

**NEWTON
HELOU
GUALTER**

**MANUAL DO
PROFESSOR**

FÍSICA 2

**TERMOLOGIA
ONDULATÓRIA
ÓPTICA**

COMPONENTE CURRICULAR
FÍSICA
2º ANO
ENSINO MÉDIO

 **Editora
Saraiva**

Newton Villas Bôas

- Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo
- Professor de Física na rede particular de ensino

Ricardo Helou Doca

- Engenheiro Eletricista formado pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI-SP)
- Professor de Física na rede particular de ensino

Gualter José Biscuola

- Engenheiro Eletricista formado pela Universidade de São Paulo
- Professor de Física na rede particular de ensino

FÍSICA

**TERMOLOGIA
ONDULATÓRIA
ÓPTICA**

**MANUAL DO
PROFESSOR**

COMPONENTE CURRICULAR
FÍSICA
2º ANO
ENSINO MÉDIO



3ª edição | 2016 | São Paulo

 **Editora
Saraiva**

Física 2
 © Newton Villas Bôas, 2016
 © Ricardo Helou Doca, 2016
 © Gualter José Biscuola, 2016

Direitos desta edição:
 Saraiva Educação Ltda., São Paulo, 2016
Todos os direitos reservados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
 (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Villas Bôas, Newton
 Física, vol. 2 : termologia, ondulatória,
 óptica / Newton Villas Bôas, Ricardo Helou
 Doca, Gualter José Biscuola. -- 3. ed. --
 São Paulo : Saraiva, 2016.

Suplementado pelo manual do professor.
 Bibliografia
 ISBN 978-85-472-0561-4 (aluno)
 ISBN 978-85-472-0562-1 (professor)

1. Física (Ensino médio) 2. Física (Ensino
 médio) - Problemas, exercícios etc. I. Doca,
 Ricardo Helou. II. Biscuola, Gualter José.
 III. Título.

16-02692

CDD-530.07

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino médio 530.07

Diretora editorial	Lidiane Vivaldini Olo
Gerente editorial	Luiz Tonolli
Editor responsável	Viviane Carpegiani
Editor	Luís Felipe Porto Mendes
Assistentes editoriais	Aline dos Reis Neves, Erich Gonçalves da Silva, Rani de Oliveira e Souza
Gerente de produção editorial	Ricardo de Gan Braga
Gerente de revisão	Hélia de Jesus Gonsaga
Coordenador de revisão	Camila Christi Gazzani
Revisores	Lilian Miyoko Kumai, Raquel Alves Taveira, Ricardo Miyake
Produtor editorial	Roseli Said
Supervisor de iconografia	Silvio Klugin
Coordenador de iconografia	Cristina Akisino
Pesquisa iconográfica	Fernando Cambetas
Licenciamento de textos	Marina Murphy Diniz
Coordenador de artes	Narjara Lara
Design e capa	Sergio Cândido com imagens de Yurok/Shutterstock
Edição de arte	Alexandre Miasato Uehara
Diagramação	Setup
Assistente	Camilla Felix Cianelli
Ilustrações	CJT/Zapt, João Anselmo, Luís Augusto Ribeiro, Luis da S. Teixeira, Luciano da S. Teixeira, Luís Fernando R. Tucillo, Paulo C. Ribeiro, Rodival Matias, Setup, Thales Trigo
Tratamento de imagens	Emerson de Lima
Protótipos	Magali Prado
Impressão e acabamento	

077712.003.001

O material de publicidade e propaganda reproduzido nesta obra está sendo utilizado apenas para fins didáticos,
 não representando qualquer tipo de recomendação de produtos ou empresas por parte do(s) autor(es) e da editora.
 Nos livros desta coleção são sugeridos vários experimentos. Foram selecionados experimentos seguros, que não oferecem riscos ao estudante.
 Ainda assim, recomendamos que professores, pais ou responsáveis acompanhem sua realização atentamente.



**Editora
 Saraiva**

SAC

0800-0117875

De 2ª a 6ª, das 8h às 18h

www.editorasaraiva.com.br/contato

Avenida das Nações Unidas, 7221 – 1ª andar – Setor C – Pinheiros – CEP 05425-902

Ao estudante

Elaboramos este trabalho com a certeza de proporcionar a você um caminho metódico e bem planejado para um início consistente no aprendizado de Física. Nem por um momento perdemos de vista a necessidade de despertar seu real interesse pela disciplina. Para alcançar esse objetivo, criamos uma obra rica em situações contextuais, baseadas em ocorrências do dia a dia. Muitos exemplos, ilustrações e outros recursos foram inseridos com o intuito de instigar sua curiosidade e seu desejo de saber mais e se aprofundar nos temas abordados.

A obra foi dividida em três volumes, um para cada ano do Ensino Médio. No primeiro volume, apresentamos a Mecânica, dividida em Cinemática, Dinâmica e Estática (dos sólidos e dos fluidos). No segundo, tratamos de Termologia, Ondulatória e Óptica Geométrica. E, no terceiro, abordamos a Eletricidade – composta de Eletrostática, Eletrodinâmica e Eletromagnetismo – e a Física Moderna.

Os grandes ramos da disciplina, como a Dinâmica, a Cinemática e a Estática no volume 1, constituem unidades de cada livro. Estas, por sua vez, são divididas em capítulos que trazem, além do texto teórico, propostas de experimentos, textos complementares e leituras que muito irão colaborar para a boa compreensão do conteúdo.

Em todos os capítulos há duas seções de atividades: as **Questões comentadas**, que, trazendo as resoluções, constroem a linguagem específica da disciplina e propõem uma primeira operacionalização com os conceitos apresentados; e as **Questões propostas**, destinadas às atividades de sala de aula e de casa.

E, ao término de cada volume, são dadas as respostas de todas as atividades apresentadas, exceto as do boxe **Descubra mais** e as do **Compreensão, pesquisa e debate** – que faz parte da seção **Intersaberes** –, pois tais questionamentos visam promover a pesquisa e propor desafios adicionais e deverão ser objeto de debates com colegas e professores.

Temos certeza de que seu percurso pelos capítulos e páginas deste trabalho contribuirá para que seu conhecimento, sua visão de mundo e seu senso crítico se ampliem em grande medida. Desejamos que você utilize esta obra com a mesma vibração e entusiasmo com que a escrevemos.

Os autores

CONHEÇA ESTE LIVRO



Abertura de unidade
Na **Abertura de unidade** é feita uma breve apresentação da área da Física que será estudada e a maneira como a unidade foi estruturada, indicando-se os capítulos que a compõem.



Abertura de capítulo

Na **Abertura de capítulo**, você poderá encontrar uma introdução ao tema e o início do estudo teórico. Na obra, a teoria é plena em abordagens históricas, seja no texto principal, seja em boxes e outros recursos, com o intuito de contribuir para a percepção da evolução das ideias, desde as eras antiga e clássica até os dias atuais.



Já pensou nisto?

Neste boxe, você verá imagens fotográficas acompanhadas de títulos instigadores. Esses títulos são propostos quase sempre em forma de perguntas ou simples provocações, cujo objetivo é motivá-lo a fazer a leitura do conteúdo, estabelecendo conexões com situações do cotidiano.



Ampliando o olhar

Nesta seção, você encontrará textos complementares cuja intenção é propor outras referências fenomenológicas, históricas e tecnológicas, além de curiosidades e justificativas que poderão contribuir para a construção do conhecimento da Física e sua relação com outras áreas do conhecimento.



Em busca de explicações

Nos textos propostos nesta seção, você verá questionamentos e problematizações interessantes acompanhados de uma explicação da Física, ou de verificações matemáticas.

Questões comentadas

Resposta correta: **B**

Material necessário:

- 1. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 2. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 3. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 4. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.

Procedimento:

1. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

2. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

3. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

4. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

Faça você mesmo

A seção **Faça você mesmo** traz atividades experimentais ou de verificação simples que poderão auxiliá-lo na compreensão de fenômenos e conceitos importantes da Física.

Questões comentadas

Resposta correta: **B**

Material necessário:

- 1. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 2. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 3. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 4. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.

Procedimento:

1. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

2. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

3. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

4. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

Questões comentadas

Em **Questões comentadas**, você terá um conjunto de atividades resolvidas em detalhes, que poderão auxiliá-lo como ponto de partida para a resolução de atividades semelhantes.

Questões propostas

Resposta correta: **B**

Material necessário:

- 1. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 2. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 3. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 4. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.

Procedimento:

1. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

2. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

3. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

4. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

Questões propostas

Nesta seção, você encontrará atividades formuladas para resolução em sala de aula e em casa. Essas atividades estão dispostas conforme a sequência da teoria e em ordem crescente de dificuldade. As **Questões propostas** são, em sua maioria, ricas em temas transversais que possibilitarão discussões relacionadas a outras áreas do conhecimento, meio ambiente, cidadania etc.

Descubra mais

No boxe **Descubra mais**, você encontra questões que o convidam a pesquisar e a conhecer um pouco mais sobre os assuntos estudados. Com isso, você poderá ampliar a abordagem do texto e descobrir temas correlatos enriquecedores.

Intersaberes

Na seção **Intersaberes**, você terá acesso a textos que poderão ser explorados de maneira integrada com outras disciplinas. É uma oportunidade de complementar e aprofundar o conteúdo do capítulo, estabelecer conexões entre diferentes áreas do conhecimento, realizar pesquisas e promover um debate de opiniões envolvendo os colegas e o professor.

Intersaberes

Resposta correta: **B**

Material necessário:

- 1. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 2. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 3. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.
- 4. Fio de cobre enrolado para enrolar o fio.

Procedimento:

1. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

2. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

3. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.

4. Enrolar o fio de cobre em espiral, ligando os pontos de contato de um lado do fio de cobre ao outro. Este fio enrolado, enrolado à volta de um fio de cobre, constitui o enrolamento de um fio de cobre.



SUMÁRIO



TERMOLOGIA

CAPÍTULO 1

TEMPERATURA 10

- 1** Introdução 10
- 2** Temperatura 11
- 3** Equilíbrio térmico 11
- 4** Medição de temperatura 12
- 5** Escalas termométricas 13
- Intersaberes**
Criogenia 19

CAPÍTULO 2

O CALOR E SUA PROPAGAÇÃO 20

- 1** Energia térmica 20
- 2** Calor 20
- 3** Processos de propagação de calor 21
- Faça você mesmo*
Fio metálico e condução de calor 24
- Ampliando o olhar*
Forno "longa-vida" 29
- Em busca de explicações*
O vaso de Dewar 30
- Ampliando o olhar*
Formas de aproveitamento da energia solar 31
- Intersaberes**
Aquecimento global 34

CAPÍTULO 3

CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE 37

- 1** Introdução 37

- 2** Capacidade térmica (C) e calor específico (c) 37

- 3** Calor sensível 38

- 4** Sistema físico termicamente isolado 38

- 5** Calorímetro 39

- 6** As mudanças de estado físico 43

- 7** Calor latente 44

- 8** Fusão e solidificação 44

- 9** Liquefação e vaporização 45

- 10** Pressão de vapor 49
- Em busca de explicações*

A chuva e a umidade relativa do ar 50

- 11** Sublimação 55

- 12** Ponto crítico e ponto triplo 55

- 13** Curva de fusão 56

- 14** Sobrefusão e superebulição 57

Ampliando o olhar
A água 58

Faça você mesmo
O experimento de Tyndall 59

Intersaberes

Lago Vostok: conflito entre conhecimento e realidade 62

CAPÍTULO 4

GASES PERFEITOS 65

- 1** Introdução 65

- 2** Modelo microscópico de gás perfeito 65

- 3** As variáveis de estado de um gás perfeito 66

Faça você mesmo

Variação da temperatura e alteração da pressão de um gás 68

- 4** Lei de Boyle 68

- 5** Lei de Charles e Gay-Lussac 69

- 6** Lei de Charles 70

- 7** Equação de Clapeyron 71

Em busca de explicações

A cabine de um avião é pressurizada. O que isso significa? 72

Faça você mesmo

Enchendo um balão com gás obtido de uma reação química 73

- 8** Lei Geral dos Gases 76

- 9** Mistura física de gases perfeitos 76

- 10** O modelo microscópico de gás perfeito 77

- 11** A temperatura na Teoria Cinética 77

- 12** A energia interna de um gás perfeito 77

CAPÍTULO 5

TERMODINÂMICA 80

- 1** Introdução 80

- 2** Energia interna, trabalho e calor 81

- 3** Lei Zero da Termodinâmica 83

- 4** A 1ª Lei da Termodinâmica 83

5 Transformações termodinâmicas particulares 84	12 Transformações reversíveis e irreversíveis 96	<i>Faça você mesmo</i> O uso de lâminas bimetálicas..... 106
6 Diagramas termodinâmicos..... 86	<i>Ampliando o olhar</i> Motor térmico..... 97	4 Dilatação superficial dos sólidos..... 106
7 Calores específicos dos gases perfeitos..... 88	Intersaberes Uma reflexão sobre a energia nuclear..... 100	5 Dilatação volumétrica dos sólidos... 107
8 Gráfico da transformação adiabática .. 88	CAPÍTULO 6	<i>Em busca de explicações</i> A dilatação térmica em nossa vida 108
9 Energia mecânica e calor..... 89	DILATAÇÃO TÉRMICA DOS SÓLIDOS E DOS LÍQUIDOS 103	<i>Faça você mesmo</i> Comprovando a dilatação volumétrica..... 109
10 As máquinas térmicas e a 2ª Lei da Termodinâmica 93	1 Introdução..... 103	6 Dilatação térmica dos líquidos 113
<i>Em busca de explicações</i> A geladeira 94	2 Forças intermoleculares explicando a dilatação térmica 103	7 Temperatura e massa específica 114
<i>Ampliando o olhar</i> Máquina térmica..... 95	3 Dilatação linear dos sólidos..... 104	8 Dilatação anormal da água 114
11 O ciclo de Carnot..... 96		



ONDULATÓRIA

CAPÍTULO 7	12 Refração 134	1 Introdução..... 152
ONDAS 118	13 Refração e reflexão de ondas transversais em cordas..... 135	<i>Faça você mesmo</i> Ressonância entre pêndulos 156
1 Introdução..... 118	14 Superposição de pulsos em cordas.... 138	2 Altura de um som..... 156
2 Ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas 118	15 Superposição de ondas periódicas .. 139	3 Intervalo acústico entre dois sons... 157
3 Ondas longitudinais, ondas transversais e ondas mistas 121	16 Ressonância..... 140	<i>Ampliando o olhar</i> Os intervalos acústicos e os matemáticos gregos 157
4 Frente de onda e raio de onda..... 122	<i>Ampliando o olhar</i> Tacoma – Inspiração para novas tecnologias..... 142	4 Intensidade sonora..... 158
5 Movimento periódico e movimento oscilatório 123	<i>Em busca de explicações</i> Como determinar a massa de um astronauta?..... 143	<i>Ampliando o olhar</i> A ecolocalização no mundo animal 159
6 Grandezas físicas associadas às ondas 124	17 Interferência de ondas bidimensionais e tridimensionais... 143	5 Cordas sonoras 162
7 Velocidade de propagação de uma onda periódica 126	<i>Ampliando o olhar</i> Forno de micro-ondas 145	6 Timbre de um som..... 164
8 O som 126	18 Princípio de Huygens..... 146	7 Tubos sonoros 165
9 A luz 126	19 Difração..... 146	<i>Faça você mesmo</i> Estudando tubos sonoros 166
10 Velocidade de propagação de ondas transversais em cordas tensas..... 127	Intersaberes Férias, praia... Cuidado com o sol ... 150	8 Velocidade de propagação do som... 170
<i>Faça você mesmo</i> Verificando a propagação do som através de um barbante 128	CAPÍTULO 8	9 Efeito Doppler 170
11 Reflexão 132	ACÚSTICA 152	10 Sonoridade..... 173
		11 Nível relativo de intensidade..... 173



ÓPTICA GEOMÉTRICA

CAPÍTULO 9

FUNDAMENTOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

1	Introdução	177
2	Óptica: divisão e aplicações	177
3	Fontes de luz	178
4	Meios transparentes, translúcidos e opacos	178
5	Frente de luz – Raio de luz	179
6	Pincel de luz – Feixe de luz	179
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Telescópios e microscópios	180
7	Princípio da Independência dos Raios de Luz	180
8	Princípio da Propagação Retilínea da Luz	181
9	Sombra e penumbra	181
10	Câmara escura de orifício	182
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Câmara escura de orifício	183
11	Fenômenos físicos essenciais na óptica geométrica	186
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Combinando cores	189
12	Sistemas ópticos estigmáticos, aplanéticos e ortoscópicos	190
13	Reversibilidade na propagação da luz	190
	<i>Em busca de explicações</i>	
	Por que o céu diurno é azul?	191
	Intersaberes	
	Luz: esse ente físico essencial	193

CAPÍTULO 10

REFLEXÃO DA LUZ

1	Reflexão: conceito, elementos e leis	195
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	A distância da Terra à Lua monitorada pela reflexão da luz	196

2	Espejos planos	197
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Fogo que não queima	200
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Verificação experimental da 2ª Lei da Reflexão	202
3	Espejos esféricos	209
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Procurando o foco	212
4	Estudo matemático dos espelhos esféricos	217

CAPÍTULO 11

REFRAÇÃO DA LUZ

1	Introdução	223
2	Cor e velocidade da luz	225
3	Índice de refração	225
4	Refringência e diopetro	227
5	Refração	227
6	Análise do desvio do raio incidente	228
	<i>Em busca de explicações</i>	
	Atmospheric seeing	230
7	Refração e reflexão	230
8	Refração em diopetro plano	231
9	Lâmina de faces paralelas	231
10	Prisma óptico	232
11	Ângulo-limite e reflexão total	237
12	Dispersão da luz	238
13	Refração na atmosfera	240
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Fibras ópticas	241
	<i>Em busca de explicações</i>	
	Ilusão de óptica	242

CAPÍTULO 12

LENES ESFÉRICAS

1	Um componente essencial	246
2	Lenes esféricas: comportamento óptico e estudo gráfico	246
3	Estudo matemático das lentes esféricas	255
	<i>Faça você mesmo</i>	
	Duas posições e duas projeções	257
4	Vergência (“grau”) de uma lente	258
5	Associação de lentes – Teorema das Vergências	260
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Teoria da Relatividade Geral	261
	Intersaberes	
	De 76 em 76 anos?	266

CAPÍTULO 13

INSTRUMENTOS ÓPTICOS E ÓPTICA DA VISÃO

1	Introdução	268
2	Instrumentos ópticos	269
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	... e Newton foi além!	272
3	Óptica da visão	276
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Um indivíduo eclético	279
	<i>Ampliando o olhar</i>	
	Os velhos “fundos de garrafa”	280
	Intersaberes	
	Estamos sós no Universo?	283

RESPOSTAS DAS QUESTÕES PROPOSTAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	288
-----------------------------------	-----

MANUAL DO PROFESSOR - Orientações didáticas

	289
--	-----

UNIDADE

1

TERMOLOGIA

Termologia é a parte da Física que estuda os fenômenos relativos à energia térmica, que é a forma de energia relacionada à agitação das partículas de um corpo. A energia térmica, quando em trânsito, é denominada calor.

Lava na cratera do vulcão Mauna Kea, Havai. Janeiro de 2005.

NESTA
UNIDADE

1

TEMPERATURA

2

O CALOR E SUA
PROPAGAÇÃO

3

CALOR SENSÍVEL
E CALOR LATENTE

4

GASES
PERFEITOS

5

TERMODINÂMICA

6

DILATAÇÃO TÉRMICA
DOS SÓLIDOS E DOS
LÍQUIDOS



TEMPERATURA

1. INTRODUÇÃO

Sabemos que a Termologia é parte da Física. No entanto, ao iniciarmos nossos estudos, surge o primeiro questionamento: onde encontramos a Termologia em nosso dia a dia? Aprender Termologia vai nos ajudar a entender algumas situações que fazem parte do nosso cotidiano?

Para responder a essas questões, vamos listar algumas situações que vivenciamos quase todo dia. No final de nosso curso, podemos retornar a essas situações e explicá-las aplicando os conceitos estudados.

- Acordamos bem cedo e vamos tomar um banho quente. A água do chuveiro está à temperatura ambiente, fria, então devemos fornecer energia para que ela se aqueça, atingindo a temperatura adequada para nosso banho.
- Ao chegarmos à cozinha, sentimos o cheirinho delicioso do café recém-passado. Ele está quente, pois a água foi aquecida até próximo da ebulição antes de ser entornada sobre o pó. Ao abirmos a porta da geladeira, recebemos o ar gelado vindo do seu interior – esse ar foi resfriado, perdendo energia. Do congelador retiramos algumas pedras de gelo que são colocadas no suco de laranja. O gelo vai receber energia do suco, que será resfriado, e derreterá, passando do estado sólido para o estado líquido. No fogão, abrimos a porta do forno para pegar o bolo e sentimos o “calor” irradiado pelo compartimento.
- Quando saímos de casa, notamos que o ar que respiramos está aquecido, afinal estamos no verão. Entramos no carro e ligamos o ar-condicionado para resfriar o ambiente. Ligamos o motor do carro e a gasolina é “explodida”, gerando gases aquecidos que se expandem e realizam trabalho, movendo os pistões do motor e colocando o carro em movimento.

- Ao passarmos com o carro em um viaduto de concreto, observamos um trepidar que se repete com um som estranho, como se estivéssemos passando por pequenas valetas. São as fendas de dilatação para que as partes do viaduto ou ponte possam dilatar sem provocar danos na estrutura.
- À tarde, olhando pela janela de nossa sala, observamos que está chovendo. A água evaporada na superfície da Terra subiu em forma de vapor e agora cai em gotas; é a chuva.

O aprendizado da Termologia vai nos ajudar a entender essas e muitas outras situações que enfrentamos em nosso dia a dia.

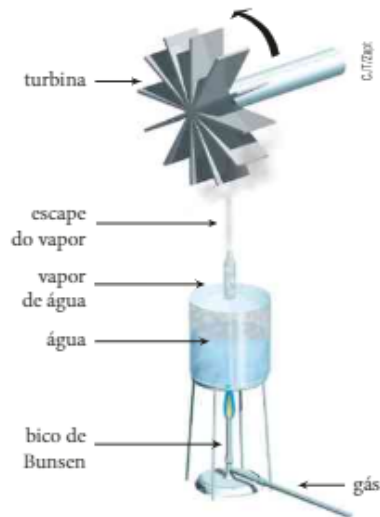
Termologia é a parte da Física que estuda os fenômenos relativos ao aquecimento, ao resfriamento ou às mudanças de estado físico em corpos que recebem ou cedem determinado tipo de energia.



A preparação de um bolo envolve **energia** em forma de **calor**. O bolo precisa receber **energia térmica** para seu cozimento.

Estudaremos, em Termologia, as formas pelas quais essa energia, que denominaremos **energia térmica**, muda de local, propagando-se através de um meio.

O comportamento de um modelo teórico de gás, denominado **gás perfeito**, e, entre outras coisas, as relações existentes entre a energia térmica e a energia mecânica também serão estudados em Termologia.



A fonte térmica aquece a água; esta vaporiza-se (muda de estado físico), e o vapor formado expande-se, saindo pela abertura existente no recipiente. O vapor atinge as pás da turbina e realiza um trabalho, colocando a turbina em rotação.

No estudo de todos os fenômenos relativos à Termologia, sempre aparece um parâmetro muito importante, denominado **temperatura**, capaz de definir o estado térmico do sistema físico estudado. Assim, iniciaremos o nosso estudo de Termologia conceituando temperatura e estabelecendo processos e regras usados para sua medição.

2. TEMPERATURA

Temperatura é a grandeza que caracteriza o estado térmico de um sistema.

É comum as pessoas avaliarem o estado térmico de um corpo pela sensação de quente ou frio que sentem ao tocá-lo. Até que ponto, entretanto, podemos confiar nessa sensação? Muitas vezes, pessoas diferentes em um mesmo ambiente experimentam sensações térmicas diferentes. Note que isso ocorre porque as sensações de quente e frio são individuais e subjetivas, dependendo do indivíduo e das condições a que ele está sujeito.

Agora você deve estar se perguntando: como podemos avaliar fisicamente esse “quente” e esse “frio”?

Imaginemos um balão de borracha, fechado, com ar em seu interior. O ar é constituído de pequenas partículas que se movimentam em todas as direções. Se aquecermos o ar, o que acontece? O balão estufa, aumentando de tamanho. O que provocou isso? Foi o ar em seu interior, que, ao ser aquecido, empurrou mais fortemente as paredes elásticas, aumentando o volume do balão.

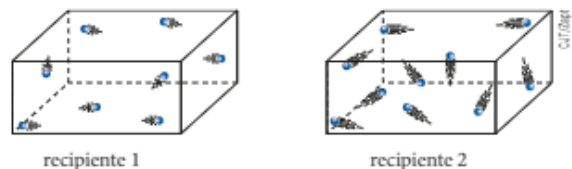
Isso ocorre porque as partículas de ar movimentam-se, possuindo certa velocidade, certa energia cinética. Quando aumentamos a temperatura dessas partículas por aquecimento, a energia cinética também aumenta, intensificando os choques das partículas com as paredes internas do balão, o que produz aumento de volume.

Assim, podemos associar a temperatura do ar à energia cinética de suas partículas, isto é, ao estado de movimento dessas partículas.

Entretanto, o que acontece nos sólidos e nos líquidos, cujas partículas são impedidas de se movimentar livremente?

Nesses casos, as partículas apenas se agitam em regiões limitadas, e esse estado de agitação cresce com o aquecimento, com o aumento de temperatura.

A conclusão a que podemos chegar é que, de alguma forma, a temperatura está relacionada com o estado de movimento ou de agitação das partículas de um corpo. Então, como uma ideia inicial, podemos dizer que a temperatura é um valor numérico associado a determinado estado de agitação ou de movimentação das partículas de um corpo, umas em relação às outras.



Considerando que os dois recipientes contêm o mesmo tipo de gás, no recipiente 2 o estado de agitação das partículas que compõem o gás é maior, pois elas se movimentam com mais rapidez. Desse modo, podemos concluir que o gás do recipiente 2 se encontra em uma temperatura mais elevada que o gás do recipiente 1.

3. EQUILÍBRIO TÉRMICO

Suponha que um assado recém-saído de um forno e um refrigerante retirado há pouco de uma geladeira sejam colocados sobre uma mesa. Após alguns minutos, observamos que ambos os produtos atingem a temperatura ambiente: o assado “esfriou” e o refrigerante “esquentou”.

Da observação de fenômenos dessa natureza, podemos concluir que os corpos colocados em um mesmo ambiente, sempre que possível, tendem espontaneamente para um mesmo estado térmico. Os corpos mais “quentes” fornecem parte da energia de agitação de suas partículas para os corpos mais “frios”. Assim, os mais “quentes” esfriam e os mais “frios” esquentam, até que seus estados térmicos (suas temperaturas) fiquem iguais. Dizemos, então, que esses corpos atingiram o **equilíbrio térmico**.

Dois ou mais sistemas físicos estão em **equilíbrio térmico** entre si quando suas temperaturas são iguais.

Considere a situação representada na figura:

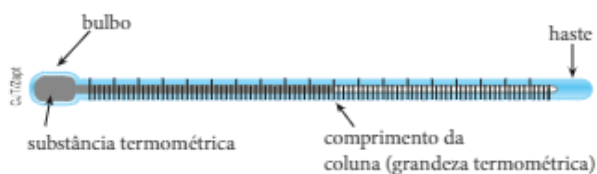


As partículas da água "quente" fornecem parte de sua energia de agitação para as partículas da água "fria" e esfriam. Ao receber essa energia, as partículas da água "fria" esquentam. A troca de energia só é interrompida quando o equilíbrio térmico é atingido.

4. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Considerando o que estudamos anteriormente, você deve ter percebido que não temos condições de medir diretamente a energia de agitação das moléculas de um corpo. Como podemos, então, avaliar sua temperatura?

É simples: isso deve ser feito por um processo indireto, usando-se um segundo corpo que sofra alterações mensuráveis em suas propriedades físicas quando do processo de busca do equilíbrio térmico com o primeiro. A esse corpo chamamos de **termômetro**.



Na extremidade esquerda desse termômetro, há um reservatório (bulbo) onde fica armazenada a **substância termométrica**. No interior da haste, há um tubo muito estreito (capilar) no qual a substância termométrica se desloca para a direita ou para a esquerda, conforme a temperatura que está sendo medida. O valor da temperatura é fornecido pela medida do comprimento da coluna, que é chamada de **grandeza termométrica**.

É importante observar que:

Substância termométrica é aquela em que pelo menos uma de suas propriedades físicas (comprimento, volume, pressão, entre outras) varia de forma mensurável com a temperatura.

Grandeza termométrica é a propriedade física da substância termométrica que varia de forma mensurável com a temperatura e que é usada para medi-la.

A seguir, vamos conhecer dois tipos de termômetros, cada um com uma utilidade específica.

Termômetro clínico

O termômetro clínico tem por finalidade medir a temperatura do corpo humano. Daí ele indicar apenas temperaturas com valores entre 35 °C e 42 °C. As substâncias termométricas mais utilizadas nesse termômetro são o mercúrio e o álcool.

O tubo capilar pelo qual passa o mercúrio, por exemplo, é muito estreito. Isso poderia dificultar a observação do nível de expansão do mercúrio. Por esse motivo, a haste de vidro é moldada de forma que sirva como uma lente de aumento.

Entre o bulbo e o início da haste existe um estrangulamento no tubo, que permite ao mercúrio se expandir ao longo do tubo, mas não voltar ao bulbo. Isso faz dele um termômetro de máxima, ou seja, em determinado intervalo de tempo, ele mede apenas a máxima temperatura do corpo.

Para que a porção do mercúrio expandida no tubo retorne ao bulbo, deve-se agitar o termômetro.



Termômetro clínico de mercúrio.

Nas farmácias podemos encontrar um outro termômetro clínico que não utiliza substâncias termométricas, mas sim um dispositivo eletrônico capaz de indicar a temperatura do corpo humano com boa precisão. Uma pequena bateria fornece energia para seu funcionamento.



Termômetro clínico digital.

Termômetro de rua

Um termômetro diferente, que podemos encontrar nas ruas de algumas cidades, são os relógios como o da fotografia, que também registram a temperatura do ar no local.

Em seu funcionamento, tal dispositivo conta com uma antena que possui, em sua extremidade, um diodo semiconductor. Esse diodo está associado a outros componentes eletrônicos, e o circuito é alimentado por uma fonte de tensão.



Termômetro de rua.

Quando o ar no local esquenta (ou esfria), a corrente elétrica no diodo aumenta (ou diminui) e essa informação é transmitida ao circuito elétrico existente no interior do "relógio", que altera o indicativo da temperatura.

□ ESCALAS TERMOMÉTRICAS

Escala termométrica é um conjunto de valores numéricos em que cada valor está associado a uma determinada temperatura.

Se, por exemplo, a temperatura de um sistema **A** é representada pelo valor 50 e a de um sistema **B**, pelo valor 20, em uma mesma escala termométrica, dizemos que a temperatura de **A** é maior que a de **B**. Isso indica que as partículas do sistema **A** estão em um nível energético mais elevado que as do sistema **B**.

Como uma escala termométrica é constituída por um conjunto de valores arbitrários, um mesmo estado térmico pode ser representado em escalas termométricas diversas, por valores numéricos diferentes.

Os valores numéricos de uma escala termométrica são obtidos a partir de dois valores atribuídos previamente a dois estados térmicos de referência, bem definidos, denominados **pontos fixos**.

Pontos fixos fundamentais

Pela facilidade de obtenção prática, são adotados usualmente como pontos fixos os estados térmicos correspondentes ao gelo fundente e à água em ebulição, ambos sob pressão normal. Esses estados térmicos costumam ser denominados **ponto de gelo** e **ponto de vapor**, respectivamente, e constituem os **pontos fixos fundamentais**.



1º ponto fixo: ponto de gelo – temperatura na qual o gelo e a água permanecem em equilíbrio térmico quando sob pressão normal.

2º ponto fixo: ponto de vapor – temperatura na qual a água entra em ebulição sob pressão normal.

Em 1939, o químico canadense William Francis GIAUQUE (1895-1982) passou a defender a proposta de Lorde Kelvin, que pretendia que as escalas termométricas usassem apenas um ponto fixo, o **ponto triplíce da água** (temperatura em que ela se apresenta em equilíbrio térmico nos três estados físicos: sólido, líquido e vapor). Essa tese foi aprovada em 1954 pelos representantes da comunidade científica e passou a ser chamada de **solução GIAUQUE**. Por ser mais prático, no entanto, continuamos usando o ponto de gelo e o ponto de vapor como referências nas escalas termométricas.

Escalas Celsius e Fahrenheit

A escala termométrica mais utilizada no mundo, inclusive no Brasil, foi criada pelo astrônomo e físico sueco Anders Celsius (1701-1744) e oficializada em 1742 por uma publicação da Real Academia Sueca de Ciências.

Outra escala termométrica muito utilizada no dia a dia, especialmente nos países de língua inglesa, é a escala Fahrenheit.

Daniel Gabriel Fahrenheit, comerciante e estudioso da Química e da Física, nasceu em 1686 em Danzig, hoje Gdansk, na Polônia. Na época de seu nascimento, essa região fazia parte da Prússia.

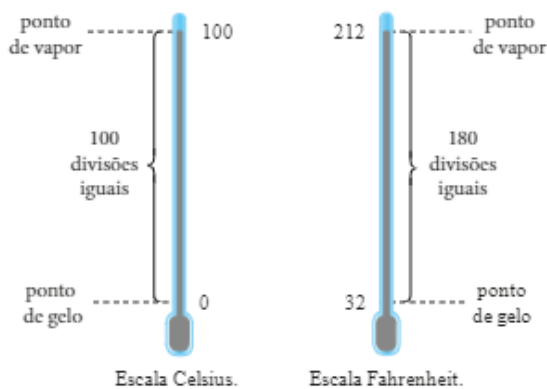
Em 1708, quando vivia na Islândia, Fahrenheit precisava de um termômetro para utilizar em suas experiências. Os termômetros até o momento construídos, com os mais variados líquidos, não eram confiáveis. Decidiu então criar sua própria escala, optando por usar como substância termométrica o mercúrio.

Como ponto de referência inferior da nova escala utilizou a temperatura de uma mistura de partes iguais de cloreto de sódio (NaCl, o sal de cozinha), cloreto de amônia (NH₄Cl) e gelo fundente (gelo picado e água pura, em equilíbrio). Para o ponto de referência superior,

utilizou a temperatura normal do corpo humano. Dividiu esse intervalo em cem partes iguais e chamou esses pontos de 0 °F e 100 °F.

Somente mais tarde, quando se passou a utilizar a água como referência, observou-se que sua escala assinalava 32 para o ponto de gelo e 212 para o ponto de vapor.

Celsius utilizou, originalmente, o valor 0 para o ponto de ebulição da água e o valor 100 para seu ponto de congelamento. Dessa forma, ele evitava valores negativos no estudo da variação de temperatura da água. Após sua morte, em 1744, esses valores foram invertidos e essa escala tomou a forma que conhecemos hoje.



Pelo fato de existir cem divisões iguais entre os pontos de fusão e ebulição da água, a escala foi chamada de escala centígrada e seu grau, de grau centígrado. No entanto, em 1948, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas estabeleceu que a denominação correta seria **escala Celsius** e **grau Celsius**.

Na **escala Celsius**, cada uma das cem divisões corresponde a uma unidade da escala, que recebe o nome de **grau Celsius**, simbolizado por °C.

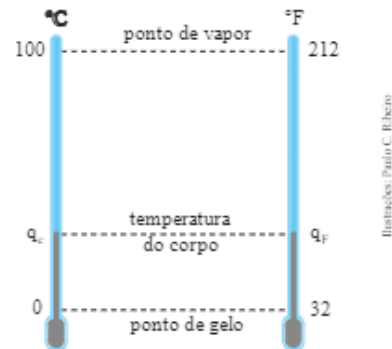
Na **escala Fahrenheit** temos cento e oitenta divisões iguais entre os pontos fixos, sendo a unidade da escala denominada **grau Fahrenheit**, simbolizado por °F.

Conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit

Sempre é possível estabelecer uma relação entre duas escalas termométricas quaisquer. Podemos, por exemplo, obter uma equação que relacione os valores numéricos dados pelas escalas Celsius e Fahrenheit.

A que valor na escala Fahrenheit corresponde, por exemplo, 60 °C?

Para fazer a correspondência, vamos utilizar dois termômetros idênticos, sendo um graduado na escala Celsius e outro, na Fahrenheit. Ao colocá-los em contato com um mesmo corpo, observamos que as alturas são iguais, mas, por se tratarem de escalas distintas, os valores numéricos assinalados são diferentes, θ_C e θ_F .



Perceba que os intervalos de temperaturas correspondentes nos dois termômetros são proporcionais. Assim, vale a relação:

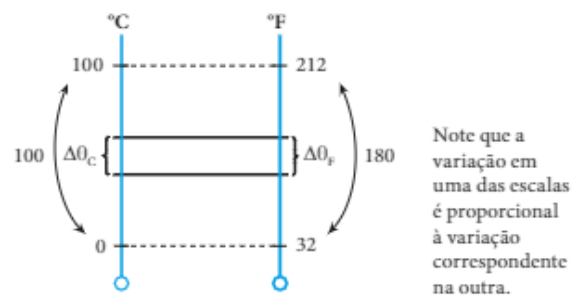
$$\frac{\theta_C - 0}{\theta_F - 32} = \frac{100 - 0}{212 - 32} \Rightarrow \frac{\theta_C}{\theta_F - 32} = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}$$

Essa equação de conversão pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

Variação de temperatura

Para converter uma **variação de temperatura** em graus Celsius para graus Fahrenheit, ou vice-versa, observe o esquema em que comparamos essas escalas:



Note que a variação em uma das escalas é proporcional à variação correspondente na outra.

Podemos afirmar que:

$$\frac{D\theta_C}{100} = \frac{\Delta\theta_F}{180}$$

Em alguns locais da Terra, são registradas grandes amplitudes térmicas (diferenças de temperatura) entre o verão (muito quente) e o inverno (muito frio). É o que ocorre, por exemplo, na costa oeste dos Estados Unidos, particularmente no estado de Nevada, na região desértica conhecida como Vale da Morte. Devido ao clima muito árido e à escassez de água, verificam-se grandes variações de temperatura, mesmo do dia para a noite.



A torre que aparece na fotografia é um grande termômetro à beira da estrada, que registrava, no momento da fotografia (por volta do meio-dia), 113 °F, que equivalem a 45 °C.



Jason Kirk/Outline USA/Getty Images

O zero absoluto

Imagine um sistema físico qualquer. Quando o aquecemos, sua temperatura se eleva, aumentando o estado de agitação de suas partículas. Se o esfriamos, sua temperatura diminui porque o estado de agitação das partículas também diminui. Se continuarmos a esfriar esse sistema, o estado de agitação das partículas diminuirá mais e mais, tendendo a um mínimo de temperatura, denominado zero absoluto.

O pouco conhecimento das partículas atômicas (o elétron ainda não havia sido descoberto) fez com que o zero absoluto fosse definido para uma situação em que ainda restava uma energia, na época desconhecida, nas partículas do sistema físico. Mais tarde, com a evolução do conhecimento, descobriu-se que no zero absoluto restava uma quantidade finita, não nula, de energia cinética. Essa energia foi denominada **energia do ponto zero**.

Zero absoluto é o limite inferior de temperatura de um sistema. É a temperatura correspondente ao menor estado de agitação das partículas, isto é, um estado de agitação praticamente nulo.

A escala absoluta

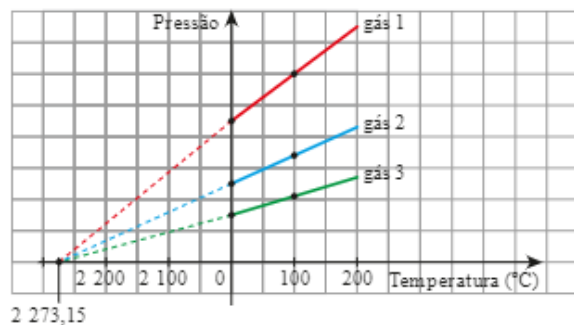
William Thomson (1824-1907), nascido em Belfast, Irlanda do Norte, foi um personagem muito ativo do século XIX, contribuindo intensamente com seu trabalho, estendendo seu talento a novas invenções e ao desenvolvimento de tecnologias, que o credenciaram a receber o título de Lorde Kelvin.



Retrato de Lorde Kelvin, pintado por Elizabeth King.

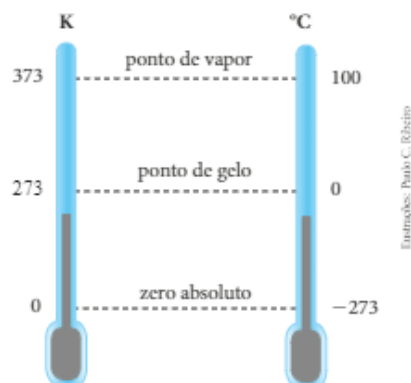
Na França, Kelvin entrou em contato com o trabalho desenvolvido por Jacques Charles, que havia estabelecido, após muitos experimentos, a relação entre a variação de volume de um gás e a variação de temperatura. Nesse estudo, o volume de todos os gases se anulava na temperatura de 2 273,15 °C.

Kelvin propôs outra conclusão: não era o volume que se anulava nessa temperatura, mas sim a energia cinética de suas moléculas. Ele havia estabelecido a menor temperatura possível para um sistema, que denominou **zero absoluto**. A partir dessa conclusão, propôs uma nova escala termométrica, que simplificava a expressão matemática na relação com outras escalas.



A escala Kelvin, também denominada **escala absoluta**, tem sua origem no zero absoluto e utiliza o grau Celsius como unidade de variação. O símbolo da

unidade da escala Kelvin é **K**. Para facilitar os cálculos, aproximamos o valor $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Assim, pode-se concluir que a equação de conversão entre as escalas Celsius e Kelvin é dada por:

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$$

A partir de 1967, convencionou-se não usar "grau" para essa escala. Assim, 20 K, por exemplo, é lido como 20 kelvins e não 20 graus Kelvin.

QUESTÕES COMENTADAS

1 Um jornalista, em visita aos Estados Unidos, passou pelo deserto de Mojave, onde eram realizados os pousos dos ônibus espaciais da Nasa. Ao parar em um posto de gasolina, à beira da estrada, ele observou um grande painel eletrônico que indicava a temperatura local na escala Fahrenheit. Ao fazer a conversão para a escala Celsius, ele encontrou o valor $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Que valor ele havia observado no painel?

RESOLUÇÃO

Aplicando a equação de conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit, temos:

$$\frac{q_c}{5} = \frac{q_f - 32}{9} \Rightarrow \frac{45}{5} = \frac{q_f - 32}{9} \Rightarrow q_f = 113\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Resposta: 113 °F

2 Um turista brasileiro, ao descer no aeroporto de Chicago (EUA), observou um termômetro marcando a temperatura local ($68\text{ }^{\circ}\text{F}$). Fazendo algumas contas, ele verificou que essa temperatura era igual à de São Paulo, quando embarcara. Qual era a temperatura de São Paulo, em graus Celsius, no momento do embarque do turista?

RESOLUÇÃO

Aplicando a equação de conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit, temos:

$$\frac{\theta_c}{5} = \frac{\theta_f - 32}{9} \Rightarrow \frac{\theta_c}{5} = \frac{68 - 32}{9} \Rightarrow \theta_c = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Resposta: 20 °C

3 Dois termômetros, um graduado na escala Celsius e outro, na escala Fahrenheit, são mergulhados em um mesmo líquido. A leitura em Fahrenheit supera em 100 unidades a leitura em Celsius. Qual era a temperatura desse líquido?

RESOLUÇÃO

Do enunciado do problema, podemos escrever:

$$\theta_f = \theta_c + 100 \quad (\text{I})$$

A relação entre as escalas consideradas é dada por:

$$\frac{\theta_c}{5} = \frac{\theta_f - 32}{9} \quad (\text{II})$$

Substituindo (I) em (II), obtemos:

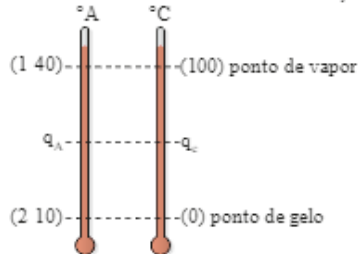
$$\frac{\theta_c}{5} = \frac{(\theta_c + 100) - 32}{9} \Rightarrow 9\theta_c = 5\theta_c + 340 \Rightarrow 4\theta_c = 340 \Rightarrow \theta_c = 85\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{ou} \quad \theta_f = 185\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Resposta: 85 °C ou 185 °F.

4 Em uma escala de temperaturas A, o ponto de gelo equivale a 20°A e, o de vapor, a 40°A . Se uma temperatura for indicada em um termômetro em Celsius pelo valor 22°C , que valor será indicado por outro termômetro graduado na escala A?

RESOLUÇÃO

Comparando a escala A com a escala Celsius, temos:



Usando a proporcionalidade dos intervalos de temperaturas podemos obter a equação de conversão:

$$\frac{\theta_A - (-10)}{40 - (-10)} = \frac{\theta_C - 0}{100 - 0} \quad \text{fi} \quad \frac{\theta_A + 10}{50} = \frac{\theta_C}{100}$$

Logo: $\theta_C = 20\theta_A$

Para $\theta_C = 22^\circ\text{C}$, temos: $22 = 20\theta_A + 20 \Rightarrow \theta_A = 1^\circ\text{A}$

Resposta: 1°A

5 Lendo um jornal brasileiro, um estudante encontrou a seguinte notícia: "Devido ao fenômeno El Niño, o verão no Brasil foi mais quente do que costuma ser, ocorrendo em alguns locais variações de até 20°C em um mesmo dia". Se essa notícia fosse vertida para o inglês, a variação de temperatura deveria ser dada na escala Fahrenheit. Que valor iria substituir a variação de 20°C ?

RESOLUÇÃO

Com base na relação entre intervalos de temperatura nas escalas Celsius e Fahrenheit, temos:

$$\frac{\Delta\theta_C}{100} = \frac{\Delta\theta_F}{180} \Rightarrow \frac{20}{100} = \frac{\Delta\theta_F}{180} \Rightarrow \Delta\theta_F = 36^\circ\text{F}$$

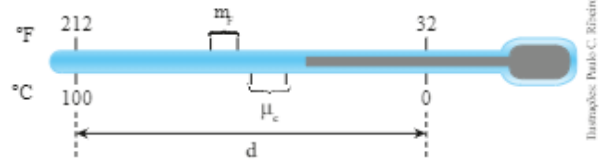
Resposta: 36°F

6 Um fabricante de termômetros lançou no mercado um termômetro de mercúrio graduado nas escalas Celsius e Fahrenheit. Na parte referente à escala Celsius, a distância en-

tre duas marcas consecutivas era de $1,08\text{ mm}$. Qual era a distância, na escala Fahrenheit, entre duas marcas consecutivas?

RESOLUÇÃO

Vamos considerar m_C e m_F as respectivas distâncias entre duas marcas consecutivas nas escalas Celsius e Fahrenheit:



Como a distância d , indicada na figura, é a mesma nas duas escalas, podemos escrever: $d = 100\mu_C = 180\mu_F$

Do enunciado, sabemos que $\mu_C = 1,08\text{ mm}$.

Substituindo esse valor na expressão acima, calculemos μ_F :

$$100 \cdot 1,08 = 180\mu_F \Rightarrow \mu_F = \frac{108}{180} \Rightarrow \mu_F = 0,60\text{ mm}$$

Resposta: $0,60\text{ mm}$

7 A menor temperatura até hoje registrada na superfície da Terra ocorreu em 21 de julho de 1983 na estação russa de Vostok, na Antártida, e seu valor foi de $-89,2^\circ\text{C}$. Na escala Kelvin, qual o valor equivalente a essa temperatura?

RESOLUÇÃO

A relação de conversão entre as escalas Celsius e Kelvin é expressa por: $\theta_C = T - 273$

Assim, para $\theta_C = -89,2^\circ\text{C}$, temos:

$$-89,2 = T - 273 \Rightarrow T = 183,8\text{ K}$$

Resposta: $183,8\text{ K}$

8 As pessoas costumam dizer que na cidade de São Paulo podemos ter as quatro estações do ano em um mesmo dia. Claro que essa afirmação é um tanto exagerada. No entanto, não é difícil termos variações de até 15°C em um mesmo dia. Na escala absoluta Kelvin, que valor representaria essa variação de temperatura?

RESOLUÇÃO

Como a escala Kelvin utiliza a mesma unidade da escala Celsius, temos: $\Delta\theta_C = \Delta T = 15$. Assim: $\Delta T = 15\text{ K}$

Resposta: 15 K

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

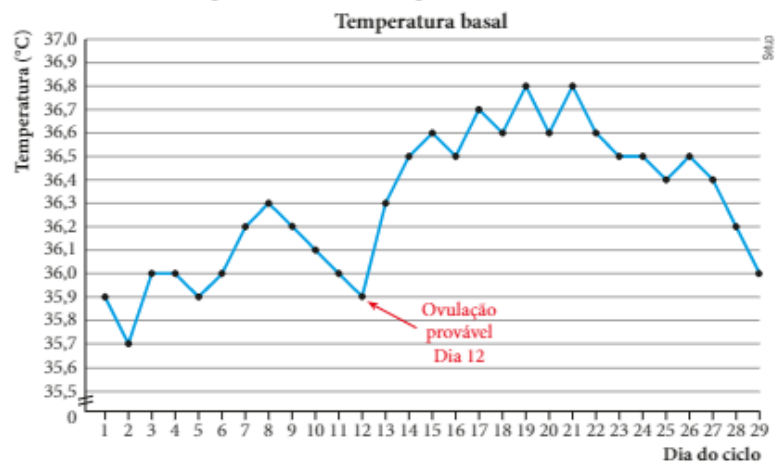
9. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a mais alta temperatura já registrada no Brasil foi $44,7^\circ\text{C}$, no município de Bom Jesus, no Piauí; a mais baixa foi -14°C , em Caçador, Santa Catarina. Faça a conversão desses valores para a escala Fahrenheit.

10. Um brasileiro fez uma conexão via internet com um amigo inglês que mora em Londres. Durante a conversa, o inglês disse que em Londres a temperatura naquele momento era igual a 14°F . Após alguns cálculos, o brasileiro descobriu qual era, em graus Celsius, a temperatura em Londres. Que valor ele encontrou?

11. Ao chegar ao aeroporto de Miami (EUA), um turista brasileiro observou em um painel eletrônico que a temperatura local medida na escala Fahrenheit ultrapassava o valor medido na escala Celsius em 48 unidades. Qual era a temperatura registrada no painel, em graus Celsius?
12. Em um laboratório, dois termômetros, um graduado em Celsius e outro em Fahrenheit, foram colocados no interior de um freezer. Após algum tempo, verificou-se que os valores lidos nos dois termômetros eram iguais. Qual era a temperatura medida, em graus Celsius?
13. Ao nível do mar, um termômetro de gás a volume constante indica as pressões correspondentes a 80 cm Hg e 160 cm Hg, respectivamente, para as temperaturas do gelo fundente e da água em ebulição. À temperatura de 20 °C, qual é a pressão indicada por ele?
14. Um termômetro foi graduado, em graus Celsius, incorretamente. Ele assinala 1 °C para o gelo em fusão e 97 °C para a água em ebulição, sob pressão normal. Qual é a única temperatura que esse termômetro assinala corretamente, em graus Celsius?
15. No interior de uma sala, há dois termômetros pendurados na parede. Um deles, graduado em Kelvin, indica 298 K para a temperatura ambiente. O outro está graduado em graus Celsius. Quanto esse termômetro está marcando?
16. Lorde Kelvin conceituou zero absoluto como o estágio nulo de agitação das partículas de um sistema físico. Nas escalas Celsius e Fahrenheit, que valores vamos encontrar para expressar a situação física do zero absoluto? (Dê sua resposta desprezando possíveis casas decimais.)

17. Uma mulher, que iniciou um tratamento para engravidar, foi orientada pelo médico a medir sua temperatura basal (menor temperatura) durante todo o ciclo menstrual, para identificar seu período fértil. O médico orientou a paciente a realizar o seguinte procedimento:

- Utilizar um termômetro clínico exclusivo;
- A partir do primeiro dia do ciclo menstrual, medir a temperatura corporal colocando o termômetro sob a língua, assim que acordar, antes de se levantar da cama;
- Realizar essas medições sempre no mesmo horário e registrar os dados. Ao completar o ciclo, organizar os dados em um gráfico de temperatura \times dia do ciclo.



Após realizar as instruções do médico, foi obtido o gráfico acima.

Com base no gráfico, determine:

- a temperatura mínima e a máxima registrada pela mulher. Dê as respostas nas escalas Celsius e Fahrenheit;
- o intervalo de temperatura apresentado nesse ciclo menstrual da paciente. Dê as respostas nas escalas Celsius e Fahrenheit;
- a temperatura, em graus Fahrenheit, do corpo da mulher no dia de provável ovulação.



DESCUBRA MAIS

- 1 É possível medirmos a temperatura do vácuo?
- 2 Por que um termômetro clínico é um termômetro de máxima?

INTERSABERES

Criogenia

A Criogenia é o estudo das baixas temperaturas. Ela pesquisa as técnicas de obtenção das temperaturas muito baixas e o comportamento dos elementos e materiais nessas condições.

A Criogenia surgiu na virada do século XX, quando se conseguiu a liquefação do ar atmosférico e a separação de seus componentes por destilação fracionada. A indústria alimentícia passou a usar dois desses gases criogênicos: o dióxido de carbono e o nitrogênio. O dióxido de carbono (nome comercial: gelo-seco) sublima a $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ e costuma ser usado no estado sólido na conservação de alimentos, como nos carrinhos que vendem sorvetes. O nitrogênio tem como ponto de liquefação a temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo usado nas situações que requerem temperaturas mais baixas. O nitrogênio líquido é também utilizado na Medicina para conservação de embriões, esperma e óvulos.

Algo que costuma despertar divergência de opiniões quanto aos estudos em Criogenia refere-se ao processo de preservação de corpos de humanos recém-falecidos com a expectativa de reanimá-los no futuro. Sobre esse processo, leia o texto a seguir.

Congelar um corpo é fácil. O que os cientistas não sabem ainda é como ressuscitá-lo

1. Assim que uma pessoa morre, um funcionário da empresa de Criogenia resfria o cadáver com gelo. Nessa fase, a temperatura do corpo fica pouco acima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Não é muito frio, mas é o suficiente para evitar, por algum tempo, a proliferação das bactérias que iriam apodrecer o cadáver.
2. Nessa fase, o corpo também recebe uma injeção de substâncias anticoagulantes, para manter os vasos sanguíneos desobstruídos. Depois, todo o sangue é bombeado para fora e no lugar entram substâncias químicas que protegerão as células na hora do congelamento, evitando a formação de parte dos cristais de gelo, que rompem a estrutura celular.
3. No local em que o corpo vai ser congelado, o cadáver passa por um resfriamento gradual, em uma câmara de gelo-seco. Para evitar danos às células, a intenção é que todos os tecidos se congelem no mesmo ritmo. Todo o processo ocorre de maneira lenta e pode durar dois dias, quando a temperatura do corpo chega a $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Depois do resfriamento, o corpo é submergido lentamente em um tanque de nitrogênio líquido, até ser totalmente coberto. Quando essa fase termina, após uma semana, o cadáver está a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, impedido de apodrecer. Ele fica no tanque por toda a eternidade ou até que alguém invente uma tecnologia para ressuscitá-lo.

Disponível em: <www.mundoestranho.abril.com.br/materia/o-que-e-criogenia-humana>. Acesso em: 13 abr. 2016.



Fotografia de cena de jogo eletrônico, na qual aparece uma câmara criogênica. No enredo, um dos personagens sobrevive a contaminações causadas por explosões nucleares, permanecendo nessa câmara por mais de 200 anos.

Compreensão, pesquisa e debate

1. Normalmente, o tema da Criogenia humana nos leva a um confronto de ideias sobre suas implicações tecnológicas, éticas e religiosas. Procure na internet ou em revistas e jornais textos que apresentem diferentes pontos de vista sobre esse assunto, leia-os e debata com os seus colegas. Respeite a opinião de todos os participantes do debate.



O CALOR E SUA PROPAGAÇÃO

□ ENERGIA TÉRMICA

Quando observamos o mundo material à nossa volta, encontramos casas, plantas, automóveis, pessoas, a atmosfera (o ar), água, pedras e tantos outros representantes da matéria. Todos têm em comum o fato de serem formados por pequenas partículas, as moléculas.

Como vimos no Capítulo 1, essas partículas possuem energia de agitação, exceto **na zero absoluto**.

Em uma primeira abordagem desse assunto, podemos dizer que essa energia de agitação das partículas é a **energia térmica** do corpo. Portanto, o somatório das energias de agitação das partículas de um corpo estabelece a sua energia térmica. No Capítulo 3, veremos que a energia térmica é, na realidade, o somatório das energias de agitação com a energia de agregação das partículas. Essa energia de agregação é que estabelece o estado físico do corpo (sólido, líquido ou gasoso).

A **energia térmica** do corpo depende de dois fatores: da energia de agitação média de cada partícula (que determina a temperatura do corpo) e do número de partículas que o corpo possui.

A **energia térmica** de um corpo é o somatório das energias de agitação das suas partículas e depende da temperatura do corpo e do número de partículas nele existentes.



A barra de chocolate foi dividida em duas partes. Apesar de ambas as partes estarem à mesma temperatura, a maior possui mais energia térmica que a menor, por ser constituída de um número maior de partículas.

É oportuno observar que o fato de um corpo **A** estar a uma temperatura mais alta que um corpo **B** não implica, necessariamente, que **A** tenha maior quantidade de energia térmica que **B**. O corpo **B**, por exemplo, pode ter mais partículas que **A**, de tal forma que o somatório das energias de vibração de suas partículas supere o de **A**.

2. CALOR

Quando colocamos em contato térmico dois corpos de temperaturas diferentes, notamos que eles buscam uma situação de equilíbrio térmico, em que suas temperaturas tornam-se iguais.

Para que isso aconteça, o corpo de temperatura mais alta fornece certa quantidade de energia térmica ao de temperatura mais baixa. Isso provoca uma diminuição em sua temperatura e um aumento na temperatura do corpo inicialmente mais frio, até que se estabeleça o equilíbrio térmico.

Essa energia térmica, quando e apenas enquanto está em trânsito, é denominada **calor**.

Calor é energia térmica em trânsito de um corpo para outro ou de uma parte para outra de um mesmo corpo, trânsito este provocado por uma diferença de temperaturas.

Observe que o calor flui, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura.



Ilustrações: Ado Aracimo

Na situação representada acima, o calor propaga-se da extremidade esquerda da barra, em contato com o fogo, para a extremidade direita. Note que o calor flui naturalmente da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

Unidade usual de calor

Sendo o calor uma forma de energia, no Sistema Internacional de Unidades (SI) sua unidade é o **joule (J)**. Esse nome foi uma forma de a comunidade científica homenagear o físico inglês James Prescott Joule (1818-1889), que, entre outros trabalhos, demonstrou a equivalência entre a energia mecânica e a energia térmica. Esse assunto será tratado no Capítulo 5 (**Termodinâmica**).

Além do joule, podemos usar também a unidade de caloria (cal) para expressar quantidades de calor. Essa unidade é pouco utilizada nos laboratórios, mas muito usada nos livros escolares. Inicialmente, a caloria foi definida como a quantidade de calor necessária para fazer 1 grama de água sofrer a variação de 1 grau Celsius em sua temperatura. Porém, observou-se que essa quantidade de energia era um pouco diferente quando se aquecia 1 grama de água de 10 °C para 11 °C e de 90 °C para 91 °C, por exemplo. Assim, foi estabelecido um valor médio, que acabou se encaixando entre 14,5 °C e 15,5 °C.

Uma **caloria (cal)** é a quantidade de calor que 1 grama de água pura deve receber, sob pressão normal, para que sua temperatura seja elevada de 14,5 °C a 15,5 °C.

Na comparação com a definição de joule, estabelecida como o trabalho realizado por uma força de 1 newton quando o ponto em que a força é aplicada se desloca 1 metro na direção da força, encontramos a equivalência entre essas unidades:

$$1 \text{ cal} \approx 4,186 \text{ J}$$

No entanto, para facilitar os cálculos, é comum adotarmos o valor 4,2 joules para cada caloria.

$$\text{Assim: } J = 4,2 \frac{\text{joules}}{\text{caloria}}$$

Essa relação é utilizada na conversão de joule para caloria ou vice-versa.

$$\tau \text{ (joule)} = J \cdot Q \text{ (caloria)}$$

Usamos também como unidade de calor a **quilocaloria (kcal)**, que é um múltiplo da **caloria (cal)**.

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$$

Nas embalagens de alimentos, normalmente encontramos a equivalência energética de uma porção. Essa energia vem expressa em **kcal (quilocaloria)** ou em **Cal (caloria alimentar ou grande caloria)**, que são equivalentes.

$$1,0 \text{ Cal} = 1,0 \text{ kcal}$$

Observe a seguir uma tabela com dados retirados de uma embalagem de aveia. Apesar de não vir mencionado na embalagem, a unidade utilizada é a caloria

alimentar (Cal), que equivale a 10³ calorias ou a 1 quilocaloria (kcal). Assim, cada 100 gramas dessa aveia têm capacidade energética equivalente a 390 Cal ou 390 kcal. Uma pessoa geralmente precisa, em média, de 2 500 kcal/dia para suas necessidades básicas.

Informação nutricional

Cada 100 g de aveia contém em média:	
Carboidratos	60 g
Proteínas	12 g
Gordura	10 g
Fibras alimentares	10 g
Cálcio	30 mg
Fósforo	130 mg
Ferro	2,1 mg
Vitamina B1	0,2 mg
Vitamina B2	0,08 mg
Sódio	1,0 mg
Niacina	1,0 mg
Calorias	390
CONTÉM GLÚTEN Ingrediente: Aveia 100% natural.	

Fonte : Dados fornecidos pelo fabricante.

□ PROCESSOS DE PROPAGAÇÃO DE CALOR

Já vimos que a energia térmica pode mudar de local, indo, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Essa mudança pode ocorrer de três maneiras distintas, denominadas **condução**, **convecção** e **radiação**.

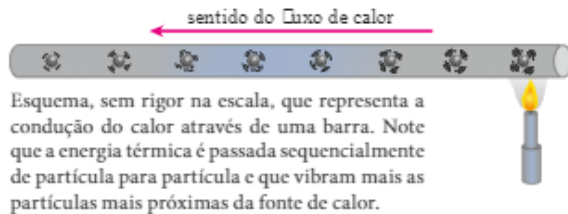
A condução

Ao colocarmos a ponta de uma barra de metal em contato com uma fonte térmica e segurarmos a outra extremidade, notamos que o local que está em contato com a mão se torna, rapidamente, cada vez mais quente, apesar de estar distante da fonte de calor.

Quando um cozinheiro fica mexendo o conteúdo de uma panela com uma colher metálica, após algum tempo, torna-se difícil manter a colher na mão, já que toda a colher se encontra muito quente. Os cozinheiros mais experientes usam colheres de madeira e de silicone, materiais que conduzem o calor de forma mais lenta do que o metal.

Nos exemplos citados, o calor propaga-se através da barra e da colher. Esse fenômeno físico é denominado condução.

Condução é o processo de propagação de calor no qual a energia térmica passa de partícula para partícula de um meio.



Para entender esse fato, devemos lembrar que as partículas da barra que estão em contato com a fonte térmica recebem calor e aumentam seu estado de agitação, que é transmitido às partículas vizinhas em uma ação sucessiva. Assim, de partícula para partícula, a energia térmica flui ao longo da barra.

É importante notar que, na condução, as partículas permanecem vibrando em torno de suas posições de equilíbrio. As partículas não se deslocam, ao contrário do que acontece com a energia.

Destaquemos que, como a ocorrência da condução requer a existência de um meio material, esse fenômeno **não** ocorre no vácuo.

Jão Amelino



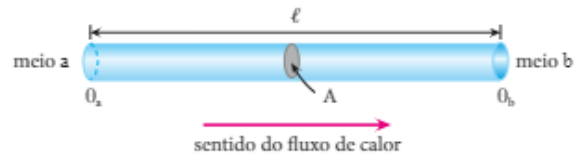
O calor propaga-se por condução através da parede do forno da pizzeria, atingindo a mão da pessoa que se encontra na face externa dessa parede.

Cálculo do fluxo de calor (f) 2 Lei de Fourier

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) nasceu em uma família pobre na segunda metade do século XVIII, em Auxerre (Borgonha), na França. Ele estabeleceu um marco na Física e na Matemática, criando parâmetros no estudo da teoria do calor.

O que vamos ver a seguir é uma simplificação matemática dos estudos de Fourier para a condução do calor que flui através de uma barra de secção transversal uniforme. Para tanto, vamos considerar ℓ o comprimento da barra e A a área de sua secção transversal.

Coloquemos as extremidades dessa barra em contato térmico com dois meios, **a** e **b**, cujas temperaturas constantes são, respectivamente, θ_a e θ_b (com $q_a > q_b$). Para evitar possíveis perdas de calor, a barra é isolada termicamente ao longo de sua superfície.

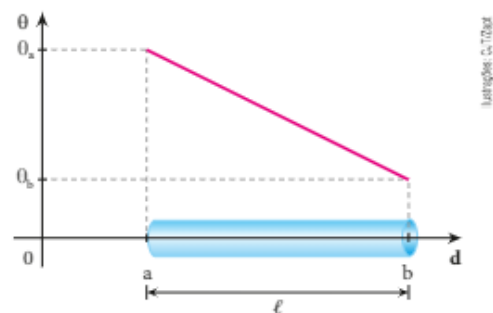


Devido à diferença de temperatura entre as extremidades **a** e **b**, há um fluxo de calor (ou corrente térmica) através da barra, no sentido da extremidade mais quente para a mais fria. A intensidade desse fluxo térmico é definida pela razão entre a quantidade de calor Q que atravessa uma secção transversal da barra e o intervalo de tempo Δt correspondente, cuja expressão é dada por:

$$f = \frac{Q}{\Delta t}$$

A unidade usual do fluxo de calor é a **caloria por segundo (cal/s)**.

Inicialmente, as diversas secções da barra apresentam temperatura variável. Decorrido certo intervalo de tempo, entretanto, essas secções assumem temperaturas constantes, mas diferentes entre si. Nessa situação, atingiu-se um equilíbrio, e o fluxo de calor dá-se em **regime permanente** ou **estacionário**. Nesse caso, o fluxo de calor é o mesmo em qualquer secção da barra, e a temperatura θ ao longo dela obedece ao gráfico representado a seguir.



No regime permanente, o fluxo térmico depende de quatro fatores: da área (A) da secção transversal da barra, de seu comprimento (ℓ), da diferença de temperaturas ($\Delta\theta$) dos meios **a** e **b** e do material de que é feita a barra (k).

Matematicamente, tais grandezas são relacionadas pela equação a seguir, denominada Lei de Fourier:

$$f = k \frac{A |Dq|}{*}$$

A grandeza k é uma constante característica do material da barra, sendo denominada coeficiente de condutibilidade térmica.

Os maiores valores do coeficiente k pertencem aos metais, que são os melhores condutores de energia térmica. Os menores valores de k ficam para os isolantes térmicos, como a lã de vidro, a cortiça, a madeira, os gases em geral e outros.

Ao lado, temos uma tabela dos coeficientes de condutibilidade térmica de algumas substâncias (ou materiais).

Os piores condutores de calor são os gases. Isso é explicado pelo fato de as partículas, no estado gasoso, estarem mais afastadas, dificultando a passagem da "vibração" térmica de uma para a outra. Os sólidos, em geral, são os melhores condutores.

Na lista observada, o cobre é o melhor condutor de calor. A explicação é dada pela forte agregação das partículas, facilitando a transferência das "vibrações" térmicas.

Condutibilidade térmica

Material	k (em W/m · K)
Ar (seco)	0,026
Fibra de vidro	0,048
Pinho	0,11
Hidrogênio	0,18
Vidro de janela	1,0
Chumbo	35,0
Ferro	67,0
Latão	109,0
Alumínio	235,0
Cobre	401,0

Fonte: HALLIDAY David, et al Fundamentos de Física : gravitação, ondas e termodinâmica. Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.



Casa de gelo (iglu)

A casa de gelo (iglu) é um abrigo feito de neve endurecida (gelo), utilizado por povos que habitam regiões de frio extremo, como o norte do Alasca e o continente Ártico (Polo Norte). Para construir tais abrigos, esses povos cortam grandes blocos de gelo e os organizam para formar uma cúpula que é completada com um único bloco na parte superior. A forma arredondada é importante para que a neve, ao cair, escorregue, evitando que o sobrepeso cause o desmoronamento da construção.



Há iglus que abrigam até 20 pessoas, apresentando divisões internas com cômodos separados. Com o passar do tempo as paredes vão ficando mais grossas e mais resistentes.

Como o gelo apresenta coeficiente de condutibilidade térmica pequeno ($2 \cdot 10^{-4} \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$), ele pode ser considerado um bom isolante térmico. Assim, o calor produzido no interior do iglu pela transpiração e respiração das pessoas, bem como a energia resultada da queima de óleo de foca ou outro combustível, permanece no interior aquecendo o ar. Enquanto isso a temperatura externa pode chegar a -50°C no inverno.



A forma arredondada possibilita que seja feita uma fogueira na parte central, região mais fria, e que as pessoas fiquem nas laterais, onde desce o ar mais quente devido à convecção.

FAÇA VOCÊ MESMO

Fio metálico e condução de calor

Vimos neste capítulo que a transmissão de calor pode ocorrer por condução, convecção ou radiação. Vamos agora realizar um experimento que consiste em verificar o processo de condução de calor através de um fio metálico.

ATENÇÃO!

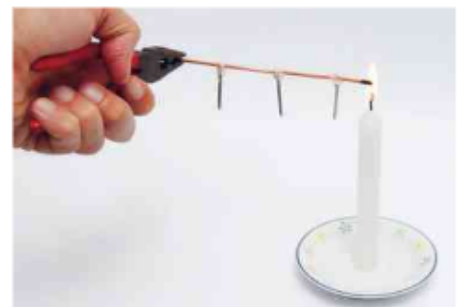
Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do seu professor.

Material necessário

- 1 pedaço de fio de cobre maciço desencapado, com comprimento em torno de 30 cm, o mais grosso possível;
- 1 vela comum e uma caixa de fósforos ou isqueiro para acender a vela;
- 3 preguinhos ou tachinhas;
- 1 alicate.

Procedimento

- I. Acenda a vela e, com cuidado, deixe pingar parafina derretida em três pontos do fio. Espere a parafina começar a se solidificar e encoste nela os preguinhos, fixando-os um a um no fio.
- II. Segure uma das extremidades do fio com o alicate e encoste a extremidade oposta na chama da vela, que deverá estar acoplada a uma base de apoio (pode ser um pires, no qual você derramará parafina derretida para fixar a vela).
- III. Aguarde alguns instantes e você notará que, depois de derretida a parafina de fixação, o primeiro preguinho se soltará e o mesmo poderá ser observado em relação aos outros dois preguinhos, que se soltarão sequencialmente.



Analisando o experimento

1. Por que os preguinhos vão se soltando sequencialmente?
2. Como você explica esse fenômeno?
3. O processo de transmissão de calor por condução pode ocorrer no vácuo? Por quê? Converse com os colegas e o professor.

QUESTÕES COMENTADAS



- 1** Imagine dois corpos **A** e **B** com temperaturas T_A e T_B , sendo $T_A > T_B$. Quando colocamos esses corpos em contato térmico, podemos afirmar que ocorre o seguinte fato:
- a) Os corpos se repelem.
 - b) O calor flui do corpo **A** para o corpo **B** por tempo indeterminado.
 - c) O calor flui do corpo **B** para o corpo **A** por tempo indeterminado.
 - d) O calor flui de **A** para **B** até que ambos os corpos atinjam a mesma temperatura.
 - e) Não acontece nada.

RESOLUÇÃO

Colocar dois corpos em **contato térmico** significa criar a possibilidade de transferência de calor de um para o outro. Esse fluxo de calor ocorrerá de forma espontânea, no sentido do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. O fluxo de calor irá cessar quando a causa que o provocou desaparecer. Assim, quando ocorrer o equilíbrio térmico (igualdade das temperaturas), o fluxo cessará.

Resposta: Alternativa *d*.

2 No café da manhã, uma colher metálica é colocada no interior de uma caneca que contém leite bem quente. A respeito desse acontecimento, são feitas três afirmativas.

- I. Após atingirem o equilíbrio térmico, a colher e o leite estão a uma mesma temperatura.
- II. Após o equilíbrio térmico, a colher e o leite passam a conter quantidades iguais de energia térmica.
- III. Após o equilíbrio térmico, cessa o fluxo de calor que existia do leite (mais quente) para a colher (mais fria).

Podemos afirmar que:

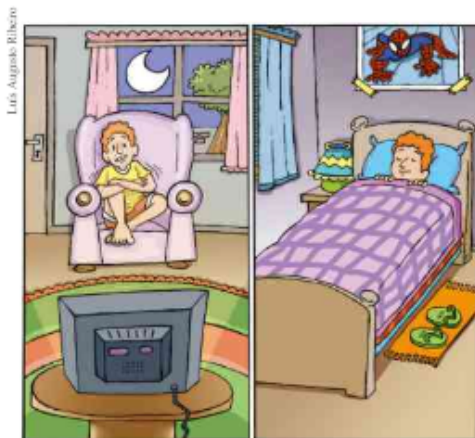
- a) somente a afirmativa I é correta;
- b) somente a afirmativa II é correta;
- c) somente a afirmativa III é correta;
- d) as afirmativas I e III são corretas;
- e) as afirmativas II e III são corretas.

RESOLUÇÃO

- I. **Correta.** Quando dois ou mais corpos atingem o equilíbrio térmico, significa que passaram a ter a mesma temperatura.
- II. **Incorreta.** No equilíbrio térmico, as temperaturas tornam-se iguais. No entanto, a quantidade de energia térmica é função da temperatura e do número de partículas existentes no corpo. Assim, não podemos dizer que dois corpos possuem mesma quantidade de energia térmica apenas sabendo que eles possuem temperaturas iguais.
- III. **Correta.** O que provoca o fluxo de calor é o fato de existir diferença entre as temperaturas. Assim, ao atingirem o equilíbrio térmico (temperaturas tornam-se iguais), cessa o fluxo de calor entre os corpos.

Resposta: Alternativa *d*.

3 Numa noite muito fria, você ficou na sala assistindo à televisão. Após algum tempo, foi para a cama e deitou-se debaixo das cobertas (lençol, cobertor e edredom). Você nota que a cama está muito fria, apesar das cobertas, e só depois de algum tempo o local se torna aquecido.



Isso ocorre porque:

- a) o cobertor e o edredom impedem a entrada do frio que se encontra no meio externo.
- b) o cobertor e o edredom possuem alta condutividade térmica.
- c) o cobertor e o edredom possuem calor entre suas fibras, que, ao ser liberado, aquece a cama.
- d) o cobertor e o edredom não são aquecedores, são isolantes térmicos, que não deixam o calor liberado por seu corpo sair para o meio externo.
- e) sendo o corpo humano um bom absorvedor de frio, após algum tempo não há mais frio debaixo das cobertas.

RESOLUÇÃO

O cobertor e o edredom não são aquecedores, mas são feitos de material que conduz o calor com muita dificuldade por possuir ar entre suas fibras. Assim, sendo materiais isolantes, não deixam o calor liberado pelo corpo sair para o meio externo, mantendo o corpo aquecido.

Resposta: Alternativa *d*.

4 Você sabe que o aprendizado da Física também se faz por meio da observação das situações que ocorrem no nosso dia a dia. Faça um experimento. Caminhe descalço sobre um carpete ou um tapete e sobre um piso cerâmico, como o do banheiro da sua casa, por exemplo. Você vai notar que o piso cerâmico parece mais frio do que o tapete, apesar de estarem à mesma temperatura. Essa diferença de sensação se deve ao fato de:

- a) a capacidade térmica do piso cerâmico ser menor que a do tapete.
- b) a temperatura do piso cerâmico ser menor que a do tapete.
- c) a temperatura do tapete ser menor que a do piso cerâmico.
- d) a condutividade térmica do piso cerâmico ser maior que a do tapete.
- e) a condutividade térmica do piso cerâmico ser menor que a do tapete.

RESOLUÇÃO

A sensação de quente e de frio que sentimos está relacionada com a rapidez com que recebemos ou cedemos calor. Ao pisarmos no piso de cerâmica, perdemos energia mais rapidamente do que quando pisamos em um tapete. Isso ocorre porque a condutividade térmica do piso é maior do que a do tapete.

Resposta: Alternativa *d*.

5 Durante uma aula de Física, o professor pediu aos alunos que pensassem em uma forma de economizar energia elétrica diferente daquelas triviais: apagar a luz ao sair de um ambiente, reduzir o tempo do banho, desligar a TV quando não estiver assistindo etc.

Enquanto discutiam o problema, um grupo de alunos falou sobre uma padaria que possuía geladeiras com portas de vidro para mostrar os produtos em seu interior. Disseram que portas desse tipo de geladeira apresentam um fluxo de energia térmica do meio ambiente (mais quente) para o interior (mais frio) e que esse fluxo de calor poderia ser minimizado apenas trocando o vidro por outro material com menor condutibilidade térmica. O professor gostou da ideia e elaborou a seguinte questão:

A porta de vidro de uma dessas geladeiras mede 160 cm de altura, 50 cm de largura e 2 cm de espessura. O coeficiente de condutibilidade térmica do vidro é igual a $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$.

Assim, se o interior da geladeira deve ter temperatura estável em 5°C , num dia muito quente, quando a temperatura exter-

na estiver a 30°C , qual será o fluxo de calor através da porta de vidro?

RESOLUÇÃO

Usaremos a Lei de Fourier, dada por: $\phi = k \cdot \frac{A|\Delta\theta|}{\ell}$.

Sabemos que: $k = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$;

$A = 160 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm} = 8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$; $\Delta\theta = 30^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$;

$\ell = 2 \text{ cm}$.

Substituindo esses valores na expressão anterior, temos:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8 \cdot 10^3 \cdot 25}{2} \text{ (cal/s)} \Rightarrow \phi = 200 \text{ cal/s}$$

Resposta: 200 cal/s

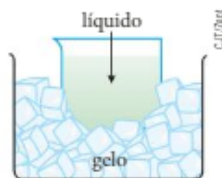


QUESTÕES PROPOSTAS

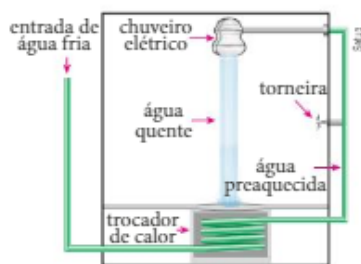


FAÇA NO CADERNO.

6. Para resfriar um líquido, é comum colocarmos a vasilha que o contém dentro de um recipiente com gelo, conforme a figura ao lado. Para que o resfriamento seja mais rápido, é conveniente que a vasilha seja metálica em vez de vidro ou porcelana. Explique por que a vasilha de metal permite o resfriamento mais rápido do líquido.

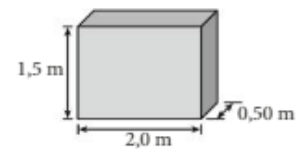


7. Engenheiros e técnicos especializados em construção civil se reuniram em um congresso para apresentar seus projetos, com promessas de revolucionar o futuro das residências. O assunto principal era a economia de energia. Um dos projetos, bastante criativo e fácil de realizar, era o preaquecimento da água do chuveiro. A água quente que cai, após ser utilizada, escoava pelo ralo, onde entra em contato com o cano em forma helicoidal que leva a água fria para o chuveiro. Observe o esquema a seguir.



Para aumentar a eficiência do sistema, o técnico responsável testou canos de vários materiais. Usou PVC (plástico), que é um isolante térmico razoável, e outros três canos metálicos. Os materiais desses canos, em ordem crescente de condutibilidade térmica, são: aço, alumínio e cobre. Desses materiais, qual é o mais indicado para ser usado como trocador de calor no ralo?

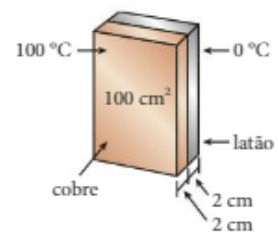
8. Na figura ao lado, está representada uma placa de alumínio que foi utilizada para separar o interior de um forno, cuja temperatura mantinha-se estável a 220°C , e o meio ambiente (20°C). Após atingido o regime estacionário, qual a intensidade da corrente térmica através dessa chapa metálica?



Suponha que o fluxo ocorra através da face de área maior.

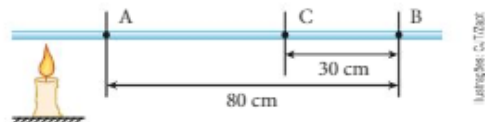
Dado: coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio = $0,50 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$

9. A condutividade térmica do cobre é aproximadamente quatro vezes maior que a do latão. Duas placas, uma de cobre e outra de latão, com 100 cm^2 de área e 2,0 cm de espessura, são justapostas como ilustra a figura ao lado.



Considerando-se que as faces externas do conjunto sejam mantidas a 0°C e 100°C , qual será a temperatura na interface da separação das placas quando for atingido o regime estacionário?

10. Uma barra metálica é aquecida conforme a figura; A, B e C são termômetros. Admita a condução de calor em regime estacionário e no sentido longitudinal da barra.



Quando os termômetros das extremidades indicarem 200°C e 80°C , o intermediário indicará:

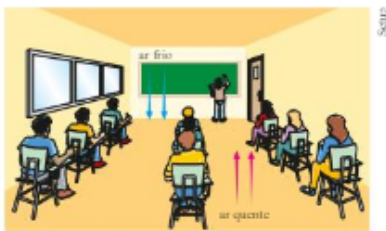
- a) 195°C b) 175°C c) 140°C d) 125°C e) 100°C

A convecção

Quando estamos num ambiente fechado (cinema, teatro, sala de aula), é comum sentirmos, após algum tempo, que ele está muito “abafado”. Parece que o ar fica “parado”. O que pode ter ocorrido, já que no início não sentíamos isso?

Tal fato acontece porque as camadas de ar mais próximas das pessoas que estão no ambiente são aquecidas por elas e se expandem, aumentando seu volume, com consequente diminuição de sua densidade. Esse ar (quente) menos denso sobe, produzindo a descida do ar (frio) de maior densidade, que se encontra mais acima. Como esse fenômeno é cíclico, ao se repetir constantemente, produz no ar as correntes de convecção. Após algum tempo, todo o ar da sala se encontra aquecido de maneira praticamente uniforme, não mais ocorrendo a convecção. Vem daí a sensação de ambiente “abafado”.

Convecção é o processo de propagação de calor no qual a energia térmica muda de local, acompanhando o deslocamento do próprio material aquecido.



Notemos que a energia térmica muda de local acompanhando as partículas do fluido, ao contrário da condução, em que apenas a energia térmica se desloca e as partículas permanecem em suas posições de equilíbrio.

É importante observar que a convecção só ocorre nos fluidos (gases, vapores e líquidos), não acontecendo nos sólidos e no vácuo.

O movimento vertical de massas fluidas, de densidades diferentes, é provocado pela existência do campo gravitacional da Terra. Em um local sem campo gravitacional não ocorre convecção. No interior de uma espaçonave em uma viagem entre a Terra e a Lua, por exemplo, um sistema de ventiladores e exaustores deve ser usado para movimentar e renovar o ar da cabine onde estão os astronautas.

Refrigeradores domésticos

Nos refrigeradores domésticos convencionais, a refrigeração dos alimentos é feita por convecção do ar em seu interior. O ar em contato com os alimentos é

aquecido, expande-se – com consequente diminuição de densidade –, sobe até o congelador, onde é resfriado, e volta a descer. Notemos que, para isso acontecer, é necessário que o congelador esteja na parte superior e as prateleiras sejam grades vazadas.

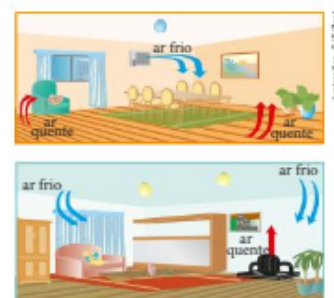


Convecção do ar no interior de um refrigerador doméstico.

Nos refrigeradores que funcionam com sistema **frost free** (livre de gelo), a placa fria não fica na parte interna do aparelho, mas entre as paredes interna e externa traseiras. Um conjunto de ventiladores provoca a circulação do ar, retirando o ar quente e injetando o ar frio, resfriando a parte interna onde ficam os alimentos. As prateleiras são inteiriças, de vidro ou de plástico, fazendo com que cada compartimento receba ar gelado através de aberturas existentes na parede do fundo. A circulação de ar quente, por convecção, ocorre nas prateleiras da porta, que são vazadas. O ar quente é retirado na parte superior da geladeira. A água formada pela condensação escorre para um recipiente na parte inferior e evapora.

Ar-condicionado (ar frio) e aquecedor (ar quente)

Em uma residência, podemos usar um ar-condicionado no verão e um aquecedor elétrico no inverno. Observe nas figuras que o ar-condicionado deve sempre ficar na parte superior da parede, enquanto o aquecedor deve ficar no nível do chão. Lembre-se de que o ar quente (menos denso) sobe e o ar frio (mais denso) desce.

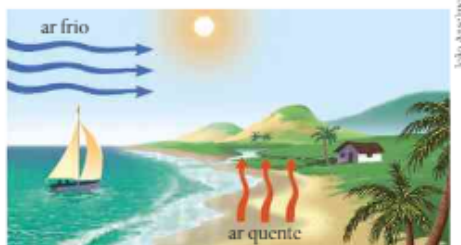


Note que, se fosse feito o contrário, o ar frio (mais denso) continuaria embaixo e o ar quente (menos denso) permaneceria em cima, não havendo circulação de ar.

Brisas marinhas

No litoral, durante o dia, a brisa sopra do mar para a praia e, à noite, da praia para o mar. A explicação para isso é que a areia tem calor específico muito pequeno em relação ao da água (para massas iguais, a areia precisa de menos energia para sofrer a mesma variação de temperatura), por isso se aquece e se resfria mais rapidamente.

Durante o dia, o ar quente próximo à areia sobe, provocando o deslocamento do ar frio que se encontra sobre a água.



À noite, a água demora mais para esfriar, invertendo o sentido das correntes de ar.



Isso explica por que o jangadeiro tem de sair de madrugada, quando a brisa sopra da praia para o mar, e tem de voltar antes de escurecer, quando a brisa ainda sopra do mar para a praia.



Como são as roupas usadas no deserto?

As roupas usadas pelos moradores do deserto em geral são escuras, largas e confeccionadas com lã de camelo, material de péssima condutibilidade térmica.

Pode parecer estranho o fato de usarem roupas com essas características, no entanto, a lã de camelo serve como isolante térmico. Esse material evita que o calor do Sol entre diretamente em contato com a pele durante o dia e dificulta a saída do calor gerado pelo corpo humano durante as noites frias.

Essas roupas são largas para facilitar a convecção do ar existente entre a face interna da roupa e a pele da pessoa. Desse modo, o ar aquecido sobe e sai pela parte de cima, na região próxima ao pescoço. Como o ar mais quente sobe, entra pela parte inferior da roupa ar mais frio, circulando e resfriando o corpo da pessoa.

A temperatura no deserto do Saara, na África, pode atingir 50 °C durante o dia e 2 5 °C à noite.



Viajante no deserto.

A radiação

Quando nos bronzeamos na praia, ficamos expostos às radiações solares. A maior parte da energia que recebemos vem do Sol até a Terra através de ondas eletromagnéticas, que, ao atingirem nosso corpo, são absorvidas e transformadas, em grande parte, em energia térmica.

Esse processo de propagação da energia através de ondas eletromagnéticas é denominado **radiação**.

Radiação é o processo de propagação de energia na forma de ondas eletromagnéticas. Ao serem absorvidas, essas ondas se transformam em energia térmica.

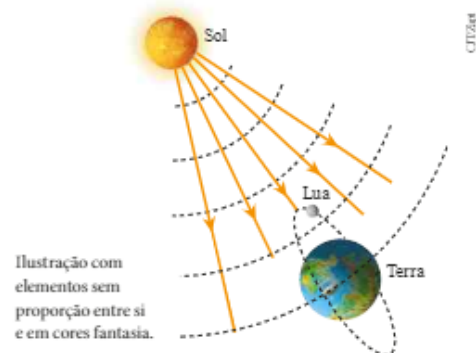
Rigorosamente, a radiação não é um processo de transmissão de calor. Sabemos, no entanto, que um corpo emite energia radiante ao sofrer um resfriamento.

Assim, associamos a energia existente nas ondas eletromagnéticas emitidas com a energia térmica que saiu do corpo. Essas ondas, ao serem absorvidas por um outro corpo, transformam-se novamente em energia térmica, aquecendo-o. Por isso, costuma-se definir radiação como um processo de transferência de energia térmica.

Apesar de todas as ondas eletromagnéticas transportarem energia, apenas as correspondentes à faixa do infravermelho são chamadas de ondas de calor. Isso porque o infravermelho transforma-se mais facilmente em energia térmica ao ser absorvido. Num banho de luz solar, recebemos, entre outras radiações, a ultravioleta e a infravermelha. A ultravioleta produz bronzeamento e a infravermelha pode provocar aquecimento e até queimaduras na pele.

O fato de as ondas eletromagnéticas se propagarem no vácuo explica como parte da energia térmica que saiu do Sol chega até a superfície da Terra.

Assim, apenas por meio da radiação podemos entender como a energia térmica é levada de uma região para outra, havendo vácuo entre elas.



A vida na Terra pôde se desenvolver devido à energia emitida pelo Sol. Essa estrela é uma fonte limitada de energia. Segundo as modernas teorias científicas, dentro de 5 bilhões de anos ela será uma estrela morta. Sem essa energia, poderá existir vida na Terra?

Forro "longa-vida"

Você já pensou no descarte de embalagens usadas de leite do tipo "longa-vida"?

Esse material pode ser reutilizado como isolamento térmico, em conjunto com os telhados das casas. É possível constatar que o ambiente de uma casa simples, que utiliza apenas o telhado sem forro, pode ter sua temperatura diminuída de até 10°C apenas colocando-se um forro formado por essas caixas abertas, montadas em uma estrutura de madeira.

Essas embalagens são feitas de papelão, plástico e alumínio. O alumínio reflete até 95% das ondas de calor que incidem nele. O papelão é bom isolante térmico e o plástico o protege da umidade. Para cada metro quadrado de forro são utilizadas cerca de 16 caixas abertas, coladas com cola branca ou similar.



Forro feito com embalagem de leite do tipo longa-vida.

no formato original, depois de lavadas e secadas, a aba por onde o leite foi derramado deve ser colada, armazenando ar em seu interior.

Ao instalar o forro, ele não deve ser colocado junto ao telhado. É desejável que exista uma distância de pelo menos 5 cm entre o forro e o telhado para que o ar possa circular por convecção.

As embalagens também podem ser usadas vazias e fechadas, no seu formato original de paralelepípedo. Nesse caso, cada metro quadrado de forro precisará de cerca de 64 caixas coladas por meio de suas partes laterais. O ar existente no interior das embalagens é um bom isolante térmico, reduzindo a condução do calor.

É importante lembrar que as caixas devem ser bem lavadas com detergente e desinfetante antes de serem usadas na confecção do forro. No caso de usá-las

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

O vaso de Dewar

Ao contrário do que muita gente pensa, a garrafa térmica não foi inventada para manter o café quente. Foi o físico inglês James Dewar (1842-1923) quem, no final do século XIX, a pedido de colegas, inventou um recipiente que pudesse conservar soluções biológicas a temperaturas estáveis. Dewar havia lido trabalhos do físico italiano Evangelista Torricelli, que no século XVII tinha comprovado ser o vácuo um bom isolante térmico. O grande problema de Dewar era como manter o vácuo no recipiente. Para tanto, ele construiu uma garrafa de vidro com paredes duplas. O ar existente entre essas paredes foi retirado e a garrafa foi lacrada. Para evitar que a luz atingisse a solução biológica e provocasse alguma alteração, Dewar espelhou as paredes da garrafa. Com isso, evitava que as ondas de calor entrassem na garrafa ou saíssem dela.

Garrafa térmica e, ao lado, seu interior de vidro espelhado com parede dupla.



Cristina Xavier

James Dewar era um daqueles cientistas que achavam que suas descobertas deviam ser usadas por todos, por isso não patenteou essa invenção, considerando-a um presente à Ciência. Somente no início do século XX o alemão Reinhold Burger, fabricante de vidros, aperfeiçoou o invento de Dewar, diminuindo seu tamanho e lançando-o no mercado. Foi um sucesso de vendas, que tornou Burger muito rico.

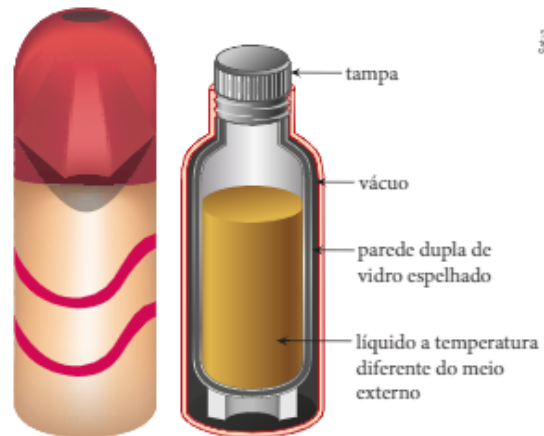
Detalhes funcionais de uma garrafa térmica

A garrafa térmica é um dispositivo cuja finalidade principal é manter constante, por um maior intervalo de tempo, a temperatura de seu conteúdo.

Para tanto, as paredes desse sistema são praticamente **adiabáticas**, isto é, reduzem consideravelmente as trocas de calor entre seu conteúdo e o meio externo.

Com a finalidade de isolar termicamente o conteúdo de uma garrafa térmica do meio ambiente, adotam-se os seguintes procedimentos:

- as paredes internas são feitas de vidro, que, por ser mau condutor térmico, atenua as trocas de calor por condução;
- as paredes internas são duplas, separadas por uma região de vácuo, cuja função é tentar evitar a condução do calor que passa pelas paredes de vidro;
- o vidro de que são feitas as paredes internas da garrafa é espelhado para que o calor radiante seja refletido, atenuando assim as trocas por radiação.
- para evitar as possíveis trocas de calor por convecção, basta fechar a garrafa, pois dessa forma as massas fluidas internas não conseguem sair do sistema.



S&P2

É evidente que não existe um isolamento térmico perfeito; assim, apesar dos cuidados citados, após um tempo relativamente grande (várias horas), o conteúdo da garrafa térmica acaba atingindo o equilíbrio térmico com o meio ambiente.

Formas de aproveitamento da energia solar

Aquecimento de água por energia solar

O Brasil recebe anualmente, em média, 1 800 kWh/m² de energia proveniente do Sol. Para se ter uma ideia disso, a radiação que incide em um ano na área do Distrito Federal, onde se encontra a cidade de Brasília, equivale a mais de 160 usinas de Itaipu. A utilização de parte dessa energia poderia representar uma grande economia para cada um de nós e para o país, que não precisaria construir novas usinas hidrelétricas, termelétricas ou nucleares.

A utilização de coletores solares para uso doméstico no aquecimento de água pode representar uma economia de 30% a 40% na conta de energia elétrica das residências. Cada metro quadrado de coletor solar em uso representa 56 m² a menos de área inundada em usinas hidrelétricas e a economia de 55 kg/ano de gás ou 215 kg/ano de lenha que deixaria de ser queimada, nas usinas termelétricas.

Segundo dados divulgados pelo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), cerca de 80% das residências brasileiras têm chuveiro elétrico (são mais de 80 milhões de aparelhos) e poucas possuem aquecedor solar. Nos países de primeiro mundo, 80% dos lares possuem aquecimento solar para aquecer a água utilizada nos banhos e para a calefação (aquecimento dos cômodos), sendo também empregadas células fotovoltaicas, que transformam energia solar em energia elétrica.

O aquecedor solar é um sistema simples que utiliza a radiação, a condução e a convecção térmica para aquecimento da água. Esse dispositivo é constituído de duas partes: o coletor solar (placas) e o reservatório térmico (onde a água aquecida é armazenada).

Estufas

Estufas são recintos fechados com paredes e teto de vidro, utilizadas, principalmente em países de inverno rigoroso, para o cultivo de verduras, legumes e mesmo flores.



Representação de estufa.

conseguem passar com a luz visível e outras radiações. Uma parcela dessa energia é absorvida pelas plantas que estão no interior da estufa. Essas plantas se aquecem e emitem parte da energia absorvida em forma de infravermelho, que, agora com comprimentos de onda maiores, não consegue passar pelo vidro e fica retido no interior da estufa. Desse modo, a temperatura permanece relativamente estável, mesmo que esteja nevando na parte externa.



As placas coletoras são, geralmente, colocadas no telhado das residências.

QUESTÕES COMENTADAS



11 Em cada uma das situações descritas a seguir você deve reconhecer o processo de transmissão de calor envolvido: condução, convecção ou radiação.

- I. As prateleiras de uma geladeira doméstica são grades vazadas para facilitar a ida da energia térmica até o congelador por...
 - II. O único processo de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo é a...
 - III. Numa garrafa térmica, é mantido vácuo entre as paredes duplas de vidro para evitar que o calor saia ou entre por...
- Na ordem, os processos de transmissão de calor que você usou para preencher as lacunas são:
- a) condução, convecção e radiação.
 - b) radiação, condução e convecção.
 - c) condução, radiação e convecção.
 - d) convecção, condução e radiação.
 - e) convecção, radiação e condução.

RESOLUÇÃO

- I. **Convecção:** Na geladeira doméstica convencional, as grades das prateleiras são vazadas para permitir a livre subida do ar quente, aquecido pelos corpos do interior do refrigerador, e a livre descida do ar frio, resfriado pelo congelador.
- II. **Radiação:** Na radiação, a energia desloca-se de um local para outro na forma de ondas eletromagnéticas, que podem se propagar no vácuo. A condução e a convecção necessitam de meio material para ocorrer.
- III. **Condução:** O vácuo mantido entre as paredes duplas de vidro de uma garrafa térmica é para evitar que a energia térmica saia do sistema ou entre nele através das partículas do meio, isto é, por condução.

Resposta: Alternativa e.

12 Analisando uma geladeira doméstica convencional, podemos afirmar:

- I. O congelador fica na parte superior para favorecer a condução do calor que sai dos alimentos e vai até ele.
- II. As prateleiras são grades vazadas (e não chapas inteiriças), para permitir a livre convecção das massas de ar quentes e frias no interior da geladeira.
- III. A energia térmica que sai dos alimentos chega até o congelador, principalmente, por radiação.
- IV. As paredes das geladeiras normalmente são intercaladas com material isolante, com o objetivo de evitar a entrada de calor por condução.

Quais são as afirmativas corretas?

- a) Apenas a afirmativa I.
- b) Apenas as afirmativas I, II e III.
- c) Apenas as afirmativas I e III.
- d) Apenas as afirmativas II e IV.
- e) Todas as afirmativas.

RESOLUÇÃO

- I. **Incorreta.** O congelador fica na parte superior para receber o ar aquecido pelos alimentos, que sobe por convecção.
- II. **Correta.** As grades vazadas permitem a livre convecção do ar no interior da geladeira. Por isso, as prateleiras não devem ser cobertas, deixando o ar circular livremente pelo compartimento interno.
- III. **Incorreta.** Existe uma parcela de energia que sai dos corpos na forma de radiação eletromagnética; no entanto, a maior parte da energia que chega ao congelador é levada por partículas de ar existentes no interior da geladeira através da convecção.
- IV. **Correta.** Entre as paredes metálicas externa e interna da geladeira é colocado isopor ou lã de vidro com a finalidade de evitar a entrada de energia térmica por condução.

Resposta: Alternativa d.

13 A comunidade científica há tempos anda preocupada com o aumento da temperatura média da atmosfera terrestre. Os cientistas atribuem esse fenômeno ao chamado efeito estufa, que consiste na "retenção" da energia térmica junto ao nosso planeta, como ocorre nas estufas de vidro, que são usadas em locais onde, em certas épocas do ano, a temperatura atinge valores muito baixos. A explicação para esse acontecimento é que a atmosfera (com seus gases naturais mais os gases poluentes emitidos por automóveis, indústrias, queimadas, vulcões etc.) é pouco transparente aos raios solares na faixa:

- a) das ondas de rádio.
- b) das ondas ultravioleta.
- c) das ondas infravermelhas.
- d) das ondas correspondentes aos raios gama.
- e) das ondas correspondentes aos raios X.

RESOLUÇÃO

A atmosfera poluída faz o papel de vidro nas estufas. Ela fica pouco transparente para a radiação na faixa do infravermelho que é emitida pela superfície da Terra. Tais ondas são, em parte, absorvidas pelos gases estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nítrico etc.) e pelo vapor de água existentes na atmosfera.

Essa energia, ao ser retida, pode provocar alterações climáticas em várias regiões do planeta.

Resposta: Alternativa c.



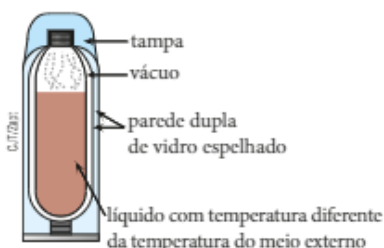
QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

14. José mora em Natal, capital do Rio Grande do Norte, Brasil, e Mary, em Estocolmo, capital da Suécia. Os dois têm em comum o fato de serem recém-formados em Arquitetura e se comunicam com frequência por meio da internet. José pretende climatizar a sala de uma residência em sua cidade e Mary, o seu quarto. Em uma de suas conversas eles trocam informações sobre onde colocar os aparelhos indicados, se no alto, próximo do teto, embaixo, próximo do chão ou no meio da parede. Lembrando que Natal está próximo da linha do Equador e Estocolmo está próximo do polo Norte, qual sua sugestão de onde colocar os aparelhos? Qual o aparelho indicado em cada caso, ar-condicionado com função "frio" ou aquecedor?

15. Ao examinarmos uma garrafa térmica, observamos que a parte interna é toda de vidro espelhado, apresentando paredes duplas e um quase vácuo entre elas. A extremidade superior deve ser mantida bem fechada, quando não estiver em uso. Esse dispositivo minimiza trocas de calor entre o meio externo e o líquido existente em seu interior, conservando por um bom tempo a sua temperatura.



Leia as afirmativas a seguir e escolha as corretas.

- (01) O vidro é péssimo condutor de calor.
- (02) O vácuo existente entre as paredes duplas impede a transferência de calor por condução e por convecção.
- (04) As radiações térmicas, que tentam sair do sistema, sofrem reflexão na parede espelhada, voltando para o líquido.
- (08) A radiação térmica não se propaga no vácuo.
- (16) A parede espelhada minimiza a saída de calor pelo processo denominado condução.

(32) Fechando bem a garrafa, não haverá trocas de calor com o meio externo pelo processo denominado convecção. Dê como resposta o somatório dos números correspondentes às afirmativas corretas.

16. Na praia, você já deve ter notado que, durante o dia, a areia esquenta mais rápido que a água do mar e, durante a noite, a areia esfria mais rápido que a água do mar. Isso ocorre porque o calor específico da água é maior que o da areia (a água precisa receber mais calor, por unidade de massa, para sofrer o mesmo aquecimento da areia). Esse fato explica a existência da brisa:

- a) do mar para a praia, à noite.
- b) da praia para o mar, durante o dia.
- c) do mar para a praia, durante o dia.
- d) sempre do mar para a praia.
- e) sempre da praia para o mar.

17. Um técnico de laboratório resolveu realizar uma experiência de trocas de calor. Para tanto, utilizou um caldeirão, uma garrafa de vidro, água e sal. Colocou água no caldeirão e no interior da garrafa de vidro. O caldeirão foi colocado sobre a chama do fogão e a garrafa, que estava aberta, teve seu gargalo preso a um barbante, que, esticado, a mantinha afastada do fundo do caldeirão, porém mergulhada na água.

Após alguns minutos, ele observou que a água do caldeirão entrou em ebulição (a 100 °C), mas a água do interior da garrafa (que também estava a 100 °C) não fervia. Esperou mais alguns minutos e colocou um punhado de sal na água do caldeirão; pouco tempo depois, notou que a água no interior da garrafa entrava em ebulição.

- a) Por que, mesmo estando a 100 °C, a água da garrafa não fervia?
- b) O que ocorre com a temperatura de ebulição da água quando acrescentamos sal?
- c) Por que, depois de ser acrescentado sal à água do caldeirão, a água do interior da garrafa também entrou em ebulição?



DESCUBRA MAIS

- 1 Pesquise e cite (com a devida explicação) um fator positivo e outro negativo do efeito estufa na atmosfera da Terra.
- 2 Em 10 de dezembro de 1997, vários países assinaram, no Japão, um acordo que foi denominado Protocolo de Kyoto. Qual é a relação do efeito estufa na atmosfera com esse acordo?

INTERSABERES

Aquecimento global

O planeta esquentando, os polos derretem, as secas intermináveis ocorrem onde antes chovia abundantemente, a mata queima com violência em razão da falta de chuvas, há inundações onde chovia pouco, furacões surgem em maior quantidade e mais intensos com o passar dos anos; enfim, o clima parece ter enlouquecido: faz frio quando devia estar quente, faz calor quando devia estar frio. Tudo isso é o reflexo do chamado aquecimento global.

Muitos cientistas e estudiosos desse assunto por décadas alertaram para o que deveria acontecer no futuro, só que o futuro chegou. Tudo o que lemos no primeiro parágrafo parece uma chamada para o noticiário que vamos assistir hoje à noite na TV. A humanidade precisa acordar e, o mais rápido possível, buscar soluções para minimizar os impactos desses fenômenos.

O esforço deve ser total e todos os países do mundo devem dar sua contribuição. Os mais ricos, que se beneficiaram até aqui com a industrialização e o consumo desenfreado, agora devem ser os mais interessados, já que a manutenção de suas conquistas para a qualidade de vida do ser humano moderno depende da ajuda da natureza, e ela parece estar ferida, reagindo violentamente contra as agressões sofridas durante esses anos.

Nas imagens a seguir podemos observar a mesma região do Alasca (EUA) retratada em dois diferentes momentos e verificar a diminuição do gelo com o passar do tempo e a mudança da paisagem.

WILHELM D. FROENBERG



Região do Alasca fotografada em agosto de 1941.

A mesma região do Alasca da fotografia acima, em agosto de 2004.



HEATHER STORVICK and the Data Center/NOAA Center for Global Change Science

Não podemos nos deixar enganar com a aparente desaceleração do aquecimento global detectada pelo estudo recente da Nasa, publicado na revista *Science*, um dos mais importantes canais de divulgação científica. De acordo com esse estudo, a energia térmica resultante do aquecimento global mudou de lugar. No entanto, mais energia continua chegando e sendo absorvida pelos gases contidos na atmosfera.

Leia na página a seguir um artigo a respeito desse "hiato" no aquecimento global. Pesquise mais a respeito e discuta com seus colegas sobre a importância da conscientização das pessoas em relação a esse tema.

O aquecimento global desacelerou?

Estudo da Nasa publicado na revista *Science* explica o suposto "hiato" do aquecimento: o calor absorvido pelos oceanos teria se transferido de águas rasas do Pacífico para camadas mais profundas dos oceanos Índico e Antártico. É esse fenômeno que faz com que haja uma aparente redução no ritmo das mudanças climáticas que afetam a Terra.



Thiago Coimbra

Baía de Narsarsuaq, Groenlândia. Outubro de 2012. Degelo de *icebergs* acima do normal, durante o começo de outono.

O planeta está esquentando, não há como negar. Desde 1880, quando começaram os registros formais, a temperatura subiu 0,8 grau, e dois terços desse aumento aconteceu nos últimos 40 anos. Não só treze dos catorze anos mais quentes já documentados ocorreram neste começo de século, como 2014 bateu o recorde dos registros. Detecta-se hoje, porém, um fenômeno que intriga cientistas. Apesar de o calor planetário crescer ano a ano, o ritmo desse aumento vem diminuindo. Isso vai na contramão das previsões de climatologistas, que apontavam que quanto maior fosse a emissão de gás carbônico (o CO₂) na atmosfera, índice que só sobe, maior seria também o fator de elevação da temperatura da Terra. A esse estranho acontecimento foi dado o nome de "hiato", justamente por representar uma aparente pausa no aquecimento. [...] a Nasa finalmente achou uma resposta para esse fenômeno que negaria as estimativas catastróficas de ambientalistas, e poderia jogar uma pá de cal nos esforços conservacionistas para tentar limitar os efeitos negativos das mudanças climáticas. Em resumo, os pesquisadores descobriram que é só aparente a redução no ritmo do aquecimento global.

O hiato era utilizado por estudiosos "céticos" como o principal argumento contrário à ideia da existência de aquecimento global. Diferentemente do que é mais aceito pela comunidade científica, esse grupo não credita as mudanças climáticas à atividade humana, que tem lotado a atmosfera com gases de efeito estufa por meio, por exemplo, da queima de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão. Para os céticos, fatores naturais explicariam a oscilação de temperatura, como ciclos esperados do clima da Terra, ou ainda a inconstante atividade do Sol.

O estudo da Nasa publicado na revista americana *Science* acaba com esses argumentos. Segundo cálculos da agência espacial americana, o calor acumulado nos últimos anos na atmosfera e pela água dos mares se deslocou para camadas mais profundas dos oceanos. Esse calor, porém, deve voltar à superfície a curto prazo, aumentando bruscamente a temperatura global. Ou seja, não é que o aquecimento passa por um hiato. As mudanças climáticas continuam a todo vapor, só não se sabia onde estava armazenada parte substancial do calor acumulado nas últimas duas décadas.

Uma análise de dados coletados por satélites da Nasa mostrou que os oceanos têm absorvido grande quantidade de calor ao longo do tempo. Os pesquisadores analisaram a distribuição de calor no planeta e descobriram que, ao menos desde 2003, as águas quentes que ocupavam os primeiros 100 metros a partir da superfície do Oceano Pacífico resfriaram – o que condiz com a teoria da pausa do aquecimento. Porém, e aí está a novidade, essa perda de calor foi compensada com o aquecimento de águas mais profundas, de até 300 metros a partir da superfície, nos oceanos Índico, Antártico e do próprio Pacífico.

"Ainda não entendemos esse mecanismo por completo. Mas podemos afirmar que o resfriamento da superfície nos iludiu. Nos próximos anos o calor regressará às águas rasas e à atmosfera", disse [...] a espanhola Veronica Nieves, física da Nasa e uma dos autores do estudo. "A oscilação, combinada ao fato de que estamos fornecendo calor extra para a atmosfera por meio das emissões de gases estufa, indica que o aquecimento vai acelerar novamente" [...]

A descoberta deve ser agora incluída nos modelos climáticos utilizados por cientistas para prever o aquecimento e seus efeitos em diferentes cenários de emissões de gases estufa. A conclusão é importante ainda por revelar com mais detalhes como os oceanos agem como reguladores da temperatura do planeta. "Se não fosse pelos mares, a atmosfera teria aquecido mais de 1,5 grau nos últimos 150 anos, e não 0,8 grau, agravando a situação já ruim", diz o climatologista Paulo Artaxo, da Universidade de São Paulo. "O problema é que, ao absorver o calor excessivo da atmosfera, os oceanos também estão sendo fortemente afetados, com alterações nas correntes oceânicas, na salinidade e na acidez da água." [...]

A questão do "hiato", porém, ainda se mostrava como um desafio para os ambientalistas. Não havia explicações críveis para a aparente pausa do aquecimento global nas últimas duas décadas. A descoberta da Nasa, portanto, é fundamental. Sim, há aquecimento global, e seu ritmo deve voltar de forma ainda mais intensa justamente em consequência desse "hiato", que acabou por armazenar calor em áreas mais profundas dos oceanos.

Com isso, os céticos terão de repensar seus argumentos – ou mudar de opinião. Como fez, em 2012, o climatologista e físico Richard Muller, pesquisador que até então integrava o grupo de descrentes, mas que reconheceu, em artigo publicado no *New York Times*, que a melhor explicação para o aquecimento do planeta é mesmo a emissão de gases de efeito estufa pelo homem.

[...]

BEER, Raquel. Planeta Sustentável.

Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/aquecimento-global-desacelerou-886866.shtml?func=2>>.

Acesso em: 12 nov. 2015.

Compreensão, pesquisa e debate

1. O aquecimento global é realmente um problema para a humanidade ou está havendo um exagero dos meios de comunicação?
2. Como cada um de nós pode contribuir para a redução de efeito estufa em nossa atmosfera?
3. A adoção de certas atitudes, como não queimar o lixo (por exemplo, plásticos), não queimar a vegetação antes de colheitas (cana-de-açúcar), não usar aerossóis com CFC (clorofluorcarboneto) existente nos propelentes de inseticidas e manter carros e caminhões bem regulados, pode ajudar a minimizar os efeitos do aquecimento global?
4. Na Europa e na cidade de São Paulo, os supermercados cobram pelos sacos plásticos usados para levar as compras para casa, atitude que visa à redução do consumo de plástico. Na Alemanha, a compra de garrafas plásticas de refrigerante e água mineral é acrescida de um valor que corresponde ao que o Estado irá gastar para recolher e processar essas embalagens. Em sua opinião, esse tipo de atitude pode reduzir a poluição ambiental e minimizar o aquecimento global?
5. O Brasil é o país que mais recicla latas de alumínio (98%). No entanto, quando se trata de garrafas PET (politereftalato de etileno), apenas pouco mais da metade é reciclada. O que podemos fazer para evitar que essas embalagens e o lixo que produzimos contribuam para o aumento do aquecimento global?



CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE

1. INTRODUÇÃO

Quando um corpo recebe ou cede certa quantidade de energia térmica, podemos observar, como consequência, uma variação de sua temperatura ou uma mudança em seu estado físico.

A variação de temperatura corresponde a uma variação no estado de agitação das partículas do corpo. Nesse caso, a energia térmica transferida é denominada **calor sensível**. A mudança de estado físico corresponde a uma alteração no estado de agregação das partículas do corpo, fazendo com que um sólido, por exemplo, transforme-se em líquido. A energia térmica responsável pelas mudanças de estado denomina-se **calor latente**.

ThomazSfury/imag



A energia térmica fornecida pela chama do fogão foi utilizada inicialmente para aquecer a chaleira e a água. Quando ocorre a ebulição, observamos vapor de água saindo pelo bico da chaleira. Esse vapor é parte da água que passou para o estado gasoso.

É importante que fique bem clara a diferença entre **calor** e **temperatura**. Calor é a denominação que damos à energia térmica quando, e apenas enquanto, ela se encontra transitando entre dois locais de temperaturas diferentes. A temperatura é o estado termodinâmico de um corpo que associamos ao nível médio de agitação de suas partículas.

2. CAPACIDADE TÉRMICA (C) E CALOR ESPECÍFICO (c)

Se tomarmos um corpo de massa **m** e temperatura inicial θ_1 e fornecermos a ele uma quantidade de calor **Q**, sua temperatura passa a ser θ_2 , sofrendo uma variação correspondente a $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

Define-se **capacidade térmica (C)** ou **capacidade calorífica** desse corpo como:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta}$$

A unidade usual de capacidade térmica é a **caloria por grau Celsius** ($\frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$).

A **capacidade térmica (C)** de um corpo indica a quantidade de calor que ele precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.

Suponha que um corpo precise receber 100 calorias de energia térmica para que sua temperatura aumente em $5,0^\circ\text{C}$. Dividindo o primeiro valor pelo segundo, encontraremos para a **capacidade térmica** desse corpo o valor $20 \text{ cal}/^\circ\text{C}$. Isso significa que, para variar 1°C , ele precisa receber (ou ceder) 20 calorias.

A capacidade térmica por unidade de massa do corpo é denominada **calor específico (c)**, dada usualmente pela unidade $\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$ (lê-se: **caloria por grama grau Celsius**).

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta\theta}$$

O **calor específico (c)** indica a quantidade de calor que cada unidade de massa do corpo precisa receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade.

Se o corpo do exemplo anterior (cuja capacidade térmica é $20 \text{ cal}/^\circ\text{C}$) tivesse 100 g de massa, seu calor específico seria $0,20 \text{ cal}/\text{g}^\circ\text{C}$. Para esse cálculo, dividimos sua capacidade térmica por sua massa.

Note que o calor específico não depende da massa do corpo, pois é uma característica da substância e não do corpo. Nem a capacidade térmica nem o calor

específico sensível de uma substância têm valores constantes com a temperatura. No entanto, para efeito de cálculo, costuma-se usar o valor médio de cada um no intervalo de temperatura considerado.

A água é a substância que mais aparece nos exercícios, sendo usado o valor $1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ para seu calor específico. Isso significa que cada grama de água necessita de 1,0 caloria para sofrer uma variação de temperatura de um grau Celsius.

A tabela a seguir apresenta o calor específico de algumas substâncias.

Calor específico de algumas substâncias

Substância	Calor específico (em cal/g °C)
Alumínio	0,219
Água	1,000
Álcool	0,590
Cobre	0,093
Ferro	0,119
Gelo	0,550
Mercúrio	0,033
Ouro	0,031
Prata	0,056
Vapor de água	0,480
Vidro	0,118

Fonte: <www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/calor.php>. Acesso em: 13 abr. 2016.

3. CALOR SENSÍVEL

Calor sensível é o calor que, recebido ou cedido por um corpo, provoca nele uma variação de temperatura.

Para calcular a quantidade de calor sensível que um corpo recebe (ou cede), usamos a definição de calor específico sensível:

$$c = \frac{Q}{m\Delta\theta} \Rightarrow Q = mc\Delta\theta$$

Essa equação é também denominada **Equação Fundamental da Calorimetria**.

Observe que a variação de temperatura é dada por:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{final}} - \theta_{\text{inicial}}$$

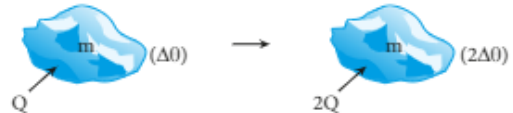
Dessa forma, se a temperatura aumenta, $\theta_f > \theta_i$ e $\Delta\theta > 0$, a quantidade de calor Q é positiva. Se a temperatura diminui, $\theta_f < \theta_i$ e $\Delta\theta < 0$, então Q é negativa.

Considerando o calor específico (c) uma constante

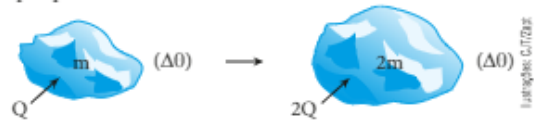
relativa à substância de que é feito o corpo, podemos concluir que, para uma mesma variação de temperatura ($\Delta\theta$), a quantidade de calor (Q) é diretamente proporcional à massa do corpo.

Ainda levando em conta a hipótese anterior, podemos concluir que:

- Para um mesmo corpo, a variação de temperatura é proporcional à quantidade de calor recebido ou cedido por ele.



- Para que corpos constituídos de igual substância sofram a mesma variação de temperatura ($\Delta\theta$), a quantidade de calor recebido ou cedido deve ser proporcional à massa.



4. SISTEMA FÍSICO TERMICAMENTE ISOLADO

A busca do equilíbrio térmico é uma lei natural.

Os corpos tendem a ter a mesma temperatura do ambiente em que se encontram. Assim, o mais "quente" cede calor e o mais "frio" recebe calor.



A jarra da esquerda contém água quente e a da direita, água gelada. Deixando-as sobre uma mesa, a água quente perderá calor para o meio ambiente e a água fria receberá calor. Após algum tempo, ambas estarão na mesma temperatura do meio. Elas atingirão o equilíbrio térmico.

Em alguns casos, porém, as trocas de calor entre o sistema e o meio externo podem ser evitadas. Isso ocorre sempre que o sistema físico é **termicamente isolado**.

Um sistema físico é **termicamente isolado** quando não existe troca de calor entre seus componentes e o meio externo.

É importante observar que, na prática, por melhor que seja o isolamento térmico de um sistema, ele sempre troca calor com o meio externo.

Se você colocar, em uma caixa de isopor, algumas latas de refrigerante sem gelo com outras geladas, perceberá que o isopor irá reduzir a participação do meio externo nas trocas de calor. No entanto, após algum tempo, todas as latas estarão à mesma temperatura, pois terão atingido o **equilíbrio térmico**. Para que isso ocorra, é necessário que os corpos troquem calor entre si, de modo que os de maior temperatura forneçam calor aos de menor temperatura.

Em um sistema termicamente isolado, as trocas de calor ocorrem apenas entre os seus integrantes. Assim, toda a energia térmica que sai de alguns corpos é recebida por outros pertencentes ao próprio sistema, valendo a relação:

$$|\Sigma Q_{\text{cedido}}| = |\Sigma Q_{\text{recebido}}|$$

O somatório das quantidades de calor cedidas por alguns corpos de um sistema tem módulo igual ao do somatório das quantidades de calor recebidas pelos outros corpos desse mesmo sistema.

O uso do módulo na fórmula deve-se ao fato de o calor recebido ser positivo e de o calor cedido ser negativo, podendo-se também escrever essa relação da seguinte forma:

$$\Sigma Q_{\text{cedido}} + \Sigma Q_{\text{recebido}} = 0$$

5. CALORÍMETRO

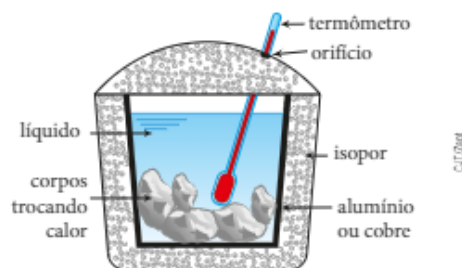
A mistura térmica de dois ou mais corpos, principalmente quando um deles está no estado líquido,

requer um recipiente adequado. Alguns desses recipientes possuem aparatos que permitem obter, de forma direta ou indireta, o valor das quantidades de calor trocadas entre os corpos.

Chamamos de **calorímetro** esse tipo de recipiente.

De modo geral, o calorímetro é metálico (de alumínio ou de cobre) e isolado termicamente por um revestimento de isopor. Em sua tampa, também de isopor, há um orifício pelo qual se introduz o termômetro, que indica a temperatura da mistura em observação.

O calorímetro representado na figura é o mais usado nos laboratórios escolares. Em experimentos que requerem tratamento especial, são usados calorímetros mais sofisticados.



Representação de um calorímetro usual.

Não podemos esquecer que o calorímetro, além de servir como recipiente, também participa das trocas de calor, cedendo calor para seu conteúdo ou recebendo calor dele.

Um calorímetro é denominado **ideal** quando, além de impedir as trocas de calor entre seu conteúdo e o meio externo, não troca calor com os corpos nele contidos. Esse tipo de calorímetro existe somente na teoria, mas aparece com frequência em exercícios. Nesses casos, os enunciados referem-se a ele dizendo que tem **capacidade térmica desprezível**.

QUESTÕES COMENTADAS

1 Uma garrafa térmica contém água a 60 °C. O conjunto garrafa térmica mais água possui capacidade térmica igual a 80 cal/°C. O sistema é colocado sobre uma mesa e, após algum tempo, sua temperatura diminui para 55 °C. Qual foi a perda de energia térmica para o ambiente nesse intervalo de tempo?

RESOLUÇÃO

A energia térmica perdida para o ambiente pode ser determinada pela expressão matemática da capacidade térmica:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} = \frac{Q}{(\theta_{\text{final}} - \theta_{\text{inicial}})}$$

$$80 = \frac{Q}{(55 - 60)} \Rightarrow 80 = \frac{Q}{-5} \Rightarrow Q = -400 \text{ cal}$$

O sinal negativo indica que essa energia saiu do sistema, foi cedida. Portanto, a energia térmica perdida pelo sistema é de 400 cal.

Resposta: 400 cal

2 Para o aquecimento de 500 g de água, de 20 °C para 100 °C, utilizou-se uma fonte térmica de potência 200 cal/s. Sendo o calor específico da água igual a 1,0 cal/g °C, quanto tempo demorou esse aquecimento se o rendimento foi de 100%?

RESOLUÇÃO

A **Equação Fundamental da Calorimetria** estabelece que:

$$Q = m c \Delta\theta$$

A definição de potência determina que:

$$\text{Pot} = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow \text{Pot} \Delta t = Q$$

Assim: $\text{Pot} \Delta t = m c \Delta\theta$

Substituindo os dados fornecidos pela questão, temos:

$$200 \cdot \Delta t = 500 \cdot 1,0 \cdot (100 - 20)$$

Logo: $\Delta t = 200 \text{ s} = 3 \text{ min } 20 \text{ s}$

Resposta: 3 min 20 s

3 Um watt (W) é a potência necessária para produzir a energia de um joule em um segundo. Uma caloria é a quantidade aproximada de energia necessária para elevar em 1,0 °C a temperatura de 1,0 grama de água. Um aquecedor elétrico de potência 1 500 W e capacidade de 135 litros está totalmente cheio com água à temperatura ambiente (20 °C). Quanto tempo o aquecedor gasta para elevar a temperatura dessa água até 60 °C?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C;
densidade absoluta da água = 1,0 kg/L;
1 caloria = 4 joules.

RESOLUÇÃO

Observe que: $\text{Pot} = 1 500 \text{ W} = 1 500 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 375 \text{ cal/s}$

$$d = \frac{m}{V} \Rightarrow m = d V = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \cdot 135 \text{ L} = 135 \text{ kg}$$

Logo: $m = 135 000 \text{ g}$

Usando a **Equação Fundamental da Calorimetria**, temos:

$$Q = m c \Delta\theta$$

Além disso: $\text{Pot} = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow \text{Pot} \Delta t = Q$

Então: $\text{Pot} \Delta t = m c \Delta\theta$

Substituindo os valores fornecidos, temos:

$$375 \cdot \Delta t = 135 000 \cdot 1,0 (60 - 20)$$

$$\Delta t = 14 400 \text{ s} = 240 \text{ min} = 4,0 \text{ h} \Rightarrow \Delta t = 4,0 \text{ h}$$

Resposta: 4,0 h

4 O calor específico do cobre é igual a 0,09 cal/g °C. Se em vez de usarmos a escala Celsius usássemos a escala Fahrenheit, quanto valeria esse calor específico?

RESOLUÇÃO

Da **Equação Fundamental da Calorimetria**, temos:

$$Q = m c \Delta\theta$$

Logo: $\frac{Q}{m} = c \Delta\theta$

Como a razão $\frac{Q}{m}$ não depende da escala termométrica utilizada, temos:

$$(c \Delta\theta)_{\text{Celsius}} = (c \Delta\theta)_{\text{Fahrenheit}}$$

Assim, sendo $\Delta\theta = 100 \text{ °C} = 180 \text{ °F}$, temos:

$$0,09 \cdot 100 = c_f \cdot 180 \Rightarrow c_f = 0,05 \text{ cal/g °F}$$

Resposta: 0,05 cal/g °F

5 Em um recipiente termicamente isolado e com capacidade térmica desprezível, misturam-se 200 g de água a 10 °C com um bloco de ferro de 500 g a 140 °C. Qual é a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C;
calor específico do ferro = 0,12 cal/g °C.

RESOLUÇÃO

Como o recipiente tem capacidade térmica desprezível, ele não participa das trocas de calor. Além disso, como é termicamente isolado, é correto afirmar que:

$$Q_{\text{cedido}} + Q_{\text{recebido}} = 0$$

$$Q_{\text{ferro}} + Q_{\text{água}} = 0$$

Uma vez que o calor trocado é sensível, temos:

$$(m c \Delta\theta)_{\text{ferro}} + (m c \Delta\theta)_{\text{água}} = 0$$

$$500 \cdot 0,12(\theta_E - 140) + 200 \cdot 1,0(\theta_E - 10) = 0$$

$$60(\theta_E - 140) + 200(\theta_E - 10) = 0$$

$$60\theta_E - 8 400 + 200\theta_E - 2 000 = 0$$

$$260\theta_E = 10 400 \Rightarrow \theta_E = 40 \text{ °C}$$

Resposta: 40 °C

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA
NO CADERNO.

6. A massa e o calor específico sensível de cinco amostras (dados fictícios) de materiais sólidos e homogêneos são fornecidos ao lado.

As cinco amostras encontram-se inicialmente à mesma temperatura e recebem quantidades iguais de calor. Qual delas atingirá a maior temperatura?

Amostra	Massa (g)	Calor específico (em cal/g °C)
A	150	0,20
B	50	0,30
C	250	0,10
D	140	0,25
E	400	0,15

7. No interior do Brasil, nas áreas rurais, é comum usarem cavalos, burros e jumentos para transportar pessoas e cargas nas regiões de difícil acesso para os veículos motorizados. Nesses animais são colocadas ferraduras para proteger os cascos e facilitar a locomoção em terrenos difíceis. Os profissionais que fixam as ferraduras, chamados de ferreiros, costumam antes aquecê-las em fogo e, utilizando martelo e bigorna, procuram uniformizá-las, retirando possíveis ondulações existentes. Após esse procedimento, as ferraduras são resfriadas em um balde contendo água à temperatura ambiente. Observe a ilustração a seguir.



Durante as férias de meio de ano, um estudante de Física, retornando a sua casa em uma dessas regiões, observou um ferreiro trabalhando e pediu licença a ele para fazer algumas medições. Pegou um termômetro e mediu a temperatura de uma ferradura aquecida, a temperatura da água no balde (antes do mergulho) e depois a temperatura da água no equilíbrio térmico. Com as anotações, ele observou que a variação da temperatura da água do balde era muito menor que a variação de temperatura sofrida pela ferradura. Como você explica esse fato?

8. A energia utilizada para a manutenção e o desempenho do corpo humano é obtida por meio dos alimentos que são ingeridos. O quadro a seguir mostra a quantidade média de energia absorvida pelo corpo humano a cada 100 gramas do alimento ingerido.

Alimento	Porção (100 g)	Energia (kcal)
Alface	20 folhas	15
Batata frita	2 unidades	274
Chocolate em barra	1 tablete	528
Macarrão cozido	7 colheres de sopa	111
Mamão	1 fatia	32
Margarina vegetal	20 colheres de chá	720
Pão	2 fatias	269
Refrigerante	1/2 copo	39
Repolho cru	10 folhas	28
Sorvete industrializado	2 bolas	175

Dados: 1 caloria = 4,2 joules;
calor específico sensível da água = 1,0 cal/g °C.

Analisando o quadro, podemos concluir que, em termos energéticos:

- o chocolate é o alimento mais energético entre os listados.
- uma fatia de mamão equivale, aproximadamente, a 10 folhas de alface.
- um copo de refrigerante fornece uma energia de, aproximadamente, 328 J.
- 0,50 kg de sorvete é equivalente a, aproximadamente, 320 g de batatas fritas.
- um sanduíche com 2 fatias de pão, 2 folhas de alface e 2 folhas de repolho equivale a 1 unidade de batata frita.

9. O chamado leite longa vida é pasteurizado pelo processo UHT (*Ultra High Temperature*), que consiste em aquecer o leite da temperatura ambiente (22 °C) até 137 °C em apenas 4,0 s, sendo em seguida envasado em embalagem impermeável a luz e a micro-organismos.

O calor específico do leite é praticamente igual ao da água, 1,0 cal/g °C. Assim, no aquecimento descrito, que quantidade de calor cada litro (1000 g) de leite precisou receber? Dê sua resposta em quilocalorias (kcal).

10. Você sabia que uma barra de chocolate de 100 g pode fornecer ao nosso organismo 500 calorias alimentares (kcal)? Usando esse dado e os seus conhecimentos de Física, responda:

- Se você pudesse transferir essa energia (da barra de chocolate) para m gramas de água a 0 °C, na fase líquida, e esta atingisse a temperatura de ebulição (100 °C), qual seria o valor de m ?

Dado: calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

- Se uma pessoa de massa 70 kg ingerisse essa barra de chocolate e utilizasse toda essa energia para subir uma escada com degraus de 20 cm de altura, quantos degraus poderia subir?

Dados: aceleração da gravidade = 10 m/s²;
1,0 cal = 4,2 J.

11. Os organismos homeotermos devem manter-se aquecidos e, por isso, precisam ingerir alimentos que são transformados em energia. Parte dessa energia mantém a temperatura do corpo compensando a perda de calor para o meio ambiente. Em repouso, o ser humano dissipa cerca de 100 W quando está descansando. Se estiver em atividade física, pode perder bem mais. Um homem ou uma mulher de cerca de 70 kg, que realize atividades físicas consideradas normais, necessita diariamente de 3 500 kcal em média, o que corresponde a ingerir cerca de 2 kg de alimentos em um dia, algo em torno de 3% da sua massa.

Observe a seguir a quantidade aproximada diária de alimento a ser consumida por alguns organismos.



Pássaro: duas vezes sua massa.



Rato: metade de sua massa.



Ser humano: 3% de sua massa.



Cavalo: 1,5% de sua massa.
Elementos sem proporção entre si.

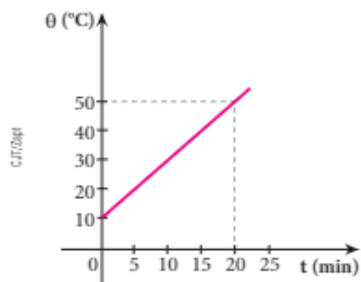
Note que um pequeno rato precisa consumir diariamente uma quantidade de alimentos correspondente a 50% de sua massa. É pela superfície do corpo que se perde a maior parte do calor. Nos cães essa perda ocorre por meio da língua.

Determine, em watt, a taxa média de perda de energia por um corpo humano que consome diariamente 3 500 kcal.

Dado: 1 cal = 4 J.

12. Uma fonte térmica foi utilizada para o aquecimento de 1,0 L de água (1 000 g) da temperatura ambiente (20 °C) até o ponto de ebulição (100 °C) em um intervalo de tempo igual a 1 min 40 s com rendimento de 100%. Sendo o calor específico da água igual a 1,0 cal/g °C, qual o valor da potência dessa fonte?

13. Uma fonte térmica de potência constante fornece 50 cal/min para uma amostra de 100 g de uma substância. O gráfico abaixo fornece a temperatura em função do tempo de aquecimento desse corpo.



Qual o valor do calor específico do material dessa substância?

14. Um bom chuveiro elétrico, quando ligado na posição "inverno", dissipa uma potência de 6,4 kW, fornecendo essa energia à água que o atravessa com vazão de 50 gramas por segundo. Se a água, ao entrar no chuveiro, tem uma temperatura de 23 °C, qual a sua temperatura na saída?

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C; 1 cal = 4 J.

15. O aumento do número de pessoas com acesso a recursos que proporcionam uma vida mais confortável torna indispensável o empenho de todos em adquirir hábitos que resultem em uma economia de água e de energia elétrica.

Segundo pesquisas, um banho de chuveiro em uma residência demora em média 15 minutos e são gastos 45 litros de água. Porém, se a pessoa tomar um banho "econômico", fechando o registro ao se ensaboar, o tempo do chuveiro ligado cai para 5 minutos e o consumo de água para 15 litros. Com base nessas informações e sabendo que a variação de temperatura da água ao passar pelo chuveiro é de 15 °C, determine:

a) a quantidade de calor, em calorias, utilizada para o aquecimento da água no banho "econômico";

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C;
massa específica da água = 1,0 kg/L.

b) a economia de energia elétrica, em Joules, ao optar pelo banho "econômico".

Dado: 1 cal = 4,18 J.

16. Em um recipiente termicamente isolado e de capacidade térmica desprezível, são misturados 200 g de água a 55 °C com 500 g também de água a 20 °C. Quando a mistura atingir o equilíbrio térmico, qual será sua temperatura?

17. Em uma garrafa térmica ideal, com 1,0 L de capacidade, são colocados 500 cm³ de leite, à temperatura ambiente (20 °C), e 200 cm³ de café a 90 °C. Admitindo-se que as trocas de calor somente aconteçam entre o café e o leite (cujas densidades e calores específicos podem ser considerados iguais), qual será a temperatura final de equilíbrio térmico do sistema?

18. Uma dona de casa coloca no interior de uma garrafa térmica o café que acabou de preparar. São 500 g de água adicionados ao pó de café a 90 °C. Se a garrafa térmica estava à temperatura ambiente (12 °C) e atinge o equilíbrio térmico a 87 °C, qual é a capacidade térmica dessa garrafa?

Dado: calor específico da água + pó de café = 1,0 cal/g °C.

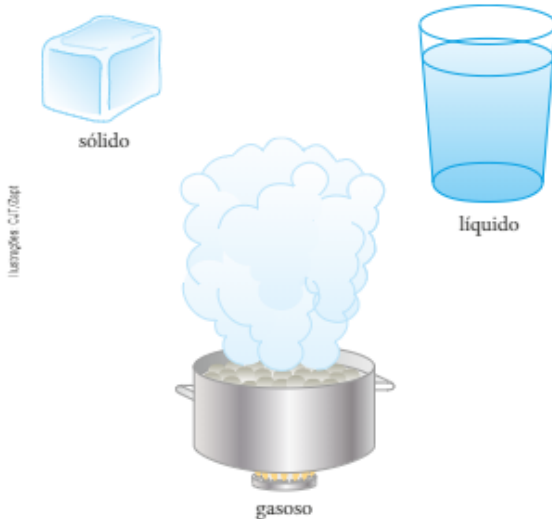
19. Para avaliar a temperatura de 300 g de água, usou-se um termômetro de 100 g de massa e calor específico sensível igual a 0,15 cal/g °C. Inicialmente, esse termômetro indicava, à temperatura ambiente, 12 °C. Após algum tempo, colocado em contato térmico com a água, o termômetro passa a indicar 72 °C. Supondo não ter havido perdas de calor, determine a temperatura inicial da água.

Dado: calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

6. AS MUDANÇAS DE ESTADO FÍSICO

Dependendo de como estão agregadas as suas partículas, uma substância pode ser encontrada em três estados físicos fundamentais: sólido, líquido e gasoso.

Observe a representação da água nos três estados físicos:



No **estado sólido**, as partículas de uma substância não têm grande liberdade de movimentação e não vão além de vibrações em torno de posições definidas. Assim, os sólidos possuem volume e forma bem definidos.

No **estado líquido**, há maior liberdade de agitação das partículas de uma substância do que no estado sólido, mas elas ainda apresentam uma coesão considerável. Assim, os líquidos possuem volume bem definido, porém forma variável, ou seja, a forma é a do recipiente que os contém.

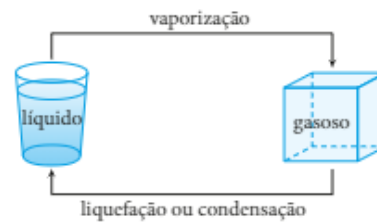
No **estado gasoso**, as partículas de uma substância estão afastadas umas das outras o suficiente para que as forças de coesão entre elas sejam muito fracas. Por isso, elas se movimentam com liberdade muito maior do que no estado líquido. Substâncias no estado gasoso (vapores e gases) não possuem volume nem forma definidos.

Quando uma substância, em qualquer um dos estados físicos, recebe ou cede energia térmica, pode sofrer uma alteração na forma de agregação de suas partículas, passando de um estado para outro. Essa passagem corresponde a uma mudança de seu estado físico.

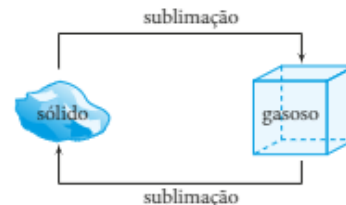
Vejamos as possíveis mudanças de estado.



A **fusão** é a passagem do estado sólido para o líquido. A transformação inversa dessa passagem é a **solidificação** .



A **vaporização** é a passagem do estado líquido para o gasoso. A transformação inversa dessa passagem é a **liquefação** (ou **condensação**).



A **sublimação** é a passagem do estado sólido para o gasoso, sem que determinada substância passe pela fase intermediária, a líquida. A transformação inversa também é denominada **sublimação** .

Entre essas transformações, as que ocorrem por recebimento de calor são denominadas **transformações endotérmicas** . São elas: a fusão, a vaporização e a sublimação (sólido \rightarrow gasoso).

A solidificação, a liquefação e a sublimação (gasoso \rightarrow sólido) são **transformações exotérmicas** , já que ocorrem por perda de calor.

É importante observar que a quantidade de calor que cada unidade de massa de uma substância precisa receber para sofrer alteração em sua fase de agregação, mudando seu estado, é igual à que precisa ceder para sofrer a transformação inversa, à mesma temperatura.

7. CALOR LATENTE

Vimos que o calor sensível produz variação de temperatura, enquanto o calor latente causa mudança de estado físico em um corpo. Podemos afirmar que **calor sensível** é a denominação dada à energia térmica que altera a energia cinética de translação das partículas, estando essa energia cinética diretamente ligada à temperatura do sistema físico.

Calor latente é a energia térmica que se transforma em energia potencial de agregação. Essa transformação pode alterar o arranjo físico das partículas do sistema e provocar uma mudança de estado, sem, no entanto, alterar a temperatura.

Observemos que **energia térmica** é a energia (cinética) que provoca a agitação das partículas de um corpo mais a energia (potencial) de agregação, que estabelece o estado físico desse corpo.

Para um determinado estado de agregação (líquido, por exemplo), existe um limite para o estado de agitação (temperatura) das partículas de um corpo.

Esse limite corresponde à temperatura de mudança de estado físico, que depende da substância de que é feito o corpo e da pressão exercida sobre ele. A água, por exemplo, sob pressão normal, sofre mudanças de estado físico a 0 °C e a 100 °C. Essas são suas temperaturas de fusão-solidificação e de vaporização-liquefação, respectivamente.

Experimentalmente podemos concluir que a quantidade de calor necessária para provocar uma mudança de estado é diretamente proporcional à massa da porção da substância que sofreu a transformação.

Assim, sendo **m** a massa de um corpo que necessita de uma quantidade **Q** de calor para sofrer uma total mudança de estado, vale a expressão:

$$\frac{Q}{m} = L \Rightarrow Q = m L$$

A grandeza **L** é denominada **calor latente**, sendo característica do material de que é feito o corpo, da mudança de estado pela qual ele passa e da temperatura a que ocorre essa mudança. Para a água, por exemplo, o calor latente de fusão-solidificação a 0 °C vale 80 cal/g enquanto o de vaporização-liquefação a 100 °C vale 540 cal/g aproximadamente.

Assim, podemos dizer que:

- o calor latente de fusão-solidificação de uma substância indica a quantidade de calor que cada uni-

dade de massa precisa receber para que ocorra sua fusão ou ceder para que ocorra sua solidificação;

- o calor latente de vaporização-liquefação de uma substância indica a quantidade de calor que cada unidade de massa precisa receber para que ocorra sua vaporização ou ceder para que ocorra sua liquefação.

A denominação sensível ou latente dada ao calor recebido ou cedido por um corpo depende do efeito produzido por ele.



A figura representa uma barra de ferro que perde calor sensível (diminui de temperatura) para um bloco de gelo a 0 °C, que derrete. Assim, para o gelo, esse calor recebido é do tipo latente, já que produziu nele uma mudança de estado e não uma variação de temperatura.

8. FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO

Consideremos um bloco de gelo de massa **m**, inicialmente a -20 °C, sob pressão normal. Quando fornecemos calor a esse gelo, suas partículas absorvem energia, com conseqüente aumento de temperatura.

Esse processo tem um limite, isto é, existe uma temperatura em que a estrutura molecular da substância não consegue se manter – é a temperatura de fusão. Ao se atingir tal temperatura, a energia recebida deixa de provocar aumento na agitação das partículas e passa a mudar a estrutura física da substância, tornando-a líquida. Esse processo é denominado **fusão**, e a energia recebida passa a ser armazenada como energia potencial. Se, depois que mudar de estado, a substância continuar a receber calor, sua temperatura aumentará.

É importante destacar que a temperatura de fusão de uma substância pura é bem determinada, dependendo apenas da substância e da pressão a que está sujeita. Para evitar complicações desnecessárias, admitiremos, em nosso estudo, que a pressão permaneça constante durante todo o processo de mudança de estado físico.

Supondo que o bloco de gelo citado anteriormente seja aquecido de -20 °C até 40 °C, vamos analisar por partes esse aquecimento.

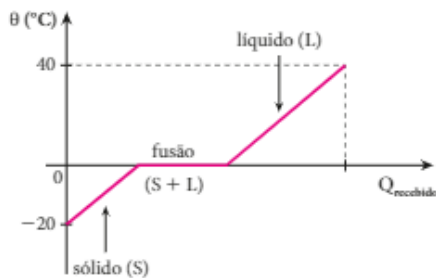


Para calcular o total de calor (Q) recebido pelo sistema, usamos as fórmulas do calor sensível e do calor latente, já vistas.

$$\text{Assim, temos: } Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}} + (m L_F)_{\text{gelo}} + (m c \Delta\theta)_{\text{água}}$$

Esse processo pode ser representado graficamente pela **curva de aquecimento**:



O trecho correspondente ao patamar indica a mudança de estado físico (fusão), pois a energia recebida não produziu variação de temperatura, e sim mudança do estado de agregação das partículas do corpo.

Como você já sabe, o processo inverso da fusão é a **solidificação**.

Para entender como se dá essa transformação, vamos retomar o exemplo anterior, considerando que a água (a 40 °C) volte a ser gelo (a -20 °C). Para que isso ocorra, é necessário que seja retirado calor dessa água. Com isso, a energia cinética de translação de suas partículas vai diminuindo, ou seja, sua temperatura vai reduzindo. No entanto, essa redução cessará quando a água atingir 0 °C. A partir daí, se continuarmos a retirar calor, as moléculas se recomporão na estrutura característica do estado sólido, diminuindo a energia potencial de agregação, sem prejuízo da temperatura.

Se, após a recomposição molecular (solidificação), continuarmos a retirar calor da água, a temperatura voltará a diminuir. Esse resfriamento é esquematizado a seguir.

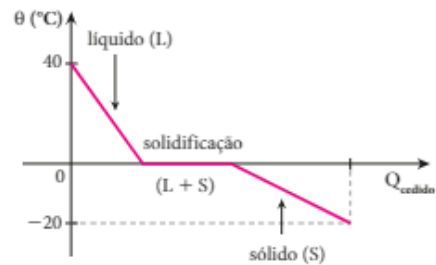


A quantidade total de calor (Q) cedida (ou retirada) é dada por: $Q = Q_3 + Q_2 + Q_1$

$$Q = (m c \Delta\theta)_{\text{água}} + (m L_S)_{\text{água}} + (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}}$$

Os módulos de L_S e L_F são iguais, porém convencionalmente L_F positivo (calor recebido) e L_S negativo (calor cedido).

A **curva de resfriamento** é representada a seguir:



Tudo o que foi explicado sobre a fusão e a solidificação do gelo vale para a maioria das substâncias.

A tabela a seguir contém os calores latentes de fusão (L_F) e as temperaturas de fusão (θ_F), em pressão atmosférica normal, de algumas substâncias.

Calor latente e temperatura de fusão de algumas substâncias

Substância	L_F (cal/g)	θ_F (°C)
Água (H_2O)	80	0
Alumínio (Al)	95	659
Cobre (Cu)	49	1083
Ferro (Fe)	64	1535
Mercúrio (Hg)	2,7	-39

Fonte: <www.if.ufrgs.br/cref/amees/tabela.html>. Acesso em: 13 abr. 2016.

9. LIQUEFAÇÃO E VAPORIZAÇÃO

Em nosso dia a dia, é comum observarmos fenômenos que envolvam liquefação ou vaporização, principalmente da água.

Lembremo-nos de que: **liquefação** ou **condensação** é a passagem de uma substância do estado gasoso para o estado líquido. Esse processo é **exotérmico**, isto é, ocorre com liberação de calor.

Como exemplos desse fenômeno, podemos citar os azulejos molhados de um banheiro depois que tomamos um banho quente; uma garrafa de refrigerante, que fica molhada em sua superfície externa após ter sido retirada da geladeira; a “fumaça” que se forma perto de nossa boca quando falamos em um dia muito frio; os vidros embaçados de um automóvel quando estão fechados em um dia de chuva.



Por que os copos “transpiram”?

Quando você coloca um líquido bem gelado em um copo de vidro, na face externa do recipiente aparecem gotas de água que escorrem. O copo que estava seco apresenta agora uma “transpiração”. Como isso ocorre?

O ar que respiramos apresenta vapor de água em sua composição, cujo percentual é indicado pela umidade relativa do ar.

Se você pegar um copo de vidro seco e colocar água bem gelada em seu interior, a parede externa do copo será resfriada. O ar em contato com essa superfície fria perderá calor e o vapor de água nele existente vai se condensar.

Portanto, a água que escorre pela parte externa do copo é o vapor que estava no ar e foi condensado.



Lembremos ainda que: **vaporização** é a passagem de uma substância do estado líquido para o estado gasoso. Esse processo é **endotérmico**, isto é, ocorre com recebimento de calor.

Como exemplos desse fenômeno, podemos lembrar da água fervendo em uma chaleira, quando vamos preparar um café; do álcool, que, se for colocado em uma superfície, lentamente vai “desaparecendo”; do éter em um recipiente de vidro destampado, que se volatiliza rapidamente.



A água está sendo aquecida na panela de vidro. Quando essa água atinge a temperatura máxima para o estado líquido (temperatura de ebulição), a energia recebida passa a provocar a passagem de partículas para o estado gasoso. Como isso ocorre no interior do líquido, essas bolhas de vapor sobem e estouram na superfície, liberando o vapor para o meio externo.

Os dois principais processos de vaporização são a **ebulição** e a **evaporação**.

Ebulição

Quando fornecemos calor a uma substância que se encontra no estado líquido, aumentamos a energia de agitação de suas partículas, isto é, elevamos sua temperatura. Entretanto, dependendo da substância e da pressão a que está sujeita, existe um limite de aumento de temperatura, além do qual a estrutura molecular do

líquido sofre mudanças. A partir dessa temperatura-limite, a energia recebida pelo líquido é usada para a mudança na estrutura molecular, e o líquido é transformado em vapor. Esse fenômeno é chamado **ebulição**.

A maior parte da massa líquida participa desse processo, ocorrendo rápida produção de vapores em muitos pontos desse líquido. Esses vapores e gases existentes no interior do líquido se expandem e, ao escaparem pela superfície, proporcionam a agitação violenta que é observada.

É importante destacar que existe uma temperatura determinada para a ebulição de um líquido. Essa temperatura depende apenas da natureza do líquido e da pressão a que ele está sujeito.

É de verificação experimental que a pressão atmosférica varia de local para local, diminuindo quando a altitude aumenta. Por isso, a temperatura de ebulição de uma substância, que depende da pressão, também varia de local para local, aumentando conforme aumenta a pressão. Esse fato ocorre porque, sob pressões maiores, o escape dos vapores torna-se mais difícil.

Por exemplo: em Santos (SP), ao nível do mar, a água entra em ebulição a 100 °C. No pico do Monte Everest, cuja altitude aproximada é de 8 882 m, o ponto de ebulição da água é 71 °C; em Brasília (DF), cerca de 1 152 m acima do nível do mar, a água ferve a 96 °C. Esse fenômeno acontece a 101 °C ao nível do Mar Morto, a aproximadamente -395 m de altitude.

Da observação desse fato, o ser humano inventou a panela de pressão, que, por causa do aumento de pressão, faz a água ferver a uma temperatura mais elevada do que se estivesse em um recipiente destampado, permitindo assim o cozimento mais rápido dos alimentos.

A fusão dos sólidos de estrutura cristalina e a ebulição dos líquidos em geral obedecem a três leis básicas:

1ª Lei

Para determinada pressão, cada substância pura possui uma temperatura de fusão e outra de ebulição.

Sob pressão normal, por exemplo, a água sofre fusão a 0 °C e entra em ebulição a 100 °C, enquanto o álcool se solidifica a -117,3 °C e entra em ebulição a 78,5 °C.

2ª Lei

Para a mesma substância pura, as temperaturas de fusão e de ebulição variam com a pressão.

A água ao nível do mar (altitude zero), por exem-

plo, entra em ebulição a 100 °C e, em São Paulo (cerca de 731 metros de altitude), a aproximadamente 98 °C.

3ª Lei

Se durante a fusão ou a ebulição de uma substância pura a pressão permanecer constante, sua temperatura também permanecerá constante.

Salvo instrução em contrário, consideraremos que durante a mudança de estado de uma substância pura a pressão permanece constante e igual à pressão atmosférica normal.

Para melhor entendermos as etapas do aquecimento de uma substância pura qualquer, vamos considerar um bloco de gelo de massa m sendo aquecido de -20 °C a 120 °C, sob pressão normal.



Por que a panela de pressão cozinha mais rápido os alimentos?

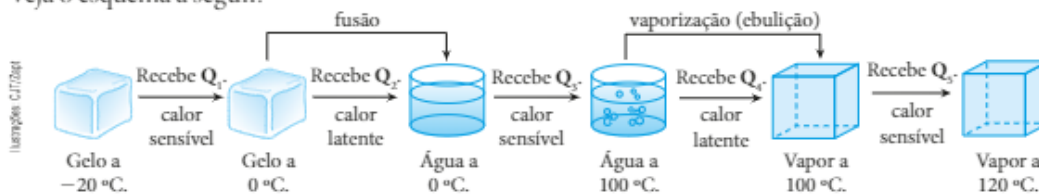
A panela de pressão cozinha muito mais rápido os alimentos porque a água, confinada no interior da panela, fica sujeita a uma pressão maior do que a pressão atmosférica, entrando em ebulição a temperaturas superiores a 100 °C. Estando a uma temperatura maior, o alimento cozinha mais depressa.

O inventor dessa panela foi o físico Denis Papin (1647-1712), que, em 1697, ao ser empossado como membro da Sociedade Real de Ciências da Inglaterra, preparou um jantar com uma panela diferente, fechada, para impressionar seus futuros colegas. Papin sabia do perigo de aquecer água em um recipiente fechado, pois a força exercida pelo vapor aquecido poderia "explodir" o recipiente. Por isso, ele criou uma válvula que permitia o escape de parte desse vapor, evitando que a pressão passasse de certo valor-limite. Evidentemente, esse sistema era rústico, mas serviu de modelo para as panelas que utilizamos atualmente.

Nas modernas panelas de pressão, a válvula permite a saída de vapor de água quando a pressão interna de vapor atinge valores próximos de 2,0 atm. Essa pressão interna é mantida quase constante, e a água entra em ebulição a aproximadamente 120 °C. Isso traz economia no tempo de cozimento dos alimentos.



Veja o esquema a seguir.

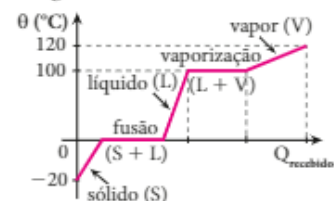


Evidentemente, à temperatura de 120 °C, não teremos mais gelo, e sim vapor de água.

Sendo L_f o calor latente de fusão; L_v o calor latente de vaporização; c_g o calor específico do gelo; c_a o calor específico da água e c_v o calor específico do vapor, podemos escrever: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$.

$$Q = (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}} + (m L_f)_{\text{gelo}} + (m c \Delta\theta)_{\text{água}} + (m L_v)_{\text{água}} + (m c \Delta\theta)_{\text{vapor}}$$

Graficamente, o evento está representado na figura ao lado.



Evaporação

A **evaporação**, ao contrário da ebulição, não depende de uma temperatura determinada para acontecer. É um processo lento, que ocorre apenas na superfície livre de um líquido.

Nesse processo, as partículas que escapam são aquelas que têm energia cinética maior que a da maioria, energia suficiente para se livrarem das demais moléculas do líquido. Por causa disso, a energia média das partículas remanescentes e a temperatura do líquido diminuem.

A rapidez com que ocorre a evaporação de um líquido depende de cinco fatores:

1º) Natureza do líquido

Os líquidos mais voláteis evaporam mais rapidamente. O éter, por exemplo, nas mesmas condições, evapora mais rápido que a água.

2º) Temperatura

O aumento da temperatura favorece a evaporação. Apesar de a evaporação não depender da temperatura para acontecer (a água, por exemplo, evapora tanto a 5 °C como a 30 °C ou a 80 °C), podemos observar que a 80 °C a água evapora mais depressa do que a 30 °C, e mais ainda do que a 5 °C.

3º) Área da superfície livre

Já que a evaporação ocorre apenas na superfície livre do líquido, quanto maior for essa superfície livre, mais rápida será a evaporação.

4º) Pressão na superfície livre

Um aumento de pressão na superfície livre dificulta o escape das partículas do líquido, diminuindo a rapidez da evaporação. Sob uma pressão menor, é maior a evaporação.

5º) Pressão de vapor do líquido

A quantidade de vapor do próprio líquido já existente nas proximidades de sua superfície livre influi na rapidez da evaporação, fato que abordaremos no item a seguir.



Pantanal-MS.

Em regiões quentes, onde existe água em amplas superfícies livres, a precipitação pluviométrica também é grande. A evaporação da água é mais rápida, formando nuvens que se precipitam em forma de chuva. É por isso que nesses locais a vegetação é mais abundante.



Por que a água permanece mais fria em moringas de barro?

Hoje, com a utilização de aparelhos elétricos que refrigeram a água, as moringas de barro estão desaparecendo em regiões de grande densidade populacional, onde a energia elétrica é acessível à grande maioria das pessoas. São geladeiras e bebedouros que refrigeram a água, tornando-a mais fria do que o ambiente.

No entanto, em regiões mais afastadas, onde a energia elétrica não chega, em geral são usadas moringas de barro para manter a água mais fria.



Moringa de barro.

A argila utilizada na confecção dessas moringas, após cozida em forno especial, resulta em um material poroso, de razoável dureza e rígido suficientemente para não quebrar facilmente. A água penetra pelas porosidades do material até alcançar a superfície externa e evapora.

Como vimos, a evaporação é um processo endotérmico em que apenas as partículas de maior energia escapam. Se ficam as partículas de menor energia, a água no interior da moringa apresenta temperatura menor do que a do ambiente. Se em vez de barro a moringa fosse feita de vidro, a água do seu interior estaria em equilíbrio térmico com o meio.

Usando o mesmo princípio, você pode resfriar uma latinha de suco usando papel toalha molhado. Basta envolver a latinha no papel toalha molhado e colocá-la em local fresco. Enquanto a água evapora, o líquido do interior da latinha fica mais frio.

10. PRESSÃO DE VAPOR

Considere um recipiente cilíndrico, transparente e dotado de um êmbolo. Vamos supor que a temperatura do sistema seja constante.

Imaginemos que haja, dentro desse recipiente, um líquido bastante volátil, o éter, por exemplo. Inicialmente, o êmbolo está em contato direto com a superfície livre do líquido.

Quando levantamos o êmbolo, a região de vácuo que se forma entre ele e o líquido começa a ser ocupada por partículas desse líquido, que vaporiza. Algumas dessas partículas, no entanto, acabam sendo recapturadas pelo líquido. No início, o número de partículas que saem é maior que o das que voltam ao líquido. A partir de determinado instante, entretanto, o aumento da concentração de vapor vai provocar um equilíbrio dinâmico, quando o número de partículas que voltam para o líquido torna-se igual ao das que saem, em cada unidade de tempo.

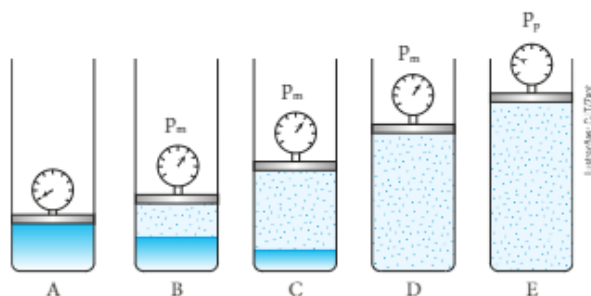
Atingida a situação de equilíbrio, o ambiente gasoso fica saturado desse vapor, denominado **vapor saturante**, e sua pressão para de aumentar, sendo chamada de **pressão máxima de vapor** (p_m).



Se levantarmos um pouco mais o êmbolo, observaremos que o equilíbrio vapor/líquido será rompido. Voltará a acontecer vaporização, uma vez que a quantidade de líquido torna a diminuir. Isso se dá até que novamente se estabeleça o equilíbrio dinâmico entre o vapor e o líquido, e a pressão, que temporariamente diminuiu, volte ao seu valor máximo.

É evidente que, se o tubo for suficientemente longo, quando levantarmos o êmbolo, a situação descrita se repetirá até que a última gota de líquido evapore. A partir daí, a elevação do êmbolo provocará uma queda da pressão, e ela não voltará mais ao valor máximo, já que não existe mais líquido para vaporizar. O vapor, nessas condições, é denominado **vapor não saturante**.

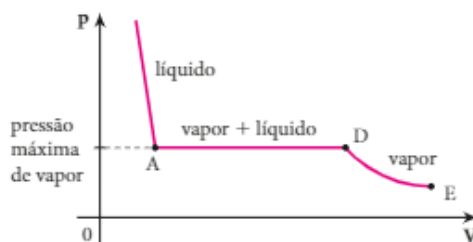
Resumindo e esquematizando o experimento descrito com o éter, a uma temperatura θ constante, temos:



- A – Situação inicial.
- B – Situação de equilíbrio entre vapor e líquido. O vapor é saturante e a pressão é a pressão máxima de vapor (p_m).
- C – Situação idêntica à anterior (observe que a quantidade de líquido diminuiu).
- D – Supondo que esta seja a situação em que a última gota de líquido vaporiza, temos pressão máxima de vapor e vapor saturante seco, uma vez que não existe mais a fase líquida.
- E – Situação a partir da qual a pressão do vapor passa a diminuir quase na razão inversa do volume. Temos aí vapor não saturante. A pressão é menor que a máxima, sendo denominada pressão parcial de vapor (p_p).

Se, a partir da situação E, em que temos vapor não saturante, resolvermos comprimir o vapor, descendo o êmbolo, notaremos que a pressão aumentará, quase na razão inversa do volume. Entretanto, isso será observado somente até a situação D, quando a pressão atingirá seu valor máximo. A partir daí, por mais que o vapor seja comprimido, sua pressão não mais aumentará, mantendo-se igual à máxima (p_m). Ocorrerá liquefação, até que, na situação A, todo o vapor terá se transformado em líquido. Se continuarmos a compressão, a variação de volume do líquido será insignificante, uma vez que os líquidos são praticamente incompressíveis.

No gráfico a seguir, representamos a variação da pressão (p) do vapor em função do respectivo volume (V).



O valor da pressão máxima de vapor depende de dois fatores: da substância e da temperatura em que foi realizado o experimento. Essa pressão máxima de vapor se eleva com a temperatura.

Com base no estudo que realizamos até agora, podemos estabelecer duas conclusões importantes:

- 1ª) A rapidez da evaporação anula-se quando o ambiente gasoso se torna saturado pelo vapor do líquido. Contudo essa rapidez será tanto maior quanto menor for a pressão do vapor lá existente.
- 2ª) A ebulição ocorre à temperatura em que a pressão máxima de vapor do líquido se iguala à pressão ambiente. A pressão máxima do vapor de água, por exemplo, é igual a 760 mmHg

a 100 °C. Por isso, em pressão atmosférica normal (760 mmHg), a água entra em ebulição a 100 °C. Já no pico do Monte Everest, por exemplo, onde a pressão atmosférica vale aproximadamente 240 mmHg (em razão da altitude), a água entra em ebulição a 71 °C, temperatura em que sua pressão máxima de vapor também é de 240 mmHg.

Note, então, que um líquido entra em ebulição sempre que a pressão externa exercida em sua superfície se torna igual à sua pressão máxima de vapor.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

A chuva e a umidade relativa do ar

A chuva é uma precipitação atmosférica constituída de gotas de água, que podem limpar o ar poluído, refrescar um dia muito quente ou mesmo promover o desenvolvimento de plantas, como as flores que embelezam o mundo ou aquelas com as quais nós e outros animais nos alimentamos.

Quando em excesso, a chuva pode provocar inundações, capazes de destruir o que foi construído pelo ser humano e causar a morte de diversos seres vivos.



Córrego transbordando por conta do excesso de chuva. Franca, SP. Janeiro de 2015.

Afinal, como ocorre esse fenômeno físico chamado chuva?

Na superfície da Terra, existe uma grande quantidade de água nos oceanos, mares, rios e lagos. Na evaporação, o vapor é misturado ao ar existente na região. A concentração desse vapor define o estado higrométrico ou umidade da atmosfera.

A **umidade relativa do ar** (U) é a razão entre a massa de vapor de água (m) existente em certo volume de ar e a massa de vapor de água (M) que provocaria a saturação desse volume de ar, na mesma temperatura. O valor da grandeza U também pode ser determinado por meio da razão entre a pressão exercida pelo vapor existente no ar (P_{parcial}) e a pressão (ou tensão) máxima possível de vapor ($P_{\text{máx}}$), na temperatura considerada.

$$U = \frac{m}{M} = \frac{P_{\text{parcial}}}{P_{\text{máx}}}$$

Observemos que o máximo valor de U é a unidade. Isso ocorre quando o ar está saturado de vapor de água e $m = M$. Se $U = 0,30$, por exemplo, devemos entender que o vapor de água existente naquele volume de ar corresponde a 30% do vapor que ocasionaria sua saturação.

Ao ocorrer a saturação de certo volume de ar, o vapor de água excedente se condensa e se precipita em forma de neblina ou de pequenas gotas de água, a chuva. A quantidade de água que o ar é capaz de absorver, antes da saturação, depende da temperatura, aumentando progressivamente com ela.



Criança divertindo-se com as gotas da chuva.

É interessante observar que o ser humano se sente melhor em local de baixa umidade, mesmo em temperaturas elevadas. Em um ambiente onde o ar é mais seco (baixa umidade), a sudorese é muito menor e a evaporação do suor é mais rápida, causando maior resfriamento da pele. Nessas condições, a pessoa pode suportar temperaturas superiores a 37 °C. Já em um ambiente de grande umidade, a sudorese é maior e o suor demora a evaporar, ocasionando bastante desconforto. Nessas condições, uma temperatura de 25 °C pode parecer sufocante para as pessoas. O conforto, portanto, depende tanto da temperatura quanto da umidade relativa do ar.

QUESTÕES COMENTADAS



20 Quanto de calor necessitam receber 100 g de gelo para serem aquecidos de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

A pressão atmosférica é constante e normal.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

RESOLUÇÃO

Sabemos que o gelo sofre fusão a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; portanto, devemos considerar o aquecimento do bloco de gelo por etapas.

Q_1 = quantidade de calor que o gelo recebeu para atingir $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor sensível).

Q_2 = quantidade de calor que o gelo recebeu para se fundir (calor latente).

Q_3 = quantidade de calor que a água, proveniente da fusão do gelo, recebeu para atingir $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor sensível).

Assim: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$$Q = (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}} + (m L_F)_{\text{gelo}} + (m c \Delta\theta)_{\text{água}}$$

Substituindo os valores numéricos fornecidos, temos:

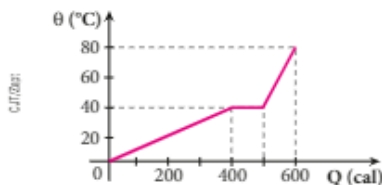
$$Q = 100 \cdot 0,50 [0 - (-30)] + 100 \cdot 80 + 100 \cdot 1,0 (10 - 0)$$

$$Q = 100 \cdot 0,50 \cdot 30 + 100 \cdot 80 + 100 \cdot 10$$

$$Q = 1500 + 8000 + 1000 \Rightarrow Q = 10500\text{ cal}$$

Resposta: 10500 cal

21 Um professor de Física recebeu de um aluno uma amostra de 50 gramas de um sólido. Foi para o laboratório, provocou um aquecimento contínuo e representou os dados obtidos em um diagrama temperatura (θ) \times quantidade de calor recebido (Q).



A partir dos dados que podem ser retirados do diagrama, responda:

- O que ocorre no intervalo entre 400 cal e 500 cal de calor recebido?
- Quais os valores dos calores específico e latente nos três trechos representados no diagrama?

RESOLUÇÃO

a) Fusão. Nesse intervalo, o corpo recebe calor sem alteração em sua temperatura.

b) No estado sólido: $Q = m c \Delta\theta$

$$400 = 50 c_s (40 - 0) \Rightarrow c_s = 0,20\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$$

Na fusão (patamar): $Q = m L$

$$500 - 400 = 50 L_F \Rightarrow L_F = 2,0\text{ cal/g}$$

No estado líquido: $Q = m c \Delta\theta$

$$600 - 500 = 50 c_L (80 - 40) \Rightarrow c_L = 0,05\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$$

Respostas: a) Fusão. O corpo recebe calor e a temperatura não varia. b) $0,20\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$; $2,0\text{ cal/g}$; $0,05\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$

22 Uma fonte de potência constante e igual a 400 cal/min fornece calor a um bloco de gelo com massa de 200 g , inicialmente à temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sabendo que o sistema é aquecido a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcule o tempo gasto para o aquecimento, desprezando quaisquer perdas de energia.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

RESOLUÇÃO

No aquecimento do gelo, temos: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Assim: $\text{Pot } \Delta t = (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}} + (m L_F) + (m c \Delta\theta)_{\text{água}}$

$$400\Delta t = 200 \cdot 0,50 [0 - (-20)] + 200 \cdot 80 + 200 \cdot 1,0 (50 - 0)$$

$$400\Delta t = 2000 + 16000 + 10000 \Rightarrow 400\Delta t = 28000$$

$$\Delta t = 70\text{ min}$$

Resposta: 70 min

23 Em um calorímetro ideal misturam-se 200 g de gelo a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 100 g de água a uma temperatura θ .

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

Determine:

- a temperatura θ para que no equilíbrio térmico coexistam massas iguais de gelo e de água;
- a temperatura da água quando o gelo atinge $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, considerando as condições do item *a*.

RESOLUÇÃO

a) Se a mistura de gelo e água é feita em um calorímetro ideal, podemos escrever: $Q_{\text{cedido (água)}} + Q_{\text{recebido (gelo)}} = 0$.

Como, no final, deve-se ter coexistência de gelo e água, o equilíbrio térmico deve ocorrer à temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Portanto, desenvolvendo a equação, temos:

$$(m c \Delta\theta)_{\text{água}} + (m c \Delta\theta)_{\text{gelo}} + (m L_F)_{\text{gelo fundido}} = 0$$

Observe que para termos massas iguais de água e de gelo, no final, é necessário que 50 g de gelo sofram fusão, ficando 150 g de água e 150 g de gelo:

$$100 \cdot 1(0 - \theta) + 200 \cdot 0,50 [0 - (-40)] + 50 \cdot 80 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -100\theta + 4000 + 4000 = 0 \Rightarrow 100\theta = 8000 \Rightarrow \theta = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- b) Observemos, pela resolução do item **a**, que o gelo precisou receber 4000 cal para atingir 0 °C e mais 4000 cal para sofrer fusão em 50 g.
Portanto, a água perdeu apenas 4000 cal até que o gelo atingisse 0 °C.

$$Q = m c \Delta\theta \Rightarrow 4000 = 100 \cdot 1(80 - \theta_a) \Rightarrow \theta_a = 40 \text{ °C}$$

Respostas: a) 80 °C; b) 40 °C

- 24** Em um calorímetro ideal são colocados 40 g de água a 40 °C e um bloco de gelo de massa 10 g, à temperatura de -20 °C. Qual é a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor específico do gelo = 0,50 cal/g °C;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g;
calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

RESOLUÇÃO

Nas questões que envolvam uma mistura de água com gelo, podemos utilizar um roteiro para facilitar a resolução. Para isso, vamos estabelecer a temperatura de 0 °C como referência, isto é, vamos levar o sistema (água + gelo) para 0 °C e, em seguida, partimos dessa temperatura para o resultado final. É importante lembrar que o calor cedido (que sai do sistema) é negativo e o calor recebido (que entra no sistema) é positivo. Atenção para o roteiro descrito a seguir.

- 1) Resfriar a água até 0 °C:

$$Q_1 = m c \Delta\theta = 40 \cdot 1,0 \cdot (0 - 40) \text{ (cal)} \Rightarrow Q_1 = -1600 \text{ cal}$$

O valor de Q_1 indica o calor que deve ser retirado para a água chegar a 0 °C.

- 2) Aquecer o gelo até 0 °C:

$$Q_2 = m c \Delta\theta = 10 \cdot 0,50 \cdot [0 - (-20)] \text{ (cal)} \Rightarrow Q_2 = +100 \text{ cal}$$

O valor de Q_2 indica o calor que o gelo recebe para chegar a 0 °C. Observe que a soma $Q_1 + Q_2$ é igual a -1500 cal. Isso quer dizer que a água e o gelo estão à temperatura de 0 °C e ainda estão sobrando 1500 cal para retornar ao sistema. Lembre-se de que o sistema está em um calorímetro ideal (não pode ceder calor para o exterior nem receber calor dele).

- 3) Derreter o gelo (ou solidificar a água):

$$Q_3 = m L_f = 10 \cdot 80 \text{ (cal)} \Rightarrow Q_3 = +800 \text{ cal}$$

A soma $Q_1 + Q_2 + Q_3$ é igual a -700 cal (observe que o sinal negativo indica calor cedido, retirado do sistema). Então, ainda sobram 700 cal para retornar.

- 4) Aquecer toda a água usando a energia que sobrou:

$$Q_4 = m c \Delta\theta$$

Atenção: o valor de Q_4 é a soma $Q_1 + Q_2 + Q_3$ com o sinal trocado, pois o calor foi cedido (negativo) e agora está "voltando", sendo calor recebido (positivo). Logo:

$$+700 = (40 + 10) \cdot 1,0 \cdot (\theta_f - 0) \Rightarrow \theta_f = 14 \text{ °C}$$

Se tivesse faltado calor, isto é, se a soma de $Q_1 + Q_2 + Q_3$ fosse um valor positivo, em vez de aquecer a água deveríamos esfriar todo o gelo. Nesse caso, no item 3, a água teria sido solidificada, liberando calor.

Resposta: 14 °C

- 25** Em um calorímetro ideal encontramos 30 g de água a 20 °C sob pressão normal. Calcule a quantidade de calor que esse sistema deve receber até que toda a água se transforme em vapor.

Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g °C;
calor latente de vaporização da água = 540 cal/g.

RESOLUÇÃO

- 1) Cálculo do calor utilizado para aquecer a água até 100 °C (temperatura de ebulição sob pressão normal).

$$Q_1 = m c \Delta\theta \Rightarrow Q_1 = 30 \cdot 1,0 \cdot (100 - 20) \text{ (cal)} \Rightarrow Q_1 = 2400 \text{ cal}$$

- 2) Cálculo do calor utilizado para a vaporização da água:

$$Q_2 = m L_v \Rightarrow Q_2 = 30 \cdot 540 \text{ (cal)} \Rightarrow Q_2 = 16200 \text{ cal}$$

- 3) Total de calor utilizado:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Q = (2400 + 16200) \text{ cal} \Rightarrow Q = 18600 \text{ cal} = 18,6 \text{ kcal}$$

Resposta: 18,6 kcal

- 26** Observe as informações a seguir:

- I. A umidade relativa do ar corresponde à razão entre a pressão parcial de vapor existente no local e a pressão de vapor saturado na temperatura local.
- II. O ser humano sente-se confortável quando a umidade relativa do ar está por volta de 50%. Uma umidade maior que 50% reduz a evaporação do suor da pele, provocando desconforto. Uma umidade menor que 50% tem um efeito secante na pele e na mucosa.
- III. O quadro a seguir mostra a pressão máxima de vapor de água ($P_{\text{máx}}$) em função da temperatura (θ).

θ (°C)	0	5	10	15	20
$P_{\text{máx}}$ (mmHg)	4,58	6,54	9,21	12,8	17,5
θ (°C)	25	30	40	50	60
$P_{\text{máx}}$ (mmHg)	23,8	31,8	55,3	92,5	149

Uma pessoa encontra-se em um ambiente onde a temperatura é de 25 °C e a pressão de vapor de água é de 16,2 mmHg. Pode-se afirmar que:

- a) nesse local está chovendo.
- b) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é menor que 50%.
- c) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é igual a 89%.
- d) essa pessoa pode estar sentindo sua pele ressecada.
- e) a umidade relativa do ar, nesse ambiente, é aproximadamente 68%.

RESOLUÇÃO

A expressão da umidade relativa do ar é dada por: $\mu_r = \frac{P_{\text{parcial}}}{P_{\text{máx}}}$

Do texto temos $p_{\text{parcial}} = 16,2$ mmHg. No quadro encontramos que, a 25 °C, $p_{\text{máx}} = 23,8$ mmHg. Assim:

$$\mu_r = \frac{16,2}{23,8} \cong 0,68 \Rightarrow \mu_r (\%) \cong 68\%$$

Resposta: Alternativa e.



QUESTÕES PROPOSTAS



27. Um bloco de gelo com 200 g de massa, a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisa receber uma quantidade de calor Q_1 para sofrer fusão total. A água resultante, para ser aquecida até $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisa receber uma quantidade de calor Q_2 . Qual é o valor de Q , sendo $Q = Q_1 + Q_2$?

Dados: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

28. Deseja-se transformar 100 g de gelo a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em água a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sabe-se que o calor específico do gelo vale $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ e o da água, $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ e que o calor latente de fusão do gelo vale 80 cal/g . Quanto calor, em quilocalorias, devemos fornecer a esse gelo?

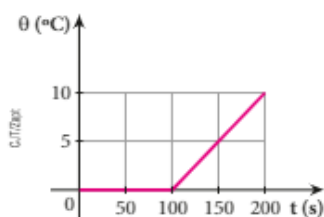
29. Uma pedra de gelo de 20 g de massa, inicialmente a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, recebeu 2 700 cal. Determine a temperatura atingida, sabendo que essa energia foi totalmente aproveitada pelo sistema.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

30. Você tem 100 g de água à temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quanto de calor deve-se retirar dessa água para obter-se um bloco de gelo de 100 g a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

31. O gráfico representa o aquecimento de um bloco de gelo de massa 1,0 kg, inicialmente a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Sabendo que o calor latente de fusão do gelo vale 80 cal/g , responda: qual é a quantidade de calor absorvida pelo gelo entre os instantes 0 s e 100 s?

32. Em um recipiente de paredes adiabáticas, há 60 g de gelo fundente ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Colocando-se 100 g de água no interior desse recipiente, metade do gelo se funde. Qual é a temperatura inicial da água?

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

33. Em um calorímetro ideal, misturam-se 200 g de gelo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 200 g de água a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

Determine:

- a temperatura final de equilíbrio térmico da mistura;
- a massa de gelo que se funde.

34. Em um calorímetro ideal são colocados 200 g de gelo fundente ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) com 200 g de água, também a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após algum tempo, podemos afirmar que:

- no equilíbrio térmico, vamos ter apenas água a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- o gelo, sempre que entra em contato com a água, sofre fusão.
- no final vamos ter apenas gelo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- as massas de água e gelo não se alteram, pois ambos estando a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ não haverá troca de calor entre eles.
- quando o calor sai da água, provoca sua solidificação; esse calor, no gelo, provoca fusão.

35. Misturando 100 g de água a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 100 g de gelo fundente ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que vamos obter no equilíbrio térmico? Para a resolução, suponha que trocas de calor ocorrem apenas entre o gelo e a água.

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

36. Em um calorímetro ideal são colocados 100 g de água a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 200 g de gelo fundente. Se as trocas de calor ocorrem apenas entre o gelo e a água, no final ainda vamos ter gelo? Em caso afirmativo, que massa de gelo ainda restará?

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

37. Vamos colocar em contato térmico 200 g de água a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 100 g de gelo a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supondo que as trocas de calor se processem apenas entre a água e o gelo, qual será a temperatura final de equilíbrio térmico?

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

38. Em um recipiente adiabático, de capacidade térmica desprezível, são colocados 400 g de água a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 200 g de gelo a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se após algum tempo, estabelecido o equilíbrio térmico, introduzirmos nesse recipiente um termômetro ideal, que temperatura ele irá registrar?

Dados: calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

39. Quando são misturados 40 g de água a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 360 g de gelo a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, qual é a temperatura final de equilíbrio térmico? Suponha que o gelo e a água não troquem calor com o recipiente nem com o meio externo.

Dados: calor específico do gelo = $0,50\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

- 40.** Analise as afirmativas dadas a seguir:
- (01) A temperatura de ebulição da água é sempre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, independentemente de outras condições.
- (02) No interior de uma panela de pressão fechada, a água entra em ebulição a uma temperatura maior que $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (04) No Rio de Janeiro (altitude zero), a água entra em ebulição a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ em uma panela sem tampa; em São Paulo (altitude 731 m), a mesma água ferveria a uma temperatura maior que $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (08) O aumento da pressão na superfície da água dificulta a evaporação, mas não altera sua temperatura de ebulição.
- (16) Na evaporação de um líquido, são as partículas de maior nível de energia que saem pela superfície livre, provocando uma diminuição de temperatura.
- Dê como resposta a soma dos números associados às proposições corretas.

- 41.** Considere $1,0\text{ kg}$ de gelo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma massa x de vapor de água a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, colocados em um recipiente de capacidade térmica desprezível. A temperatura final de equilíbrio térmico é $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, e o sistema está totalmente no estado líquido. Qual é o valor de x em quilogramas?

Dados: calor específico latente de vaporização da água = 540 cal/g ;
calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ;
calor específico sensível da água = $1,0\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$.

- 42.** O fato de o éter evaporar mais depressa que o álcool, nas mesmas condições, mostra que a rapidez de evaporação depende da:

- temperatura.
- pressão em sua superfície livre.
- natureza do líquido.
- área da superfície livre.
- densidade do líquido.

- 43.** Quando alguém vai tomar um café muito quente, costuma assoprar a superfície do líquido. Com isso, o café esfria mais depressa, porque:

- o ar expelido pela pessoa é mais frio que o café e retira calor do sistema.
- o ar expelido pela pessoa evita que o calor saia pela superfície livre, forçando-o a sair pelas faces da xícara.
- o ar expelido retira o vapor de água existente na superfície do café, reduzindo a pressão de vapor e, desse modo, favorecendo a evaporação.
- o ar expelido combina quimicamente com o vapor de água, retirando energia térmica do café.
- é um costume que vem do século XVII, da Corte dos reis da França, quando os nobres descobriram o café.

- 44.** Leia o texto a seguir.
[...] Quando não estamos fazendo exercício físico, se a temperatura ambiente subir acima da temperatura corporal, boa parte da umidade da pele evapora (no mínimo 600 g

por dia), "roubando" cerca de 17 W do corpo. Em casos extremos é possível perder até $1,5$ litro por hora, levando a perda de calor em uma taxa de $2,4\text{ kW}$! Isso mostra o quão importante (e eficiente) é o processo da transpiração na regulação da temperatura do corpo.

[...] Quando a pele atinge uma temperatura de cerca de $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ começamos a suar. A transpiração é um importante mecanismo de controle da temperatura do corpo. Ela faz uso do alto calor de vaporização da água (580 cal/g a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$) para retirar quantidades apreciáveis de calor do corpo. [...]

Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol9/Num2/a09.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

Com base nesse texto, responda: se uma pessoa descansando perde calor na taxa de 100 W , que massa de água será transferida para o ambiente em uma hora?

Considere que toda a energia térmica emitida é utilizada na vaporização do suor. **Dado:** $1\text{ cal} = 4\text{ J}$.

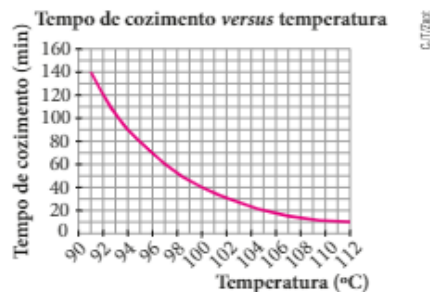
- 45.** A falta de chuva provoca uma baixa concentração de vapor de água no ar. Isso torna o ambiente seco e causa dificuldade de respirar, principalmente para os recém-nascidos. Usar um vaporizador é uma maneira possível de amenizar o problema. Esse aparelho funciona com um resistor que permanece ligado enquanto existir água em seu reservatório. Nesse caso, a água aquecida vaporiza e é lançada para o ambiente, aumentando a umidade relativa do ar, tornando-o melhor para as vias respiratórias.

No reservatório de um vaporizador foram derramados 200 mL de água, à temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Após 2 horas de funcionamento o aparelho desligou automaticamente, pois acabou a água do reservatório. Considere que toda a energia dissipada pelo resistor é transferida para a água, que todo o vapor produzido é lançado para o ambiente e que a vaporização ocorre na temperatura de ebulição à pressão normal ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Determine a potência desse aparelho, em watts. Dê como resposta o número inteiro mais próximo do valor obtido.

Dados: calor específico da água = $1\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$;
calor latente de vaporização da água = 540 cal/g ;
densidade da água = 1 g/mL ; $1\text{ cal} = 4\text{ J}$.

- 46.** O gráfico a seguir fornece o tempo de cozimento, em água fervente, de uma massa m de feijão em função da temperatura.



Sabe-se que a temperatura de ebulição da água, em uma panela sem tampa, é função da pressão atmosférica local. Observe a seguir a temperatura de ebulição da água em diferentes pressões. Ao nível do mar (altitude zero), a pressão atmosférica vale 76 cmHg e ela diminui 1,0 cmHg para cada 100 metros que aumentamos na altitude.

Pressão (em cmHg)	64	68	72	76	80	84
Temperatura (em °C)	95	97	98	100	102	103

Pressão (em cmHg)	88	92	96	100	104	108
Temperatura (em °C)	105	106	108	109	110	111

Analise as afirmações.

I. Ao nível do mar, essa massa **m** de feijão irá demorar 40 minutos para cozinhar.

II. O Mar Morto encontra-se aproximadamente 400 metros abaixo do nível dos mares (altitude – 400 m). Nesse local, o mesmo feijão demoraria 30 minutos para cozinhar.

III. O tempo de cozimento desse feijão seria de 1,0 hora em um local de altitude aproximadamente igual a 1,0 km.

IV. Se esse feijão estivesse no interior de uma panela de pressão fechada, cuja válvula mantém a pressão interna a 1,42 atm (1,0 atm equivale a 76 cmHg), independentemente do local, o tempo de cozimento seria de aproximadamente 10 minutos.

É (são) verdadeira(s):

- somente I.
- somente I e III.
- somente I, II e IV.
- somente II, III e IV.
- I, II, III e IV.

11. SUBLIMAÇÃO

Sólidos cristalinos podem liberar vapor de modo bastante lento em diversas temperaturas. É o caso, por exemplo, de cristais de naftalina sob condições normais de pressão e temperatura. Esse processo é semelhante ao da evaporação de um líquido.

Se, porém, a pressão máxima de vapor do cristal iguala-se à pressão externa, essa liberação de vapor passa a ser bastante rápida. Esse processo é, de certo modo, análogo à ebulição de um líquido.

Os dois processos citados são tipos de **sublimação**. Daqui por diante, porém, quando falarmos em sublimação, estaremos nos referindo sempre ao segundo processo citado, isto é, ao caso em que a pressão máxima de vapor iguala-se à pressão externa.

É importante lembrar que a **sublimação** é a passagem do estado físico sólido para o gasoso ou vice-versa, sem que a substância passe pela fase líquida.



No prato da fotografia observamos um bloco de CO_2 no estado sólido, popularmente chamado de **gelo-seco**. Nas condições de pressão normal, ele absorve energia do meio e sublima, passando direto do estado sólido para o gasoso, sem passar pela fase líquida.

12. PONTO CRÍTICO E PONTO TRIPLO

Ponto crítico

O estado gasoso é constituído de vapores e gases. Qual é a diferença entre um vapor e um gás?

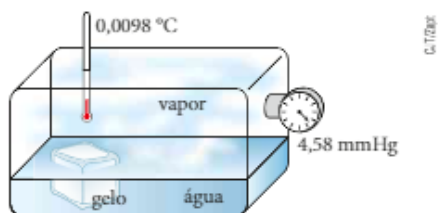
Uma substância no estado gasoso é denominada **gás** quando, à temperatura constante, é impossível levá-la ao estado líquido, por maior que seja a pressão exercida sobre ela. O **vapor**, ao contrário, é a substância no estado gasoso que, à temperatura constante, pode sofrer liquefação por aumento de pressão.

A situação-limite entre vapor e gás é definida por uma temperatura denominada **temperatura crítica**, que, em conjunto com um valor de pressão (pressão crítica), determina o **ponto crítico**.

É importante fixar que acima da temperatura crítica a substância é denominada gás, não podendo ser liquefeita por simples compressão isotérmica. Para a água, por exemplo, a pressão crítica corresponde a 218 atm e a temperatura crítica, a 374 °C.

Ponto triplo

O **ponto triplo** de uma substância é caracterizado por um valor de pressão e outro de temperatura sob os quais essa substância pode coexistir em equilíbrio nos estados físicos sólido, líquido e gasoso (vapor) simultaneamente.



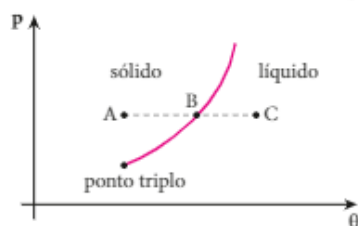
Para a água, o ponto triplo é definido pela temperatura de 0,0098 °C e pressão de vapor igual a 4,58 mmHg. Nessa situação física, podem coexistir o **gelo**, a **água** e o **vapor de água**, sem que ocorra mudança nas proporções relativas de qualquer um deles.

13. CURVA DE FUSÃO

Curva de fusão de um sólido cristalino é a representação gráfica da pressão ambiente (p) em função da temperatura de fusão (θ) do sólido. Há dois casos a considerar:

- Para a grande maioria das substâncias, o volume **aumenta** com a fusão. Consequentemente, quanto maior é a pressão sobre o sólido, mais difícil é a sua fusão. Em outras palavras, quanto maior a pressão, maior é a temperatura que o sólido precisa atingir para fundir-se.

É o que mostra a curva de fusão a seguir.



A – Estado sólido.
B – Equilíbrio das fases sólida e líquida.
C – Estado líquido.

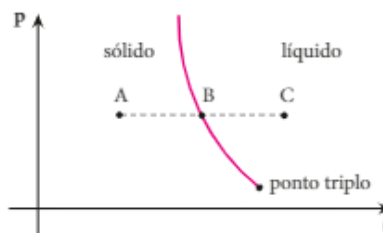
- Para algumas substâncias (exceções à regra geral), como a água, o bismuto, o ferro e o antimônio, o volume **diminui** com a fusão. Isso acontece porque as ligações químicas características do estado sólido determinam a existência de grandes vazios intermoleculares nesse estado. Com o desmoronamento da estrutura por ocasião da fusão, esses vazios são ocupados pelas próprias moléculas e, consequentemente, o volume diminui.

Evidentemente, a solidificação dessas substâncias implica aumento de volume. É o que ocorre com a água presente no interior das células vegetais por ocasião das geadas: a água solidifica-se, aumentando seu volume e rompendo as membranas das células.

Para essas substâncias excepcionais, como a água, a fusão é facilitada pelo aumento de pressão, isto é,

quanto maior a pressão, menor a temperatura que o sólido precisa atingir para fundir-se.

É o que representa a curva de fusão abaixo.



A – Estado sólido.
B – Equilíbrio das fases sólida e líquida.
C – Estado líquido.

Cada ponto da curva de fusão faz a correspondência entre uma temperatura de fusão (solidificação) e uma pressão. Assim, em cada um desses pontos, as fases sólida e líquida podem apresentar-se em equilíbrio: obtemos mais líquido quando fornecemos mais calor ao sistema e mais sólido quanto mais retiramos calor do sistema.

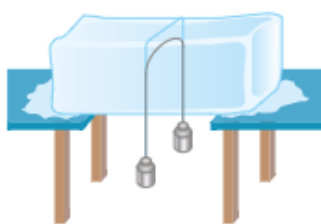
Na solidificação, a água (uma das exceções à regra geral) tem seu volume aumentado. Na fotografia, a garrafa de vidro se quebra quando a água em seu interior se solidifica.



Foto: COLOMBA

Como vimos, um aumento de pressão provoca uma diminuição na temperatura de fusão do gelo.

Com base nesse fato, o físico britânico John Tyndall (1820-1893) elaborou um experimento que recebeu seu nome. Ele apoiou as extremidades de uma barra de gelo a uma temperatura pouco inferior a 0 °C e colocou sobre ela, na parte central, um fio metálico, em cujas extremidades havia corpos de pesos convenientes.



Representação do experimento de Tyndall.

Ilustração: C. T. ZUCCHETTI

Após algum tempo, o fio atravessou a barra sem que ela fosse dividida. A explicação do fenômeno é o regelo.

Dá-se o nome de **regelo** ao fenômeno que consiste na ressolidificação da água por diminuição da pressão.

No experimento de Tyndall, o aumento de pressão provocado pelo fio diminui a temperatura de fusão do gelo, fazendo com que ele se funda. Para isso, a parte que sofre fusão retira calor das partículas que estão ao lado e que, no entanto, não tiveram acréscimo de pressão. Após a passagem do fio, o aumento de pressão é suprimido e a água no estado líquido devolve o calor “emprestado”, voltando ao estado sólido, o que constitui o regelo.

14. SOBREFUSÃO E SUPEREBULIÇÃO

Sobrefusão

No resfriamento de um líquido, eventualmente podem ser atingidas temperaturas abaixo da que corresponde à de solidificação da substância, e ainda assim a substância se manter líquida.

Na **sobrefusão** (ou **superfusão**), uma substância encontra-se no estado líquido abaixo da sua temperatura de solidificação.

A sobrefusão é um estado de equilíbrio metaestável (capaz de perder a estabilidade por meio de pequenas perturbações), ou seja, em que existe aparentemente equilíbrio, mas há uma passagem muito lenta para outro estado. Uma simples agitação, ou mesmo a introdução de uma pequena porção sólida, perturba o fenômeno e provoca uma brusca solidificação parcial ou total do líquido. A temperatura eleva-se até o ponto de solidificação. Essa elevação de temperatura é provocada pelo calor liberado pela parte do líquido que se solidifica (a solidificação é uma transformação exotérmica).

Superebulição

Nos procedimentos comuns de aquecimento de uma porção de água sobre a chama de um fogão ou em um forno a gás (ou elétrico), sob pressão normal, a ebulição acontece na temperatura de 100 °C. Mas se isso ocorre em um forno de micro-ondas, existe a possibilidade de a água atingir uma temperatura maior do que 100 °C sem ebulição.

Quando aquecemos água sobre a chama de um fogão, notamos que primeiro é aquecida aquela em contato com as paredes do recipiente, provocando as correntes de convecção, isto é, uma movimentação ascendente e descendente das partículas do líquido. Em um forno de micro-ondas sem prato giratório, esse aquecimento se dá de maneira quase igual, tanto para

as partículas das superfícies como para as do interior do líquido, de maneira que não produza as correntes de convecção. Dessa forma, temperaturas maiores do que a de ebulição podem ser atingidas sem alterações no estado metaestável (de precária estabilidade) do arranjo molecular da água. Porém, qualquer agitação do recipiente pode quebrar essa estabilidade, produzindo uma ebulição violenta.

Na **superebulição**, uma substância encontra-se no estado líquido acima da sua temperatura de ebulição.

Experimentalmente, observa-se que, para atingirmos esse estado de superaquecimento (quando o líquido se encontra a uma temperatura maior do que a sua temperatura de ebulição), é preciso utilizar um forno de micro-ondas sem o prato giratório (para não agitar o líquido), no interior de um recipiente não metálico (de preferência, vidro refratário). Utilizando água destilada, pode-se conseguir o estado líquido a até 108 °C, aproximadamente. Quando o líquido está superaquecido, uma leve agitação do recipiente pode provocar uma ebulição violenta, quase uma explosão. Como a transição do líquido para o vapor requer uma grande quantidade de calor, assim que a ebulição deixa de ocorrer, a temperatura do líquido que restou fica menor do que sua temperatura de ebulição na pressão existente. Em outras palavras, a uma atmosfera, a água restante estaria a uma temperatura menor do que 100 °C.

Esse fenômeno do superaquecimento pode ocorrer com qualquer líquido; por isso, quando aquecemos água ou leite no micro-ondas, devemos ter muito cuidado ao retirarmos o recipiente do forno, pois, se o líquido estiver superaquecido, uma ebulição violenta pode lançar gotas com temperaturas maiores que 100 °C em nossas mãos, produzindo graves queimaduras.



Nesta fotografia observamos água destilada superaquecida. A temperatura registrada no termômetro foi obtida aquecendo-se a água em um forno de micro-ondas sem o prato giratório.

A água

A água é a principal responsável pela existência da vida em nosso planeta. Acredita-se que há 3,5 bilhões de anos tenham surgido, na água, os primeiros compostos orgânicos que originariam os seres vivos: as bactérias. O desenvolvimento da vida sempre esteve ligado à água, que é o elemento predominante na constituição de animais e vegetais. Nos humanos, ela é responsável por quase 75% de sua massa.

Encontramos na Terra cerca de $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ de água nos diferentes estados físicos. Praticamente 97% é salgada (em oceanos e mares) e apenas 3% dessa água é doce. E, desses 3%, menos de um centésimo está acessível no estado líquido distribuído na superfície do planeta; o restante é gelo nos polos, água subterrânea de difícil acesso ou vapor de água na atmosfera. Então, somente essa pequena porção de água doce encontrada em rios e lagos é que mantém a vida terrestre. Por isso o uso desordenado de produtos químicos, que polui de maneira irreversível a água, pode comprometer o futuro da vida na Terra.

No estudo das características da água, notamos que seu calor específico sensível ($1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$) é bastante alto, fazendo sua presença, em grandes quantidades, um fator de estabilidade da temperatura. Para esfriar a água, libera-se energia térmica; para esquentá-la, absorve-se energia térmica. Por esse motivo, em regiões litorâneas ou onde exista um grande lago, as amplitudes térmicas (variações de temperatura) são pequenas e a vegetação e a fauna costumam ser bastante extensas e diversificadas. Como a água cobre quase $\frac{2}{3}$ da superfície de nosso planeta, o clima global é bastante influenciado por sua presença.

O vapor de água na atmosfera terrestre contribui de forma benéfica para o efeito estufa, aumentando a retenção da energia térmica emitida pela Terra, não deixando a temperatura diminuir muito à noite. Durante o dia, esse vapor reflete e retém parte da energia solar, evitando que a superfície do planeta se aqueça em demasia.

Na solidificação, a água aumenta de volume enquanto a maioria das substâncias diminui. Isso faz a densidade do gelo ser menor que a da água, o que leva o gelo a flutuar nela. Em regiões de invernos rigorosos, a solidificação de lagos e rios ocorre apenas na superfície, existindo água a uma temperatura maior que $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (zero grau Celsius) nas regiões mais profundas. Como o gelo é um bom isolante térmico, a vida, assim, é preservada. E após o degelo, na primavera, a vida animal e vegetal no interior desses lagos e rios volta a se desenvolver normalmente.

Seu calor específico latente de vaporização (540 cal/g) também é um importante fator de regulação do clima. Na evaporação da água, é absorvido calor para a mudança de estado, isto é, em locais com grandes áreas ocupadas por água, como uma represa, a temperatura é mais amena, pois a evaporação da água retira energia térmica do meio ambiente.

O gelo (água em estado sólido) flutua na água em estado líquido. Na fotografia, observamos um *iceberg* com aproximadamente nove décimos de seu volume imersos em água.



FAÇA VOCÊ MESMO

O experimento de Tyndall

Após a leitura da parte teórica, em que entramos em contato com situações interessantes, como a **sobrefusão**, a **superebulição** e o **regelo**, você deve ter pensado em realizar uma atividade experimental para reproduzir pelo menos um desses fenômenos físicos. O mais fácil de ser reproduzido é o **regelo**.

Material necessário

- 1 barra grande de gelo;
- 1 fio de aço com aproximadamente 1 metro de comprimento;
- 2 corpos iguais e pesados, como dois halteres pequenos (com 1 kg ou pouco mais).

ATENÇÃO!

Use luvas de proteção ao manusear o gelo e o fio de aço.

Procedimento

- Amarre cada corpo em uma das extremidades do fio de aço.
- Apoie a barra de gelo em dois suportes (como duas mesas pequenas) e coloque o fio sobre ela de modo que os corpos pesados fiquem pendentes.
- Observe o fio de aço descendo lentamente e atravessando o bloco de gelo. Note a "cicatrização" rápida no "corte" deixado pelo fio, que deverá ser retirado por baixo da barra sem que ela seja dividida em duas partes. Cuide para que os corpos pesados não caiam no chão.



Analisando o experimento

1. O que ocorre com a parte do gelo que recebe a pressão do fio de aço?
2. Como o fio consegue passar pelo gelo?
3. Após a passagem do fio, o que ocorre com a água? Explique sua resposta.
4. Procure na parte teórica um diagrama que possa ilustrar o ocorrido e discuta com seus colegas o fenômeno do regelo, tentando explicá-lo por meio desse gráfico.
5. Por que a barra de gelo não se dividiu em duas partes? Converse com seus colegas, levantando hipóteses a respeito.

QUESTÕES COMENTADAS

47 A curiosidade pelas explicações de fenômenos físicos é bastante aguçada no decorrer do Ensino Médio. Assim, um aluno aprendeu na aula de Física que a água entra em ebulição na temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ quando a pressão na superfície é igual à pressão normal (aquela que encontramos ao nível do mar). No entanto, se alterarmos o valor dessa pressão, a água irá ferver em temperatura diferente de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo ser maior ou menor. Como tarefa de casa, um aluno do 2º ano do Ensino Médio, residente em uma cidade litorânea, realizou um experimento interessante.

1. Colocou água em uma vasilha metálica e a aqueceu na boca de um fogareiro até que ela entrasse em ebulição.
2. Utilizando uma seringa de injeção, sem agulha, aspirou água fervente, puxando o êmbolo alguns centímetros. Em seguida lacrou a extremidade aberta com um pingo de cola de secagem rápida.

3. Verificando que, após alguns segundos, essa água aspirada deixou de ferver, o aluno puxou mais um pouco o êmbolo da seringa. Para seu espanto, essa água voltou a entrar em ebulição.

Explique o que ocorreu nesse experimento.

RESOLUÇÃO

A água aspirada para de ferver porque perdeu energia para as paredes internas da seringa, esfriando. Quando o aluno puxa o êmbolo mais alguns centímetros, a pressão na superfície da água diminui, diminuindo assim a temperatura de ebulição. A água, em temperatura menor, volta a ferver porque está agora a uma pressão menor do que a atmosfera.

Resposta: A diminuição da pressão diminuiu a temperatura de ebulição da água.

48 Leia com atenção as afirmativas dadas a seguir.

- I. Ao perceber que a água da panela em que você está cozinhando começou a **ferv**er, uma providência correta é baixar a chama do fogão. Esse procedimento é válido porque, durante a ebulição, a temperatura da água não se eleva mais até que todo o líquido tenha sido vaporizado, e seria desperdício fornecer mais calor mantendo a chama alta.
- II. O ponto de ebulição da água é sempre igual a 100 °C em qualquer ponto da superfície terrestre, não importando a altitude, porque a pressão atmosférica não exerce influência em sua temperatura de ebulição.
- III. Uma panela de pressão pode representar economia porque, quando fechada, a pressão no interior dela é maior do que a pressão atmosférica, e a água atingirá temperaturas maiores do que 100 °C, fazendo que os alimentos cozinhem mais rapidamente.

Indique a alternativa correta:

- a) Somente a afirmativa III é verdadeira.
- b) Somente a afirmativa II é verdadeira.
- c) Somente as afirmativas I e III são verdadeiras.
- d) Todas as afirmativas são verdadeiras.
- e) Todas as afirmativas são falsas.

RESOLUÇÃO

I. **Verdadeira.** Mantendo-se a pressão constante, a temperatura de ebulição de um líquido permanece constante.

Assim, quando a água, em uma panela sem tampa, começa a ferver, a chama do fogo deve ser baixada. Se não fizermos isso, a quantidade de água que irá passar para o estado gasoso será maior, mas a temperatura da água em ebulição continuará a mesma, não alterando o tempo de cozimento do alimento contido na panela. A redução da chama do fogão representa uma economia sem alterar o resultado final.

II. **Falsa.** A temperatura de ebulição de um líquido depende da pressão que está sendo aplicada em sua superfície. O líquido entra em ebulição quando sua pressão de vapor iguala-se à pressão externa em sua superfície.

III. **Verdadeira.** As chamadas "panelas de pressão" são quase totalmente fechadas, a não ser por uma pequena abertura, sobre a qual encaixamos um pequeno corpo que faz com que a pressão interna seja maior que a pressão atmosférica.

Quando colocamos a panela sobre a chama, inicialmente ocorre a evaporação da água, levando, aos poucos, ao aumento da pressão do vapor e, conseqüentemente, da pressão interna, que pode chegar até a 2 atm. A temperatura de ebulição da água, nessa pressão, é de aproximadamente 120 °C. Mantendo a água nessa temperatura, o cozimento dos alimentos é bastante abreviado.

Resposta: Alternativa c.



QUESTÕES PROPOSTAS

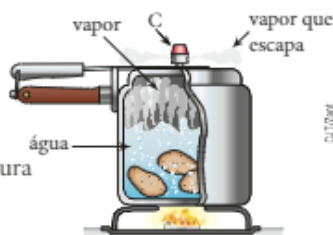


FAÇA NO CADERNO.

49. As chamadas "panelas de pressão" são quase totalmente fechadas, a não ser por uma pequena abertura, sobre a qual encaixamos um pequeno corpo C (ver figura) que faz com que a pressão interna seja maior que a pressão atmosférica. Quando colocamos a panela sobre a chama, inicialmente ocorre a evaporação da água, fazendo com que, aos poucos, vá aumentando a pressão do vapor e, conseqüentemente, a pressão interna, que pode chegar até a 2 atm.

Nessas condições de pressão, começa a ebulição a uma temperatura que é

- a) igual a 100 °C.
- b) maior que 100 °C.
- c) 80 °C.
- d) menor que 100 °C.
- e) depende da temperatura da panela.



50. A temperatura do ponto triplo corresponde:

- a) ao conjunto do zero absoluto, da temperatura de fusão e da temperatura de ebulição de uma substância.
- b) à temperatura em que uma substância pode ter suas fases líquida, de vapor e de gás coexistindo em equilíbrio.

- c) à temperatura crítica de uma substância.
- d) à coexistência, em equilíbrio, das fases sólida, líquida e de vapor de uma mesma substância.
- e) Nenhuma das afirmações anteriores está correta.

51. Temperatura crítica de uma substância é a:

- a) única temperatura na qual a substância pode sofrer condensação, qualquer que seja a pressão.
- b) única temperatura na qual a substância não pode sofrer condensação mediante simples aumento de pressão.
- c) única temperatura na qual a substância pode sofrer condensação, mediante simples aumento de pressão.
- d) maior temperatura na qual a substância não pode sofrer condensação mediante simples aumento de pressão.
- e) temperatura acima da qual a substância não pode sofrer condensação mediante simples aumento de pressão.

52. Durante uma aula experimental, o professor de Física mostrou uma situação, envolvendo a ebulição de água, que intrigou seus alunos. Pegou um recipiente de vidro refratário, que pode ser aquecido e resfriado sem que se quebre, e de boca estreita, que pode ser bem fechado com uma rolha.

Introduziu água em seu interior, ocupando pouco mais de 70% do seu volume interno. Fazendo manuseio de forma adequada, deixando aberto o recipiente, passou a aquecer a água na chama de um pequeno fogão. Quando a água entrou em ebulição, o sistema foi retirado da fonte térmica e bem fechado por uma rolha. Os alunos observam que a água parou de ferver. Em seguida, o professor abriu a torneira da pia e colocou o recipiente fechado em contato com a água fria. Para a surpresa dos alunos, a água existente no interior da vasilha voltou a entrar em ebulição.



O professor esperou algum tempo para que os alunos conversassem, tentando explicar o ocorrido, e cobrou de três deles uma explicação. A seguir, encontramos as respostas dadas pelos alunos A, B e C.

Aluno A: Quando a água ferveu, o vapor liberado expulsou todo o ar do interior do recipiente que foi hermeticamente fechado. Na ausência de ar, os líquidos fervem facilmente.

Aluno B: Na realidade a água não ferveu. No resfriamento sofrido, bolhas de ar quente que estavam no interior do líquido escaparam, provocando uma falsa ebulição.

Aluno C: No resfriamento do sistema, a pressão de vapor no seu interior diminuiu mais rapidamente do que a temperatura da água. Com pressão menor na sua superfície, a água voltou a ferver.

Considerando a letra V para uma afirmativa verdadeira e F para falsa, assinale o conjunto correto de letras, na sequência de A para C.

- a) FFF c) VFV e) VVF
b) FVF d) FFV

53. Leia as afirmativas a seguir.

- (01) A sublimação de uma substância corresponde à sua passagem do estado sólido para o estado líquido.
(02) A temperatura de sublimação de uma substância cresce com o aumento de pressão.
(04) Gelo-seco é a denominação comercial do dióxido de carbono (CO_2 sólido). Quando este é deixado sobre uma mesa, vai “desaparecendo”. A explicação é que ele está sublimando.
(08) A passagem de uma substância do estado sólido para o gasoso, ou vice-versa, sem que se transforme em líquido, é denominada sublimação.

Dê como resposta a soma dos valores associados às afirmativas corretas.

54. Para liquefazer um gás, deve-se:

- a) comprimi-lo isotermicamente a uma temperatura acima da crítica.
b) apenas levá-lo a uma temperatura abaixo da crítica.
c) simplesmente comprimi-lo, qualquer que seja sua temperatura.
d) diminuir sua temperatura abaixo da crítica e, se necessário, comprimi-lo.
e) É impossível liquefazer um gás.

55. O que acontece quando se agita um recipiente contendo água em sobrefusão?

- a) Necessariamente, toda a água solidifica-se, acarretando uma queda na temperatura do recipiente.
b) Parte da água solidifica-se, acarretando uma queda na temperatura do recipiente.
c) A água solidifica-se total ou parcialmente, acarretando um aumento na temperatura do recipiente.
d) Necessariamente, toda a água solidifica-se, acarretando um aumento na temperatura do recipiente.
e) Nada do que foi dito ocorre.



DESCUBRA MAIS

- 1 Pesquise o que é o **ponto de orvalho**.
- 2 Um dos maiores temores dos agricultores de certas regiões do Brasil é a **geada**, fenômeno meteorológico que pode destruir plantações. Explique como e quando ocorre a geada.
- 3 Em dias muito quentes, é comum observarmos cães grandes e peludos com a boca aberta, a língua de fora e arfando rapidamente. Pesquise e tente explicar por que os cães arfam.

Lago Vostok: conflito entre conhecimento e realidade

No início de 2012, jornais, revistas, noticiários de rádio, TV e internet deram grande destaque à chegada de uma sonda russa à superfície do lago subglacial **Vostok**, localizado no continente Antártico, sob uma camada de gelo com espessura de aproximadamente 4 km. Observe o infográfico apresentado na parte inferior desta página e da página seguinte.

Por que esse assunto mereceu tamanho destaque? Ora, porque esse lago está lacrado e isolado da atmosfera há mais de 20 milhões de anos. Espera-se encontrar nesse ambiente hermético um novo bioma – vida com espécies diferentes das conhecidas. Afinal, se essas formas de vida de fato existirem, os microrganismos presentes se desenvolveram em condições peculiares, em um local saturado de oxigênio e a pressões muitíssimo maiores que a pressão atmosférica a que estamos acostumados.

O grande lago da Antártica

Existem mais de 200 lagos sob a camada de gelo da Antártica. O Vostok é o maior deles. Foi descoberto em 1995, com o auxílio de radares, e está isolado há 15 milhões de anos por uma camada de gelo de 3769 metros. O Vostok está localizado no ponto mais frio do globo, onde a temperatura média é de 55 graus negativos.



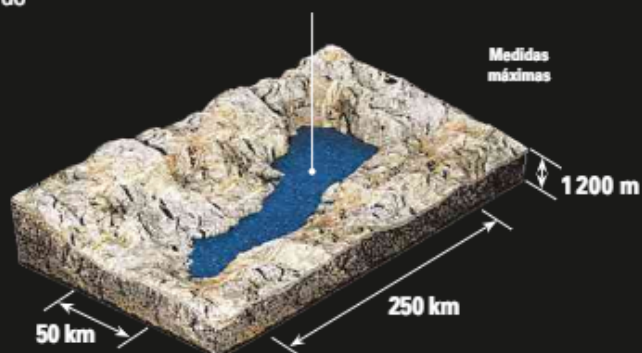
Por que o Vostok não congela?

Por uma conjunção de dois fatores. Primeiro, a grossa camada de gelo mantém a água do lago sob uma pressão de 400 atmosferas. Quanto maior for a pressão a que a água é submetida, menor é a temperatura de seu ponto de congelamento.

Segundo, a água de Vostok recebe calor do centro do planeta.

Área: 15500 quilômetros quadrados, quarenta vezes a da Baía de Guanabara.

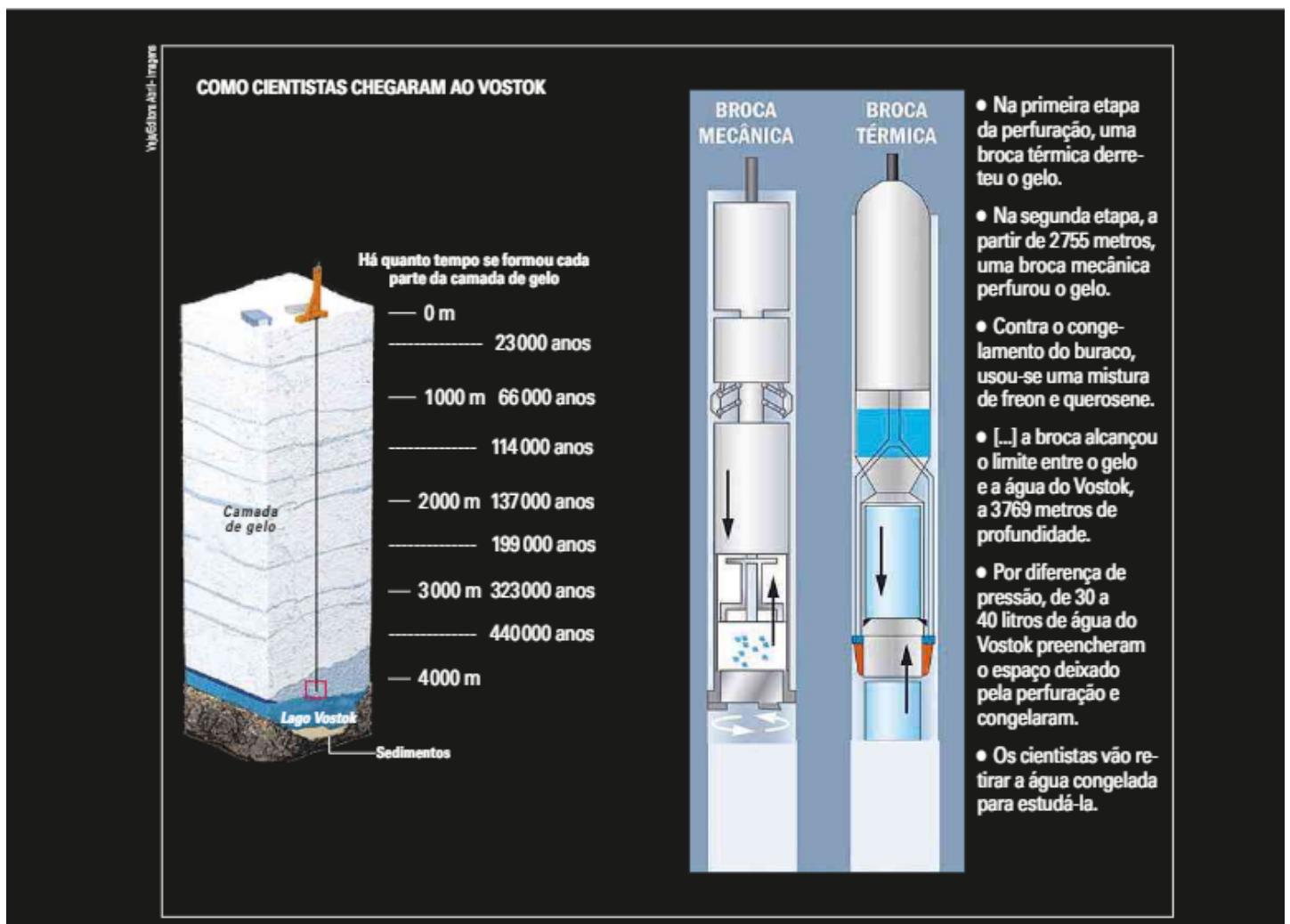
Volume de água: 6300 quilômetros cúbicos.



Por outro lado, é fundamental que sejam descobertas novas reservas de água pura, sem contaminação, já que esse líquido é um dos insumos básicos necessários à vida no planeta. Sem a preciosa água, haveria a extinção de quase todas as espécies conhecidas, animais e vegetais.

É bom saber também que no polo Norte só encontramos gelo – uma grande e espessa placa. No céu dessa região pode-se ver nitidamente a estrela Polaris, pertencente à constelação de Ursa Menor. Desse fato surgiu o nome Ártico, que vem do grego *arktos*, que significa urso. Então, o polo Norte fica na região Ártica; já o polo Sul encontra-se em um continente com muita terra e gelo, em posição diametralmente oposta ao polo Norte. Por isso, o polo Sul é o *anti-arktos*, o continente Antártico ou a Antártida.

A seguir podemos “mergulhar” no assunto do lago Vostok lendo um artigo escrito pelo professor de Física Marcelo Gleiser, publicado no jornal *Folha de S.Paulo* em 12 de fevereiro de 2012, logo após os cientistas e técnicos russos terem coletado as primeiras amostras da água do lago.



Um mundo alienígena na Terra

É possível haver vida nas profundezas do lago Vostok. Que criaturas seriam essas?

O espaço sideral não é a única fronteira. Existem outras aqui na Terra, em locais inóspitos e ainda inexplorados. São cada vez mais escassos, ao menos os que são acessíveis a pé, de barco ou por máquinas voadoras. Mas, felizmente, sobram os mundos subterrâneos, nas profundezas dos oceanos, em cavernas ainda não descobertas ou soterrados sob quilômetros de gelo. As possibilidades são enormes e prometem desafiar nossa imaginação.

[...] um time de cientistas russos anunciou ter chegado até a superfície do lago Vostok, na Antártida. O incrível é que esse lago de água puríssima, com aproximadamente 250 km de extensão e 50 km de largura, está a quase 4 km de profundidade, enterrado sob espessa camada de gelo.

Em 1983, nesse mesmo local, foi registrada a temperatura mais baixa na Terra, -89 graus Celsius. Realmente, um local bem diferente das nossas terras tropicais.

Foram quase três décadas de trabalho para as brocas dos russos chegarem até o lago. Eles só se aventuravam até o local no verão, o que limitava o tempo em que podiam perfurar o gelo. Usando 60 toneladas de querosene e outros fluidos, conseguiram finalmente alcançar seu objetivo (embora tenham provocado sérias dúvidas quanto ao impacto de seus métodos na qualidade da água do lago). Mesmo que tenha havido algum vazamento — os russos garantem que não —, o volume dos poluentes é pequeno se comparado ao volume do lago. E a enorme diferença de pressão, 360 vezes maior que a pressão atmosférica (por isso que a água do lago permanece líquida, mesmo a -3 graus Celsius), fará com que a água suba imediatamente, selando a cavidade feita pela broca.

Existem outros 145 lagos submersos sob o gelo da Antártida, mas nenhum com as dimensões do Vostok. Calcula-se que ele tenha ficado isolado durante 20 milhões de anos, criando um ambiente único: sem luz, sempre frio, supersaturado com oxigênio e outros gases. Trata-se de um mundo alienígena com o qual nunca tivemos contato.

É possível que existam formas de vida nesse ambiente inóspito. Nesse caso, elas poderiam fazer parte de um ecossistema diferente de qualquer outro, adaptadas a águas frias e escuras por milhões de anos.

Que criaturas seriam essas? Se alguma forma de vida existir por lá, ela se alimenta de fontes de energia alternativas. Isso porque poucos nutrientes estão disponíveis.

Porém, sabemos da incrível resiliência da vida na Terra. Há extremófilos nas profundezas de oceanos próximos a fumarolas vulcânicas e mesmo nas piscinas radioativas de reatores nucleares. Não me surpreenderia nada se algo fosse encontrado nas águas do lago Vostok (embora muito cuidado tenha que ser exercido para evitar a contaminação por bactérias vindas da superfície ou que existem no gelo).

O lago Vostok é o que temos de mais próximo na Terra dos oceanos subglaciais de Europa, um dos satélites de Júpiter. Lá, uma camada de gelo de quilômetros de espessura cobre um vasto oceano com volume ao menos duas vezes maior do que todos os oceanos da Terra.

Se houver algum tipo de vida no lago Vostok, é muito possível que exista vida em outros mundos da nossa vizinhança celeste.

GLEISER, Marcelo. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/25350-um-mundo-alienigena-na-terra.shtml>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

Compreensão, pesquisa e debate

1. Pesquise e descubra como esse lago foi descoberto, quais as dificuldades encontradas na perfuração do gelo e as técnicas desenvolvidas para atingir a superfície do lago.
2. Como é possível a água do lago permanecer em estado líquido mesmo estando a uma temperatura abaixo de 0°C ?
3. É importante conhecermos todas as espécies vivas existentes na Terra?
4. Essa água não é a única que permanece isolada, longe da poluição. Pesquise e descubra mais a respeito de reservas de água subterrâneas existentes na Terra. Pesquise sobre os aquíferos existentes no Brasil.
5. O professor universitário Antônio Donato Nobre, especialista em clima, revelou que há verdadeiros rios de vapor de água “correndo” acima da Floresta Amazônica, carregando umidade para boa parte do nosso continente; e que a devastação da floresta explica a diminuição das chuvas no Sudeste brasileiro. Pesquise sobre a importância da preservação da Amazônia para o clima em nosso país. Debata com os colegas e o professor suas principais descobertas.



GASES PERFEITOS

1. INTRODUÇÃO

Quando pensamos em um gás, o primeiro exemplo que costuma vir à cabeça é o ar que respiramos. Esse ar, que forma a atmosfera terrestre, é uma mistura de vários gases, na qual predominam o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%). Em razão dos campos gravitacional e magnético de nosso planeta, esses gases são atraídos e formam uma fina cobertura, com praticamente 99% da atmosfera contida em uma faixa que vai da superfície terrestre a pouco mais de 30 km de altitude. Essa camada gasosa é essencial à vida por conter o oxigênio e filtrar grande parte das radiações nocivas aos seres vivos, como a ultravioleta. O oxigênio é consumido pela respiração de alguns seres vivos, os quais expelem um subproduto desse processo, o gás carbônico. Este, por sua vez, é absorvido por plantas, que, pela fotossíntese, o transformam em oxigênio.

O peso da atmosfera produz uma pressão sobre a superfície da Terra, evitando que a água líquida de oceanos, mares, rios e lagos se transforme rapidamente em vapor.



Itália, junho de 2008.

A visão desta maravilhosa paisagem nos leva a pensar na natureza e a buscar respostas a algumas indagações, por exemplo: por que o céu é azul? A resposta vem do fato de nossa atmosfera ser constituída de gases que provocam a dispersão da luz branca do Sol.

Os gases que constituem nossa atmosfera também são responsáveis pelo fato de o céu ser azul. A luz branca que vem do Sol, ao encontrar as partículas gasosas, sofre dispersão, separando-se nas cores do arco-íris. A luz azul é aquela que dispersa mais, em todas as direções, predominando sobre as demais cores.

Os gases sempre fizeram parte de nosso dia a dia. Mas, a partir do século XVII, vários cientistas, ao iniciarem estudos sobre as propriedades dos gases, notaram que deveriam fazer uma simplificação, já que não havia uma uniformidade no comportamento de todos os gases. Daí o surgimento do modelo teórico que foi denominado **gás perfeito** ou **gás ideal**. Faremos, a seguir, um estudo desse modelo, que será muito útil mais adiante.

2. MODELO MACROSCÓPICO DE GÁS PERFEITO

No Capítulo 3, fizemos a distinção entre vapor e gás, que constituem o estado gasoso. Lembremos que gás é a situação física de uma substância que se encontra a uma temperatura maior que a sua temperatura crítica.

Os diferentes gases reais (hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, hélio etc.), devido às suas características moleculares, em geral apresentam comportamentos diferentes. Quando são colocados sob baixas pressões e altas temperaturas, entretanto, passam a se comportar, macroscopicamente, de maneira semelhante.

Assim, para iniciar o estudo dos gases, é conveniente adotarmos um modelo teórico, simples, sem existência prática, de comportamento apenas aproximado ao comportamento dos gases reais. Essa aproximação será tanto melhor quanto menor for a pressão e maior for a temperatura. A esse modelo chamamos de **gás perfeito**.

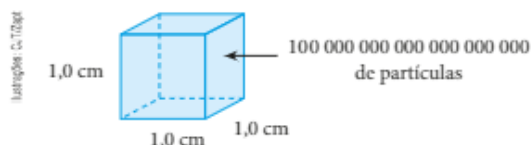
As regras do comportamento dos gases perfeitos foram estabelecidas por Robert Boyle, Jacques Charles, Joseph Louis Gay-Lussac e Benoît Paul-Émile Clapeyron entre os séculos XVII e XIX, como veremos adiante.

Diremos, então, que um gás se enquadra no modelo teórico de gás perfeito se obedece às leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac — que veremos oportunamente com detalhes. Tais leis estabelecem as regras do comportamento “externo” do gás perfeito, levando-se em conta as grandezas físicas a ele associadas — temperatura, volume e pressão —, denominadas **variáveis de estado** do gás.

3. AS VARIÁVEIS DE ESTADO DE UM GÁS PERFEITO

Sempre que considerarmos determinada massa de um gás, estaremos estabelecendo uma quantidade N de partículas desse gás. Esse número N , entretanto, é sempre muito grande, da ordem de 10^{20} partículas por centímetro cúbico.

No local onde você se encontra, há aproximadamente, em cada centímetro cúbico, 10^{20} moléculas dos componentes do ar (oxigênio, hidrogênio, nitrogênio etc.).



Por ser mais cômodo, costuma-se quantificar uma porção de gás por meio do seu **número de mols** (n).

Um mol de um gás constitui-se de um número de moléculas desse gás, dado pelo **número de Avogadro** ($A = 6,02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol). O número de mols é obtido dividindo-se a massa do gás (m) por sua massa molar ou molécula-grama (M), ambos na mesma unidade.

$$n = \frac{\text{massa do gás}}{\text{mol}} = \frac{m}{M}$$

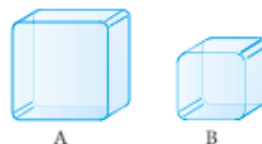
Vimos que, para determinada massa de gás perfeito, as variáveis de estado são as grandezas físicas **temperatura** (T), **volume** (V) e **pressão** (p).

A **temperatura** é a grandeza física que está relacionada à energia cinética de translação das partículas do gás, como veremos oportunamente.

Como usaremos para temperatura a escala absoluta Kelvin, o símbolo adotado será T .

Lembremos que: $T(K) = \theta_c(^{\circ}C) + 273$

Sendo os gases extremamente expansíveis, suas moléculas ocupam todo o espaço disponível no recipiente que os contém. Assim, o **volume** do gás corresponde à capacidade do recipiente.



Dois porções iguais (mesmo número de partículas) de um mesmo gás perfeito, colocadas em dois recipientes de capacidades diferentes, ocupam volumes diferentes ($V_A > V_B$).

As unidades de volume que encontraremos com maior frequência são o metro cúbico (m^3) e o litro (L).

Atenção: $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
 $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$

A **pressão** é uma grandeza escalar definida como a razão entre a intensidade da força resultante aplicada perpendicularmente a uma superfície e à área dessa superfície.

A pressão numa superfície de área A , quando nela aplicamos uma força resultante normal (perpendicular) de módulo F , é definida pela relação:

$$p = \frac{F}{A}$$

As unidades mais usadas para pressão são o pascal (Pa), a atmosfera técnica métrica (atm), a atmosfera normal (At) e o milímetro de mercúrio (mmHg), valendo as equivalências:

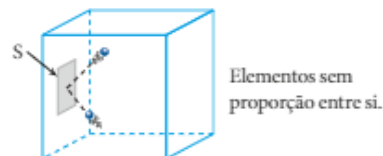
$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ At} = 760 \text{ mmHg} \cong 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ kgf/cm}^2 \cong 10^5 \text{ Pa}$$

A pressão média que o gás exerce nas paredes internas do recipiente é devida aos choques de suas moléculas com essas paredes. Por ocasião desses choques, as moléculas aplicam força nas paredes.

Considere uma superfície S de área unitária contida em uma das paredes do recipiente.



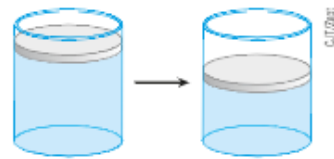
A cada instante, a força total aplicada em S pelas N moléculas que sobre ela estão incidindo determina a pressão média exercida pelo gás. É previsível que essa pressão não deva variar, se forem mantidas as condições do gás, pois teremos, a cada instante, o mesmo número N de moléculas chocando-se contra S e exercendo a mesma força total. Se, porém, introduzirmos mais gás no recipiente ou diminuirmos o seu volume, sem variarmos a temperatura, o número N de choques em S a cada instante aumentará. Com isso, a pressão média exercida pelo gás também aumentará, apesar de não se ter alterado a violência de cada choque.

Experimentos mostram, porém, que, se aquecermos o gás a volume constante, a pressão média também aumentará. Isso evidencia que a temperatura do gás está relacionada com a energia cinética de translação de suas moléculas. Nesse experimento, a pressão média aumenta porque tanto o número N de moléculas que se chocam contra S como a força exercida ali pelas moléculas aumentam.

Destaquemos que:

- a pressão média exercida por um gás está relacionada a dois fatores: a quantidade de moléculas que colidem por unidade de área e a força exercida em cada choque;
- a temperatura está relacionada de fato com a energia cinética de translação das moléculas do gás.

Aí estão as grandezas físicas **temperatura**, **volume** e **pressão** de um gás perfeito, suas variáveis de estado, que em conjunto definem o comportamento macroscópico do gás. Para determinada massa, a variação de pelo menos duas dessas variáveis de estado caracteriza uma **transformação** sofrida pelo gás.



No esquema representado acima, mesmo que a temperatura não se altere, a diminuição de volume produz um aumento de pressão. Esse fato caracteriza uma **transformação** sofrida pelo gás.



Airbag, como funciona?

Os automóveis fabricados atualmente possuem vários dispositivos de segurança.

Dois desses dispositivos são utilizados para desacelerar os corpos dos passageiros em caso de acidente, fazendo-os parar com o mínimo de dano possível.

Lembre-se de que o Princípio da Inércia garante que um corpo em movimento tende a conservar a sua velocidade vetorial em direção, sentido e módulo. Assim, quando um automóvel a 120 km/h atinge um obstáculo, reduzindo bruscamente a velocidade, os corpos do motorista e dos passageiros tenderão a permanecer com essa velocidade.

O cinto de segurança mantém cada corpo preso ao assento enquanto a velocidade diminui. No entanto, a cabeça oscila para frente e para trás podendo provocar a ruptura da coluna na região do pescoço. Para evitar que isso ocorra, foram desenvolvidos os *airbags*, que são "sacos" contendo um gás. Esse dispositivo de segurança tem o objetivo de amortecer o impacto do rosto e também do corpo.



Teste de acionamento de *airbag*.

O sistema que aciona os *airbags* possui sensores que registram o impacto e, em fração de segundo (20 milésimos de segundo), um dispositivo elétrico aquece a mais de 300 °C uma porção de azida de sódio (NaN_3) misturada com nitrato de potássio (KNO_3) e óxido de silício (SiO_2). Essa reação libera uma grande quantidade de nitrogênio (N_2) gasoso que expande rapidamente enchendo o *airbag*, atingindo uma pressão maior do que duas atmosferas.

Para evitar o sufocamento das pessoas, o gás é liberado imediatamente após atingir o ponto máximo de expansão do "saco", chegando a uma atmosfera de pressão no momento em que a cabeça do passageiro atinge o *airbag*.

Assim, os carros que possuem dispositivos como esses são mais seguros em caso de acidente, pois podem impedir danos irreversíveis nos passageiros, evitando até possíveis óbitos.

FAÇA VOCÊ MESMO

Variação da temperatura e alteração da pressão de um gás

Para melhor compreensão da ação das colisões de partículas de ar sobre uma superfície, podemos realizar um experimento bastante simples.

Material necessário

- 1 ovo de galinha de tamanho grande cozido e sem casca;
- 1 vidro de boca circular com diâmetro igual ao da maior seção circular do ovo. Podem ser reaproveitados vidros utilizados como embalagem de alimentos em conserva;
- 1 recipiente, suficientemente grande para alojar o vidro, para conter água gelada ou água quente;
- 1 caneta de ponta porosa.

Procedimento

- Encaixe o ovo cozido e sem casca na abertura do vidro vazio. Utilizando a caneta de ponta porosa, faça um pequeno traço no ovo, na linha da boca do vidro, como indicado na imagem a seguir.
- Coloque água e gelo no recipiente. Aguarde o equilíbrio térmico e mergulhe a parte inferior do vidro nessa mistura. Observe o que ocorre com o ovo, usando como referência o risco traçado nele;



Fotografias: Fimera Fimera/Clar image

- Passado um tempo, retire do recipiente o vidro com o ovo e despeje a água com gelo na pia. Com cuidado para não se queimar, coloque em seguida água bem quente – não fervendo – no recipiente e volte a mergulhar o vidro nessa água. Observe o que ocorre com o ovo. Isso pode ser notado visualizando-se o deslocamento do traço feito no ovo.

Analisando o experimento

- Podemos usar um ovo cru, com casca, para realizar esse experimento? Por que usamos um ovo cozido, sem casca?
- Por que o ovo desce para o interior do vidro quando mergulhamos este recipiente na mistura de água e gelo?
- A mistura de água e gelo proposta para o experimento apresenta temperatura em torno de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se colocarmos o conjunto no interior de um *freezer*, em temperatura próxima de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, o ovo poderá passar pelo gargalo e cair dentro do vidro?
- Por que o ovo sobe, como se quisesse sair do recipiente, quando o vidro é mergulhado em água quente?
- Teoricamente (não tente realizar isso na prática para não quebrar o vidro), se pudéssemos continuar a aquecer o ar do interior do vidro, o ovo seria expelido?

4. LEI DE BOYLE

Junto com Robert Hooke, Robert Boyle (1627-1691), físico irlandês, criou uma máquina pneumática para auxiliar nos estudos dos gases (principalmente do ar), demonstrando a impossibilidade da obtenção do vácuo absoluto. Descobriu que o ar era

meio de propagação do som e que podia ser comprimido, já que era formado por pequenas partículas que se moviam no vácuo. Verificou experimentalmente que o volume do ar variava, praticamente, na razão inversa da variação da pressão a que era submetido.

Alguns anos depois, o abade francês Edme Mariotte observou que essa relação volume-pressão somente era válida se a temperatura permanecesse constante. Por isso essa **Lei de Boyle** é também denominada **Lei de Boyle-Mariotte**.

Robert Boyle foi o responsável pela lei que rege as transformações sofridas por determinada massa de nosso modelo de gás perfeito quando sua temperatura se mantém constante (transformação **isotérmica**). É de fácil compreensão que uma redução de volume de um gás aumentará a concentração de partículas, aumentando o número de colisões nas paredes do recipiente, provocando um aumento na pressão do gás. Em contrapartida, o aumento do volume irá “espalhar” mais as partículas, diminuindo a concentração de choques nas paredes do recipiente, diminuindo, assim, a pressão do gás.

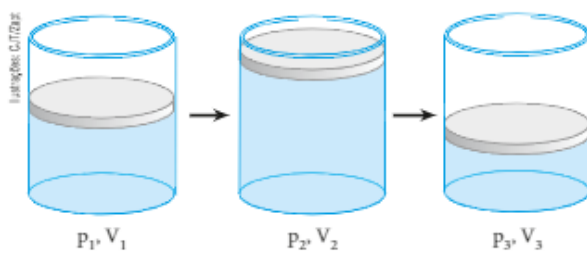
Para o modelo de gás perfeito vale o enunciado a seguir.

Quando determinada massa de um gás perfeito sofre uma **transformação isotérmica**, sua pressão varia de maneira inversamente proporcional ao volume por ele ocupado.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$pV = K_1$$

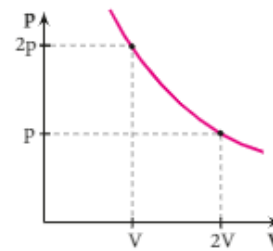
em que **p** é a pressão, **V** o volume e **K₁** uma constante que depende da massa, da temperatura e da natureza do gás. Isso significa, por exemplo, que, sob temperatura constante, para dobrarmos o valor da pressão devemos reduzir o valor do volume à metade.



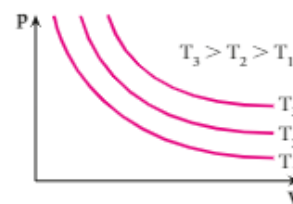
Nessas transformações, a massa e a temperatura do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Boyle** garante a validade da relação:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = p_3 V_3$$

Em um diagrama pressão (**p**) × volume (**V**), a representação gráfica da Lei de Boyle é um ramo de hipérbole.



Para cada valor da temperatura absoluta do gás, obtemos uma hipérbole diferente. Quanto maior a temperatura, mais afastada da origem dos eixos encontra-se a hipérbole.



5. LEI DE CHARLES E GAY-LUSSAC

Em 1802, após experimentos a respeito da expansão de um gás a pressão constante, Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), físico, químico e balonista francês, constatou que o volume variava na razão direta da variação de temperatura. Descobriu ainda que, a volume constante, a pressão e a temperatura também variavam na razão direta. Essas leis de Gay-Lussac eram uma confirmação das leis estabelecidas por Jacques Alexandre Cesar Charles em 1787, as quais, pelo fato de ele não as ter publicado, eram ainda desconhecidas por muitos. Dessa forma, essas leis podem ser chamadas de Leis de Charles ou Leis de Gay-Lussac ou, ainda, Leis de Charles e Gay-Lussac.

Joseph Louis Gay-Lussac.
Litografia de Delpuch, século XIX, coleção particular.



No início deste capítulo vimos que a pressão média exercida por um gás depende de dois fatores: da quantidade de partículas que colidem com a unidade de área da superfície interna do recipiente e da força exercida em cada colisão. Assim, se aumentamos o volume de um gás, suas partículas ficam mais espalhadas, diminuindo o número de colisões com a unidade de área.

Para compensarmos isso, devemos aumentar a intensidade das colisões, isto é, aumentar a temperatura do gás para manter a pressão constante. Se diminuirmos o volume do gás, as partículas ficarão mais concentradas, aumentando a frequência de colisões nas unidades de área. Para a manutenção da pressão devemos diminuir a intensidade das colisões, isto é, diminuir a temperatura do gás.

Assim, a **Lei de Charles e Gay-Lussac** pode ser enunciada da seguinte forma:

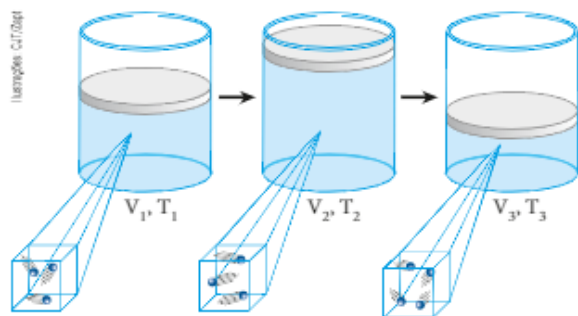
Quando determinada massa de gás perfeito passa por uma **transformação isobárica**, seu volume deve variar, mantendo-se diretamente proporcional à temperatura absoluta desse gás.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$V = K_2 T$$

Nessa expressão, V é o volume ocupado pelo gás, T sua temperatura absoluta e K_2 uma constante que depende da massa, da pressão e da natureza do gás, sendo inversamente proporcional ao valor da pressão, a qual permanece constante.

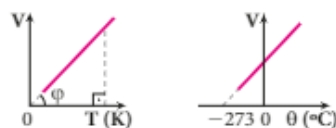
Dessa forma, para mantermos constante a pressão de um gás perfeito, ao dobrarmos o valor de sua temperatura absoluta, devemos dobrar a capacidade do recipiente que o contém.



Nessas transformações, a massa e a pressão do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Charles e Gay-Lussac** garante a validade da relação:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$$

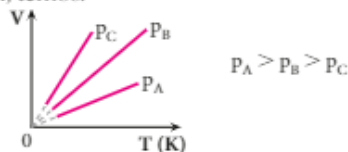
Em um diagrama volume (V) \times temperatura (T ou θ), a **Lei de Charles e Gay-Lussac** é representada por um segmento de reta oblíquo aos eixos.



É importante observar que, sendo o gás perfeito um modelo teórico constituído de partículas de volume desprezível, à temperatura correspondente ao zero absoluto, o volume desse gás praticamente se anula.

Para três pressões diferentes, p_A , p_B e p_C , sendo $p_A > p_B > p_C$, uma mesma massa de um mesmo gás perfeito apresenta três valores diferentes para K_2 , de forma que $K_{2A} < K_{2B} < K_{2C}$. Observe que K_2 é inversamente proporcional à pressão; então, para a maior pressão, temos o menor valor de K_2 , portanto o menor ângulo de declividade ϕ .

Assim, temos:



6. LEI DE CHARLES

Em 1787, Jacques Alexandre Cesar Charles (1746-1823), físico francês, descobriu que, a pressão constante, a variação de volume de um gás é proporcional à variação de sua temperatura. Ele não publicou as suas descobertas, e Gay-Lussac chegou à mesma conclusão em 1802. Em seus experimentos, Charles notou que toda substância no estado gasoso, mantida constante a pressão, ao ser aquecida a 1°C tem o volume variando $\frac{1}{273}$ do volume ocupado por esse gás a 0°C . Isso

levou Charles a concluir que, a -273°C , o volume de qualquer gás provavelmente se anularia. Essa temperatura deveria, então, ser a mínima possível para qualquer sistema. Isso foi utilizado, mais tarde, por Lord Kelvin na definição do zero absoluto. Foi também Charles quem estabeleceu a relação direta entre as variações de pressão e temperatura, a volume constante, de um gás.

Jacques Alexandre Cesar Charles. Litografia de Julien L. Boilly, coleção particular.



Arquivo:G-Imagem/Latimes

Recebe a denominação de **Lei de Charles** a lei que rege as transformações a volume constante de determinada massa de gás. As transformações a volume constante são chamadas de **isovolumétricas**, **isométricas** ou **isocóricas**.

A partir do estudo que fizemos da pressão média exercida por um gás, podemos inferir que, mantendo-se o volume constante, ao aumentarmos a temperatura absoluta aumentaremos a força média das colisões na unidade de área e a frequência de colisões, já que as partículas estarão mais rápidas. Assim, a pressão do gás aumentará. Por outro lado, se diminuirmos a temperatura absoluta, a intensidade e a frequência das colisões diminuirão, diminuindo a pressão desse gás.

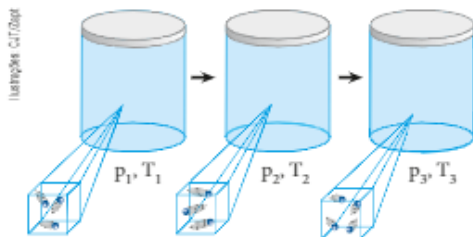
Para nosso modelo de gás perfeito, a Lei de Charles pode ser enunciada da seguinte forma:

Quando determinada massa de gás perfeito sofre uma **transformação isométrica**, sua pressão mantém-se diretamente proporcional à sua temperatura absoluta.

Essa lei pode ser expressa matematicamente por:

$$p = K_3 T$$

Nessa expressão, **p** é a pressão do gás, **T** a sua temperatura absoluta e **K₃** uma constante que depende da massa, do volume e da natureza do gás, sendo inversamente proporcional ao valor do volume, que permanece constante.



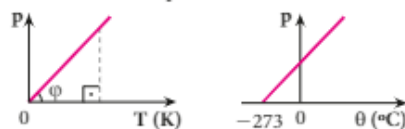
Nessas transformações, a massa e o volume do gás perfeito mantêm-se constantes. Dessa forma, a **Lei de Charles** garante a validade da relação:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

Assim, mantendo-se o volume constante, ao aumentarmos a temperatura absoluta de um gás perfeito, aumentaremos a força média dos choques das partículas nas paredes do recipiente, elevando a pressão na mesma proporção da temperatura absoluta.

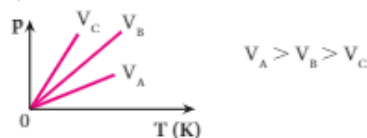
Admitindo que no zero absoluto cessa o movimento de translação das moléculas do gás, podemos concluir que a essa temperatura as partículas não mais se chocam com as paredes do recipiente, anulando-se a pressão.

Em um diagrama pressão (**p**) × temperatura (**T** ou **θ**), a **Lei de Charles** é representada por um segmento de reta oblíquo aos eixos.



Para três volumes diferentes, **V_A**, **V_B** e **V_C**, sendo **V_A > V_B > V_C**, uma mesma massa de um mesmo gás perfeito apresenta três valores diferentes para **K₃**, de forma que **K_{3A} < K_{3B} < K_{3C}**. Observe que **K₃** é inversamente proporcional ao volume, e, para o maior volume, temos o menor valor de **K₃**, portanto o menor ângulo φ.

Assim, temos:



7. EQUAÇÃO DE CLAPEYRON

Benoît Paul-Émile Clapeyron (1799-1864), engenheiro e físico francês, estudou os trabalhos, até então desconhecidos, de Sadi Carnot, dando uma formulação matemática a essas teorias e contribuindo, assim, para o progresso da Termodinâmica. Somente após esse tratamento matemático as análises verbais de Carnot passaram a ser consideradas pela comunidade científica. Thomson e Clausius foram influenciados por esse trabalho de Clapeyron na criação da 2ª Lei da Termodinâmica. Clapeyron juntou as leis de Boyle, Gay-Lussac e Charles a respeito de gases perfeitos e chegou à expressão que leva seu nome, a famosa **Equação de Clapeyron** ($pV = nRT$).

Foi Clapeyron quem estabeleceu a equação que relaciona as variáveis de estado: pressão (**p**), volume (**V**) e temperatura absoluta (**T**) de um gás perfeito, equação que nada mais é do que a síntese das leis de Boyle, Charles e Gay-Lussac.

De acordo com a **Lei de Boyle**, a pressão (**p**) e o volume (**V**) de um gás perfeito são inversamente proporcionais. Da **Lei de Charles e Gay-Lussac**, sabemos que o volume (**V**) é diretamente proporcional à temperatura absoluta (**T**) do gás. Da **Lei de Charles**, sabemos que a pressão (**p**) é diretamente proporcional à temperatura absoluta (**T**) do gás.

Não podemos esquecer ainda que, se a pressão de um gás é produzida pelo choque de suas partículas com as paredes do recipiente, a pressão (p) é função também do número de partículas, isto é, da massa (m) do gás considerado.

Considerando isso, podemos escrever que:

$p = K \frac{m T}{V}$ em que K é uma constante que depende apenas da natureza do gás.

Pode-se comprovar experimentalmente que, para diferentes gases, o valor de K é inversamente proporcional à massa molar (M) de cada gás: $K = \frac{R}{M}$ em que R é uma constante de proporcionalidade igual para todos os gases. É por isso que a constante R é denominada **constante universal dos gases perfeitos**.

Assim, a relação anterior fica dada por:

$$p = R \frac{m}{M} \frac{T}{V} \Rightarrow p V = \frac{m}{M} R T$$

Uma vez que o quociente m/M é o número de mols (n) do gás, a **Equação de Clapeyron** para os gases perfeitos toma seu aspecto definitivo:

$$p V = n R T$$

A constante universal dos gases perfeitos (R) e seus valores

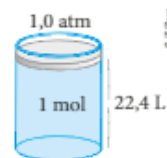
Nas denominadas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), quando a temperatura é 0°C e a pressão assume o valor $1,0\text{ atm}$, 1 mol de qualquer gás ocupa um volume correspondente a $22,4\text{ litros}$.

Resumindo, nas CNTP:

$$p = 1,0\text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$$

1 mol de qualquer gás ocupa um volume de $22,4\text{ L}$.



Da **Equação de Clapeyron**, temos: $R = \frac{p V}{n T}$.

Substituindo os dados anteriores, obtemos:

$$R = \frac{1\text{ atm} \cdot 22,4\text{ L}}{1\text{ mol} \cdot 273\text{ K}} \Rightarrow R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

A grandeza R é uma constante física; assim, possui unidades que, ao serem mudadas, produzem alteração no valor numérico da constante.

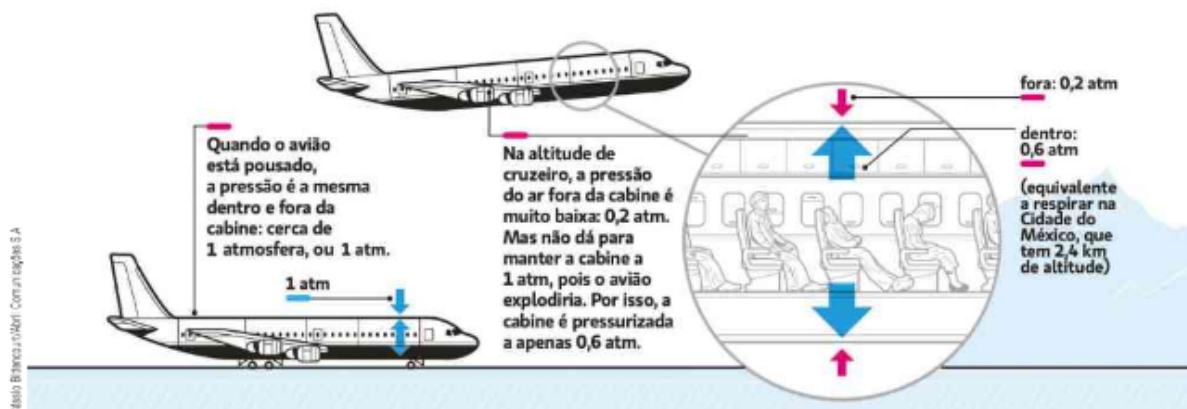
A constante R , dependendo das unidades das demais grandezas, pode assumir os valores:

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} = 8,31 \frac{\text{joules}}{\text{mol K}} \cong \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

A cabine de um avião é pressurizada. O que isso significa?

Quando entramos em um avião, o ar que respiramos no interior da aeronave está à mesma pressão do ar no exterior. As portas são fechadas e o avião levanta voo. À medida que ele sobe, a pressão na parte externa vai diminuindo e a pressão interna deve ser controlada para manter uma condição na qual as pessoas possam respirar sem dificuldades. No esquema abaixo você pode observar as diferenças de pressão de acordo com a altitude.



Pressurização em aeronaves.

Disponível em: <<http://super.abril.com.br/tecnologia/como-cal-um-aviao>>. Acesso em: 6 nov. 2015.

As portas do avião, ao serem fechadas, lacram o interior da aeronave e um sistema de refrigeração com válvulas adequadas funciona para manter a pressão em níveis que as pessoas suportem.

A depressurização da cabine ocorre quando o ar interno escapa, reduzindo a pressão no interior do avião. Nesse caso, o ar mais rarefeito fica difícil de ser respirado e as pessoas podem sofrer de hipóxia, quando o cérebro não recebe a quantidade mínima de oxigênio para o seu funcionamento.

Para evitar esse problema, existem máscaras que “caem” do teto do avião e que devem ser usadas pelos passageiros para restabelecer a respiração. Se a depressurização ocorrer de forma muito rápida, as pessoas podem não ter tempo suficiente para colocar as máscaras e perder rapidamente os sentidos, ficando inconscientes.

FAÇA VOCÊ MESMO

Enchendo um balão com gás obtido de uma reação química

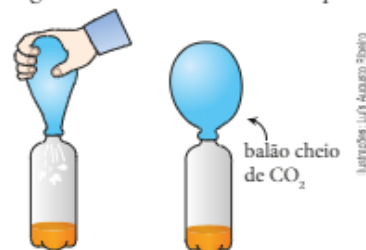
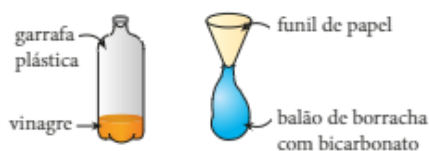
Na teoria deste capítulo, aprendemos que a pressão exercida por um gás ocorre pelas colisões de suas partículas com as paredes internas do recipiente. A comprovação desse fato pode ser observada por meio de uma atividade experimental simples e de fácil realização.

Material necessário

- 1 garrafa plástica de 1 L, transparente e de gargalo estreito, como as embalagens de água mineral;
- 200 mL de vinagre, aproximadamente o equivalente a quatro xícaras de café bem cheias;
- 1 funil, que pode ser feito com uma folha de papel;
- 1 colher de chá bem cheia de bicarbonato de sódio (NaHCO_3), usado como antiácido estomacal e encontrado em qualquer farmácia;
- 1 balão de borracha, desses usados em festas de aniversário.

Procedimento

- I. Coloque o vinagre no interior da garrafa plástica. Em seguida, usando o funil, coloque o bicarbonato de sódio no interior do balão de borracha.
- II. Prenda o bico do balão no gargalo da garrafa plástica e levante o balão, de modo que o bicarbonato de sódio caia no interior da garrafa, onde se encontra o vinagre. Observe atentamente o que ocorre.



Analisando o experimento

1. A reação causada pela mistura de bicarbonato de sódio com o vinagre libera uma grande quantidade de gás. Que gás é esse? Converse com seu professor de Química e equacione essa reação.
2. Por que o gás liberado pela reação química provoca a expansão do balão?
3. No final da atividade, amarre bem a boca do balão. Retire-o do gargalo da garrafa e leve-o ao interior de um freezer ou do congelador de sua geladeira. Após 30 minutos, observe o balão. Você saberia explicar o que aconteceu com ele?
4. Reúna-se com um grupo de colegas e façam uma pesquisa sobre **balonismo**. Descubram a função do ar quente na elevação dos balões.

QUESTÕES COMENTADAS



1 Em um recipiente indeformável, aprisiona-se certa massa de gás perfeito a 27 °C. Medindo a pressão exercida pelo gás, obtemos 90 cmHg. Se elevarmos a temperatura para 170,6 °F, qual será a nova pressão do gás?

RESOLUÇÃO

Uma vez que o volume permanece constante, podemos aplicar a **Lei de Charles**, que é expressa da seguinte forma:

$$p = K T \Rightarrow \frac{p}{T} = K$$

$$\text{Assim, temos: } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (I)$$

São dados: $p_1 = 90 \text{ cmHg}$ e $T_1 = 27 \text{ °C} = 300 \text{ K}$.

Transformando 170,6 °F na escala Kelvin, temos:

$$\frac{\theta_F - 32}{9} = \frac{T - 273}{5} \Rightarrow \frac{170,6 - 32}{9} = \frac{T_2 - 273}{5} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 15,4 = \frac{T_2 - 273}{5} \Rightarrow T_2 = 350 \text{ K}$$

Substituindo os valores conhecidos na relação (I), obtemos:

$$\frac{90}{300} = \frac{p_2}{350} \Rightarrow p_2 = 105 \text{ cmHg}$$

Resposta: 105 cmHg

2 Um gás, considerado perfeito, encontra-se aprisionado no interior de um recipiente cúbico cuja aresta mede 2 metros. A pressão exercida por esse gás é equivalente a 8% da pressão atmosférica normal. Qual é o módulo da força média aplicada pelo gás em cada face do recipiente?

Dado: $1 \text{ atm} = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

RESOLUÇÃO

Com base na definição de pressão: $p = \frac{F}{A}$

Assim, sendo a pressão de gás equivalente a 8% da pressão atmosférica normal, temos:

$$0,08 \cdot 1 \cdot 10^5 = \frac{F}{2 \cdot 2} \Rightarrow F = 3,2 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Resposta: $3,2 \cdot 10^4 \text{ N}$

3 Colocam-se 160 g de oxigênio, a 27 °C, em um recipiente com capacidade de 5,0 L. Considerando-se que o oxigênio comporta-se como um gás perfeito, qual é o valor da pressão exercida por ele?

Dados: massa molar do oxigênio = 32 g; $R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$.

RESOLUÇÃO

Aplicando a **Equação de Clapeyron** para os gases perfeitos, temos: $pV = nRT$; em que $n = m/M$, **R** é a constante universal dos gases perfeitos e **T** é a temperatura absoluta do gás.

$$V = 5,0 \text{ L}; n = \frac{m}{M} = \frac{160}{32} \Rightarrow n = 5,0 \text{ mols};$$

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}; T = 27 \text{ °C} = 300 \text{ K}.$$

$$\text{Portanto: } p \cdot 5,0 = 5,0 \cdot 0,082 \cdot 300 \Rightarrow p = 24,6 \text{ atm}$$

Resposta: 24,6 atm

4 Um cilindro metálico de paredes indeformáveis contém gás ideal a -23 °C. Quando aquecemos lentamente o sistema até 127 °C, uma válvula deixa escapar gás, a fim de manter a pressão interna constante, durante todo o processo. Determine a fração do gás inicial que escapa.

RESOLUÇÃO

Veja que o volume e a pressão do gás permanecem constantes. Aplicando a **Equação de Clapeyron**, temos: $pV = nRT$. Sendo pV = constante, podemos escrever:

$$n_1 R T_1 = n_2 R T_2 \Rightarrow n_1 T_1 = n_2 T_2 \quad (I)$$

São dados: $T_1 = -23 \text{ °C} = 250 \text{ K}$ e $T_2 = 127 \text{ °C} = 400 \text{ K}$

Substituindo esses valores na expressão (I), encontramos:

$$n_1 \cdot 250 = n_2 \cdot 400 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n_2 = 0,625n_1 \text{ ou } n_2 = 62,5\%n_1$$

Portanto, o gás que escapa representa 37,5% da massa inicial.

Resposta: 37,5% da massa inicial.

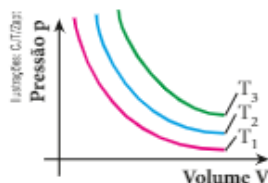


QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

5. O diagrama representa três isotermas T_1 , T_2 e T_3 , referentes a uma mesma amostra de gás perfeito. A respeito dos valores das temperaturas absolutas T_1 , T_2 e T_3 , pode-se afirmar que:



a) $T_1 = T_2 = T_3$

b) $T_1 < T_2 < T_3$

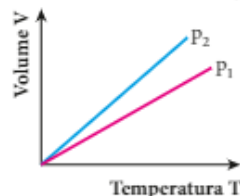
c) $T_1 > T_2 > T_3$

d) $T_1 = T_2 < T_3$

e) $T_2 > T_1 < T_3$

6. O diagrama mostra duas transformações isobáricas sofridas por uma mesma amostra de gás perfeito.

Com base nesses dados, pode-se afirmar que:



a) $p_2 > p_1$

b) $p_2 < p_1$

c) $p_2 = p_1$

d) $p_2 = 2p_1$

e) Num diagrama $V \times T$, não se pode comparar diferentes valores da pressão.

7. Certa massa de gás ideal, inicialmente nas CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão: $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$ e $p = 1,0\text{ atm}$), sofre uma transformação isobárica e aumenta seu volume em 80%. Em graus Celsius, qual foi a variação de temperatura sofrida por esse gás?

8. Certa massa de gás perfeito está em um recipiente de volume constante. No início, a temperatura do gás é de $47\text{ }^{\circ}\text{C}$, e a pressão registrada é equivalente a 100 mmHg . Qual será a nova pressão do gás se a sua temperatura for alterada para $207\text{ }^{\circ}\text{C}$?

9. Uma garrafa metálica aprisiona ar a uma temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob pressão de $1,2\text{ atm}$. Essa garrafa é colocada no interior de um forno e é aquecida até que sua tampa seja ejetada. Supondo que o ar se comporte como um gás perfeito, a dilatação da garrafa seja desprezível e a condição para a tampa ser ejetada seja uma pressão igual a $2,8\text{ atm}$, qual é a temperatura do ar no instante em que a tampa escapa da garrafa?

10. Um gás perfeito está confinado no interior de um recipiente, hermeticamente fechado, de volume constante. Em uma das faces, de forma retangular, de medidas 2 metros por 1,5 metro, o gás aplica uma força média de intensidade igual a $1,8 \cdot 10^4\text{ N/m}^2$. Se aumentarmos em 50% a temperatura absoluta do gás, qual será a intensidade da nova força média aplicada?

11. Em um recipiente rígido de 41 L de capacidade, são colocados 10 mols de um gás perfeito, à temperatura de $177\text{ }^{\circ}\text{C}$. Qual é o valor da pressão exercida por esse gás nas paredes internas do recipiente?

Dado: $R = 0,082\text{ atm L/mol K}$.

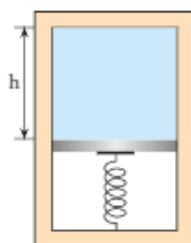
12. Que volume devem ocupar 6,0 mols de um gás perfeito, a $227\text{ }^{\circ}\text{C}$, para exercer nas paredes do recipiente uma pressão de 12 atm ?

Dado: $R = 0,082\text{ atm L/mol K}$.

13. Em um recipiente de paredes rígidas e capacidade igual a 10 L, são colocados 8,0 g de hidrogênio à temperatura de $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Qual é a pressão exercida pelo gás, supondo-se que ele se comporte como um gás perfeito?

Dados: $R = 0,082\text{ atm L/mol K}$; $\text{mol}(\text{H}_2) = 2\text{ g}$.

14. Um cilindro adiabático vertical foi dividido em duas partes por um êmbolo de 2,50 kg de massa, que está apoiado em uma mola ideal de constante elástica igual a $1,04 \cdot 10^5\text{ N/m}$. Na parte inferior do cilindro fez-se vácuo, e na parte superior foram colocados 5 mols de um gás perfeito.



Na situação de equilíbrio, a altura h vale 60 cm e a mola está comprimida em 20 cm.

Desprezando-se possíveis atritos, qual é a temperatura do gás, em graus Celsius?

Dados: $g = 10\text{ m/s}^2$; $R = 8,31\text{ J/mol K}$.

15. A densidade do nitrogênio, considerado como gás ideal, nas condições normais de temperatura e pressão, é de $1,25\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Qual será a massa de 10 L de nitrogênio à pressão de 700 mmHg e a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$?

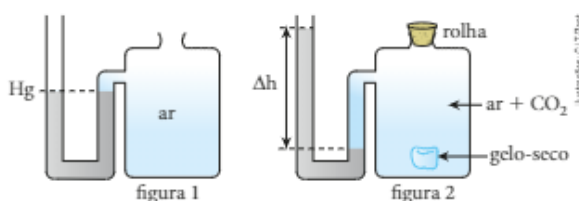
16. Ao ler um livro sobre tecnologia do vácuo, um aluno recebeu a informação de que o melhor "vácuo" que se pode obter no interior de um recipiente, na superfície da Terra, é da ordem de $2,5 \cdot 10^{-15}\text{ atm}$.

Considerando-se que o ar se comporta como um gás perfeito, aproximadamente quantas moléculas iremos encontrar em 1 mm^3 do interior desse recipiente, onde se fez o vácuo parcial, à temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Dados: $R = 0,082\text{ atm L/mol K}$; 1 litro = 1 dm^3 ; número de Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol.

- a) zero c) 602 e) $6 \cdot 10^{23}$
b) 60 d) 1820

17. Na figura 1, podemos observar um recipiente de volume 2 litros, que contém ar na pressão atmosférica local (70 cmHg), acoplado a um tubo em forma de U que contém mercúrio. No início, os níveis do mercúrio estão na mesma horizontal. Em seguida, é introduzida no recipiente uma porção de gelo-seco (CO_2). O recipiente é fechado. Após algum tempo, quando todo o gelo-seco passou para a fase gasosa, notamos que o mercúrio apresenta um desnível de 19 cm e a situação se estabiliza. Observe, para tanto, a figura 2. Despreze o volume do tubo em comparação com o do recipiente.



Todo o processo ocorre à temperatura do meio ambiente ($27\text{ }^{\circ}\text{C}$). Supondo-se que o ar e o CO_2 comportem-se como gases perfeitos, que a pressão atmosférica normal valha 76 cmHg e que a constante universal dos gases perfeitos valha $0,082\text{ atm L/mol K}$, o número de mols aproximado de CO_2 existente no recipiente é:

- a) 0,002 c) 0,2 e) 20
b) 0,02 d) 2

8. LEI GERAL DOS GASES

Quando determinada massa de gás perfeito (massa constante) sofre uma transformação em que as três variáveis – pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T) – se modificam, podemos usar a chamada **Lei Geral dos Gases**.

Essa lei é obtida a partir da **Equação de Clapeyron**. Para tanto, suponhamos que certa massa de gás perfeito se encontre inicialmente num estado definido por p_1 , V_1 e T_1 . Sofrendo uma transformação, essa **mesma** massa de gás passa para o estado definido por p_2 , V_2 e T_2 .

Se aplicarmos a Equação de Clapeyron separadamente para essas situações, teremos:

Estado (1):

$$p_1 V_1 = n R T_1$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = n R \quad (\text{I})$$

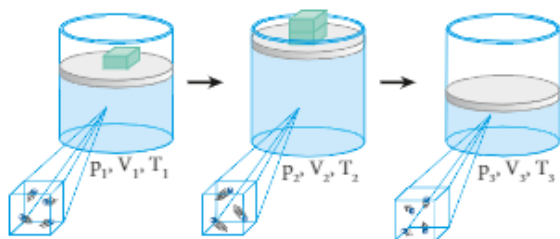
Estado (2):

$$p_2 V_2 = n R T_2$$

$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = n R \quad (\text{II})$$

Igualando (I) e (II), obtemos a seguinte relação, denominada **Lei Geral dos Gases**:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$



Nas transformações do exemplo, a massa do gás perfeito mantém-se constante, variando apenas as demais grandezas: pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T).

A **Lei Geral dos Gases** garante a validade da relação:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$$

9. MISTURA FÍSICA DE GASES PERFEITOS

A **mistura física de gases perfeitos** é a reunião de dois ou mais gases ideais, de forma a não ocorrerem reações químicas entre suas partículas, isto é, as interações existentes são estritamente físicas.

Ao calcular as grandezas físicas associadas à mistura, devemos lembrar que, sempre, numa mistura de gases perfeitos, o número de mols da associação é igual à soma do número de mols dos gases componentes.

Assim: $n_{\text{mistura}} = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_e$ (I)

Mas da **Equação de Clapeyron** temos:

$$p V = n R T \Rightarrow n = \frac{p V}{R T}$$

Daí, calculando o número de mols de cada gás antes da mistura, temos:

$$n_1 = \frac{p_1 V_1}{R T_1} \quad n_2 = \frac{p_2 V_2}{R T_2}$$

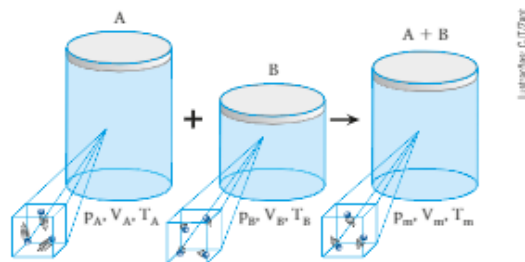
$$n_3 = \frac{p_3 V_3}{R T_3} \quad \dots \quad n_e = \frac{p_e V_e}{R T_e}$$

Para a mistura, podemos escrever: $n_m = \frac{p_m V_m}{R T_m}$.

Da expressão (I), temos:

$$\frac{p_m V_m}{T_m} = \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \dots + \frac{p_e V_e}{T_e}$$

Portanto, numa mistura de gases ideais, a razão $\frac{p V}{T}$ da mistura é a soma das razões $\frac{p V}{T}$ de cada um dos gases participantes, antes de fazerem parte da mistura.



Na ilustração, os gases perfeitos **A** e **B** são misturados fisicamente em um terceiro recipiente. A mistura terá um número de mols n igual à soma dos números de mols de **A** e **B** ($n = n_A + n_B$). Assim:

$$\frac{p_m V_m}{T_m} = \frac{p_A V_A}{T_A} + \frac{p_B V_B}{T_B}$$

10. O MODELO MICROSCÓPICO DE GÁS PERFEITO

O estudo do gás perfeito realizado sob a perspectiva microscópica leva-nos à **Teoria Cinética dos Gases**. Nesse modelo teórico, por encontrarmos um número muito grande de partículas por unidade de volume (ordem de 10^{20} partículas por cm^3), as hipóteses impostas representam o que deve acontecer, em média, com as partículas do gás.

Vejam as hipóteses da Teoria Cinética a respeito dos gases perfeitos:

- Uma porção de gás perfeito é constituída de um grande número de moléculas em movimento caótico (todas as direções são igualmente prováveis).
- As moléculas são consideradas pontos materiais, isto é, suas dimensões são desprezíveis quando comparadas com as distâncias que percorrem entre colisões sucessivas.
- As colisões entre duas moléculas ou entre uma molécula e uma parede do recipiente são supostas perfeitamente elásticas (não há perda de energia cinética).
- Cada colisão tem duração desprezível quando comparada com o tempo decorrido entre colisões sucessivas.
- Entre colisões sucessivas, o movimento das moléculas é retilíneo e uniforme. Isso equivale a desprezar as forças gravitacionais e intermoleculares.
- As forças intermoleculares só se manifestam durante as colisões.
- O estudo das colisões das moléculas do gás pode ser feito com base na mecânica newtoniana.

11. A TEMPERATURA NA TEORIA CINÉTICA

Como vimos, a temperatura de um gás perfeito está relacionada com a energia de movimentação das moléculas. Agora, vamos analisar esse fato utilizando as informações da Teoria Cinética.

É possível demonstrar que a pressão (p) se relaciona com a velocidade média quadrática (\bar{v}) por:

$$p = \frac{1}{3} \mu (\bar{v})^2$$

A massa específica (μ), entretanto, é o quociente da massa total (m) do gás pelo volume (V) ocupado por ele:

$$\mu = \frac{m}{V}$$

Daí:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} (\bar{v})^2 \Rightarrow 3pV = m (\bar{v})^2 \quad (\text{I})$$

A **Equação de Clapeyron** fornece-nos:

$$pV = nRT \quad (\text{II})$$

Comparando (I) e (II), temos: $3nRT = m(\bar{v})^2$.

Mas: $n = \frac{m}{M}$. Portanto: $3 \frac{m}{M} RT = m(\bar{v})^2$.

$$\text{Assim, temos: } T = \frac{M}{3R} (\bar{v})^2$$

Do exposto, observamos que a temperatura absoluta de um gás perfeito é função da velocidade média quadrática de suas partículas e da natureza do gás (T depende de M , que é a massa molar do gás).

Essa lei é válida para qualquer gás, desde que seu comportamento seja igual ou aproximadamente igual ao do gás perfeito.

12. A ENERGIA INTERNA DE UM GÁS PERFEITO

Das hipóteses do modelo teórico de gás perfeito, sabemos que as suas moléculas são pontos materiais que não interagem entre si. Consequentemente, essas moléculas não possuem energia cinética de rotação nem energia potencial.

Podemos, então, dizer que a energia interna (U) de uma amostra de gás perfeito é a energia cinética de translação de suas moléculas.

$$\text{Assim, vale a expressão: } U = \frac{1}{2} m (\bar{v})^2 \quad (\text{I})$$

em que m é a massa total do gás e \bar{v} , a velocidade média quadrática das partículas.

Usando a relação demonstrada no item anterior:

$$T = \frac{M}{3R} (\bar{v})^2 \Rightarrow (\bar{v})^2 = \frac{3RT}{M} \quad (\text{II})$$

$$\text{Substituindo (II) em (I): } U = \frac{1}{2} \frac{m}{M} 3RT$$

$$\text{Como } \frac{m}{M} = n, \text{ obtemos: } U = \frac{3}{2} nRT$$

A **energia interna** de um gás perfeito é função exclusiva do número de mols (n) e da temperatura absoluta (T) do gás.

Para um gás real, a expressão deduzida não é válida, uma vez que no **zero absoluto** sua **energia interna não é nula**. Ao valor da energia interna no zero absoluto dá-se o nome de **energia do ponto zero**. Essa expressão, no entanto, é válida, com boa aproximação, para gases reais monoatômicos, em baixas pressões e altas temperaturas. O valor do coeficiente $\frac{3}{2}$ varia com a atomicidade do gás real. No caso de gases biatômicos, por exemplo, o coeficiente assume o valor $\frac{5}{2}$.

QUESTÕES COMENTADAS



18 Um recipiente provido de êmbolo contém um gás ideal, de tal forma que $V_1 = 2,0 \text{ L}$, $p_1 = 3,495 \text{ atm}$ e $T_1 = 233 \text{ K}$. O êmbolo é comprimido, reduzindo o volume em 40%. Quanto devemos aquecer esse gás para que a pressão se torne igual a $7,825 \text{ atm}$? Dê a resposta na escala Fahrenheit.

RESOLUÇÃO

Já que a massa do gás não varia, pode-se usar a Lei Geral dos Gases:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Note que: $V_2 = V_1 - 0,4 \cdot V_1 = 0,6 \cdot V_1$

$$V_2 = 0,6 \cdot 2,0 \text{ (L)} \Rightarrow V_2 = 1,2 \text{ L}$$

$$\text{Então: } \frac{3,495 \cdot 2,0}{233} = \frac{7,825 \cdot 1,2}{T_2} \Rightarrow T_2 = 313 \text{ K}$$

Como a questão pede **quanto** devemos aquecer o gás, temos:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \Rightarrow \Delta T = 313 - 233 \Rightarrow \Delta T = 80 \text{ K}$$

Entretanto, a resposta deve ser dada em unidades da escala Fahrenheit.

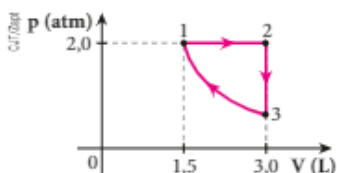
$$\frac{\Delta T_K}{\Delta \theta_F} = \frac{100}{180} \Rightarrow \frac{80}{\Delta \theta_F} = \frac{100}{180} \Rightarrow \Delta \theta_F = 144 \text{ }^\circ\text{F}$$

Resposta: 144 °F

19 Um gás perfeito realiza um ciclo (1, 2, 3, 1) formado por três transformações: (1, 2) isobárica, (2, 3) isovolumétrica e (3, 1) isotérmica. Em **1**, suas variáveis de estado são: pressão $p_1 = 2,0 \text{ atm}$, volume $V_1 = 1,5 \text{ L}$ e temperatura $\theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Na transformação isobárica (1, 2), o volume do gás é duplicado. Calcule os valores das variáveis de estado (pressão, volume e temperatura) em cada um dos dois outros estados (2 e 3).

RESOLUÇÃO

O ciclo (1, 2, 3, 1), formado pelas transformações (1, 2) isobárica (pressão constante), (2, 3) isovolumétrica (volume constante) e (3, 1) isotérmica (temperatura constante), é representado no **diagrama de Clapeyron**:



No estado (1), as variáveis de estado do gás são dadas por:

$$p_1 = 2,0 \text{ atm}; V_1 = 1,5 \text{ L}; \theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_1 = 293 \text{ K}$$

No estado (2), após ter sofrido uma transformação isobárica ($p = \text{cte.}$) e ter dobrado o volume, as variáveis de estado do gás ficam:

$$p_2 = 2,0 \text{ atm} \quad \text{e} \quad V_2 = 3,0 \text{ L}$$

$\theta_2 = ?$

Usando a **Lei Geral dos Gases**, uma vez que o número de mols permanece constante, temos:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{2,0 \cdot 1,5}{293} = \frac{2,0 \cdot 3,0}{T_2}$$

$$\text{Logo: } T_2 = 586 \text{ K} \Rightarrow \theta_2 = 313 \text{ }^\circ\text{C}$$

No estado (3), após ter sofrido uma transformação isovolumétrica ($V = \text{cte.}$), o gás tem as seguintes variáveis de estado:

$$p_3 = ? \quad V_3 = 3,0 \text{ L} \quad (\text{transformação isovolumétrica})$$

$\theta_3 = \theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (pois o gás volta ao estado (1) numa transformação isotérmica)

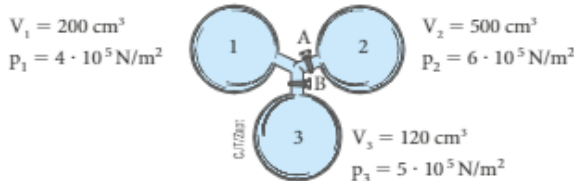
Usando novamente a **Lei Geral dos Gases**, temos:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \Rightarrow \frac{2,0 \cdot 3,0}{586} = \frac{P_3 \cdot 3,0}{293}$$

$$\text{Logo: } p_3 = 1,0 \text{ atm}$$

Resposta: $p_2 = 2,0 \text{ atm}$, $V_2 = 3,0 \text{ L}$ e $\theta_2 = 313 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $p_3 = 1,0 \text{ atm}$, $V_3 = 3,0 \text{ L}$ e $\theta_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

20 Três recipientes contêm gases sob pressão e volume conforme representado a seguir:



As paredes dos recipientes são diatérmicas (permitem trocas de calor com o meio externo). Abrindo-se as válvulas **A** e **B**, os gases misturam-se, sem reações químicas, mantendo a temperatura constante (igual à temperatura ambiente). Qual é o valor aproximado da pressão final da mistura?

RESOLUÇÃO

Para uma mistura de gases perfeitos em que não há variação do número de mols dos componentes, temos:

$$\frac{P_m V_m}{T_m} = \frac{P_1 V_1}{T_1} + \frac{P_2 V_2}{T_2} + \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

Observe que, na mistura, vale: $n_m = n_1 + n_2 + n_3$

Como $T_1 = T_2 = T_3 = T_m = T_{\text{ambiente}}$ e

$$V_m = V_1 + V_2 + V_3 \Rightarrow V_m = 820 \text{ cm}^3, \text{ temos:}$$

$$P_m \cdot 820 = 4 \cdot 10^5 \cdot 200 + 6 \cdot 10^5 \cdot 500 + 5 \cdot 10^5 \cdot 120$$

$$P_m \cong 5,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

Resposta: Aproximadamente $5,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

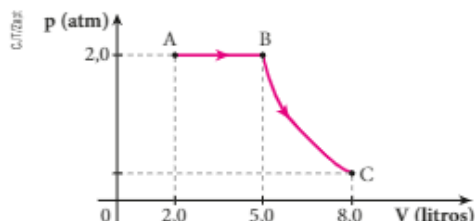


QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

21. Uma amostra de gás perfeito sofre as transformações AB (isobárica) e BC (isotérmica) representadas no diagrama pressão \times volume:



Sabe-se que a temperatura do gás, na situação representada pelo ponto B, vale 27 °C.

Qual é a temperatura desse gás nas situações A e C?

22. Certa massa de gás perfeito é colocada, a 27 °C, em um recipiente de 5,0 L de capacidade, exercendo em suas paredes uma pressão equivalente a 2,0 atm. Mantendo-se a massa e transferindo-se o gás para um outro recipiente de 3,0 L de capacidade, quer-se ter esse gás sob pressão de 5,0 atm. Para tanto, a que temperatura deve-se levar o gás?

23. O Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) resolveu lançar um balão que leva acoplados instrumentos utilizados para a previsão do tempo. Considere um balão que apresentava 15 m³ de volume no momento em que foi lacrado no solo, em um local onde a pressão atmosférica vale 1,0 atm e a temperatura 27 °C.

Lançamento de balão meteorológico. Campus do Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília. Maio de 2012.



INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA

Em certo instante de sua subida os instrumentos registram uma temperatura de -23 °C e pressão atmosférica de 0,5 atm. Nesse momento qual é o volume desse balão?

Considere que a massa do gás interno permanece constante.

24. No interior de um recipiente de volume variável, são introduzidos n mols de um gás perfeito. Os quadros a seguir contêm os valores medidos da pressão (p), do volume (V) e da temperatura absoluta (T) dessa amostra de gás perfeito em duas situações diferentes, denominadas A e B:

p_A (atm)	V_A (L)	T_A (K)	p_B (atm)	V_B (L)	T_B (K)
16,40	3,0	300	19,22	2,5	?

Usando os dados dos quadros e sabendo que a constante universal dos gases perfeitos vale $R = 0,082$ atm L/mol K, determine os valores de n e de T_B .

25. Em um recipiente A, de capacidade igual a 25 L, há nitrogênio à temperatura de -23 °C, sob pressão de 3,0 atm. Em outro recipiente B, com 30 L de capacidade, há oxigênio à temperatura de 127 °C sob pressão de 8,0 atm. Ambos os gases são colocados em um terceiro reservatório de capacidade de 27 L, no qual se misturam. Admitindo que esses gases não interagem quimicamente e que se comportam como gases perfeitos, qual será a temperatura final da mistura gasosa, sabendo que a pressão passou a ser de 10 atm?

26. Um recipiente de 600 cm³ contém criptônio a uma pressão de 400 mmHg. Outro recipiente de 200 cm³ está cheio de hélio a 1200 mmHg. Misturam-se os conteúdos de ambos os recipientes, abrindo-se uma válvula de conexão. Supondo que todas as operações se realizem a temperatura constante, determine a pressão total da mistura.

Despreze o volume da válvula e dos tubos de conexão.



DESCUBRA MAIS

Quando um recipiente de 1,5 litro de água mineral com gás é aberto, você pode observar bolhas subindo através do líquido. Essas bolhas aumentam de tamanho, praticamente dobrando seu volume, quando atingem as proximidades da superfície. Por que esse aumento de volume ocorre?



TERMODINÂMICA

1. INTRODUÇÃO

O estudo da Física envolve quase sempre um conceito primitivo denominado **energia**. Essa energia manifesta-se de várias formas, recebendo em cada caso um nome que a caracteriza: energia mecânica, energia térmica, energia elétrica, energia luminosa, entre outros.

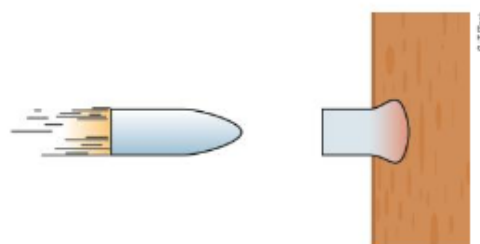


Quando nos propomos a estudar Termodinâmica, um dos primeiros exemplos de máquina térmica que encontramos é o da maria-fumaça. Essa precursora das locomotivas atuais, que são elétricas ou funcionam a óleo *diesel*, tinha no aquecimento de água e na expansão do vapor (quando era realizado trabalho) o princípio termodinâmico de seu funcionamento.

É importante lembrar que a realização de trabalho pode envolver trânsito ou conversão de energia e que calor também é energia em trânsito.

A **Termodinâmica** estuda as transformações e as relações existentes entre dois tipos de energia: energia mecânica e energia térmica.

Para exemplificar, vamos considerar um projétil atirado contra um bloco de madeira.



Antes de chocar-se com a madeira, o projétil possui uma energia mecânica (cinética). Após o choque, essa energia mecânica converte-se em outras formas de energia, principalmente térmica. Esse fato fica evidenciado pelo aquecimento do projétil, em decorrência do choque. Isso significa que a energia (interna) de agitação das suas partículas se intensificou. Assim, houve conversão de energia mecânica em térmica. Essa conversão é medida pelo trabalho realizado pelas forças que se opuseram à penetração do projétil.

Vejam, agora, um exemplo um pouco mais complexo: um reator nuclear. Nesse sistema, ocorre fissão de núcleos de urânio (geralmente U^{235} , urânio enriquecido), que liberam calor. O calor é absorvido pela água existente no corpo do reator, que entra em ebulição, vaporizando. O vapor de água expande-se por uma tubulação, onde encontra, como obstáculo, as partes móveis de uma turbina. Devido à expansão, esse vapor aciona as turbinas, girando-as para que ocorra a produção de energia elétrica. Observe que parte da energia térmica existente nas partículas do vapor é transformada em energia mecânica na movimentação das partes móveis das turbinas, com a realização de trabalho.

Dos exemplos mais simples (como o impacto e a penetração da bala na madeira) aos mais sofisticados (como o funcionamento de um reator nuclear), podemos observar que é possível converter energia mecânica em térmica e vice-versa.

Em todos os casos em que ocorre essa conversão, há um sistema físico intermediário que transforma um dos dois tipos de energia recebido no outro. No reator nuclear, por exemplo, o sistema intermediário, ou **fluido operante**, é a água, que vaporiza ao receber calor. Os vapores de água expandem-se, realizando trabalho.

Como estudamos a Física por meio de **modelos teóricos**, para entendermos os princípios básicos de cada parte dela, devemos utilizar situações que simplifiquem a realidade. Assim, a seguir faremos um estudo da **termodinâmica dos gases perfeitos**. Veremos situações em que o sistema físico intermediário na conversão entre energia térmica e energia mecânica é o modelo teórico de gás que denominamos **gás perfeito**.



Uma máquina térmica que faz parte de nosso dia a dia é o motor de automóvel. A explosão do combustível (gasolina, álcool ou *diesel*) origina gases aquecidos que empurram o pistão, realizando trabalho. O movimento do pistão é transferido para as rodas, que giram e proporcionam o movimento do automóvel.

2. ENERGIA INTERNA, TRABALHO E CALOR

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, são parâmetros básicos as grandezas físicas **energia interna (U)**, **trabalho (τ)** e **quantidade de calor (Q)** associadas a uma transformação sofrida pelo gás perfeito. Vejamos melhor cada uma dessas três grandezas.

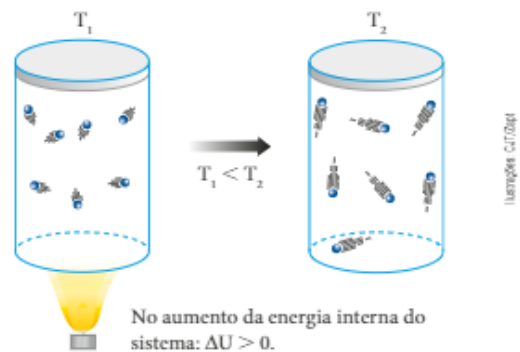
Energia interna

A energia interna de um sistema é o somatório de vários tipos de energia existentes em suas partículas. Nesse cálculo, consideramos as energias cinética de agitação (ou de translação), potencial de agregação, de ligação, nuclear, enfim todas as energias existentes em suas moléculas. Observemos que apenas parte dessa energia (cinética de agitação e potencial de agregação) é térmica. Quando fornecemos energia térmica para um corpo ou a retiramos dele, provocamos a variação de sua energia interna.

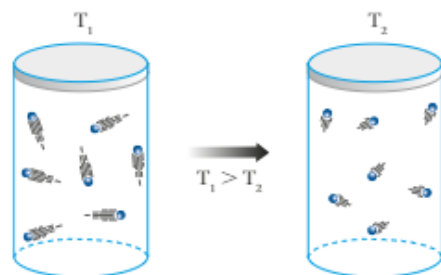
É essa variação que utilizaremos em Termodinâmica.

No caso do gás perfeito, como vimos nas considerações gerais, as partículas são esferas de dimensões desprezíveis, não existindo energia de ligação, muito menos energia de agregação. Como as dimensões são desprezíveis, também não existe energia de rotação. Dessa forma, a energia interna se resume na energia de translação de suas partículas, e seu cálculo é feito pela expressão definida pela **Lei de Joule**, como vimos no capítulo anterior: $U = \frac{3}{2}nRT$

Observemos que a energia interna (U) de um gás perfeito é função de sua temperatura absoluta (T). Para determinada massa de gás perfeito ($n = \text{constante}$), o aumento da temperatura absoluta corresponde a um aumento da energia interna, e a variação de energia interna ΔU é **positiva** ($\Delta U > 0$).



Se há diminuição de temperatura, a energia interna diminui, e sua variação é **negativa** ($\Delta U < 0$).



Quando a temperatura permanece constante, a energia interna também se mantém constante. Portanto, sua variação é nula ($\Delta U = 0$).

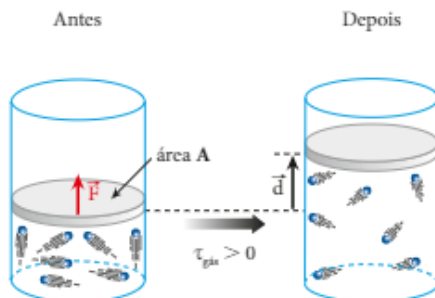
Relacionando a **Lei de Joule** com a **Equação de Clapeyron**, podemos escrever:

$$U = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}pV$$

A expressão da Lei de Joule $U = \frac{3}{2} nRT$ também é válida aproximadamente para os gases reais rarefeitos monoatômicos. Para os gases de outras atomicidades, entretanto, o cálculo é diferente, já que existem outras parcelas de energia a serem consideradas, como vimos no Capítulo 4.

Trabalho

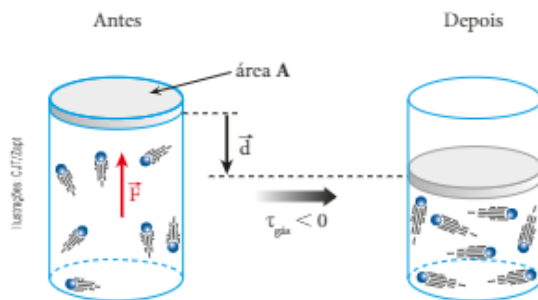
De acordo com o que já foi estudado em Mecânica, todo trabalho é realizado por uma força. Vamos, então, considerar a expansão de um gás perfeito, representada na figura abaixo.



Esquema de expansão de um gás perfeito: volume final maior que volume inicial.

A força (\vec{F}) exercida no êmbolo pelo gás tem o mesmo sentido do deslocamento sofrido pelo êmbolo (\vec{d}). Consequentemente, o trabalho realizado por essa força é **positivo** ($\tau_{\text{gás}} > 0$).

Consideremos agora a compressão de um gás perfeito.

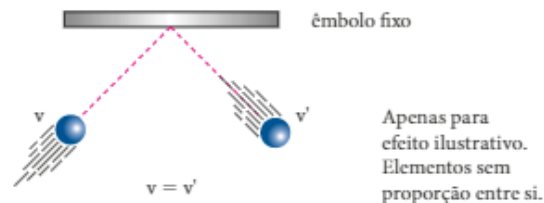


Esquema de compressão de um gás perfeito: volume final menor que volume inicial.

Nesse caso, a força (\vec{F}) exercida pelo gás tem sentido oposto ao do deslocamento (\vec{d}) do êmbolo. Consequentemente, o trabalho realizado por essa força é **negativo** ($\tau_{\text{gás}} < 0$).

Evidentemente, se o gás não se expande nem é comprimido, temos $\tau_{\text{gás}} = 0$, pois o êmbolo não se desloca.

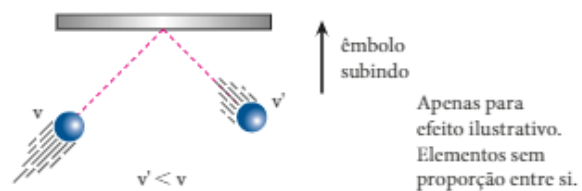
Quando o êmbolo representado nas figuras anteriores não muda de posição, as moléculas do gás que se chocam contra ele retornam com a mesma velocidade escalar, uma vez que os choques são supostos perfeitamente elásticos.



Quando o gás se expande, durante a subida do êmbolo, moléculas do gás chocam-se contra ele e retornam com velocidades escalares menores.

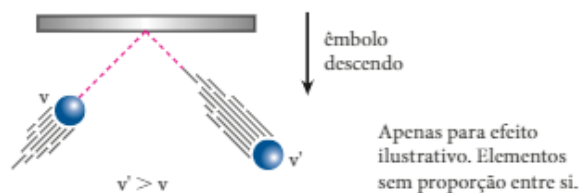
Isso significa que, ao expandir-se, o gás perde energia na forma de trabalho. Essa energia perdida corresponde, pelo menos em parte, ao acréscimo de energia potencial gravitacional do êmbolo e de algum corpo que eventualmente esteja sobre ele.

Assim, o gás fornece energia durante esse trabalho. Por isso, diz-se que "o gás realiza trabalho".



Quando o gás é comprimido, durante a descida do êmbolo, moléculas do gás chocam-se contra ele, retornando com velocidades escalares maiores.

Nesse caso, o gás recebe energia na forma de trabalho. Por isso, diz-se que "o gás recebe trabalho" na compressão.

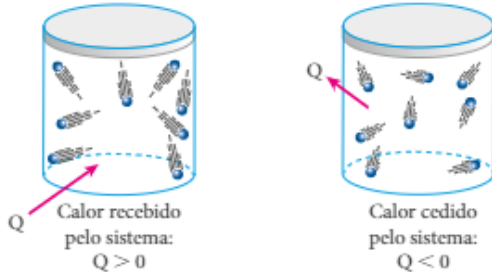


Na **expansão**, $\tau_{\text{gás}} > 0$ e o gás fornece energia na forma de trabalho: o gás **realiza trabalho**.

Na **compressão**, $\tau_{\text{gás}} < 0$ e o gás recebe energia na forma de trabalho: o gás **recebe trabalho**.

Calor

Já vimos que calor é a energia térmica transitando de um sistema para outro. Assim, um dos sistemas **cede** essa energia, e o outro a **recebe**. Será convenicionado que o calor recebido é **positivo** e o calor cedido, **negativo**.

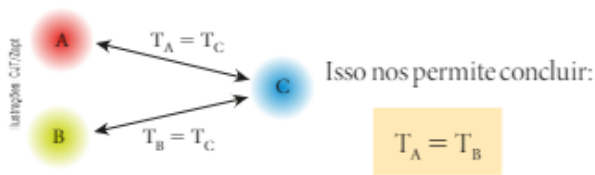


Os sinais atribuídos ao calor recebido e ao calor cedido tornam correta a maneira como equacionaremos a **1ª Lei da Termodinâmica**. É muito importante notar que as trocas de energia entre um sistema gasoso e o meio externo podem dar-se tanto pela realização de trabalho como por trocas de calor.

3. LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

A **Lei Zero da Termodinâmica** trabalha o conceito de **equilíbrio térmico**. Essa lei diz que dois sistemas físicos estão em equilíbrio se, ao serem colocados em contato térmico, não há fluxo de calor entre eles. Como a condição para existir fluxo de calor entre dois locais é que exista uma diferença de temperatura, concluímos que o equilíbrio térmico indica a igualdade das temperaturas dos dois sistemas.

A partir da **Lei Zero da Termodinâmica** também podemos concluir que, se dois sistemas físicos, **A** e **B**, estão individualmente em equilíbrio térmico com um terceiro sistema **C**, ambos estarão em equilíbrio térmico entre si ($T_A = T_B$). Esquematicamente, temos:



4. A 1ª LEI DA TERMODINÂMICA

O conhecido **Princípio da Conservação da Energia**, quando aplicado à Termodinâmica, recebe a denominação de **1ª Lei da Termodinâmica**.

Com a aplicação dessa lei, podemos, por meio de uma “contabilidade” energética, saber o que ocorre

com um sistema gasoso ao sofrer uma transformação termodinâmica.

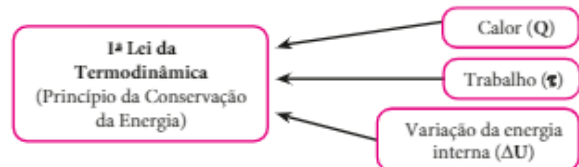
Essa lei pode ser enunciada da seguinte forma:

Para todo sistema termodinâmico existe uma função característica denominada **energia interna**. A variação dessa energia interna (ΔU) entre dois estados quaisquer pode ser determinada pela diferença entre a quantidade de calor (Q) e o trabalho ($\tau_{\text{gás}}$) trocados com o meio externo.

Matematicamente, essa lei pode ser expressa por:

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

É importante observar que essas grandezas podem ser positivas, negativas ou nulas.



Para entender o mecanismo de aplicação da **1ª Lei da Termodinâmica**, tomemos como exemplo um sistema gasoso contido em um recipiente provido de êmbolo móvel.

Exemplo 1:

O gás recebe de uma fonte térmica externa uma quantidade de calor igual a 1000 cal ($Q = +1000$ cal). Essa energia, além de produzir um aquecimento no gás, provoca sua expansão, com consequente realização de trabalho equivalente a 600 cal ($\tau_{\text{gás}} = +600$ cal).

Já que a energia fornecida pelo sistema para o ambiente em forma de trabalho é menor que a recebida em forma de calor, pode-se concluir que o restante ficou no gás, na forma de energia interna, produzindo neste um aumento de 400 cal ($\Delta U = +400$ cal).

A aplicação da equação da **1ª Lei da Termodinâmica** leva-nos à mesma conclusão.

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

Sendo: $Q = +1000$ cal (calor recebido); $\tau_{\text{gás}} = +600$ cal (trabalho realizado), temos:

$$\Delta U = (+1000) - (+600)$$

$\Delta U = +400$ cal

O sinal positivo de ΔU indica que o sistema sofreu um **aumento** em sua energia interna.

Exemplo 2:

O gás é comprimido, recebendo um trabalho igual a 500 J ($\tau_{\text{gás}} = -500 \text{ J}$). Simultaneamente, esse gás perde para o ambiente uma quantidade de calor correspondente a 600 J ($Q = -600 \text{ J}$).

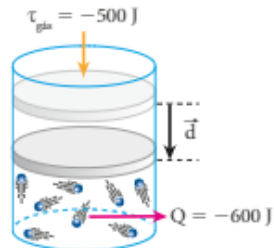
Como o total de energia deve conservar-se, concluímos que, pelo fato de o calor cedido ser, em módulo, maior que a energia recebida em forma de trabalho, a diferença de 100 J saiu do próprio sistema, diminuindo sua energia interna ($\Delta U = -100 \text{ J}$).

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$$

Sendo: $Q = -600 \text{ J}$ (calor cedido); $\tau_{\text{gás}} = -500 \text{ J}$ (trabalho recebido), temos:

$$\Delta U = (-600) - (-500) = -600 + 500$$

$$\Delta U = -100 \text{ J}$$



O sinal negativo de ΔU indica que o sistema sofreu uma **diminuição** em sua energia interna.

Observe que é indiferente usarmos as unidades **caloria** ou **joule**. O que não podemos fazer é misturar as duas unidades.

5. TRANSFORMAÇÕES TERMODINÂMICAS PARTICULARES

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, encontramos quatro transformações particulares que devem ser analisadas com mais detalhes: a **isotérmica**, a **isométrica**, a **isobárica** e a **adiabática**.

Transformação isotérmica

Nas transformações isotérmicas, a temperatura do sistema gasoso mantém-se constante e, em consequência, a variação de sua energia interna é nula ($\Delta U = 0$). Lembre-se de que a energia interna de um gás perfeito é função de sua temperatura absoluta ($U = \frac{3}{2} nRT$).

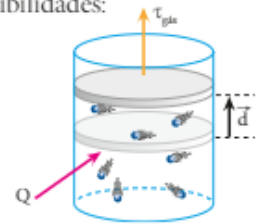
Aplicando a equação da **1ª Lei da Termodinâmica** a essa transformação, temos: $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$

$$0 = Q - \tau_{\text{gás}} \Rightarrow Q = \tau_{\text{gás}}$$

Isso significa que o calor e o trabalho trocados com o meio externo são iguais.

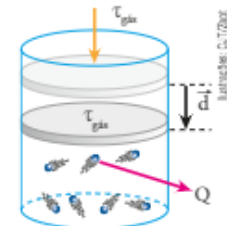
Esse fato indica duas possibilidades:

a) Se o sistema gasoso recebe calor ($Q > 0$), essa energia é integralmente utilizada na realização de trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$).



$$Q = \tau_{\text{gás}}, \text{ pois } \Delta U = 0. \quad Q > 0 \text{ e } \tau_{\text{gás}} > 0.$$

b) Se o sistema gasoso recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), ele cede para o meio externo igual quantidade de energia em forma de calor ($Q < 0$).



$$\tau_{\text{gás}} = Q, \text{ pois } \Delta U = 0. \quad \tau_{\text{gás}} < 0 \text{ e } Q < 0.$$

É muito importante observar que a temperatura do gás não varia em uma transformação isotérmica, mas ele troca calor com o meio externo.

Transformação isométrica

Nas transformações isométricas (também denominadas isovolumétricas, ou ainda, isocóricas), o volume do gás mantém-se constante e, em consequência, o sistema não troca trabalho com o meio externo ($\tau_{\text{gás}} = 0$). Portanto, nesse tipo de transformação o sistema não realiza nem recebe trabalho.

Utilizando a equação da **1ª Lei da Termodinâmica**, obtemos: $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$

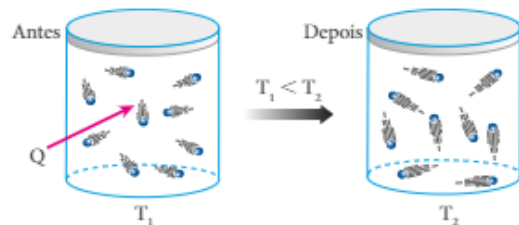
$$\Delta U = Q - 0 \Rightarrow \Delta U = Q$$

Isso significa que a variação de energia interna sofrida pelo sistema gasoso é igual ao calor trocado com o meio externo.

Temos, então, duas situações a considerar:

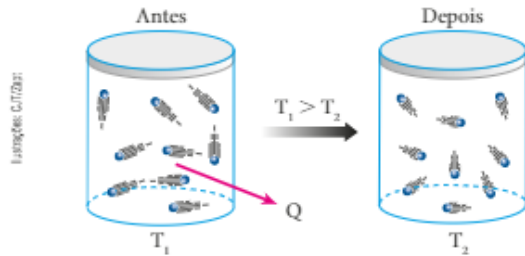
a) Se o sistema recebe calor ($Q > 0$), sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) em igual valor.

$$\tau_{\text{gás}} = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$$



b) Se o sistema cede calor ($Q < 0$), sua energia interna diminui ($\Delta U < 0$) em igual valor.

$$\tau_{\text{gás}} = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$$



Transformação isobárica

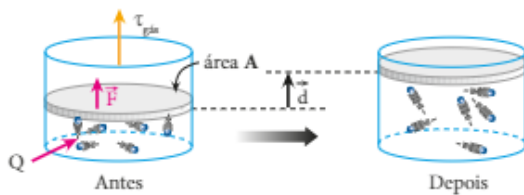
Nas transformações isobáricas, a pressão do sistema gasoso mantém-se constante. Dessa forma, a análise do que ocorre é feita pela **Equação de Clapeyron** (é bom lembrar que estamos utilizando o gás perfeito como sistema físico intermediário):

$$p V = n R T$$

Note que o volume (V) do gás varia na razão direta da temperatura absoluta (T), já que as demais grandezas permanecem constantes nessa transformação. Há, então, duas situações a considerar:

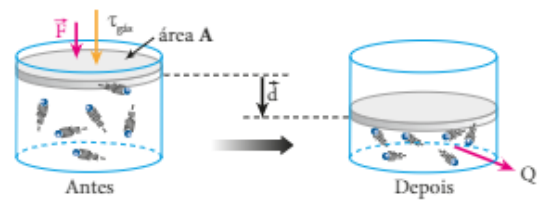
a) Quando a temperatura absoluta do sistema aumenta, seu volume também aumenta. Isso significa que sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) e que o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$). É evidente que toda essa energia entra no sistema na forma de calor.

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \text{ ou } Q = \tau_{\text{gás}} + \Delta U$$



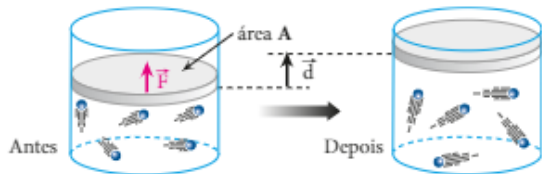
b) Quando a temperatura absoluta do sistema diminui, seu volume também diminui. Isso significa que sua energia interna diminui ($\Delta U < 0$) e que o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$). É evidente que toda essa energia sai do sistema na forma de calor.

$$\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}} \text{ ou } Q = \tau_{\text{gás}} + \Delta U$$



Trabalho de um gás em uma transformação isobárica (τ_p)

Considere um gás em expansão isobárica.



Podemos calcular o trabalho realizado por ele usando a fórmula da definição de trabalho de força constante:

$$\tau_p = F d \quad (\text{I})$$

em que F é o módulo da força média aplicada pelo gás no êmbolo móvel do recipiente e d é o módulo do deslocamento sofrido por ele.

Sendo A a área da seção transversal do êmbolo, da definição de pressão, temos:

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p A \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), obtemos: $\tau_p = p A d$

O produto $A d$, contudo, corresponde ao volume varrido pelo êmbolo, isto é, à variação de volume ΔV sofrida pelo gás nessa transformação ($A d = \Delta V$).

Assim, a equação do trabalho do gás em uma transformação isobárica fica expressa pelo produto da pressão (p), que permanece constante, pela variação de volume (ΔV) sofrida pelo gás perfeito: $\tau_p = p \Delta V$

Usando a **Equação de Clapeyron**, obtemos:

$$\tau_p = p \Delta V = n R \Delta T$$

Essa expressão é válida também na compressão isobárica de um gás perfeito.

Transformação adiabática

Nas transformações adiabáticas, não há troca de calor entre o sistema e o meio externo. Dessa forma, toda a energia recebida ou cedida pelo sistema ocorre por meio de trabalho.

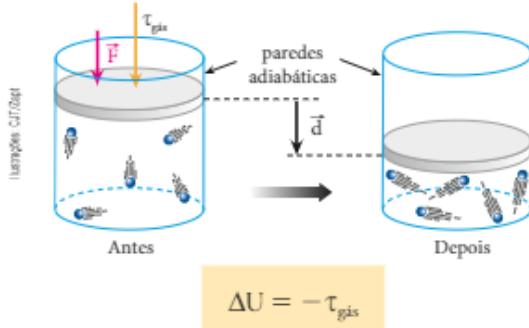
Da equação da **1ª Lei da Termodinâmica**, sendo $Q = 0$, temos: $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$

$$\Delta U = 0 - \tau_{\text{gás}} \Rightarrow \Delta U = -\tau_{\text{gás}}$$

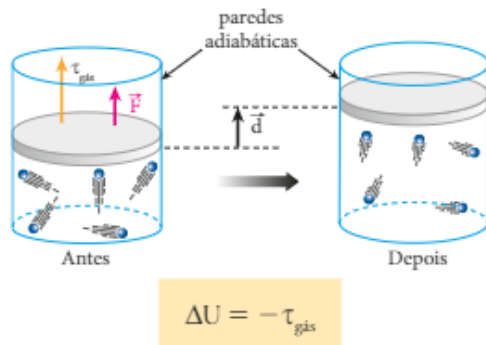
Isso significa que o módulo da variação de energia interna sofrida pelo sistema é igual ao módulo do trabalho que o sistema troca com o meio externo.

Assim, temos duas situações a considerar:

- a) Quando o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), sua energia interna aumenta ($\Delta U > 0$) em igual valor.

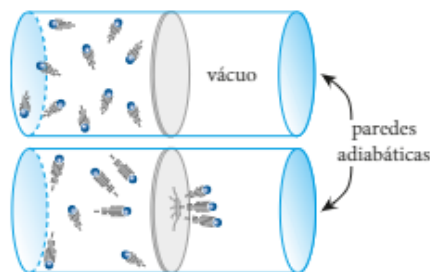


- b) Quando o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), ele o faz retirando essa energia da sua própria energia interna, que diminui ($\Delta U < 0$).



Expansão livre

Para entender melhor, considere um recipiente de paredes rígidas (volume constante) e adiabáticas (não permite trocas de calor através delas), dividido em duas partes por uma fina película. Em uma das partes coloca-se certa massa de gás perfeito, enquanto na outra supõe-se vácuo.



Se a película subitamente se rompe, o gás se expande pela região de vácuo, realizando uma expansão livre.

Como o gás não sofreu resistência em sua expansão, ele não realizou trabalho ($\tau_{\text{gás}} = 0$). Pelo fato de o processo ser adiabático, também não há troca de calor ($Q = 0$). Assim, a variação de energia interna é nula ($\Delta U = 0$) e a temperatura mantém-se constante durante todo o processo.

NOTA

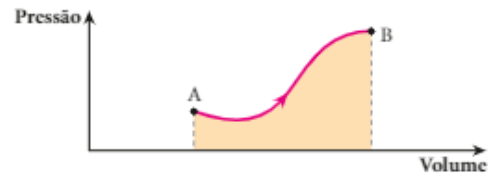
A expansão livre é uma transformação termodinâmica **irreversível**, pois o sistema não consegue voltar à situação inicial espontaneamente, isto é, sem a ajuda de um agente externo. Esse agente deve realizar sobre o gás um trabalho, forçando-o a voltar. Dessa forma, o gás recebe trabalho, o que provoca um aumento em sua energia interna. (Lembremos que a transformação é adiabática.)

6. DIAGRAMAS TERMODINÂMICOS

No estudo da Termodinâmica dos Gases Perfeitos, é de grande importância o **Diagrama de Clapeyron**, que representa a relação entre a pressão, o volume e a temperatura absoluta de uma massa de gás perfeito.

Transformação aberta

Consideremos um sistema constituído por certa massa de gás perfeito, que sofre uma transformação aberta, passando de um estado definido pelo ponto A para outro definido pelo ponto B, conforme a indicação do diagrama a seguir.



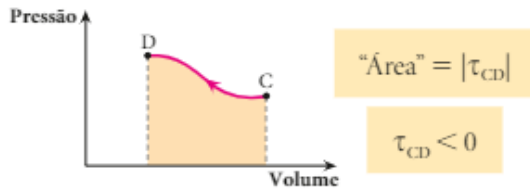
A "área" destacada sob a curva que representa a transformação, indicada no diagrama pressão \times volume, é igual ao módulo do trabalho que esse sistema troca com o meio externo ao executar essa transformação.

Numa transformação aberta, podem ocorrer três situações:

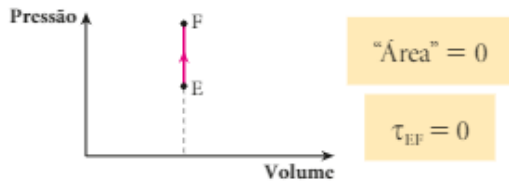
- a) Quando um sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), seu volume aumenta.



b) Quando um sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), seu volume diminui.

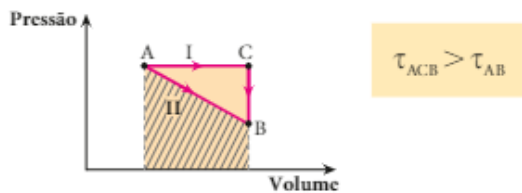


c) Quando um sistema não troca trabalho com o meio externo, seu volume permanece constante.



É importante observar que o trabalho trocado entre o sistema e o meio externo depende não somente dos estados inicial e final, mas também dos estados intermediários, que determinam o "caminho" ao longo da transformação.

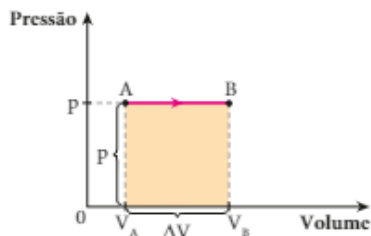
O diagrama abaixo mostra, por exemplo, uma transformação aberta sofrida por um sistema gasoso, na qual o estado final, B, pode ser atingido, a partir do estado inicial, A, por dois caminhos diferentes, I e II.



A "área" colorida, correspondente ao caminho I, é maior que a "área" hachurada, correspondente ao caminho II. Isso significa que o trabalho realizado pelo sistema ao percorrer o caminho I é maior que o trabalho realizado ao percorrer o caminho II.

Na transformação isobárica ($p =$ pressão constante), fica fácil demonstrar que a "área" sob o gráfico é igual ao módulo do trabalho trocado pelo sistema.

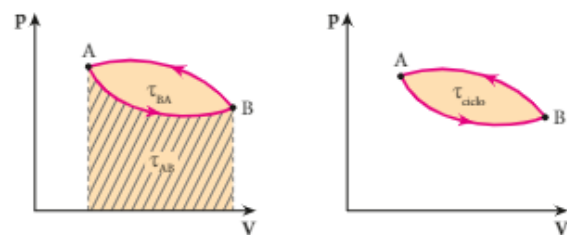
"Área" = $p|\Delta V| = |\tau_{AB}| \Rightarrow \tau_{AB} = p \Delta V = n R \Delta T$



Transformação cíclica

Um sistema gasoso sofre uma transformação definida como cíclica (ou fechada) quando o estado final dessa transformação coincide com o estado inicial. Num diagrama pressão (p) \times volume (V), essa transformação cíclica é representada por uma curva fechada, e o módulo do trabalho total trocado com o meio externo é determinado pela "área interna" à curva fechada representativa do ciclo.

Não é difícil perceber que, ao desenvolver uma transformação cíclica, o sistema geralmente realiza e recebe trabalho, sendo o trabalho total a soma desses trabalhos parciais.



Na transformação AB, o módulo do trabalho é dado pela "área" hachurada (trabalho realizado $\Rightarrow \tau_{AB} > 0$) e, na transformação BA, é dado pela área bege (trabalho recebido $\Rightarrow \tau_{BA} < 0$). Ao determinarmos o trabalho total, resta apenas a "área interna" à curva fechada.

O trabalho total tem seu módulo determinado pela "área interna" à curva fechada.

É importante observar que:

- a) Quando o ciclo está orientado no sentido horário, o trabalho realizado é maior que o recebido. Dizemos que o ciclo no **sentido horário** indica que o sistema **realiza** trabalho: $\tau_{\text{ciclo}} > 0$.
- b) Quando o ciclo está orientado no sentido anti-horário, o trabalho recebido é maior que o realizado. Dizemos que o ciclo no **sentido anti-horário** indica que o sistema **recebe** trabalho: $\tau_{\text{ciclo}} < 0$.

NOTA

No diagrama pressão \times volume, o módulo do trabalho trocado entre o sistema e o meio externo é determinado pela "área", em joules, quando a pressão é dada em N/m^2 (pascal) e o volume, em m^3 ; caso contrário, deve-se fazer a conversão para essas unidades. Para isso, é importante lembrar que:

$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
 $1 \text{ atm} \cong 760 \text{ mmHg} \cong 10^5 \text{ N/m}^2$

7. CALORES ESPECÍFICOS DOS GASES PERFEITOS

A variação de temperatura de certa massa de gás pode ser realizada de três maneiras: a volume constante, a pressão constante e a volume e pressão variáveis. Verifica-se que, em cada um desses processos, cada unidade de massa do gás precisa receber ou ceder quantidades diferentes de calor para que sua temperatura sofra a variação de uma unidade.

Esse fato leva-nos a estudar dois desses casos, que apresentam particular importância. São as transformações a volume constante (isométrica) e a pressão constante (isobárica).

Transformação a volume constante

Suponha o aquecimento **isométrico** de certa massa de gás perfeito. Como vimos, já que o volume permanece constante, o trabalho trocado é nulo, e todo o calor (Q) recebido pelo sistema é integralmente utilizado para aumento de sua energia interna (ΔU):

$$Q_V = \Delta U_V$$

Transformação a pressão constante

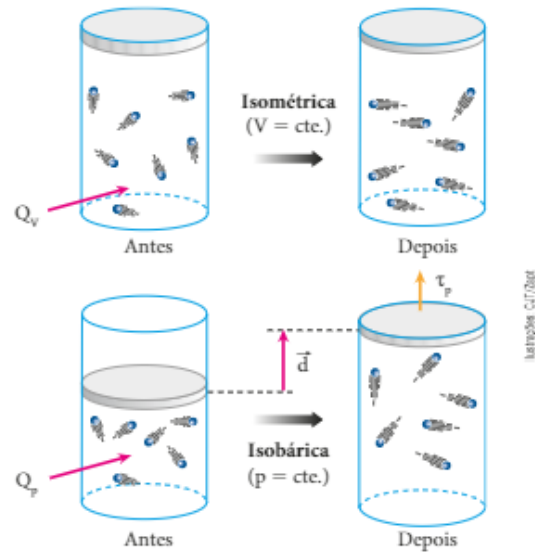
O aquecimento **isobárico** da massa de gás perfeito é acompanhado de uma realização de trabalho, já que o volume do sistema deve aumentar para que a pressão permaneça constante. Dessa forma, o sistema recebe calor, usa parte dessa energia para realizar trabalho e, com o restante, produz aumento em sua energia interna:

$$Q_p = \tau_p + \Delta U_p$$

Comparação entre Q_p e Q_V

Se o aquecimento sofrido pela massa de gás perfeito foi o mesmo a volume e a pressão constantes ($\Delta U_V = \Delta U_p$), concluímos que sob pressão constante esse sistema recebeu mais calor, pois parte dessa energia foi utilizada para a realização de trabalho, o que não ocorre quando o aquecimento é feito a volume constante: $Q_p > Q_V$

Assim, vale a relação: $\tau_p = Q_p - Q_V$ (I)



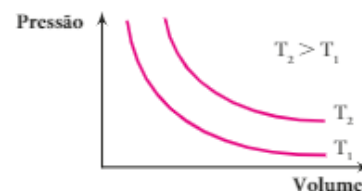
Note que, para o aquecimento ($\Delta U_V = \Delta U_p$), precisamos fornecer mais calor ao gás quando a transformação é feita a pressão constante do que quando é feita a volume constante.

É importante observar que um mesmo gás tem um calor específico para transformações a pressão constante (c_p) e outro para transformações a volume constante (c_v). Isso porque cada unidade de massa desse gás tem que receber mais calor a pressão constante do que a volume constante para que sua temperatura seja elevada em uma unidade.

Dessa forma: $c_p > c_v$

8. GRÁFICO DA TRANSFORMAÇÃO ADIABÁTICA

Com relação aos gases perfeitos, vimos que as transformações isotérmicas (temperatura constante) de determinada massa de gás são regidas pela equação $pV = K$, em que p é a pressão desse gás, V é o seu volume e K é uma constante. Representada num diagrama pressão \times volume, essa equação proporciona uma curva denominada hipérbole.



Já a transformação adiabática ($Q = 0$) tem por expressão analítica a **Equação de Poisson**:

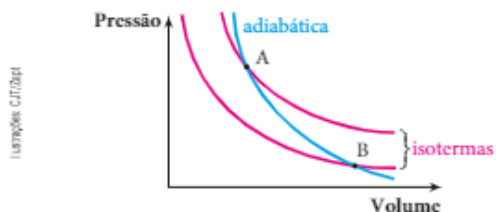
$$pV^\gamma = \text{constante}$$

em que p é a pressão do gás, V , o seu volume e γ , o expoente de Poisson.

O valor do coeficiente γ depende apenas da atomicidade do gás, variando de acordo com o quadro a seguir:

Atomicidade	Monoatômico	Diatômico	Poliatômico
γ	$\cong 1,7$	$\cong 1,4$	$\cong 1,3$

Notemos que o valor do coeficiente γ é maior que 1. Por isso, a curva representativa dessa função, num diagrama pressão \times volume, é semelhante a uma hipérbole, porém inclinada em relação às isotermas, intersectando-as:



A expansão AB, ao longo da adiabática, indica que o trabalho foi realizado pelo gás à custa de sua energia interna (a temperatura diminuiu). A compressão BA, ao longo da adiabática, indica que o trabalho recebido pelo sistema produziu aumento em sua energia interna (a temperatura aumentou).

9. ENERGIA MECÂNICA E CALOR

A energia mecânica de um sistema pode ser dos tipos cinética ou potencial (gravitacional ou elástica). Muitas vezes, essa energia mecânica transforma-se em energia térmica, produzindo aquecimento do sistema. Quando um corpo cai, por exemplo, a energia potencial gravitacional ($E_p = m g h$) é transformada em energia cinética ($E_c = \frac{mv^2}{2}$). No impacto com o chão, pelo menos uma parcela dessa energia cinética transforma-se em térmica, ocorrendo a elevação da temperatura desse corpo.

Geralmente, a energia mecânica é medida em joules (J) e a energia térmica, em calorias (cal). Dessa forma, é importante saber a relação entre essas unidades, para possíveis conversões:

$$1 \text{ caloria} = 4,186 \text{ joules}$$

É comum falar em equivalente mecânico da caloria, que é expresso por:

$$J = 4,186 \frac{\text{joules}}{\text{caloria}}$$

O número 4,186 é frequentemente arredondado para 4,19 ou 4,2, ou mesmo 4. Esse arredondamento é feito para facilitar os cálculos nos exercícios.

QUESTÕES COMENTADAS

1 Um gás perfeito sofre uma expansão, realizando um trabalho igual a 200 J. Sabe-se que, no final dessa transformação, a energia interna do sistema está com 60 J a mais que no início. Qual é a quantidade de calor recebida pelo gás?

RESOLUÇÃO

A **1ª Lei da Termodinâmica** dá a relação entre as grandezas referidas no problema: $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$

Do texto, sabemos que: $\tau_{\text{gás}} = +200 \text{ J}$ (o sistema **realizou** trabalho) e $\Delta U = +60 \text{ J}$ (a energia interna **aumentou**)

$$\text{Assim, temos: } 60 = Q - 200 \Rightarrow Q = 260 \text{ J}$$

Resposta: 260 J

2 Analise as afirmativas a seguir:

(01) Um gás somente pode ser aquecido se receber calor.

(02) Pode-se aquecer um gás realizando-se trabalho sobre ele.

(04) Para esfriar um gás, devemos necessariamente retirar calor dele.

(08) Um gás pode receber calor do meio externo e sua temperatura permanecer constante.

(16) Numa transformação adiabática de um gás, sua temperatura pode diminuir.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmativas corretas.

RESOLUÇÃO

(01) **Incorreta.** Um gás pode ser aquecido recebendo energia em forma de calor ou em forma de trabalho.

(02) **Correta.** Quando realizamos um trabalho sobre o gás, estamos transferindo energia mecânica para o sistema.

- (04) **Incorreta.** Se um gás se expande, ele realiza trabalho e transfere parte da sua energia interna para o meio externo. Dessa forma sua energia interna diminuirá sem perder calor.
- (08) **Correta.** Se um gás realizar um trabalho equivalente à energia térmica recebida, sua energia interna permanecerá constante e sua temperatura também.
- (16) **Correta.** Em uma transformação adiabática, o sistema gasoso não troca calor com o meio externo, mas pode trocar energia em forma de trabalho. Assim, na expansão adiabática o gás realiza trabalho, não troca calor e, perdendo energia em forma de trabalho, sua temperatura diminui.

Resposta: (02 + 08 + 16) = 26

- 3** Um sistema gasoso ideal troca (recebe ou cede) com o meio externo 150 cal em forma de calor. Determine, em joules, o trabalho trocado com o meio, em cada um dos casos:
- a) expansão isotérmica; c) aquecimento isométrico.
b) compressão isotérmica;

Dado: 1 cal = 4,18 J

RESOLUÇÃO

Nas transformações isotérmicas, não há variação de temperatura, e, em consequência, a energia interna do sistema mantém-se constante ($\Delta U = 0$).

Da 1ª Lei da Termodinâmica, $\Delta U = Q - \tau_{\text{gás}}$, temos:

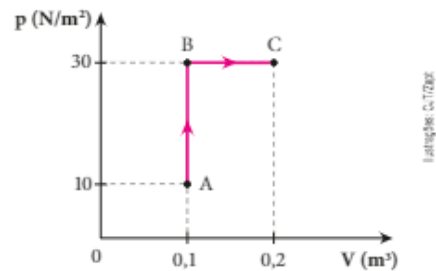
$$Q = \tau_{\text{gás}}$$

Então, se o sistema recebe calor, realiza um trabalho de igual valor. Se cede calor, é porque recebe igual quantidade de energia em forma de trabalho.

- a) Na expansão, o volume aumenta e o sistema realiza trabalho ($\tau_{\text{gás}} > 0$), recebendo calor ($Q > 0$).
Daí, temos: $\tau_{\text{gás}} = Q = 150 \text{ cal}$
Transformando calorias em joules, obtemos:
 $\tau_{\text{gás}} = J \cdot Q \Rightarrow \tau_{\text{gás}} = 4,18 \cdot 150 \Rightarrow \tau_{\text{gás}} = 627 \text{ J}$
- b) Na compressão, o volume diminui e o sistema recebe trabalho ($\tau_{\text{gás}} < 0$), cedendo calor ($Q < 0$).
Daí, temos: $\tau_{\text{gás}} = Q = -150 \text{ cal}$
Transformando calorias em joules, obtemos:
 $\tau_{\text{gás}} = -627 \text{ J}$
- c) Nas transformações isométricas, o volume permanece constante e não há trabalho trocado com o meio externo.
Então: $\tau_{\text{gás}} = 0$

Respostas: a) 627 J; b) -627 J; c) 0

- 4** Um gás perfeito passa do estado representado por A, no gráfico, para os estados representados por B e C.



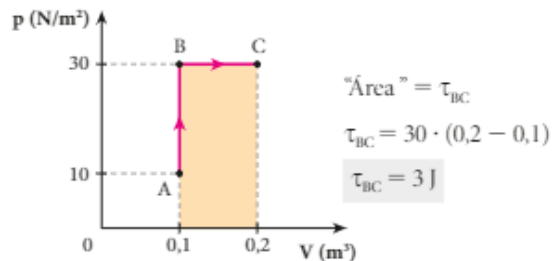
Determine o trabalho realizado pelo gás, em joules, nas transformações:

- a) A para B; b) B para C; c) ABC.

RESOLUÇÃO

- a) Na transformação AB, não há troca de trabalho com o meio externo, pois o volume do sistema mantém-se constante: $\tau_{AB} = 0$

- b) Na transformação BC, o trabalho realizado (o volume do sistema aumenta) pelo gás é igual à "área" sob o gráfico:



- c) O trabalho total na transformação ABC é a soma algébrica dos trabalhos nas transformações AB e BC.

$$\tau_{ABC} = \tau_{AB} + \tau_{BC} \Rightarrow \tau_{ABC} = 0 + 3 \Rightarrow \tau_{ABC} = 3 \text{ J}$$

Respostas: a) 0; b) 3 J; c) 3 J

- 5** Uma esfera metálica de 200 g de massa é abandonada do repouso, de uma altura H, sobre um grande bloco de gelo a 0 °C. Desprezam-se as influências do ar e supõe-se que toda a energia mecânica existente na esfera transforme-se em energia térmica e é absorvida pelo gelo, sem, no entanto, alterar a temperatura do metal. Qual deve ser a altura H para que 1 g de gelo sofra fusão?

Dados: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; aceleração da gravidade = 10 m/s²; 1 cal = 4,2 J

RESOLUÇÃO

Para a fusão de 1 grama de gelo, são necessárias 80 cal ou 336 J (1 cal = 4,2 J).

Da conservação da energia, concluímos que essa energia inicialmente estava armazenada no sistema em forma de energia potencial gravitacional. Portanto:

$$E_p = m g h \Rightarrow 336 = 0,2 \cdot 10 \cdot H \Rightarrow H = 168 \text{ m}$$

Resposta: 168 m



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

6. A primeira coluna descreve uma transformação sofrida pelo gás; a segunda contém a denominação utilizada para indicar essa transformação.

- | | |
|--|-----------------------------|
| (A) O gás realiza trabalho e sua energia interna não varia. | (1) Compressão isotérmica. |
| (B) O gás tem sua energia interna aumentada e não troca trabalho com o meio externo. | (2) Compressão adiabática. |
| (C) O gás não troca calor com o meio externo, mas sua temperatura aumenta. | (3) Aquecimento isométrico. |
| (D) O gás recebe trabalho e sua energia interna não varia. | (4) Expansão isotérmica. |

Em qual das alternativas as associações estão corretas?

- a) A-1, B-2, C-3 e D-4. d) A-3, B-1, C-4 e D-2.
 b) A-4, B-2, C-1 e D-3. e) A-2, B-4, C-1 e D-3.
 c) A-4, B-3, C-2 e D-1.

7. A **1ª Lei da Termodinâmica**, aplicada a uma transformação gasosa, se refere à:

- a) conservação de massa do gás.
 b) conservação da quantidade de movimento das partículas do gás.
 c) relatividade do movimento de partículas subatômicas, que constituem uma massa de gás.
 d) conservação da energia total.
 e) expansão e contração do binômio espaço-tempo no movimento das partículas do gás.

8. Uma porção de gás perfeito está confinada por um êmbolo móvel no interior de um cilindro. Ao receber 20 kcal de calor do meio externo, o êmbolo sobe e o gás realiza um trabalho equivalente a 12 kcal. Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica, determine a variação sofrida pela energia interna desse gás.

9. Um gás perfeito sofre uma expansão isotérmica ao receber do ambiente 250 J de energia em forma de calor. Qual é o trabalho realizado pelo gás e qual é sua variação de energia interna?

10. Na transformação de um gás perfeito, os estados final e inicial acusaram a mesma energia interna. Nesse caso, certamente:

- a) a transformação foi cíclica.
 b) a transformação foi isométrica.
 c) não houve troca de calor entre o gás e o ambiente.
 d) são iguais as temperaturas dos estados inicial e final.
 e) não houve troca de trabalho entre o gás e o ambiente.

11. Analise as proposições dadas a seguir e dê como resposta o somatório dos números que correspondem às afirmativas corretas:

- (01) A energia interna de dada massa de gás é função exclusiva de sua temperatura.
 (02) Em uma expansão isobárica, a quantidade de calor recebida é menor que o trabalho realizado.
 (04) Em uma transformação isocórica, a variação de energia interna do gás é igual à quantidade de calor trocada com o meio exterior.
 (08) Em uma transformação adiabática, o gás não troca trabalho com o meio externo.
 (16) A energia interna de um sistema gasoso só não varia nas transformações adiabáticas.
 (32) Em uma expansão isobárica, a temperatura do gás aumenta.

12. Um gás perfeito sofre uma expansão isobárica, sob pressão de $5,0 \text{ N/m}^2$. Seu volume aumenta de $0,20 \text{ m}^3$ para $0,60 \text{ m}^3$. Qual foi a variação de energia interna do gás se, durante a expansão, ele recebeu 5,0 J de calor do ambiente?

13. Um sistema termodinâmico, constituído de um gás perfeito, troca 400 cal de calor com o meio externo. Determine a variação de energia interna do sistema, em cada um dos casos:

- a) aquecimento isocórico;
 b) resfriamento isométrico;
 c) expansão isotérmica.

14. Numa transformação termodinâmica, um gás ideal troca com o meio externo 209 J em forma de trabalho. Determine, em calorías, o calor que o sistema troca com o meio externo, em cada um dos casos:

- a) expansão isotérmica;
 b) compressão isotérmica;
 c) expansão adiabática.

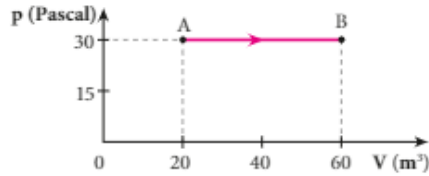
Dado: $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$

15. Um estudante manuseava uma bomba manual (metálica) de encher bola de futebol. Mantendo o orifício de saída do ar tapado com seu dedo, ele comprimia rapidamente o êmbolo e observava que o ar dentro da bomba era aquecido. Das afirmativas a seguir, qual você usaria para explicar o fenômeno descrito?

- a) Quando se comprime um gás, sua temperatura sempre aumenta.
 b) Quando se comprime rapidamente um gás, facilita-se a troca de calor entre o ar que está dentro da bomba e o meio externo.
 c) Devido à rapidez da compressão, o ar que está dentro da bomba não troca calor com o meio externo; assim, o trabalho realizado provoca aumento da energia interna desse ar.

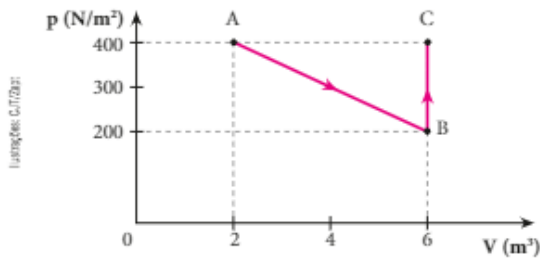
- d) A compressão rápida do ar foi feita isobaricamente, provocando aumento na velocidade de suas partículas.
 e) O fenômeno descrito é impossível de ocorrer, pois, sendo o corpo da bomba metálico, qualquer energia que seja fornecida para o ar interno será imediatamente transferida para o meio externo.

16. No processo isobárico indicado no gráfico, um gás perfeito recebeu 3000 J de energia do ambiente.



Que variação ocorreu na energia interna desse gás?

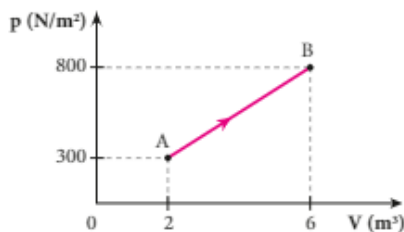
17. Um gás perfeito sofre a transformação ABC indicada no diagrama pressão (p) × volume (V) a seguir:



Determine o trabalho do sistema nas transformações:

- a) A para B; b) B para C; c) ABC.

18. Um sistema termodinâmico constituído de certa massa de gás perfeito recebe calor de uma fonte térmica, num total de 8 500 J. Em consequência, o gás se expande, sofrendo a transformação AB representada no diagrama pressão (p) × volume (V) a seguir:

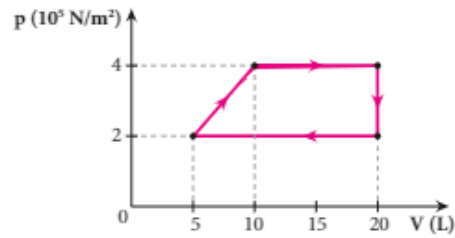


A respeito da transformação AB, responda:

- a) Qual é o trabalho do sistema? É trabalho realizado ou recebido? Justifique.
 b) Qual é a variação de energia interna? A energia interna aumentou ou diminuiu? Justifique.

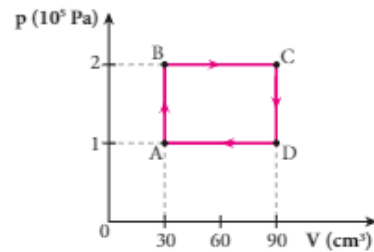
19. Uma determinada massa de gás perfeito passa por quatro transformações térmicas que são representadas pelo ci-

clo visualizado no diagrama pressão (p) × volume (V) dado a seguir.



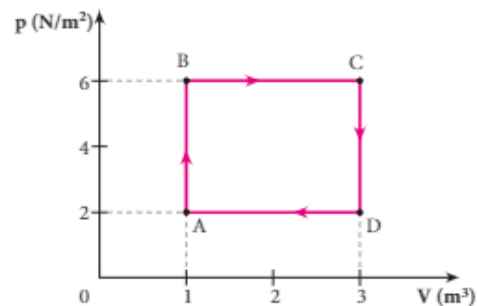
Qual é o trabalho realizado por esse gás em cada ciclo? Dê a resposta em joules.

20. Um sistema termodinâmico, constituído de certa massa de gás perfeito, realiza a cada segundo 100 ciclos ABCDA. O diagrama a seguir mostra a evolução de um ciclo ABCDA.



Qual é a potência desse sistema? Dê a resposta em watt.

21. Um gás perfeito desenvolve uma transformação cíclica ABCDA, como mostra a figura abaixo.



Determine:

- a) o trabalho, em joules, realizado pelo gás no ciclo ABCDA;
 b) o ponto do ciclo em que a energia interna do sistema é máxima e o ponto onde é mínima.

22. Uma amostra de 60 g de gás perfeito foi aquecida isometricamente, tendo sua temperatura variado de 200 K para 230 K. O calor específico a volume constante desse gás é igual a 0,25 cal/g K e o calor específico a pressão constante é 0,32 cal/g K. Determine:

- a) o trabalho realizado por esse gás;
 b) a variação da energia interna desse gás.

23. Um bloco de gelo fundente de 12 kg de massa é lançado com velocidade igual a 20 m/s sobre uma pista horizontal também de gelo a 0 °C. Devido ao atrito, o bloco para. Se toda a energia cinética foi transformada em térmica e absorvida pelo gelo, qual é a massa de gelo que se funde?

Dados: 1 cal = 4 J;

calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g.

24. Um martelo de 1 kg, movendo-se a 20 m/s, golpeia uma esfera de chumbo de 100 g sobre uma bigorna de aço. Se metade da energia cinética do martelo aqueceu o chumbo,

qual foi o seu aumento de temperatura, em °C?

Dado: calor específico do chumbo = 0,125 J/g °C.

25. Uma bola de 8,4 kg abandonada do repouso a uma altura de 5,0 m após chocar-se com o solo (altura zero) retorna a uma altura de 4,0 m. Se a perda de energia mecânica da bola pudesse ser usada exclusivamente no aquecimento de 10 g de água, qual seria a elevação de temperatura da água?

Dados: $g = 10 \text{ m/s}^2$;

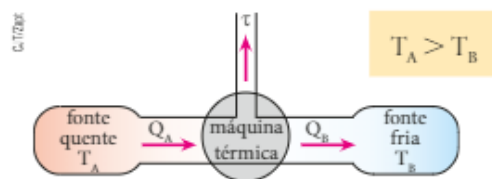
1 cal = 4,2 J;

calor específico da água = 1,0 cal/g °C.

10. AS MÁQUINAS TÉRMICAS E A 2ª LEI DA TERMODINÂMICA

São denominadas **máquinas térmicas** os dispositivos usados para converter energia térmica em energia mecânica.

Desde as máquinas térmicas mais primitivas, que eram usadas para movimentar trens, navios e mesmo os primeiros automóveis, até as mais modernas e sofisticadas, como um reator termonuclear, todas funcionam obedecendo basicamente a um mesmo esquema.



Representação esquemática do funcionamento de uma máquina térmica.

Há duas fontes térmicas, uma “quente” e outra “fria”. Entre elas, coloca-se a máquina térmica. Um fluido operante, geralmente vapor de água, serve de veículo para a energia térmica que sai da fonte quente, passa pelo dispositivo intermediário, que utiliza parte dessa energia na realização do trabalho, e leva o restante para a fonte fria.

A quantidade Q_A de calor que chega à máquina térmica, vinda da fonte quente, geralmente é obtida pela combustão de carvão, óleo, madeira ou mesmo por fissão nuclear, ocorrida nos modernos reatores nucleares. A conservação da energia garante que:

$$\tau = |Q_A| - |Q_B|$$

O trabalho realizado pela máquina térmica é igual à diferença entre os módulos do calor recebido da fonte quente e do calor rejeitado para a fonte fria.

A 2ª Lei da Termodinâmica

O **rendimento** de uma máquina térmica é definido pela fração do calor recebido da fonte quente que é usada para a realização de trabalho:

$$\eta = \frac{\tau}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - |Q_B|}{|Q_A|}$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}$$

É importante observar que a máquina térmica ideal seria aquela que tivesse um rendimento de 100% ($\eta = 1$). Para que isso se concretizasse, a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria deveria ser nula ($Q_B = 0$). Na prática, isso é impossível, pois a energia térmica Q_A somente sai da fonte quente devido à existência da fonte fria. Lembremos que calor é energia térmica em trânsito, que se transfere, espontaneamente, de um local de maior temperatura para outro de menor temperatura.

Dessa impossibilidade surgiu o enunciado de Kelvin-Planck para a **2ª Lei da Termodinâmica**:

É impossível construir uma máquina que, operando em transformações cíclicas, tenha como único efeito transformar completamente em trabalho a energia térmica recebida de uma fonte quente.

O fato de a energia térmica fluir da fonte quente para a fonte fria levou Rudolf Emmanuel Clausius, físico alemão que viveu de 1822 a 1888, a enunciar essa 2ª Lei da Termodinâmica da seguinte forma:

É impossível que uma máquina, sem ajuda de um agente externo, conduza calor de um sistema para outro que esteja a uma temperatura maior.

A consequência imediata desse enunciado é que o calor só pode passar de um sistema de menor temperatura para outro de maior temperatura se um agente externo realizar um trabalho sobre esse sistema, como nas máquinas frigoríficas.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

A geladeira

Há evidências de que, desde muito cedo, os seres humanos que viviam em regiões muito frias observaram que o resfriamento dos alimentos conseguia conservá-los por mais tempo. Com o deslocamento das populações pelo mundo, esse conhecimento se espalhou.

Porém, foi somente no século XIX, precisamente em 1834, que Jacob Perkins patenteou um compressor que podia solidificar a água, produzindo gelo artificialmente. A utilização desse compressor possibilitou que algumas indústrias prosperassem, como as cervejarias. Os comerciantes de carne agora podiam mandar seus produtos para os mais distantes países.

No início do século XX, em 1902, o americano Willis Carrier instalou em uma gráfica, na cidade de Nova York, o primeiro aparelho de ar-condicionado, que permitia resfriar e controlar a umidade do ambiente. No início da década de 1920, surgiram nos Estados Unidos os primeiros refrigeradores domésticos, que logo se popularizaram. Hoje, no Brasil, mais de 80% das residências têm geladeira.

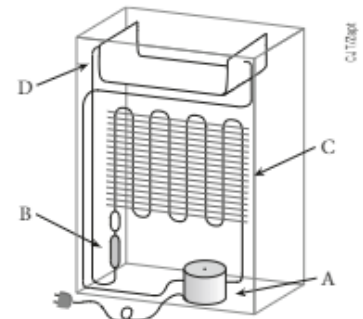
O funcionamento de uma geladeira baseia-se em um processo de transferência de calor de uma fonte fria para uma quente. Esse processo não é espontâneo. É necessária uma energia externa, em forma de trabalho (no compressor), para que essa transferência possa ocorrer. A geladeira possui, portanto, uma fonte fria (o congelador) e outra quente (o radiador), que se encontra na parte externa traseira, em forma de serpentina. O fluido operante usado é o fréon, que vaporiza a baixa pressão no congelador e se condensa a alta pressão no radiador. O mecanismo utilizado para reduzir a pressão no congelador é uma válvula; para aumentar a pressão no radiador, o mecanismo é um compressor, muito parecido com aquele que Perkins inventou. Observe que o fréon retira calor do interior da geladeira ao se vaporizar no congelador e libera calor para o ambiente no radiador, quando se condensa ao ser comprimido pelo compressor.

Fotografia de geladeira do final do século XIX. Na parte superior era colocado gelo, que, ao resfriá-la, fazia o papel do atual congelador. Na parte interna útil, o ar que se aquecia retirando calor dos alimentos subia por convecção e era resfriado na face interna superior.



Observe na representação ao lado as partes principais do mecanismo de uma geladeira:

- A – **Compressor:** o fréon entra no estado gasoso com baixa pressão e sai com alta pressão, já condensado.
- B – **Válvula:** um tubo estreito (capilar) que diminui a pressão do vapor.
- C – **Radiador:** serpentina externa (localizada na parte traseira) na qual o vapor se liquefaz, liberando calor para o ambiente.
- D – **Congelador:** o fréon no estado líquido se vaporiza ao absorver calor do interior da geladeira.



Máquina térmica

O primeiro dispositivo que funcionava usando a força do vapor data do século I da era cristã. Um estudioso de nome Heron, que viveu em Alexandria, Egito, deixou um esboço da primeira "máquina térmica" de que se tem notícia, a eolípila. Essa máquina era uma esfera metálica, oca, encaixada em um cano, através do qual recebia vapor de uma caldeira. Em suas laterais encontravam-se dois canos em forma de L. O vapor entrava na esfera e saía pelos canos em L. Isso provocava o movimento de rotação do dispositivo. Esse "motor" não realizava trabalho, era apenas uma forma de demonstrar a "força" do vapor.

No século XVIII, mais precisamente em 1712, Thomas Newcomen (1662-1729), nascido em Dartmouth, Inglaterra, mecânico de profissão, aperfeiçoou uma máquina inventada por seu sócio Thomas Savery, que seria utilizada na drenagem de minas. Essa máquina foi instalada com grande sucesso nas minas de carvão em Staffordshire, na Grã-Bretanha, e, por quase cinquenta anos, foi utilizada para evitar a inundação das galerias subterrâneas da área. No entanto, esse dispositivo tinha o inconveniente de gastar muito combustível, sendo usado apenas quando os outros meios de drenagem não estavam em funcionamento.

Em 1765, coube ao engenheiro escocês James Watt (1736-1819) aperfeiçoar a máquina de pistão de Thomas Newcomen, criando um dispositivo mais econômico e prático.

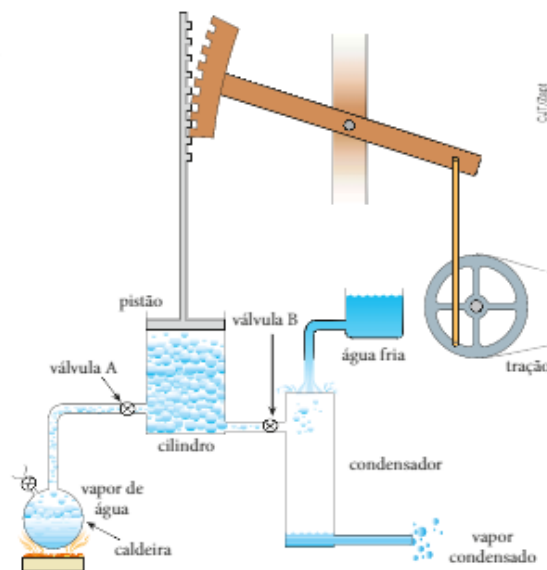


A figura acima é uma gravura do século XIX que mostra o "motor" inventado por Heron de Alexandria, a eolípila. Essa é a primeira "máquina a vapor" de que se tem notícia. (Coleção particular.)



Retrato de James Watt, pintado por Carl Frederick von Breda, em 1792.

Essa nova máquina a vapor passou a substituir as forças animal e humana no funcionamento das máquinas industriais, deflagrando o período histórico denominado Revolução Industrial, que transformou toda a estrutura social da Europa. Em 1830, após sua morte, funcionavam, só na Inglaterra, mais de 10000 máquinas a vapor. Em 1814, o inglês George Stephenson encontrou outra utilidade para as máquinas térmicas de Watt: movimentar uma locomotiva, revolucionando o transporte de pessoas e de bens produzidos pelas indústrias.



Na figura acima, podemos observar um esquema que representa uma das primeiras máquinas térmicas idealizadas por James Watt. A água aquecida na caldeira entrava em ebulição e o vapor se expandia, provocando o movimento de um pistão que, acoplado a uma roda, desencadeava o movimento de um eixo. Ligadas a esse eixo, várias máquinas industriais funcionavam e, assim, produziam os bens de consumo da época.

11. O CICLO DE CARNOT

Até 1824, acreditava-se que uma máquina térmica poderia atingir o rendimento total (100%) ou algo próximo desse valor, isto é, que toda a energia térmica fornecida a uma máquina se transformaria integralmente, ou quase, em trabalho.

Coube ao jovem engenheiro francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) demonstrar a impossibilidade desse rendimento. Ele propôs uma máquina térmica teórica, ideal, que funcionaria percorrendo um ciclo particular, denominado **ciclo de Carnot**. Esse dispositivo obedeceria a dois postulados estabelecidos por Carnot, antes mesmo do enunciado da 1ª Lei da Termodinâmica. São eles:

1º Postulado de Carnot

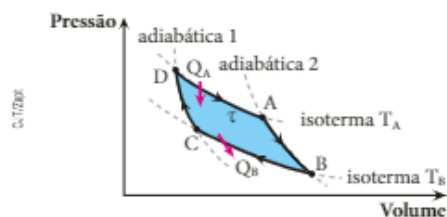
Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot operando entre essas mesmas temperaturas.

2º Postulado de Carnot

Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante.

Observe que esses postulados garantem que o rendimento de uma máquina térmica é função das temperaturas das fontes fria e quente. Entretanto, fixando-se as temperaturas dessas fontes, a máquina teórica de Carnot é aquela que conseguiria ter o maior rendimento.

Para o caso em que o fluido operante é o gás perfeito, o ciclo de Carnot é composto de duas transformações isotérmicas (isotermas) e duas adiabáticas, intercaladas.



Ciclo de Carnot para gases perfeitos, limitado por duas isotermas e duas adiabáticas.

Na expansão isotérmica DA, o sistema realiza trabalho utilizando o calor Q_A retirado da fonte quente.

Na expansão adiabática AB, o sistema não troca calor, realizando trabalho com diminuição de energia interna e, portanto, de temperatura.

Na compressão isotérmica BC, o sistema rejeita Q_B de calor para a fonte fria, utilizando o trabalho recebido.

Na compressão adiabática CD, o sistema não troca calor. Recebe trabalho, que serve para aumentar sua energia interna e, portanto, sua temperatura.

No ciclo de Carnot, os calores trocados (Q_A e Q_B) e as temperaturas absolutas (T_A e T_B) das fontes quente e fria são proporcionais, valendo a relação:

$$\frac{|Q_B|}{|Q_A|} = \frac{T_B}{T_A}$$

Substituindo na equação do rendimento de uma máquina térmica, obtemos, para a máquina de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Considerando a temperatura da fonte fria (T_B) igual a zero Kelvin (zero absoluto), temos:

$$\eta = 1 - \frac{0}{T_A} \quad \eta = 1 \quad \text{ou} \quad \eta(\%) = 100\%$$

Entretanto, esse fato contraria a 2ª Lei da Termodinâmica, que garante ser impossível um rendimento de 100% (pois sempre haverá energia sendo transferida para a fonte fria), o que nos leva a concluir que nenhum sistema físico pode estar no zero absoluto.

De qualquer forma, podemos dizer que:

O **zero absoluto** seria a temperatura da fonte fria de uma máquina ideal de Carnot, que operasse com rendimento de 100%.

12. TRANSFORMAÇÕES REVERSÍVEIS E IRREVERSÍVEIS

Denomina-se transformação **reversível** aquela em que, após seu término, o sistema pode retornar às suas condições iniciais pelo mesmo caminho, isto é, passando pelos mesmos estados intermediários, na sequência inversa daquela ocorrida na transformação inicial, sem interferência externa. A transformação será **irreversível** se o processo não puder satisfazer às condições citadas.

Do exposto, podemos entender que a maioria dos processos naturais são irreversíveis, sendo o processo reversível apenas uma idealização teórica. Quando, por exemplo, misturamos dois gases diferentes, torna-se impossível voltar a separá-los sem uma intervenção externa; quando provocamos a expansão livre de um gás, ele não voltará espontaneamente a ocupar as condições iniciais.

Motor térmico

E a revolução continua...

No início do século XVIII, a indústria instalada dependia da potência muscular de seus operários, de animais como o cavalo, da força do vento e de quedas-d'água. Com o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, o trabalho de várias pessoas ou de muitos animais pôde ser substituído por um único dispositivo. As máquinas térmicas passaram a substituir em larga escala a força motriz existente, tornando mais ágeis e confiáveis os navios. Foram também responsáveis por novas alternativas de deslocamento por terra, como as locomotivas a vapor, capazes de transportar cargas e pessoas em grandes distâncias.

Com o advento dos primeiros motores de combustão interna, a partir da segunda metade do século XIX, uma nova revolução tecnológica se instalou. Nesses propulsores, uma reação química produzia a queima do combustível e os gases aquecidos empurravam os pistões, realizando a transformação de energia térmica em energia mecânica. No início, vários pesquisadores implementaram projetos para o funcionamento dos motores térmicos; no entanto, as tentativas de construção não lograram êxito. Coube ao alemão Nikolaus August Otto (1832-1891), em 1876, aperfeiçoar e construir tal motor.

Ele descobriu acidentalmente que era necessário adicionar ar em certa proporção ao combustível na fase de compressão. E eis que funcionou! O dispositivo desenvolvido por esse engenheiro passou a ser conhecido por **Motor Otto**, e o ciclo termodinâmico que traduz seu funcionamento foi chamado de **Ciclo de Otto**.

Surgia, assim, o motor térmico de quatro tempos...

Ao lado, apresentamos em um diagrama $p \times V$ (pressão *versus* volume) o ciclo ideal de Otto, que traduz o funcionamento teórico dos quatro tempos do funcionamento do motor térmico.

O ciclo ideal é um pouco diferente do idealizado. Na prática, os processos são aproximados, ocorrendo interferências externas.

No esquema a seguir, é possível observar o que ocorre em cada pistão nas quatro etapas do ciclo.



Nikolaus August Otto. Este engenheiro alemão desenvolveu o motor térmico de quatro tempos, o que lhe valeu a medalha de ouro na Exposição de Paris, em 1867.

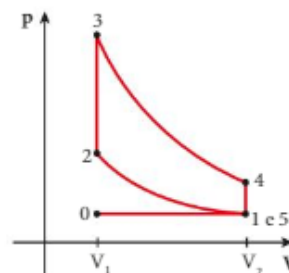
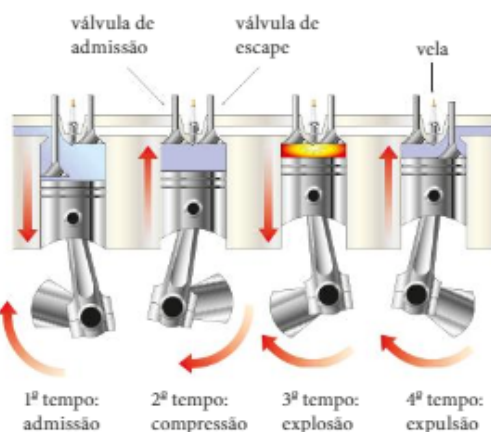


Diagrama pressão \times volume.



1. Admissão – processo isobárico 0 \rightarrow 1.

Nesta fase, o pistão desce, a válvula de admissão abre e uma mistura de combustível e ar é injetada na câmara interna.

2. Compressão – processo adiabático 1 \rightarrow 2.

As válvulas de admissão e exaustão são fechadas e o pistão sobe, comprimindo a mistura na câmara.

3. Combustão e Expansão – processo isométrico 2 \rightarrow 3, seguido de expansão adiabática 3 \rightarrow 4.

Quando o pistão atinge o ponto de compressão máxima, uma faísca elétrica é emitida por uma vela, provocando a explosão da mistura combustível-ar. Gases aquecidos empurram o pistão para baixo, expandindo a câmara interna do cilindro.

4. Exaustão ou Escape – abertura da válvula de exaustão, 4 \rightarrow 5, seguida de descompressão isobárica, 5 \rightarrow 0. A válvula de escape é aberta, possibilitando a exaustão, isto é, a retirada dos gases formados na explosão.

Os motores são constituídos basicamente por pistões móveis acoplados a um virabrequim ou eixo de manivelas, que transmite o movimento dos pistões às rodas. Nos veículos atuais, os motores de combustão interna são, em sua quase totalidade, de dois tempos (motocicletas) ou de quatro tempos (automóveis, caminhões e ônibus), diferenciando-se apenas quanto ao combustível utilizado (etanol, gasolina, *diesel*, biodiesel etc.).

Os motores térmicos fizeram surgir a indústria automobilística, que não para de crescer. Desde os tempos de Henry Ford (1863-1947), visionário empreendedor norte-americano e fundador da Ford Motor Company, a primeira fábrica de automóveis em série, essa indústria se expande e se sofisticada. Diariamente, em todos os rincões do planeta, mais e mais veículos são colocados em circulação, exigindo infraestrutura viária e combustíveis diversos para manter a gigantesca frota em circulação. Só na cidade de São Paulo, por exemplo, o número de carros licenciados já passa de 8 milhões, sem falar de motocicletas, ônibus etc.

Esse número crescente de veículos tem provocado aumento significativo de emissões de CO_2 (gás carbônico), um dos gases que incrementam o efeito estufa.

Por isso, é de grande importância que os veículos movidos a derivados de petróleo sejam gradualmente substituídos por máquinas propulsadas por combustíveis menos poluentes ou mesmo por eletricidade, tecnologia que já se encontra bastante desenvolvida e em fase de aprimoramento.

QUESTÕES COMENTADAS



26 Uma máquina térmica teórica opera entre duas fontes térmicas, executando o ciclo de Carnot. A fonte fria encontra-se a 127°C e a fonte quente, a 427°C . Qual é o rendimento percentual dessa máquina?

RESOLUÇÃO

O rendimento de uma máquina que executa o ciclo de Carnot é dado por: $\eta = 1 - \frac{T_F}{T_A}$

em que T_A é a temperatura absoluta da fonte quente e T_F é a da fonte fria.

Sabemos que: $T_B = 127^\circ\text{C} = 400\text{ K}$; $T_A = 427^\circ\text{C} = 700\text{ K}$
Substituindo na expressão, obtemos:

$$\eta = 1 - \frac{400}{700} \Rightarrow \eta = \frac{3}{7} \cong 0,43 \text{ ou } \eta(\%) \cong 43\%$$

Resposta: Aproximadamente 43%.

27 Até 1824, acreditava-se que uma máquina térmica poderia atingir o rendimento de 100% ou algo muito próximo desse valor. Se isso fosse verdade, poderíamos transformar integralmente, ou quase, a energia térmica recebida pela máquina em trabalho. No entanto, um jovem engenheiro francês, Nicolas Léonard Sadi Carnot, demonstrou a impossibilidade desse rendimento. Ele propôs uma máquina térmica teórica, que foi chamada de ideal e funcionaria percorrendo um ciclo particular, posteriormente denominado **ciclo de Carnot**, constituído de duas isotermas e duas adiabáticas, intercaladas. Esse dispositivo obedeceria a dois postulados estabelecidos pelo próprio Carnot:

1º postulado

Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot operando entre essas mesmas temperaturas.

2º postulado

Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante.

Assim, imagine uma máquina térmica que funciona de acordo com os postulados de Carnot. Em cada ciclo desenvolvido, o trabalho útil fornecido equivale a 2000 joules. As temperaturas das fontes térmicas são 500 K e 300 K, respectivamente, fonte quente e fonte fria.

Determine:

- o rendimento dessa máquina;
- a quantidade de calor retirada da fonte quente;
- a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria.

RESOLUÇÃO

- a) Cálculo do rendimento da máquina de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{300}{500} \Rightarrow \eta = 0,40$$

$$\text{Logo: } \eta(\%) = 40\%$$

- b) Cálculo da quantidade de calor retirada da fonte quente de uma máquina de Carnot:

$$\frac{Q_Q}{Q_F} = \frac{T_Q}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_Q}{Q_Q - \tau} = \frac{T_Q}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_Q}{Q_Q - 2000} = \frac{500}{300} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5Q_Q - 10000 = 3Q_Q \Rightarrow Q_Q = 5000\text{ J}$$

- c) Cálculo da quantidade de calor rejeitada para a fonte fria:

$$Q_F = Q - \tau \Rightarrow Q_F = (5000 - 2000) \Rightarrow Q_F = 3000\text{ J}$$

Respostas: a) 40%; b) 5000 J; c) 3000 J



QUESTÕES PROPOSTAS



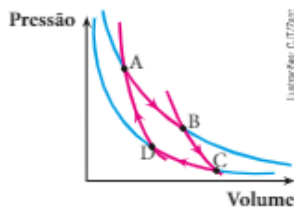
FAÇA NO CADERNO.

28. Leia as afirmações com atenção:

- (01) A 1ª Lei da Termodinâmica pode ser traduzida pela seguinte afirmação: "A energia não pode ser criada nem destruída, mas somente transformada de um tipo em outro".
- (02) O calor flui espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- (04) A energia interna de dada massa de um gás perfeito não depende da temperatura do gás.
- (08) O rendimento de uma máquina de Carnot independe das temperaturas da fonte fria e da fonte quente.
- (16) É impossível transformar calor em trabalho utilizando apenas duas fontes de calor a temperaturas diferentes.
- (32) O termômetro é um aparelho destinado a medir diretamente o calor de um corpo.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

29. (UEL-PR) No gráfico ao lado está representada a evolução de um gás ideal segundo o ciclo de Carnot. Com relação ao comportamento do gás, é correto afirmar:

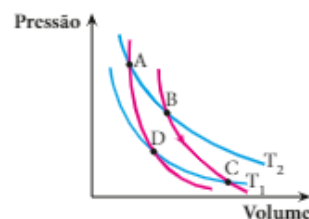


- a) A temperatura no ponto A é maior que no ponto B.
- b) No trajeto BC, o gás cedeu calor para a fonte fria.
- c) No trajeto DA, o trabalho realizado é negativo.
- d) A temperatura no ponto C é maior que no ponto B.
- e) No trajeto CD, o gás recebeu calor.

30. O ciclo termodinâmico imaginado por Sadi Carnot, no século XIX, era constituído por duas isotermas e duas adiabáticas, intercaladas. Na figura a seguir representamos em um diagrama pressão \times volume esse ciclo, quando utilizamos uma amostra de gás perfeito como fluido operante.

Se, ao percorrer o trecho BC desse ciclo, o sistema realiza um trabalho equivalente a 100 joules sobre o meio externo, então é verdade que, nesse trecho:

- a) o sistema recebe mais do que 100 joules de calor da fonte quente e sua energia interna aumenta.
- b) o sistema recebe 100 joules de calor da fonte quente e sua energia interna não sofre variação.
- c) o sistema rejeita 100 joules de calor para a fonte fria e sua energia interna se mantém constante.
- d) o sistema não troca calor com o meio externo e sua energia interna aumenta de 100 joules.
- e) o sistema não troca calor com o meio externo (BC é uma adiabática) e a energia interna diminui de 100 joules.



31. Uma máquina térmica, teórica, opera entre duas fontes de calor, executando o ciclo de Carnot. A fonte fria encontra-se à temperatura de 6°C e a fonte quente, a 347°C . Qual é o maior rendimento teórico dessa máquina?

32. O rendimento de certa máquina térmica de Carnot é de 40%, e a fonte fria é a própria atmosfera a 27°C . Qual é a temperatura da fonte quente?

33. Um motor de Carnot recebe da fonte quente 100 cal por ciclo e rejeita 80 cal para a fonte fria. Se a temperatura da fonte quente é de 127°C , qual é a temperatura da fonte fria?

34. Um refrigerador doméstico retira, por minuto, 1 000 kcal de energia térmica do congelador, enviando para o ambiente 1 200 kcal. Utilizando os dados fornecidos, determine a potência do compressor do refrigerador.

Dado: $1 \text{ kcal} = 4,2 \text{ kJ}$.



DESCUBRA MAIS

- 1 Como funcionam os motores de combustão interna, de quatro tempos, utilizados nos automóveis?
- 2 Por que as geladeiras tipo frost-free não precisam ser descongeladas? Por que elas não possuem a grade trocadora de calor em sua parte traseira?

Uma reflexão sobre a energia nuclear

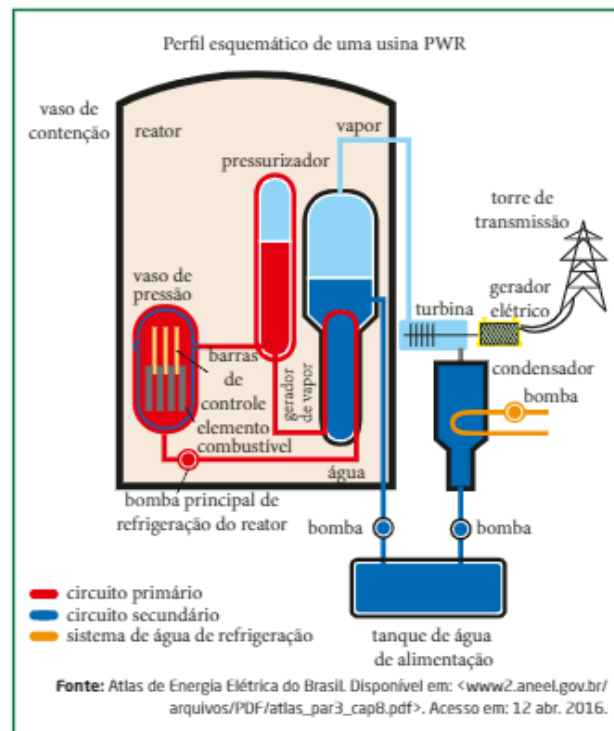
Muito se tem falado e escrito sobre a energia do átomo. Alguns a favor e muitos contra. No entanto, será que todos sabemos realmente os prós e os contras? A real necessidade de a humanidade usar ou não a energia nuclear?

Nós vivemos em uma sociedade que exige cada vez mais a utilização de energia elétrica. Usamos essa energia para iluminação de nossas casas, lojas e ruas; para fazer funcionar nossos aparelhos de cozinha (geladeiras, fornos elétricos, fornos de micro-ondas e outros); para nossos televisores (modelos mais antigos, de plasma, de LCD ou de LED), aparelhos de som, computadores fixos e móveis (*notebooks* e *netbooks*), *tablets*, telefones sem fio ou celulares; enfim, uma grande quantidade de aparelhos que exigem energia elétrica para seu funcionamento. Já se fala em fácil acesso a automóveis elétricos em um futuro bem próximo. Todos eles deverão ser abastecidos nas tomadas de nossas residências. A indústria que produz todos esses bens funciona com energia elétrica. Como vamos gerar tanta energia assim? Muitos podem dizer que existe a energia hídrica (gerada nas hidrelétricas, utilizando o desnível de grandes quantidades de água em represas), a energia eólica (gerada por aqueles grandes “ventiladores” soprados pelos ventos), a energia do carvão e dos óleos combustíveis (petróleo ou vegetais), do etanol, da energia solar, porém a obtenção dessas energias também tem suas limitações, seus prós e contras.

A seguir vamos entender um pouco da energia nuclear, como obtê-la, os prós e os contras.

A energia utilizada nas centrais termonucleares é obtida a partir da *fissão* controlada de núcleos de Urânio 235 (radioativo). Esse Urânio U^{235} é um isótopo que possui 92 prótons e 143 nêutrons, e sua massa atômica é 235 (92 + 143). Além do U^{235} , encontramos na natureza o U^{238} , outro isótopo de Urânio que contém 92 prótons e 146 nêutrons. O U^{238} é encontrado em maior quantidade, mas só pode sofrer *fissão* se bombardeado por nêutrons “rápidos”, de alta energia cinética. Já o U^{235} , que representa apenas 0,7% do Urânio encontrado, pode ser fissionado por nêutrons de qualquer energia cinética, os nêutrons “lentos” (nêutrons térmicos). Como nos reatores do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), os mais usados, precisamos ter aproximadamente 3,2% de concentração de U^{235} , a massa de Urânio deve passar por um processo de enriquecimento. Isso é feito retirando-se U^{238} da amostra, já que, após o enriquecimento, devem-se encontrar 32 átomos de U^{235} para cada 968 átomos de U^{238} . Quando o grau de enriquecimento é muito alto (mais de 90% de U^{235}), uma reação em cadeia muito rápida pode ocorrer: é a bomba atômica.

A *fissão* de núcleos de Urânio e seus isótopos gera uma grande quantidade de energia térmica, que pode ser aproveitada para a geração de energia elétrica, por meio de reatores do tipo PWR. A taxa de liberação de energia, a potência do reator, pode ser mudada, alterando-se a densidade de átomos fissionáveis, alterando-se o fluxo de nêutrons ou ainda o tamanho do núcleo a ser bombardeado. Para se ter uma ideia, se um grama de U^{235} fosse totalmente fissionado, forneceria energia equivalente à combustão de 9 toneladas de carvão.



Comparando uma usina termonuclear com usinas termelétricas e hidrelétricas, observamos que:

1. As usinas nucleares possuem uma reserva energética muito maior que as termelétricas (que dependem principalmente de combustíveis fósseis, em extinção) e as hidrelétricas (que dependem de reservas hídricas em cotas elevadas, cada vez mais difíceis de se obter).

2. As agressões ao meio ambiente são muito menores nas usinas nucleares. Já as usinas termelétricas são altamente poluidoras, emitindo gases tóxicos gerados pela queima de combustíveis fósseis (como os derivados de petróleo). As usinas hidrelétricas provocam grandes alterações no meio ambiente, como a devastação de grandes áreas úteis à agricultura, alagando-as.

De toda a energia elétrica produzida no mundo, 17% são gerados por usinas termonucleares. O país que mais utiliza essa forma de produção de energia são os Estados Unidos, com 98 usinas gerando 98 784 MWe. O segundo é a França, com 56 usinas que produzem 58 493 MWe. O terceiro é o Japão, 51 usinas gerando 39 917 MWe. O Brasil possui apenas duas usinas: Angra 1, em operação desde 1985, que gera 657 MWe, e Angra 2, em operação desde 2001, que produz 1 309 MWe. Hoje, são trinta e quatro os países que possuem usinas termonucleares em funcionamento.

Apesar dos riscos representados por usinas termonucleares, observamos que no futuro, se não encontrarmos uma nova maneira de obtenção de energia ou não mudarmos nosso modo de vida (utilizando menos energia), deveremos retornar à construção de novas usinas que utilizam a energia do átomo para obter a preciosa energia elétrica que move nosso mundo.

Na fotografia, observamos, à direita, a usina nuclear de Angra 1 com sua cúpula cilíndrica; à esquerda, a usina Angra 2 com sua cúpula convexa e a imensa chaminé. O conjunto é denominado Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Angra 1 iniciou seus trabalhos em 1985 e Angra 2, em 2001. Em um futuro próximo, a usina Angra 3 deverá fazer parte desse cenário.



Agência EBC/Imagem

Leia a seguir um texto sobre a construção de usinas atômicas e o impacto na redução de gases estufa.

Retomada nuclear

Mesmo ainda abalado com o acidente de Fukushima, o mundo retoma a construção de usinas atômicas de olho na redução dos gases estufa

Quatro anos depois do *tsunami* devastador que destruiu os reatores da Usina de Fukushima, no Japão, o mundo parece estar se reconciliando com a energia nuclear. Mesmo ainda sob o impacto do pior acidente atômico desde Chernobyl, 16 países estão investindo na construção de 72 novas usinas nucleares, a maior parte delas exatamente na Ásia. O movimento, apesar de ainda contar com a resistência dos ambientalistas, é um sinal claro de que a energia atômica está longe de ser aposentada, como previram os assustados japoneses logo após o *tsunami* de 2011.

Construção de reator nuclear em Flamanville, noroeste da França, em novembro de 2014. O início da produção de energia é previsto para 2016, esperando pleno funcionamento até 2018.

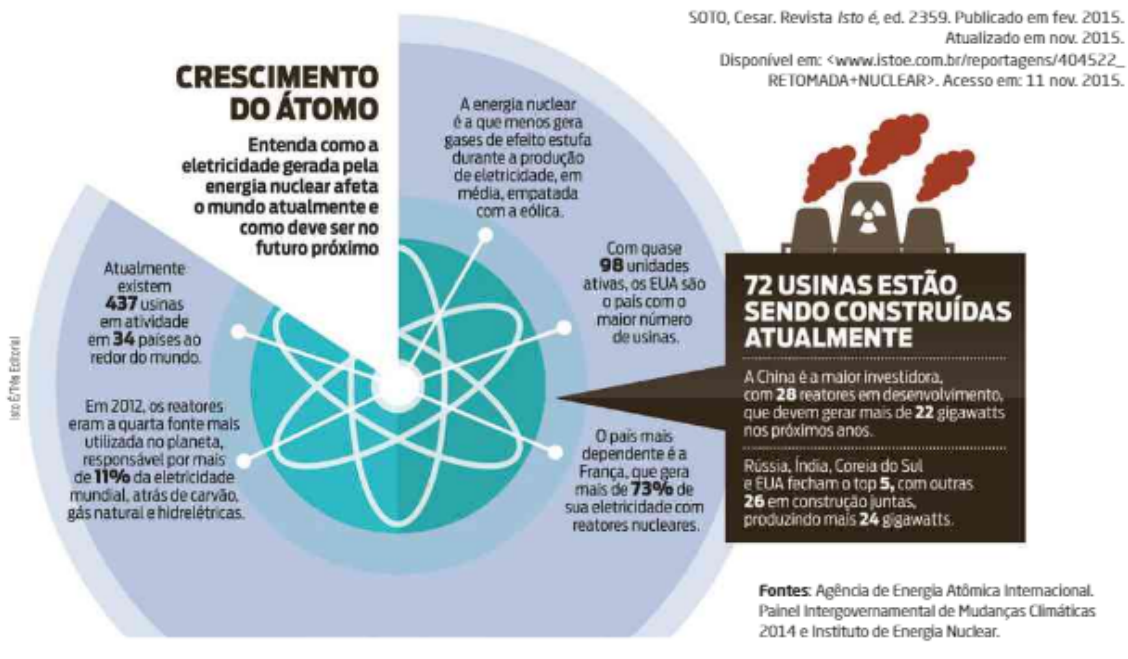


Daily Mail/Alamy

Só na China, 28 novas usinas nucleares estão em construção

Na verdade, a expectativa é de que usinas nucleares, em número cada vez maior, passem a ser construídas em ritmo acelerado. De acordo com um relatório conjunto divulgado em janeiro pela Agência Internacional de Energia e pela Agência Internacional de Energia Nuclear, seria necessário no mínimo dobrar a capacidade de geração das usinas atômicas até 2050 para reduzir de forma sensível o nível de emissão dos gases estufa na atmosfera. Apesar de seus resíduos serem altamente contaminantes, as usinas nucleares praticamente não emitem CO₂ – a tecnologia produz 70 vezes menos gases de efeito estufa que o carvão, responsável por 40% da eletricidade do mundo. "São muito mais baratas e eficientes", diz Sérgio Malta, presidente do Sindicato Interestadual das Indústrias de Energia Elétrica (Sinergia).

Hoje, cerca de 400 gigawatts/hora de energia elétrica são produzidos em usinas nucleares – o Brasil consome em média 88 gigawatts/hora. As 72 usinas que estão sendo construídas ampliarão essa capacidade em pouco mais de 10%. Ou seja, apesar de extremamente perigosa, a energia atômica parece estar longe de ser aposentada.



Compreensão, pesquisa e debate

1. A obtenção de energia a partir do átomo pode ser feita de duas maneiras: por fissão nuclear e por fusão nuclear. Pesquise e descubra a diferença entre esses dois processos.
2. A melhora da qualidade de vida das pessoas exige maior consumo de energia, principalmente a elétrica. A obtenção dessa energia sempre agride a natureza. Como podemos equacionar essa questão?
3. Pesquise e descubra como o uso do petróleo, do etanol, do biodiesel, do carvão e do átomo para a obtenção de energia provoca a degradação do meio ambiente.
4. Como as usinas hidrelétricas podem agredir o meio ambiente? Quais são os riscos de utilizar a energia nuclear?
5. Você é a favor da utilização de energia nuclear no Brasil? Discuta com seus colegas essa questão.
6. Em março de 2011 ocorreu o desastre de Fukushima, no Japão. Um terremoto provocou ondas de 14 metros de altura que inundaram as instalações da usina nuclear dessa cidade. Pesquise e entenda mais sobre os perigos das usinas nucleares. Compartilhe as informações obtidas com os colegas.



DILATAÇÃO TÉRMICA DOS SÓLIDOS E DOS LÍQUIDOS

1. INTRODUÇÃO

Em seu dia a dia, você pode observar que:

- entre trilhos consecutivos de uma estrada de ferro existe um espaçamento;



Fotografia mostrando espaço entre trilhos.

- nas pontes e nos viadutos, de construção não muito antiga, há fendas de dilatação para possibilitar a expansão da estrutura, evitando assim o aparecimento de trincas;
- quando se mede a temperatura de uma pessoa, o nível de mercúrio do termômetro varia;



Termômetros mostrando nível de mercúrio.

- nas quadras de esportes que ficam ao ar livre, recebendo radiação solar, o piso é feito em blocos quadrados separados por um material elástico, que possibilita a dilatação do concreto, para que não ocorram trincas.

Situações como essas são explicadas pela **dilatação térmica**.

Como vimos no Capítulo 1, a temperatura está relacionada com o estado de agitação das partículas de um corpo. Um estado de agitação maior indica uma temperatura maior. Assim, ao aquecermos um corpo, aumentamos a agitação de suas partículas e, conseqüentemente, sua temperatura.

De modo geral, o aumento na temperatura de um corpo provoca um aumento nas suas dimensões, fenômeno denominado **dilatação térmica**. Uma diminuição de temperatura produz, em geral, uma diminuição nas dimensões do corpo, uma **contração térmica**.

Nos sólidos, observamos que o aumento ou a diminuição da temperatura provoca variações em suas dimensões lineares, bem como nas dimensões superficiais e volumétricas. No estudo da dilatação térmica dos sólidos, faremos uma separação em três partes: dilatação linear, dilatação superficial e dilatação volumétrica.

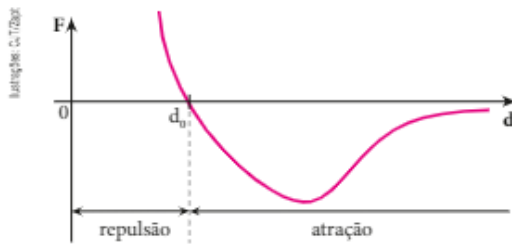
Para os líquidos, estudaremos apenas a dilatação volumétrica.

2. FORÇAS INTERMOLECULARES EXPLICANDO A DILATAÇÃO TÉRMICA

Quando um corpo é aquecido, suas moléculas passam a apresentar um movimento de agitação mais vigoroso. Nesse movimento, as moléculas conseguem afastar-se mais e também aproximar-se mais.

Será, então, que esse maior afastamento e essa maior aproximação não se compensam, de modo a não alterar as dimensões do corpo? Não! Para entender isso, recordemos como a intensidade das forças intermoleculares F varia em função da distância d entre as moléculas.

Observe o gráfico a seguir.



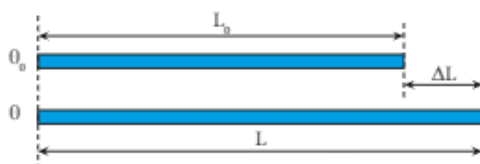
É bom lembrar que d_0 é a distância que separa as moléculas na posição de equilíbrio.

Observemos, no gráfico, que o módulo da força de repulsão, na aproximação, cresce mais depressa que o módulo da força de atração no afastamento. Consequentemente, a aproximação é mais dificultada que o afastamento. A ausência de simetria no gráfico mostra que ocorre um aumento da distância média entre as moléculas e a consequente dilatação térmica.

3. DILATAÇÃO LINEAR DOS SÓLIDOS

Para o estudo da dilatação linear dos sólidos, consideremos um fio metálico com comprimento L_0 quando a uma temperatura θ_0 . Aquecendo esse fio até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), observamos que seu comprimento passa a ser L ($L > L_0$).

É fácil compreender que, sendo o fio homogêneo, cada unidade de seu comprimento deve sofrer a mesma dilatação por unidade de variação de temperatura. Em outras palavras, todos os "centímetros" do fio devem sofrer os mesmos aumentos de comprimento, quando aquecidos igualmente.



Do exposto, podemos concluir que a variação total de comprimento ΔL sofrida pelo fio é diretamente proporcional ao seu comprimento inicial L_0 . Se um fio de 10 metros, ao ser aquecido, aumenta 1 centímetro em seu comprimento, outro de mesmo material, com 20 metros, deve aumentar 2 centímetros ao sofrer a mesma variação de temperatura do primeiro.

É evidente, também, que as partículas se afastam de acordo com a variação de temperatura, isto é, para

um maior aquecimento, obtém-se uma maior dilatação. Assim, ΔL é também diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta\theta$ sofrida pelo sólido (aproximadamente).

Vale, portanto, a relação:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

em que α é a "constante" de proporcionalidade, denominada **coeficiente de dilatação linear**. O valor de α é uma característica do material e, na prática, não é rigorosamente constante, dependendo da pressão, de eventuais tratamentos térmicos e mecânicos e, principalmente, da temperatura. Entretanto, costuma-se usar o valor médio de α entre as temperaturas inicial e final consideradas.

A unidade de α é o inverso da unidade de temperatura, como $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $^{\circ}\text{F}^{-1}$ e K^{-1} , por exemplo. Tal conclusão é tirada da relação obtida anteriormente:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta\theta}$$

Basta, agora, simplificar as unidades de comprimento relativas a ΔL e a L_0 para obter a unidade de α .

É importante observar que o coeficiente de dilatação linear médio é uma característica da substância e indica sua dilatação média por unidade de comprimento, quando sofre a variação de uma unidade na temperatura.

Lembrando que $\Delta L = L - L_0$, podemos obter a expressão de L em função de $\Delta\theta$:

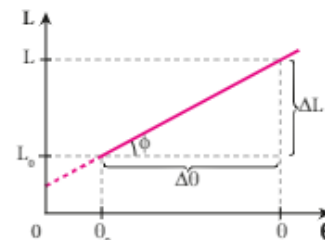
$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L - L_0 = L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L = L_0 + L_0 \alpha \Delta\theta$$

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta\theta)$$

A representação gráfica do comprimento L em função da temperatura θ está feita abaixo.



$$\text{tg}\phi = \frac{\Delta L}{\Delta\theta} = L_0 \alpha$$

Observemos que o gráfico é um segmento de reta oblíquo (função do 1º grau) que não passa pela origem, já que L_0 é diferente de zero.

Na sequência veremos algumas observações importantes para a continuação de nossos estudos sobre a dilatação dos sólidos.

- O ângulo ϕ de inclinação do gráfico está diretamente relacionado ao produto $L_0 \alpha$, e ϕ será tanto maior quanto maior for o produto $L_0 \alpha$. De fato, como $\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$, para um mesmo $\Delta \theta$, ΔL será tanto maior quanto maior for $L_0 \alpha$. Consequentemente, o ângulo ϕ também será maior.
- Um material é considerado **isótropo** em relação à dilatação térmica quando seu coeficiente de dilatação linear é o mesmo em qualquer direção. O vidro, por exemplo, é isótropo. Assim, se um cubo de vidro for aquecido de maneira que em todos os seus pontos ocorra a mesma variação de temperatura, ele se dilatará mantendo sua forma cúbica.
- Quando o coeficiente de dilatação linear (α) de um material for diferente em diferentes direções, esse material será considerado **anisótropo** em relação à dilatação térmica.
- Salvo declaração em contrário, admitiremos todos os materiais isótropos na dilatação.

A tabela a seguir fornece os coeficientes de dilatação linear (α) de alguns sólidos:

Coeficiente de dilatação linear de alguns sólido

Substância	α (em $^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Zinco	$26 \cdot 10^{-6}$
Alumínio	$22 \cdot 10^{-6}$
Prata	$19 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$17 \cdot 10^{-6}$
Ouro	$15 \cdot 10^{-6}$
Ferro	$12 \cdot 10^{-6}$
Platina	$9 \cdot 10^{-6}$
Vidro comum	$8 \cdot 10^{-6}$
Tungstênio	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Vidro pirex	$3 \cdot 10^{-6}$
Invar*	$1 \cdot 10^{-6}$

Fonte: <www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Dilatacao/linear.php>. Acesso em: 13 abr. 2016.

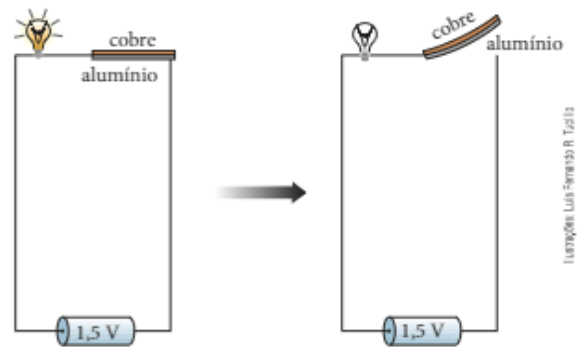
* Liga de níquel e ferro. Invar é redução do francês *invariable* (invariável), por causa de seu baixo coeficiente de dilatação térmica.

Lâminas bimetálicas

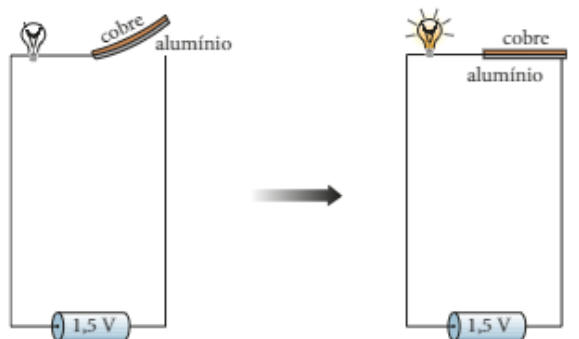
Você já deve ter visto uma árvore de Natal enfeitada com muitas lâmpadas pisca-pisca. Também já deve ter notado que, de tempos em tempos, a geladeira se desliga automaticamente, voltando a funcionar após alguns minutos.

Nessas duas situações, é uma lâmina bimetálica que liga e desliga os circuitos elétricos.

A lâmina bimetálica é constituída de duas faces de materiais diferentes, “coladas” uma à outra, que inicialmente possuem comprimentos iguais. Quando a corrente elétrica passa pela lâmina bimetálica, ela se aquece, o que provoca dilatações diferentes nos metais. Por exemplo, se usássemos alumínio ($\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) em uma das faces e cobre ($\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) na outra, teríamos uma dilatação maior para o alumínio. A lâmina iria se encurvar, e o alumínio ficaria na face convexa. Isso seria suficiente para interromper a corrente elétrica, apagando as lâmpadas ou desligando a geladeira.



Após algum tempo, a lâmina esfria, diminuindo de tamanho devido à contração térmica. O metal que se dilata mais ao ser aquecido é aquele que se contrai mais ao ser esfriado. Ao voltar ao comprimento inicial, a lâmina fecha o circuito, que volta a ser percorrido por corrente elétrica, até que um novo aquecimento provoque curvatura na lâmina.



FAÇA VOCÊ MESMO

O uso de lâminas bimetálicas

ATENÇÃO!

Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do seu professor.

Como vimos, são as lâminas bimetálicas que explicam o funcionamento das lâmpadas pisca-pisca e do termostato da geladeira, que liga e desliga esse aparelho. Existe uma atividade experimental bastante simples e fácil de ser realizada que mostra como esse dispositivo funciona.

Material necessário

- 1 folha que tenha uma face de alumínio e a outra de papel. Folhas como essa podem ser encontradas em algumas embalagens de bombons;
- 1 vela;
- um prendedor de roupas.

Procedimento

- Recorte uma tira retangular de aproximadamente $12\text{ cm} \times 1,5\text{ cm}$ e alise-a de modo que ela fique plana.
- Segure uma das extremidades da tira com um prendedor de roupas. Mantendo-a na horizontal, com a face de alumínio voltada para baixo, aproxime-a da chama da vela com muito cuidado. Não deixe a tira muito perto da chama, pois a face do papel poderá queimar.



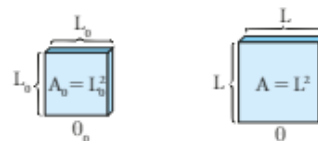
Analisando o experimento

1. A tira se curva para cima ou para baixo?
2. Por que essa tira se curva? Isso ocorre se aquecermos uma tira de embalagem 100% alumínio?
3. Para um mesmo aquecimento, quem dilata mais: o papel ou o alumínio?
4. Se deixarmos a face do alumínio voltada para cima, corremos o risco de queimar o papel em contato com a chama da vela. No entanto, até que isso ocorra, a tira irá se curvar para cima ou para baixo?
5. Deixando a tira inicial esfriar, ela perde a curvatura? Por que isso ocorre?
6. Pesquise e descubra outras situações em que a lâmina bimetálica contribui para o funcionamento de um dispositivo de Física aplicada.

4. DILATAÇÃO SUPERFICIAL DOS SÓLIDOS

Para facilitar o estudo da dilatação superficial dos sólidos, vamos considerar uma placa metálica de forma quadrada, com lado L_0 , a uma temperatura θ_0 e de material cujo coeficiente de dilatação linear vale α .

Aquecendo-se a placa até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), o aumento de suas dimensões lineares produz um aumento na área de sua superfície, que, no entanto, permanece quadrada.



No início, a área da placa é dada por: $A_0 = L_0^2$ (I)

Após o aquecimento, tornou-se: $A = L^2$ (II)

Mas podemos relacionar L e L_0 por: $L = L_0(1 + \alpha\Delta\theta)$

Elevando ao quadrado ambos os membros da equação, temos: $L^2 = L_0^2(1 + \alpha\Delta\theta)^2$ (III)

Substituindo (I) e (II) em (III), obtemos:

$$A = A_0(1 + \alpha\Delta\theta)^2$$

Logo: $A = A_0(1 + 2\alpha\Delta\theta + \alpha^2\Delta\theta^2)$

Como a ordem de grandeza de α é 10^{-5} , ao ser elevado ao quadrado teremos 10^{-10} , que é desprezível se comparado com 10^{-5} , pois é cem mil vezes menor que 10^{-5} . É bom lembrar que $\Delta\theta$ em geral não ultrapassa a ordem de 10^3 °C, com o corpo ainda no estado sólido. Portanto, o termo $\alpha^2 \Delta\theta^2$ é desprezível em comparação com $2\alpha \Delta\theta$. Assim, a equação da dilatação superficial assume a forma aproximada:

$$A = A_0(1 + 2\alpha \Delta\theta)$$

Fazendo-se $2\alpha = \beta$, que chamaremos de **coeficiente de dilatação superficial** do material, segue que:

$$A = A_0(1 + \beta \Delta\theta) \quad \text{ou} \quad \Delta A = A_0 \beta \Delta\theta$$

Essa equação pode ser usada para calcular a dilatação superficial, mesmo que a superfície em questão não seja quadrada, podendo ser retangular, circular ou de qualquer outra forma.

Como se comportam os buracos em uma dilatação?

Imagine uma placa metálica, quadrada, de zinco, por exemplo, material usado para a confecção de calhas de uma residência. Com uma tesoura adequada vamos cortar uma parte, no meio dessa placa.

Ilustração: Luis da S. Teixeira



Vamos agora colocar as duas partes no interior de um forno preaquecido. Depois de alguns minutos, usando luvas térmicas apropriadas, tentaremos encaixar no orifício a parte que foi retirada. O que será que vai acontecer? É claro que a parte que foi retirada encaixará certinho no orifício da placa. Isso ocorre porque, na placa, o aquecimento provocará uma dilatação "para fora", isto é, tudo se passa como se o buraco estivesse preenchido do material da placa. Assim, o pedaço retirado irá se dilatar e o buraco também e, a qualquer temperatura que se aqueça o conjunto, placa e pedaço retirado, o encaixe ocorrerá.

Do exposto acima podemos concluir que, no aquecimento, os orifícios encontrados em placas ou blocos aumentarão de tamanho e, no resfriamento, diminuirão de tamanho. Tudo acontecendo como se a placa ou o bloco tivessem os buracos preenchidos do mesmo material existente ao seu redor.

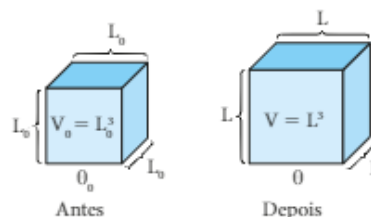
Nos cálculos para determinar comprimentos, larguras, áreas ou volumes de buracos, usaremos as equações da dilatação e iremos considerar o coeficiente de dilatação do material do corpo que forma o buraco.

5. DILATAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS SÓLIDOS

Também aqui, para facilitar o entendimento, consideraremos um sólido de forma particular: um cubo. Depois, generalizaremos para as demais formas dos sólidos.

Assim, vamos considerar um cubo metálico de aresta L_0 , à temperatura θ_0 e feito de um material de coeficiente de dilatação linear igual a α .

Aquecendo-se esse cubo até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), o aumento das suas dimensões lineares provoca, também, um aumento no seu volume. No entanto, o sólido continua com forma cúbica.



No início, o volume do cubo é dado por:

$$V_0 = L_0^3 \quad (\text{I})$$

Após o aquecimento, passa a ser V , tal que:

$$V = L^3 \quad (\text{II})$$

Elevando os dois membros da equação da dilatação linear ao cubo, temos:

$$L^3 = L_0^3 (1 + \alpha \Delta\theta)^3 \quad (\text{III})$$

Substituindo (I) e (II) em (III), obtemos:

$$V = V_0(1 + \alpha \Delta\theta)^3$$

Desenvolvendo o binômio, temos:

$$V = V_0(1^3 + 3 \cdot 1^2 \cdot \alpha \Delta\theta + 3 \cdot 1 \cdot \alpha^2 \Delta\theta^2 + \alpha^3 \Delta\theta^3)$$

Pelo já exposto no item anterior, $3\alpha^2 \Delta\theta^2$ e $\alpha^3 \Delta\theta^3$ são desprezíveis em comparação com $3\alpha \Delta\theta$. Assim, a relação passa a ter a forma aproximada:

$$V = V_0(1 + 3\alpha \Delta\theta)$$

Fazendo-se $3\alpha = \gamma$, que chamaremos de **coeficiente de dilatação volumétrica** ou **cúbica** do material, obtemos as expressões:

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta\theta) \quad \text{ou} \quad \Delta V = V_0\gamma\Delta\theta$$

A relação entre os coeficientes de dilatação é dada por:

$$\frac{\alpha}{1} = \frac{\beta}{2} = \frac{\gamma}{3}$$

Da mesma forma que na dilatação superficial, a equação da dilatação volumétrica é válida para todos os sólidos, quaisquer que sejam suas formas.

Se o sólido em questão possuir uma cavidade, com o aquecimento, ela se dilatará, como se estivesse preenchida pela substância de que é constituído o sólido. Portanto, o volume interno de um frasco de vidro vai variar, no aquecimento ou no resfriamento, como se fosse um bloco maciço de vidro. O mesmo ocorre com uma placa que tenha um orifício, que se dilatará ou se contrairá junto da placa, no aquecimento e no resfriamento, como se estivesse preenchido do mesmo material da placa.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

A dilatação térmica em nossa vida

Você já deve ter observado no seu dia a dia algumas situações que envolvem a dilatação térmica. Por exemplo, se uma porção de chá muito quente é colocada no interior de um copo de vidro comum, ele pode trincar. Isso ocorre porque a parte interna do copo é aquecida e se dilata. Como o vidro é péssimo condutor de calor, a face externa do copo demora para ser aquecida. É essa diferença de dilatação entre as partes interna e externa que provoca o trincamento do vidro.

THEO TIZ



Copo trincado (à direita) por causa da diferença de dilatação entre suas superfícies interna e externa.

Nas calçadas de cimento, um pedreiro sempre deve dividir o espaço usando ripas de madeira, pois, se a superfície for grande, com o tempo irá apresentar rachaduras, devido à dilatação do concreto. Nas quadras esportivas com piso de cimento também há juntas de dilatação. É comum lajes de concreto apresentarem infiltrações. Isso ocorre porque a laje sofre dilatação quando a temperatura aumenta e contração quando a temperatura diminui. Podem surgir fissuras na laje, por onde a água entra quando chove.

As divisões de madeira permitem a dilatação das placas de concreto.



Nas pontes e nos viadutos, devem ser previstas fendas de dilatação para que a estrutura possa dilatar-se quando a temperatura aumenta.

Nem todas as pessoas sabem que líquidos muito gelados e comida muito quente podem provocar sérios danos aos dentes. Como os materiais usados nas obturações e os dentes possuem coeficientes de dilatação diferentes, nas variações de temperatura a dilatação ocorre de forma diversa. Se o material da obturação dilatar mais, poderá ocorrer quebra do dente; se dilatar menos, irá se afastar do dente, provocando infiltrações e, conseqüentemente, cáries.

As obturações metálicas se expandem e se contraem mais do que os dentes. Isso pode provocar fraturas ou infiltrações, quando são ingeridos líquidos muito gelados ou comidas muito quentes.



Nas ferrovias, é deixado um pequeno espaço entre dois trilhos consecutivos para permitir sua expansão térmica. Na fotografia ao lado, você pode observar que um grande aumento de temperatura distorceu os trilhos, impossibilitando a passagem dos trens.

Com o aquecimento, os trilhos sofreram uma grande expansão térmica.



FAÇA VOCÊ MESMO**Comprovando a dilatação volumétrica****ATENÇÃO!**

Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do seu professor.

Nesta seção, vamos realizar uma atividade prática bastante simples, com o objetivo de constatar a dilatação volumétrica de um corpo.

Material necessário

- 1 cadeado de tamanho médio e sua respectiva chave;
- 1 alicate;
- 1 vela e 1 pires para servir de suporte para a vela;
- 1 isqueiro ou fósforo para acender a vela.

Procedimento

- Experimente a chave no alojamento existente no cadeado, abrindo-o. Repita essa operação algumas vezes.
- Acenda a vela e, segurando a chave com o alicate, aqueça-a durante algum tempo diretamente sobre a chama da vela. Em seguida, tente colocar a chave aquecida no alojamento existente no cadeado.

**Analisando o experimento**

1. Quando você aqueceu a chave, o que ocorreu com as dimensões desse objeto?
2. Após o aquecimento, a chave entrou no alojamento existente no cadeado? Por quê?
3. Deixando a chave esfriar, ela voltará a entrar no alojamento existente no cadeado? Por quê?

QUESTÕES COMENTADAS

1 Griselda resolveu fazer uma salada para seu jantar. Ao tentar abrir o vidro de palmito, que tem tampa metálica, não conseguiu. Porém, lembrando-se de suas aulas de Física do Ensino Médio, mergulhou a tampa da embalagem em água quente durante alguns segundos. Ao tentar novamente abrir a tampa, observou que ela se soltou facilmente. Isso provavelmente ocorreu porque:

- a) reduziu-se a força de coesão entre as moléculas do metal e do vidro.
- b) reduziu-se a pressão do ar no interior do recipiente.

- c) houve redução da tensão superficial existente entre o vidro e o metal.
- d) o coeficiente de dilatação do metal é maior que o do vidro.
- e) o coeficiente de dilatação do vidro é maior que o do metal.

RESOLUÇÃO

O coeficiente de dilatação do metal é maior que o do vidro. Ao ser mergulhada na água quente, a tampa de metal dilata mais do que o vidro, soltando-se.

Resposta: Alternativa *d*.

2 Uma barra de cobre, homogênea e uniforme, mede 20 m, a 0 °C. Calcule a variação do comprimento dessa barra, em milímetros, quando aquecida a 50 °C.

Dado: coeficiente de dilatação linear do cobre = $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

RESOLUÇÃO

Usando a **Equação da Dilatação Linear**, temos:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$$

Substituindo os valores fornecidos, temos:

$$\Delta L = 20 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot (50 - 0)$$

$$\Delta L = 0,016 \text{ m} = 16 \text{ mm}$$

Resposta: 16 mm

3 A primeira ferrovia a funcionar no Brasil foi inaugurada em abril de 1854, ligando o Porto de Mauá a Frago, no Rio de Janeiro, com 14,5 km de extensão, construída pelo Visconde de Mauá.

Um dos cuidados que se deve ter na colocação dos trilhos em uma ferrovia é deixar uma pequena distância entre dois deles para possibilitar a dilatação térmica que pode ocorrer com a variação de temperatura.

Normalmente os trilhos utilizados possuem 20 m de comprimento. Em sua fixação sobre dormentes, uma distância de 5 mm é deixada entre as peças consecutivas, são as juntas de dilatação que evitam que os trilhos se espremam em dias muito quentes. Considerando um local em que a temperatura varia aproximadamente 25 °C entre a mínima no período da noite e a máxima durante o dia, determine o valor do coeficiente de dilatação linear do material dos trilhos, supondo que o espaço deixado é exatamente o necessário.

RESOLUÇÃO

Aplicando a **Equação da Dilatação Linear**, temos:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$$

Se a distância entre dois trilhos consecutivos é 5 mm, cada trilho pode dilatar 2,5 mm de cada lado. Assim, o total a ser dilatado é 5 mm.

$$5 = 20000 \cdot \alpha \cdot 25 \Rightarrow \alpha = \frac{5}{20000 \cdot 25}$$

$$\text{Logo: } \alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Resposta: $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

4 Uma barra metálica de coeficiente de dilatação linear médio de $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a 20 °C é colocada no interior de um forno. Após a barra ter atingido o equilíbrio térmico, verifica-se que seu comprimento é 1% maior em relação ao anterior. Qual é a temperatura do forno?

RESOLUÇÃO

Considerando a dilatação percentual da barra, temos:

$$L_0 \rightarrow 100\% \quad \Delta L \rightarrow 1\%$$

$$\text{Assim: } \Delta L = \frac{L_0}{100}$$

Da **Equação da Dilatação Linear**, temos: $\Delta L = L_0 \alpha \Delta \theta$

Portanto:

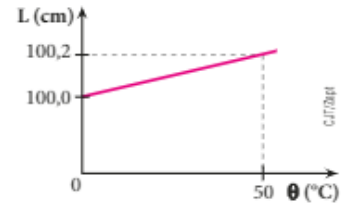
$$\frac{L_0}{100} = L_0 \alpha \Delta \theta \Rightarrow 1 = 100 \cdot \alpha \Delta \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 = 100 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta_f - 20) \Rightarrow 500 = \theta_f - 20 \Rightarrow \theta = 520 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Resposta: 520 °C

5 A figura ao lado representa o comprimento de uma barra metálica em função de sua temperatura.

Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do material dessa barra?



RESOLUÇÃO

Da **Equação da Dilatação Linear**, temos: $\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta \theta}$

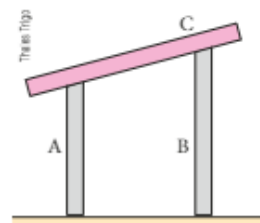
Utilizando os valores fornecidos pelo gráfico, obtemos:

$$\alpha = \frac{100,2 - 100,0}{100,0 \cdot (50 - 0)} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

$$\alpha = \frac{0,2}{5000} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \Rightarrow \alpha = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Resposta: $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

6 No laboratório de pesquisas de uma universidade foram obtidas duas ligas metálicas que são chamadas de A e B. À temperatura de 20 °C, cortou-se uma barra de comprimento 1000 mm da liga metálica A e outra de 1001 mm da liga B. Elas foram fixadas a uma base horizontal de concreto e uma terceira barra C, de material desconhecido, foi apoiada sobre elas. Por causa do atrito, a barra C não deslizou.



Elementos sem proporção entre si.

Sabendo o conjunto foi aquecido até a barra C ficar na posição horizontal, determine essa temperatura.

Dados: coeficientes de dilatação linear das ligas metálicas A e B: $\alpha_A = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_B = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

RESOLUÇÃO

Quando a barra C estiver na horizontal, os comprimentos das barras A e B serão iguais: $L_A = L_B$

Como $L = L_0 (1 + \alpha \Delta \theta)$, temos:

$$L_{0A} (1 + \alpha_A \Delta \theta) = L_{0B} (1 + \alpha_B \Delta \theta)$$

$$1000 \cdot (1 + 3,0 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \theta) = 1001 \cdot (1 + 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \theta)$$

$$1000 + 3000 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \theta = 1001 + 1001 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \theta$$

$$1999 \cdot 10^{-5} \Delta \theta = 1 \Rightarrow \Delta \theta \cong 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Logo: } \theta - 20 \cong 50 \Rightarrow \theta \cong 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Resposta: Aproximadamente 70 °C.

7 Uma moeda, fabricada com níquel puro, está à temperatura de 20 °C. Ao ser levada a um forno, ela sofre um acréscimo de 1% na área de sua superfície. Qual é a temperatura do forno?

Dado: coeficiente de dilatação linear do níquel = $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

RESOLUÇÃO

A Equação Simplificada da Dilatação Superficial é:

$$\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta$$

$$\text{Sendo: } \Delta A = 0,01 A_0; \beta = 2\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\Delta \theta = \theta - 20, \text{ temos:}$$

$$0,01 A_0 = A_0 25 \cdot 10^{-6} (\theta - 20)$$

$$400 = \theta - 20 \Rightarrow \theta = 420 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Resposta: 420 °C

8 Numa chapa de latão, a 0 °C, fez-se um orifício circular de 20,0 cm de diâmetro. Determine o acréscimo de área que o orifício sofre quando a temperatura da chapa é elevada a 250 °C.

Dados: coeficiente de dilatação linear do latão = $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

RESOLUÇÃO

Como o orifício é de forma circular, a 0 °C sua área é calculada por: $A_0 = \pi R_0^2 \Rightarrow A_0 = 3,14 \cdot (10,0)^2 \Rightarrow A_0 = 314 \text{ cm}^2$
Usando a Equação Simplificada da Dilatação Superficial, $\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta$ e sendo: $\beta = 2\alpha = 4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, temos:

$$\Delta A = 314 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \Rightarrow \Delta A = 3,14 \text{ cm}^2$$

Resposta: 3,14 cm²

9 Ao aquecermos um sólido de 20 °C a 80 °C, observamos que seu volume experimenta um aumento correspondente a 0,09% em relação ao volume inicial. Qual é o coeficiente de dilatação linear do material de que é feito esse sólido?

RESOLUÇÃO

O volume inicial V_0 corresponde a 100% e a variação de volume ΔV , a 0,09%. Assim, podemos escrever a relação:

$$\Delta V = \frac{0,09 V_0}{100}$$

Como $\Delta V = V_0 \gamma \Delta \theta$, então: $\frac{0,09 V_0}{100} = V_0 \gamma \Delta \theta$
Mas $\gamma = 3\alpha$

$$\text{Logo: } \frac{0,09}{100} = 3\alpha(80 - 20) \Rightarrow \alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Resposta: $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$



QUESTÕES PROPOSTAS



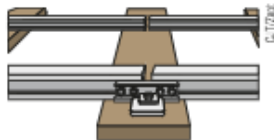
FAÇA NO CADERNO.

10. Você já deve ter observado em sua casa que o vidro pirex é mais resistente às variações de temperatura que o vidro comum. Se colocarmos água fervente em um copo de vidro comum, ele trinca, mas isso não acontece com o vidro pirex. A explicação para isso é que:

- o calor específico do pirex é menor que o do vidro comum.
- o calor específico do pirex é maior que o do vidro comum.
- para aquecimentos iguais, o vidro comum sofre maior variação de temperatura.
- o coeficiente de dilatação do vidro comum é menor que o do vidro pirex.
- o coeficiente de dilatação do vidro comum é maior que o do vidro pirex.

11. Um estudante ouviu de um antigo engenheiro de uma estrada de ferro que os trilhos de 10 m de comprimento haviam sido fixados ao chão em um dia em que a temperatura era de 10 °C. No dia seguinte, em uma aula de Geografia, ele ouviu que, naquela cidade, a maior temperatura que um objeto de metal atingiu, exposto ao Sol, foi 50 °C.

O espaço entre os trilhos possibilita sua dilatação.



Com essas informações, o estudante resolveu calcular a distância mínima entre dois trilhos de trem. Que valor ele encontrou?

Dado: coeficiente de dilatação linear do aço = $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

12. Uma régua de alumínio tem comprimento de 200 cm a 20 °C. Qual é o seu comprimento, em centímetros, a 60 °C?

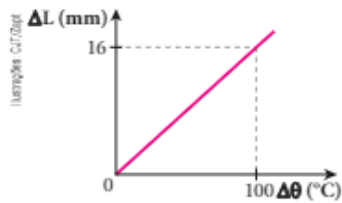
Dado: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

13. À temperatura de 0 °C, um fio de cobre mede 100,000 m. Seu comprimento passa a ser de 100,068 m quando a temperatura atinge 40 °C. Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do cobre?

14. Um fio de cobre, com 1,000 m de comprimento a 20 °C, foi colocado em um forno, dilatando-se até atingir 1 012 mm. Qual é a temperatura do forno, suposta constante?

Dado: coeficiente de dilatação linear do cobre = $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

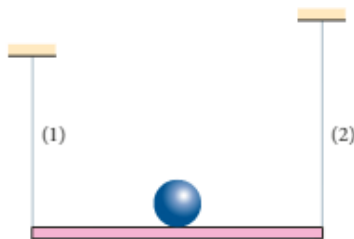
15. O diagrama abaixo mostra a variação (ΔL) sofrida por uma barra metálica de comprimento inicial igual a 10 m em função da variação de temperatura ($\Delta\theta$).



Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do material dessa barra?

16. Sabendo que o coeficiente de dilatação linear médio do concreto é $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, estime a variação anual da altura de um prédio de 10 andares em uma cidade do litoral de São Paulo, uma região temperada, em razão da variação de temperatura entre o inverno e o verão.

17. A figura a seguir mostra uma esfera em repouso sobre uma barra horizontal sustentada por dois fios metálicos de materiais diferentes, (1) e (2), de comprimentos desiguais, L_1 e L_2 , a 0°C . Sendo α_1 e α_2 os respectivos coeficientes de dilatação lineares dos fios (1) e (2), qual das relações a seguir representa a condição para que a esfera continue equilibrada sobre a barra ao variar a temperatura?



- $\alpha_1 = \alpha_2$
- $\alpha_1 L_1 = \alpha_2 L_2$
- $\alpha_1 L_2 = \alpha_2 L_1$
- $L_1 L_2 = \alpha_1 \alpha_2$
- $L_2 = L_1 \alpha_1 \alpha_2$

18. Três bastões de mesmo comprimento L , um de alumínio ($\alpha_{Al} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), outro de latão ($\alpha_{latão} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e o terceiro de cobre ($\alpha_{Cu} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), são emendados de modo que constituam um único bastão de comprimento $3L$. Determine o coeficiente de dilatação linear do bastão resultante.

19. Os materiais usados para a obturação e os dentes possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Assim, do ponto de vista físico, por que pode ser prejudicial aos dentes ingerirmos bebidas muito quentes ou muito geladas?

20. À temperatura de 15°C , encontramos uma chapa de cobre com superfície de área 100 cm^2 .

Que área terá essa superfície se a chapa for aquecida até 515°C ?

Dado: coeficiente de dilatação superficial do cobre = $3,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

21. Uma chapa de alumínio possui um furo em sua parte central. Sendo aquecida, observamos que:

- tanto a chapa como o furo tendem a diminuir suas dimensões.
- o furo permanece com suas dimensões originais e a chapa aumenta.
- a chapa e o furo permanecem com suas dimensões originais.
- a chapa aumenta e o furo diminui.
- tanto a chapa como o furo tendem a aumentar suas dimensões.

22. Em uma placa de ouro há um pequeno orifício que, a 30°C , tem superfície de área $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. A que temperatura devemos levar essa placa para que a área do orifício aumente o correspondente a $6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$?

Dado: coeficiente de dilatação linear do ouro = $15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

23. Um dos cuidados que se deve ter na cozinha é nunca tirar uma forma de vidro quente do forno e colocá-la imediatamente em cima da pia, que geralmente está molhada. Ao tocar a superfície fria da pia, a face externa da forma de vidro esfria rapidamente. Enquanto isso, a face interna, em contato com o alimento, permanece aquecida. Dessa forma, a face externa se contrai e a face interna permanece dilatada. Isso faz com que o vidro trinque, mesmo os refratários. Portanto, ao retirar uma forma de vidro do tipo pirex do forno, ela deve ser levada imediatamente à mesa e colocada sobre uma base feita de material próprio para isolamento térmico.

Imagine um almoço de domingo, em que foi preparada uma lasanha maravilhosa. A forma usada é retangular com base de dimensões 20 cm por 30 cm, na temperatura ambiente de 20°C .

Essa forma permaneceu no interior do forno a uma temperatura de 250°C , quando foi retirada e, inadvertidamente, colocada sobre a pedra fria da pia. A face externa esfria rapidamente atingindo a temperatura de 100°C .

Considerando o coeficiente de dilatação linear do vidro refratário igual a $3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, de quanto seria em cm^2 a contração sofrida pela face externa da base da forma se ela não tivesse trincado?

24. Uma estatueta de ouro foi aquecida de 25°C para 75°C , observando-se um aumento de $2,1 \text{ cm}^3$ em seu volume. Sendo $14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o coeficiente de dilatação linear do ouro, qual era o volume inicial dessa estatueta?

25. Uma esfera metálica maciça é aquecida de 30°C para 110°C , e seu volume sofre um aumento correspondente a 1,2%. Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear médio desse metal?

26. Um cubo é aquecido e constata-se um aumento de 0,6% em seu volume. Qual foi a variação de temperatura sofrida pelo cubo?

Dado: coeficiente de dilatação volumétrica do material do cubo = $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

27. Uma panela de alumínio possui, a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, uma capacidade de 1000 cm^3 (1 L). Se levarmos a panela com água ao fogo, até que ocorra ebulição da água, sob pressão normal, qual será a nova capacidade da panela?

Dados: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; coeficiente de dilatação cúbica da água = $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

6. DILATAÇÃO TÉRMICA DOS LÍQUIDOS

Um líquido, devido às suas características, precisa estar no interior de um recipiente sólido para que possamos determinar seu volume.

Assim, podemos estudar o que ocorre com o volume de um líquido, no aquecimento ou no resfriamento, se ele estiver em uma proveta graduada, por exemplo.

Líquido no interior de uma proveta graduada. O volume do líquido é lido na escala indicada na proveta.

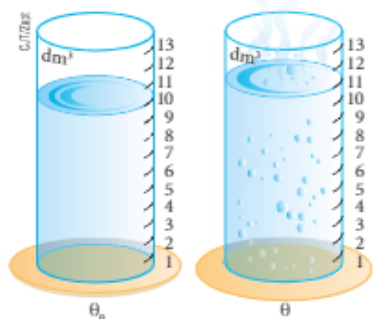


Imaginemos um recipiente de vidro transparente, graduado corretamente em dm^3 , a uma temperatura θ_0 .

Um líquido, também à temperatura θ_0 , é colocado no interior desse frasco até a marca de 10 dm^3 . Como o frasco foi graduado corretamente a essa temperatura θ_0 , podemos dizer com certeza que o recipiente contém 10 dm^3 de líquido.

Agora, aquecendo o conjunto frasco-líquido até uma temperatura θ ($\theta > \theta_0$), notamos que o líquido atinge a marca de 11 dm^3 .

Qual foi a dilatação sofrida por esse líquido?



À primeira vista, pode-se pensar que o líquido dilatou 1 dm^3 . Mas será que foi 1 dm^3 mesmo?

Na verdade, esse líquido dilatou mais do que 1 dm^3 , pois, como **o frasco também dilatou**, entre duas marcas consecutivas da graduação do frasco temos agora uma capacidade maior do que 1 dm^3 . Assim, à temperatura θ , temos o líquido ocupando 11 unidades da graduação do frasco, sendo que cada unidade corresponde a um volume maior do que 1 dm^3 . Daí termos mais de 11 dm^3 de líquido e, em consequência, uma dilatação real maior do que 1 dm^3 .

Lembre-se de que esse problema é inevitável, já que o líquido tem de estar no interior de um frasco sólido, que também dilata.

É por isso que se observam dois tipos de dilatação para os líquidos: uma **real** (que não depende do frasco) e outra **aparente** (afetada pela dilatação do frasco).

Em líquidos, só existe interesse no estudo da dilatação volumétrica, que é regida pela mesma **Equação da Dilatação Volumétrica dos Sólidos**:

$$V = V_0(1 + \gamma \Delta\theta)$$

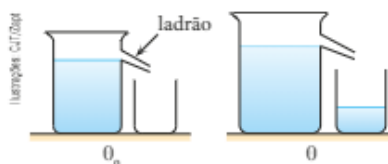
Os coeficientes de dilatação real dos líquidos são, em geral, maiores do que os dos sólidos.

Veja, no quadro a seguir, os coeficientes de dilatação real de alguns líquidos:

Líquido	$\gamma_{\text{real}} (\text{em } ^\circ\text{C}^{-1})$
Éter	$16,6 \cdot 10^{-4}$
Álcool etílico	$11 \cdot 10^{-4}$
Petróleo	$9 \cdot 10^{-4}$
Glicerina	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Água*	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Mercúrio	$1,8 \cdot 10^{-4}$

* À temperatura aproximada de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Para entendermos melhor as dilatações real e aparente, consideremos um frasco totalmente cheio com um líquido. Ao aquecermos o conjunto, notamos que ocorre um extravasamento parcial do líquido.



Note que após o aquecimento o recipiente continua cheio. A quantidade de líquido extravasado representa a aparente dilatação do líquido, pois o **recipiente também dilatou**, aumentando sua capacidade.

Assim, a dilatação real do líquido corresponde à variação da capacidade do frasco mais o volume do líquido extravasado:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{frasco}} + \Delta V_{\text{aparente}}$$

Entretanto, $\Delta V = V_0 \gamma \Delta \theta$; como, no início, o volume real do líquido é igual ao aparente e, ainda, igual à capacidade do frasco, temos:

$$V_0 \gamma_r \Delta \theta = V_0 \gamma_f \Delta \theta + V_0 \gamma_a \Delta \theta$$

$$\gamma_r = \gamma_f + \gamma_a$$

O coeficiente de dilatação real do líquido é igual à soma do seu coeficiente de dilatação aparente com o coeficiente de dilatação do frasco que o contém.

Observemos que a dilatação real depende somente do líquido, enquanto a dilatação aparente depende também do frasco em que foi medida. Um mesmo líquido apresenta dilatações aparentes diferentes quando medidas em dois frascos de materiais diferentes, pois o frasco que dilata menos provoca maior extravasamento e maior dilatação aparente.

7. TEMPERATURA E MASSA ESPECÍFICA

Vamos agora observar a influência da temperatura na massa específica de uma substância.

Massa específica ou **densidade absoluta** (μ) de uma substância é o quociente de sua massa (m) pelo respectivo volume (V):

$$\mu = \frac{m}{V}$$

Com a variação de temperatura, a massa da substância considerada permanece inalterada, porém seu volume varia, o que provoca alteração em sua massa específica.

Assim, a uma temperatura θ_0 , temos:

$$\mu_0 = \frac{m}{V_0} \Rightarrow m = \mu_0 V_0 \quad (\text{I})$$

À temperatura θ , temos, para a densidade da substância:

$$\mu = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \mu V \quad (\text{II})$$

Igualando (I) e (II), podemos escrever:

$$\mu_0 V_0 = \mu V \quad (\text{III})$$

Substituindo em (III) a expressão da dilatação volumétrica, dada por: $V = V_0(1 + \gamma \Delta \theta)$, obtemos:

$$\mu_0 V_0 = \mu V_0(1 + \gamma \Delta \theta)$$

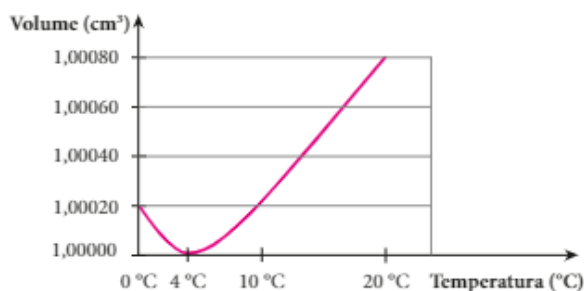
$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 + \gamma \Delta \theta)}$$

Observe, na relação, que a massa específica de um líquido diminui com o aumento da temperatura.

8. DILATAÇÃO ANORMAL DA ÁGUA

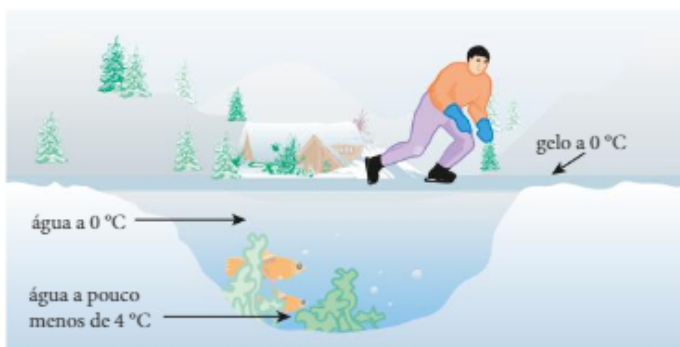
Em geral, um líquido, quando aquecido, sempre dilata, aumentando de volume. No entanto, a água constitui uma exceção a essa regra, pois, ao ser aquecida de 0°C a 4°C , tem seu volume diminuído. Apenas para temperaturas acima de 4°C a água dilata normalmente ao ser aquecida.

Para melhor ilustrar, vejamos o gráfico abaixo, que representa a variação de volume de 1 g de água pura em função da sua temperatura.



É importante observar que a 4°C o volume da água é mínimo e, portanto, sua massa específica é máxima.

Esse tipo de dilatação anormal da água explica por que um lago congela apenas na superfície. Durante o resfriamento da água da superfície, até $4\text{ }^\circ\text{C}$ a densidade aumenta, e essa água desce, produzindo a subida da água mais quente do fundo (convecção). Isso ocorre até que toda a água do lago atinja $4\text{ }^\circ\text{C}$, pois, a partir daí, quando a temperatura da água da superfície diminui, seu volume aumenta, diminuindo a densidade. Em consequência, essa água mais fria não desce mais e acaba solidificando. Esse gelo formado na superfície isola o restante da água, fazendo com que a temperatura no fundo do lago se conserve acima de $0\text{ }^\circ\text{C}$.



Na ilustração (com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia) vemos o esquema de um lago congelado. A dilatação anormal da água faz com que apenas a superfície de um lago se solidifique. O gelo formado isola o restante da água (o gelo é péssimo condutor de calor), mantendo a temperatura no fundo do lago superior a $0\text{ }^\circ\text{C}$ e, desse modo, preservando a vida animal e vegetal lá existente.

QUESTÕES COMENTADAS



28 Um frasco de vidro, graduado em cm^3 a $0\text{ }^\circ\text{C}$, contém mercúrio até a marca de $100,0\text{ cm}^3$, quando ainda a $0\text{ }^\circ\text{C}$. Ao se aquecer o conjunto a $120\text{ }^\circ\text{C}$, o nível de mercúrio atinge a marca de $101,8\text{ cm}^3$. Determine o coeficiente de dilatação linear do vidro.

Dado: coeficiente de dilatação do mercúrio:

$$\gamma_{\text{Hg}} = 18 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

RESOLUÇÃO

A diferença de leitura corresponde à dilatação aparente do líquido, pois não podemos nos esquecer de que o frasco também dilata:

$$\Delta V_{\text{aparente}} = 101,8 - 100,0 = 1,8\text{ cm}^3$$

Usando a **Expressão da Dilatação Aparente dos Líquidos**:

$\Delta V_{\text{aparente}} = V_{0\text{L}} \cdot \gamma_{\text{aparente}} \cdot \Delta\theta$, temos:

$$1,8 = 100,0 \cdot \gamma_{\text{a}} \cdot 120 \Rightarrow \gamma_{\text{a}} = 15 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Porém:

$$\gamma_{\text{a}} = \gamma_{\text{r}} - \gamma_{\text{f}} \text{ e } \gamma_{\text{r}} = 3\alpha_{\text{f}}$$

Portanto:

$$15 \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-5} - 3\alpha_{\text{f}} \Rightarrow 3\alpha_{\text{f}} = 3 \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha_{\text{f}} = \alpha_{\text{vidro}} = 1 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Resposta: $1 \cdot 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

29 Um comerciante comprou 10 000 L de álcool em um dia em que a temperatura era de $12\text{ }^\circ\text{C}$. Para obter um lucro extra de 2%, resolveu esperar um dia em que a temperatura

fosse θ , para o engarrafamento. Sabendo que o coeficiente de dilatação volumétrica do álcool é de $1 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, determine essa temperatura θ .

RESOLUÇÃO

Considerando a dilatação percentual da substância, temos:

$$\Delta V = \frac{2 \cdot V_0}{100}$$

Aplicando-se a **Equação da Dilatação Volumétrica**, temos:

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta\theta$$

$$\frac{2V_0}{100} = V_0 \cdot 1 \cdot 10^{-3} (\theta - 12)$$

$$20 = \theta - 12 \Rightarrow \theta = 32\text{ }^\circ\text{C}$$

Resposta: $32\text{ }^\circ\text{C}$

30 A $4\text{ }^\circ\text{C}$, a massa específica da água vale $1,0\text{ g/cm}^3$. Se o coeficiente de dilatação volumétrica real da água vale $2,0 \cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, qual é sua massa específica, na temperatura de $84\text{ }^\circ\text{C}$?

RESOLUÇÃO

A **densidade absoluta** ou **massa específica** de uma substância varia com a temperatura, de acordo com a seguinte

$$\text{função: } \mu = \frac{\mu_0}{(1 + \gamma \cdot \Delta\theta)}$$

Substituindo os valores conhecidos, temos:

$$\mu = \frac{1,0}{1 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 80} \Rightarrow \mu \cong 0,98\text{ g/cm}^3$$

Resposta: Aproximadamente $0,98\text{ g/cm}^3$.



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

31. Ao abastecer o carro num posto de gasolina, você compra o combustível por volume e não por massa, isto é, você compra “tantos litros” e não “tantos quilogramas” de combustível. Assim, qual é o melhor horário do dia para abastecer o carro se você quer fazer economia?

32. Um posto recebeu 5 000 L de gasolina num dia muito frio, em que a temperatura era de 10 °C. No dia seguinte, a temperatura aumentou para 30 °C, situação que durou alguns dias, o suficiente para que a gasolina fosse totalmente vendida. Se o coeficiente de dilatação volumétrica da gasolina é igual a $11 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, determine o lucro do proprietário do posto, em litros.

33. Um recipiente de volume V está cheio de um líquido a 20 °C. Aquecendo-se o conjunto a 70 °C, transbordam 5,0 cm³ de líquido. Esses 5,0 cm³ correspondem:

- à dilatação real do líquido.
- à dilatação aparente do líquido.
- à soma da dilatação real com a dilatação aparente do líquido.
- à diferença entre a dilatação real e a dilatação aparente do líquido.
- a três vezes a dilatação real do líquido.

34. Num recipiente de porcelana, graduado corretamente em centímetros cúbicos a 30 °C, é colocado petróleo a 30 °C até a marca 500 cm³. Em seguida, eleva-se a temperatura do conjunto a 70 °C.

Dados: coeficiente de dilatação cúbica do petróleo = $9,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
coeficiente de dilatação linear da porcelana = $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Determine:

- o coeficiente de dilatação aparente do petróleo, quando medido no frasco de porcelana;
- a marca atingida pelo petróleo no frasco, após o aquecimento;
- a dilatação real sofrida pelo petróleo.

35. Dois recipientes de 1 000 cm³ cada um, a 0 °C, foram usados na determinação do coeficiente de dilatação aparente do mercúrio. Um dos recipientes era de cobre e o outro de alumínio. Após serem totalmente cheios de mercúrio, também a 0 °C, os conjuntos foram aquecidos até 100 °C. Determine:

- os coeficientes de dilatação aparente encontrados para o mercúrio em cada recipiente;
- o volume de mercúrio extravasado em cada caso.

Dados: coeficiente de dilatação cúbica do mercúrio = $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
coeficiente de dilatação linear do cobre = $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
coeficiente de dilatação linear do alumínio = $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

36. Um recipiente de vidro encontra-se completamente cheio de um líquido a 0 °C. Quando o conjunto é aquecido até 80 °C, o volume do líquido que transborda corresponde a 4% do volume que o líquido possuía a 0 °C. Sabendo que o coeficiente de dilatação volumétrica do vidro é de $27 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, determine o coeficiente de dilatação real do líquido.

37. Um recipiente de 200 cm³ de capacidade, feito de um material de coeficiente de dilatação volumétrica de $100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, contém 180 cm³ de um líquido de coeficiente de dilatação cúbica de $1 000 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A temperatura do sistema é de 20 °C.

Qual é a temperatura-limite de aquecimento do líquido sem que haja transbordamento?

38. A densidade absoluta de um material a 20 °C é 0,819 g/cm³, e seu coeficiente de dilatação volumétrica vale $5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A que temperatura devemos levar esse corpo para que sua densidade absoluta se torne igual a 0,780 g/cm³?

39. Uma substância tem massa específica de 0,78 g/cm³ a 25 °C e 0,65 g/cm³ a 425 °C. Qual é seu coeficiente de dilatação volumétrica?



DESCUBRA MAIS

1 O que faz a água apresentar uma dilatação diferente em relação às demais substâncias?

UNIDADE

2

ONDULATÓRIA

A **Ondulatória** é a parte da Física que estuda as oscilações, a produção e a propagação de ondas em geral, sejam elas de natureza mecânica ou eletromagnética. Trata também de todos os fenômenos determinados por movimentos ondulatórios.

Imagem computadorizada de ondas se propagando na superfície da água.

NESTA
UNIDADE

7

ONDAS

8

ACÚSTICA



ONDAS

1. INTRODUÇÃO

Ondas de vários tipos estão presentes em nossa vida. Quando vemos objetos, por exemplo, nossos órgãos visuais estão sendo sensibilizados por ondas luminosas. Devido às limitações do nosso sistema visual, outras ondas do mesmo tipo da luz não podem ser vistas – como as ondas utilizadas nas telecomunicações (ondas de rádio, ondas de televisão e micro-ondas para comunicação via satélite).



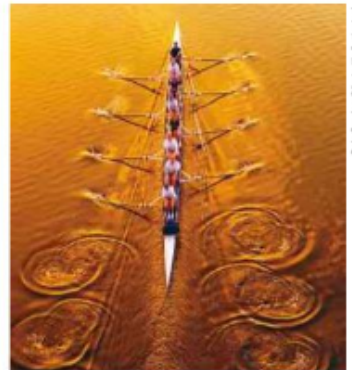
Esta imagem só pode ser vista devido à existência de ondas luminosas.

Podemos ouvir música, vozes e ruídos devido a ondas sonoras. Assim como acontece com as ondas luminosas, as limitações do nosso sistema auditivo não nos permitem captar ondas do mesmo tipo do som, como o ultrassom.



O som emitido por um violino é uma onda que se propaga pelo ar, acionando nosso sistema auditivo. Temos, assim, a sensação de audição.

Além da luz e do som, que são as ondas que mais sentimos no nosso dia a dia, podemos encontrar outras, como as ondas formadas na superfície da água quando nela cai alguma coisa, ou aquelas que aparecem em uma corda esticada quando sacudimos uma de suas extremidades.



SCIENCE/ALAMY

Ao tocar a superfície da água, cada remo produz ondas que se propagam, formando circunferências.

Todas essas ondas, e as que você estudará adiante, possuem algo em comum: são energias que se propagam através de um meio. **Atenção:** a energia se propaga, porém o meio não acompanha essa propagação, qualquer que seja a onda em estudo.

2. ONDAS MECÂNICAS E ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

De acordo com sua natureza (características físicas), as ondas classificam-se em dois grupos: **ondas mecânicas** e **ondas eletromagnéticas**.

Ondas mecânicas

São deformações que se propagam em meios elásticos. Esse fenômeno ocorre apenas em meios materiais, pois as ondas mecânicas necessitam de partículas para se propagar. Isso significa que elas nunca se propagam no vácuo.

A propagação de uma onda mecânica através de um meio material envolve o transporte de energia cinética e de energia potencial mecânica e depende de dois fatores fundamentais: a **inércia** e a **elasticidade** do meio.

Como acontece com qualquer onda, uma onda mecânica não transporta o meio onde se propaga. É apenas a energia que muda de local, passando de partícula para partícula do meio material.

Alguns exemplos de ondas mecânicas são as que se propagam em cordas ou molas esticadas, as que se propagam em superfícies de líquidos e os sons.

Observe que em todos esses casos a existência de um meio material é fator preponderante para a propagação das ondas mecânicas.

Onda mecânica é a propagação de energia através de partículas de um meio material, sem que essas partículas sejam transportadas. Uma onda mecânica nunca se propaga no vácuo.

Em alto-mar, as ondas não transportam matéria, são apenas energia se propagando. Nas proximidades da praia, porém, em razão da diminuição brusca da profundidade, as ondas “quebram”, provocando o movimento de toda a massa de água e formando correntezas que podem arrastar corpos que lá se encontram. Essas “ondas quebradas” deixam de se comportar como ondas.



Onda se “quebrando” nas proximidades da praia.

O alto-falante emite ondas mecânicas

O alto-falante é um dispositivo utilizado para produzir ondas sonoras a partir de impulsos elétricos. Os primeiros alto-falantes surgiram na década de 1920, nos Estados Unidos, acompanhando os primeiros fonógrafos elétricos.

Através de um cone de papelão (circular ou elíptico) que avança e recua, os alto-falantes emitem ondas **mecânicas longitudinais**.

Os sons agudos (altas frequências), acima de 4000 Hz, são emitidos por unidades pequenas (*tweeters*), de 3 cm a 5 cm de diâmetro. Os sons graves (baixa frequência), abaixo de 500 Hz, são emitidos pelas unidades (*woofers*) de 25 cm de diâmetro. Já os sons intermediários, de 500 Hz a 4000 Hz, são emitidos por unidades de 15 cm de diâmetro. No entanto, podemos encontrar alto-falantes que emitem tanto sons médios como graves.

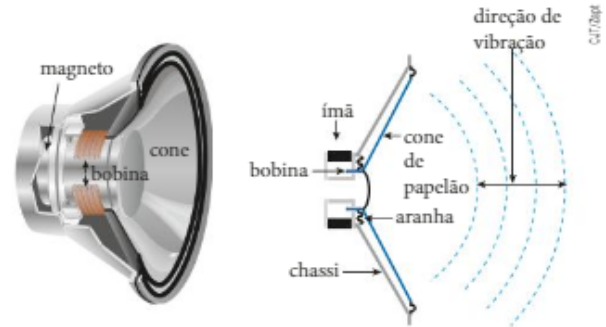


Ilustração esquemática de um alto-falante.

Ondas eletromagnéticas

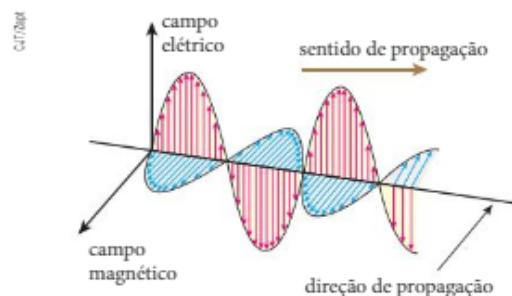
As ondas eletromagnéticas são formadas por dois campos variáveis, um elétrico e outro magnético, que se propagam. Essa propagação pode ocorrer no vácuo e em determinados meios materiais.

Como exemplos de ondas eletromagnéticas podemos citar as ondas de rádio, dentre elas as ondas de AM (Amplitude Modulada) e as de FM (Frequência Modulada), as ondas de TV, as ondas luminosas (luz), as micro-ondas, os raios X e γ , entre outras. Essas denominações são dadas de acordo com a principal fonte geradora das ondas e se diferenciam em especial pelas faixas de frequência.

Todas as ondas eletromagnéticas têm em comum sua velocidade de propagação no vácuo: aproximadamente 300 000 km/s. A velocidade de propagação depende do material do meio e da frequência da onda. Em meios materiais transparentes a essas ondas, elas se propagam a uma velocidade menor que 300 000 km/s.

Ondas eletromagnéticas constituem um conjunto de dois campos, um elétrico e outro magnético, que se propagam no vácuo com velocidade aproximada de 300 000 km/s. Em meios materiais, quando ocorre propagação, a velocidade é menor que 300 000 km/s.

Observe, na representação esquemática a seguir, que os campos citados são perpendiculares entre si e, ainda, perpendiculares à direção de propagação da onda.



Raios α , β , γ , X e catódicos

Os raios α são partículas formadas por 2 prótons e 2 nêutrons, núcleos de um dos isótopos do hélio. Os raios β e os raios catódicos são compostos de elétrons. Assim, os raios α , β e catódicos não são ondas, e sim partículas dotadas de carga elétrica, podendo ser desviadas por campos magnéticos.

Dentre os raios α , β , γ , X e catódicos, apenas os raios γ e X são ondas eletromagnéticas.

Os raios γ são obtidos por processos nucleares e, sendo fatais para microrganismos, têm aplicação em esterilização de instrumentos cirúrgicos. Cereais que precisam ficar muito tempo armazenados também costumam ser expostos a raios γ , para que fiquem livres de fungos e bactérias que produzem a deterioração dos grãos. Esses raios ainda são empregados para destruir tumores cancerígenos.

Na Medicina, os raios X são largamente usados para a obtenção de radiografias, e na indústria, dentre outras aplicações, são utilizados para detectar falhas em peças metálicas que constituirão uma máquina. Minúsculos defeitos e microfissuras podem ser descobertos com o uso dos raios X.



Raio X panorâmico de arcada dentária, muito utilizado por especialistas em ortodontia. Os raios X são ondas eletromagnéticas que podem se propagar através dos tecidos "moles" do corpo humano, como músculos, tendões e pele; porém, ao atravessarem os ossos, perdem mais energia. Uma película sensível a essas radiações é sensibilizada quando atingida. Assim, podemos "tirar uma fotografia" de partes de nosso corpo e observar sua estrutura óssea.

Raio laser

A palavra *laser* é formada pelas letras iniciais das palavras que formam a expressão inglesa *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação). A invenção do *laser* data de 1960; no entanto, já em 1954 havia sido inventado o *maser*, no qual se usava não a luz, mas micro-ondas (*microwaves*).



Na fotografia observamos um profissional utilizando o *laser* para "apagar" uma tatuagem no braço de uma pessoa. Esse processo consiste em fazer incidir um feixe de radiação *laser* de luz especial que fraciona as partículas dos pigmentos em parcelas menores, que são absorvidas pelo organismo, desaparecendo.

A principal característica de um *laser* é que, pela estimulação de átomos de uma substância particular, se obtém um estreito feixe de luz monocromática, colimada e coerente, isto é, luz de uma mesma cor, em feixe concentrado e em fase. Nesse feixe, todas as partículas de luz (fótons) possuem as mesmas propriedades.

Ondas de rádio AM e FM e ondas de TV

Em 1887, o físico alemão Heinrich Rudolf **Hertz** descobriu os princípios básicos da emissão e da recepção de ondas de rádio. No início, captava-se no receptor apenas um sinal contínuo. Somente depois de 1904, com o desenvolvimento da válvula termoionica de Fleming, é que foi possível o início da transmissão via ondas eletromagnéticas. Para que essas ondas fossem portadoras de mensagens, elas deviam ser **moduladas**, isto é, deviam sofrer variações em sua amplitude (AM) ou em sua frequência (FM).

As ondas de **amplitude modulada** (AM) são divididas em três faixas, de acordo com seu comprimento de onda: **ondas curtas** (OC), **ondas médias** (OM) e **ondas longas** (OL). Por causa do longo alcance dessas ondas, elas são utilizadas por emissoras comerciais, nas comunicações entre aviões, por radioamadores etc.

As ondas de **frequência modulada** (FM), embora tenham um alcance menor, podendo ser captadas apenas em um raio de pouco mais de 100 km da fonte emissora, apresentam melhor qualidade. Dessa forma, as ondas de FM têm uma aplicação mais local, para pequenas distâncias. É por isso que, estando em São Paulo, você não pode captar no rádio emissoras de FM do Rio de Janeiro, enquanto algumas emissoras de AM podem ser captadas.

Em um aparelho de televisão, uma faixa de ondas de FM é utilizada para levar sinais que se transformam em imagens e sons. Para cada emissora há um conjunto de duas frequências próximas, uma transportando os sinais de imagem e a outra, os sinais de som. Alguns receptores de rádio têm sua banda de frequências ampliada, podendo "captar o som" de canais de TV.

A banda de frequências reservadas às emissoras de TV é dividida em duas faixas: a de VHF (*very high frequencies* – frequências muito altas) e a de UHF (*ultra high frequencies* – frequências ultra-altas).

Por meio de antenas como essa, ondas de rádio são enviadas para aparelhos receptores.



THIRASSO/OLYMPIA IMAGES

3. ONDAS LONGITUDINAIS, ONDAS TRANSVERSAIS E ONDAS MISTAS

Em uma propagação ondulatória, as vibrações podem ocorrer em direção idêntica à da propagação ou em direção perpendicular à dela. Em função disso, as ondas são classificadas em **longitudinais** e **transversais**. Em alguns casos, as vibrações ocorrem nas duas direções, tratando-se, então, de ondas **mistas**.

Ondas longitudinais

São ondas mecânicas que produzem perturbações nas partículas do meio material na mesma direção em que se propagam.

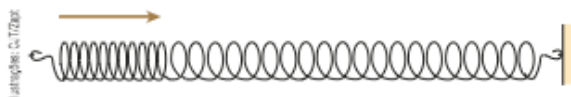


Como exemplo, considere uma mola elástica disposta horizontalmente:



Se fizermos uma rápida compressão na extremidade esquerda da mola, a compressão se propagará para a direita.

Note que as partículas da mola oscilam horizontalmente, na mesma direção em que a onda se propaga.



Os sons, quando se propagam em meios fluidos (líquidos, gases e vapores), são ondas longitudinais.

Ondas transversais

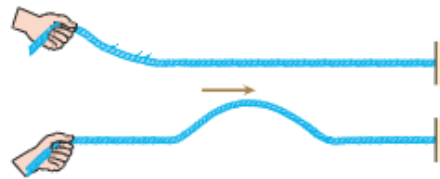
São ondas em que as vibrações ocorrem perpendicularmente à direção de propagação.



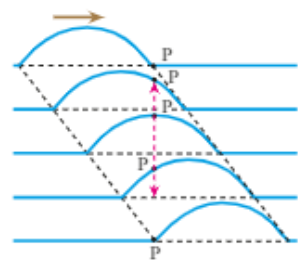
Como exemplo, considere uma corda esticada disposta horizontalmente:



Se sacudirmos a extremidade esquerda da corda, surge um pulso que se propaga ao longo dela, dirigindo-se para a direita.



Esse pulso provoca um movimento vertical de sobe e desce nos pontos da corda atingidos. O movimento de sobe e desce ocorre perpendicularmente à direção de propagação do pulso, como podemos observar na ilustração.



As ondas eletromagnéticas são constituídas de dois campos variáveis (um elétrico e outro magnético), perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação das ondas. Dizemos, então, que elas são **transversais**. As perturbações eletromagnéticas que atingem os pontos de um meio, seja ele vácuo ou não, são sempre **perturbações transversais**.

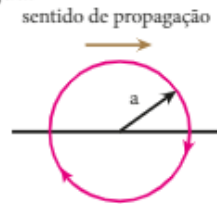
Ondas mistas

São ondas mecânicas constituídas de vibrações transversais e longitudinais simultâneas.

Quando uma partícula de um meio material é atingida por uma perturbação mista, ela oscila simultaneamente na direção de propagação e na direção perpendicular à de propagação.

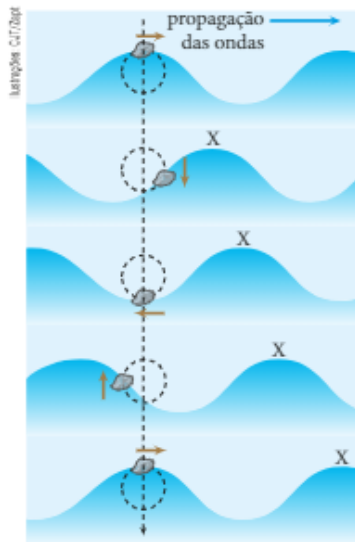


Como exemplo, podemos citar as ondas em superfícies de líquidos, que nos mares e lagos geralmente são produzidas pela ação dos ventos sobre a superfície livre da água.



Representação esquemática da trajetória de uma partícula de água durante a passagem da onda.

Se um corpo está flutuando na superfície da água em alto-mar, com a passagem da onda ele executará um movimento misto. Veja, na sequência a seguir, como esse movimento pode ser representado:



Os sons, quando se propagam em meios sólidos, também são exemplos de perturbações mistas.

4. FRENTE DE ONDA E RAIOS DE ONDA

Em uma propagação, podemos observar três tipos distintos de ondas:

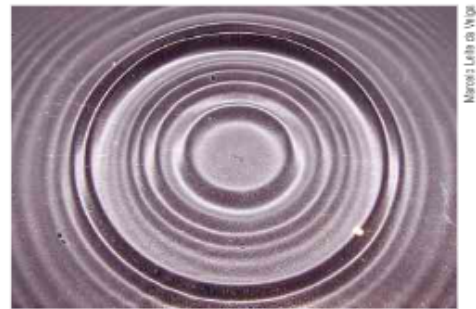
- unidimensionais:** propagam-se em uma única dimensão. Por exemplo, ondas em cordas;
- bidimensionais:** propagam-se em duas dimensões, isto é, num plano. Por exemplo, ondas em superfície de líquidos;
- tridimensionais:** propagam-se em três dimensões, isto é, no espaço. Por exemplo, ondas luminosas e ondas sonoras no ar.

No estudo das ondas bidimensionais e tridimensionais, são úteis os conceitos de frente de onda e de raio de onda.

Frente de onda é a fronteira entre a região já atingida pela onda e a região ainda não atingida.

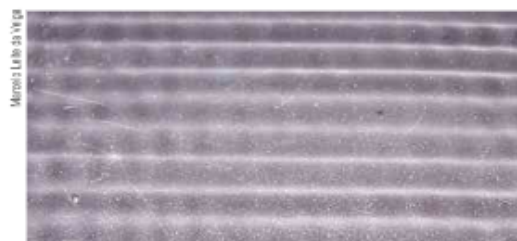
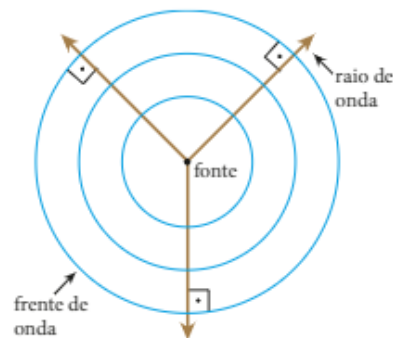
Raio de onda é uma linha orientada que tem origem na fonte de ondas e é perpendicular às frentes de onda. Os raios de onda indicam a direção e o sentido de propagação das ondas num meio.

Entre as ondas bidimensionais que se propagam na superfície de líquidos, destacam-se as ondas circulares, cujas frentes de onda são circunferências, e as ondas retas, cujas frentes são segmentos de reta.



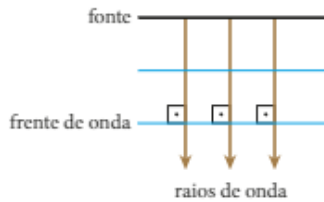
Ondas circulares geradas na superfície da água.

Veja uma representação esquemática de ondas circulares que se propagam na superfície de um líquido:



Ondas retas geradas na superfície da água.

Veja uma representação esquemática de ondas retas que se propagam na superfície de um líquido:



Entre as ondas tridimensionais (som e luz) que se propagam no espaço, destacam-se aquelas cujas frentes de onda são esféricas ou planas.

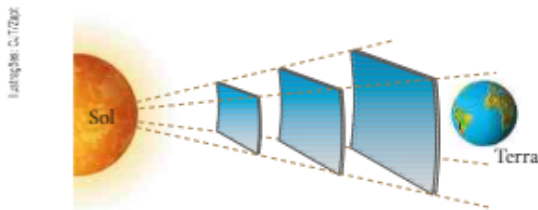


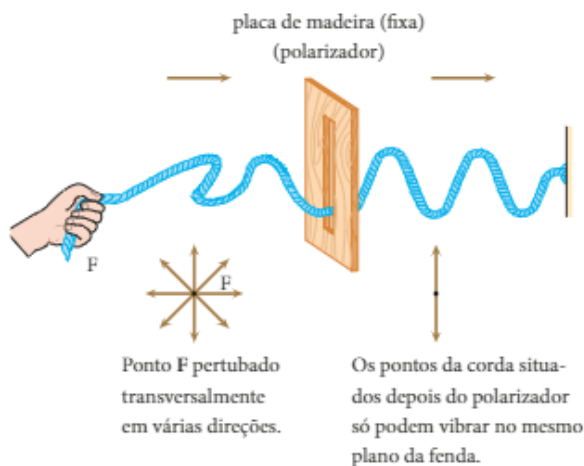
Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

A luz emitida pelo Sol avança pelo espaço apresentando frentes de onda esféricas.

Onda polarizada

A polarização de uma onda transversal ocorre quando ela é “filtrada”, permitindo apenas a passagem das vibrações que ocorrem na mesma direção que a previamente estabelecida pelo polarizador.

Observe que é possível gerar vibrações transversais em todas as direções, mas só vão passar pela placa de madeira (polarizada) aquelas que ocorrem na direção estabelecida pela fenda.



As ondas que se propagam após a fenda são denominadas **ondas polarizadas**.

Apenas ondas transversais podem ser polarizadas. A luz, que é uma onda transversal, pode ser polarizada utilizando-se uma lâmina especial (polarizador). Ondas longitudinais, como o som nos fluidos, não podem ser polarizadas.

Filmes em 3D são assistidos através de lentes polarizadoras

Os primeiros efeitos em 3D eram observados com óculos que tinham, no lugar das lentes, papel celofane vermelho e azul (*red blue*) ou vermelho e verde (*red green*). Esses filtros eram usados para que o olho coberto pelo vermelho não observasse a parte da fotografia ou filme feita em vermelho. O outro olho deixava de ver a parte em azul ou verde, dependendo do filtro.

Os atuais filmes, do tipo iMax, por exemplo, utilizam óculos com lentes polarizadoras, separando para cada olho um plano de vibração. Assim, pode-se produzir o efeito 3D permitindo que cada olho observe apenas uma das duas imagens projetadas na tela.



Modelo de óculos com lentes polarizadoras utilizado em filmes do tipo iMax.

5. MOVIMENTO PERIÓDICO E MOVIMENTO OSCILATÓRIO

Vamos ver, generalizadamente, os significados de um movimento **periódico** e de um movimento **oscilatório**.

Movimento periódico

Um movimento é **periódico** quando a posição, a velocidade e a aceleração do móvel (estado cinemático) repetem-se em intervalos de tempo iguais. O movimento elíptico de translação de um planeta em relação ao Sol é um exemplo de movimento periódico.

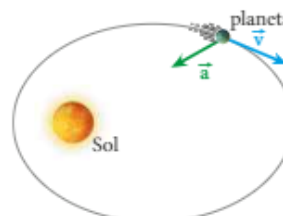


Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

A cada volta que o planeta completa a partir da posição indicada na figura, sua posição, sua velocidade vetorial (\vec{v}) e sua aceleração vetorial (\vec{a}) repetem-se.

Também são exemplos de movimentos periódicos o movimento de rotação da Terra e os realizados pelos ponteiros de um relógio.

O intervalo de tempo necessário para que ocorra uma repetição do movimento é denominado **período** do movimento (T). Assim, se ocorrerem n repetições do movimento num intervalo de tempo Δt , seu período será:

$$T = \frac{\Delta t}{n} \quad (\text{I})$$

O período pode ser medido em qualquer unidade de tempo. No SI, sua unidade é o **segundo** (s).

Outra grandeza a ser destacada num movimento periódico é sua **frequência** (f), que corresponde ao número de vezes que esse movimento se repete na unidade de tempo. Assim, ocorrendo n repetições do movimento no intervalo de tempo Δt , sua frequência será:

$$f = \frac{n}{\Delta t} \quad (\text{II})$$

Comparando as expressões (I) e (II), temos:

$$f = \frac{1}{T}$$

Essa relação de proporcionalidade inversa entre frequência e período já era esperada. De fato, quanto maior for o intervalo de tempo decorrido até acontecer uma repetição do movimento (maior período), menor será a quantidade de repetições ocorridas em uma unidade de tempo (menor frequência).

A unidade de frequência, no SI, é o **hertz** (Hz). A frequência de 1 Hz significa que o movimento repete-se uma vez por segundo.

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ hertz} = 1 \text{ repetição/s}$$

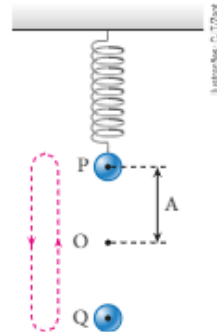
Movimento oscilatório

Movimento **oscilatório** (ou vibratório) é o movimento em que algo realiza sucessivos vaivéns. Cada vaivém é uma oscilação (ou ciclo).



As cordas do violão são um exemplo de sistema mecânico que realiza movimento oscilatório.

Certos movimentos oscilatórios e periódicos, descritos por funções horárias harmônicas (funções seno ou cosseno), são denominados **movimentos harmônicos simples** (MHS). É o caso de um corpo oscilando suspenso a uma mola ideal, desprezando-se a influência do ar:



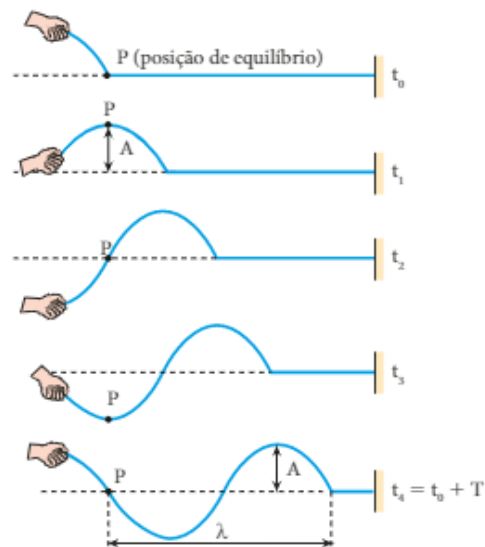
Esfera realizando um MHS, presa a uma mola. O ponto O é o ponto de equilíbrio do movimento. O máximo afastamento de O (OP ou OQ) é a amplitude do MHS.

6. GRANDEZAS FÍSICAS ASSOCIADAS ÀS ONDAS

De acordo com a observação e o estudo de fenômenos ondulatórios, percebemos a necessidade de definir várias grandezas físicas associadas às ondas.

As principais grandezas são: **amplitude** (A), **período** (T), **frequência** (f) e **comprimento de onda** (λ). Utilizando um sistema que nos permita ver as ondas, podemos observar o significado de cada grandeza.

Considere um conjunto de ondas periódicas geradas continuamente (trem de ondas) numa corda, disposta horizontalmente, por um movimento harmônico simples (MHS), executado verticalmente na extremidade livre dessa corda.



Supondo que não haja dissipação de energia na propagação, observamos que essas ondas fazem cada ponto da corda oscilar verticalmente, repetindo o movimento harmônico simples original. O ponto **P**, por exemplo, oscila com a mesma amplitude **A** do MHS que gerou as ondas.

O valor de **A** é denominado **amplitude da onda**. Ele permanece constante ao longo da corda quando a propagação é conservativa (não há dissipação de energia) e diminui ao longo da corda quando a propagação é dissipativa (caso real, em que parte da energia da onda se dissipa). Se duas ondas diferem apenas na amplitude e propagam-se no mesmo meio, a mais intensa (mais forte) é aquela que tem maior amplitude.

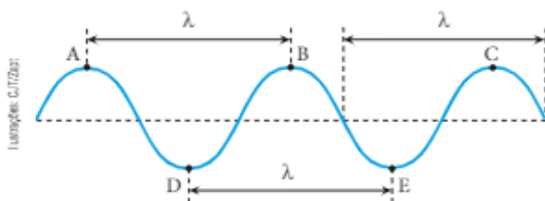
Note que de t_0 a t_4 o ponto **P** completa uma oscilação (um ciclo). Assim, o intervalo de tempo de t_0 a t_4 é o período do MHS do ponto **P**, também denominado **período da onda (T)**.

O número de oscilações executadas pelo ponto **P** na unidade de tempo é denominado **frequência da onda (f)**. Convém notar que a frequência de uma onda é sempre igual à frequência da fonte que a originou e se mantém constante durante toda a existência dessa onda.

Como vimos, a unidade de frequência no SI é o **hertz (Hz)**, valendo a relação:

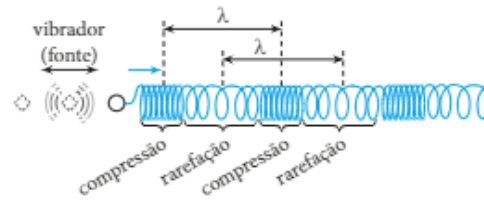
$$f = \frac{1}{T}$$

É importante observar que, durante um período **T** da onda – correspondente a uma oscilação completa do ponto **P** –, ela avança uma determinada distância, a que chamamos de **comprimento de onda**. Na figura, essa distância é indicada pela letra grega λ (lambda).



Os pontos **A**, **B** e **C** são denominados **cristas** da onda, enquanto os pontos **D** e **E** são chamados **vales** ou **depressões** da onda. Observe que a distância entre duas cristas consecutivas ou entre dois vales consecutivos também é igual a λ .

Nas ondas longitudinais, o comprimento de onda é a distância entre os centros de duas compressões ou de duas rarefações sucessivas.



Executando movimentos periódicos de vaivém na extremidade de uma mola, observamos ondas periódicas constituídas de compressões e rarefações.

Nas ondas mistas, o comprimento de onda pode ser obtido pela distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos.

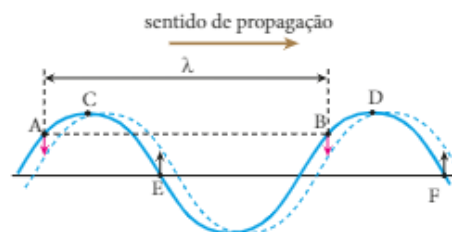


As cristas provocam, nas partículas do líquido, deslocamentos para cima e **para a frente**, enquanto os vales provocam deslocamentos para baixo e **para trás**.

Convém destacar que os conceitos de período, frequência, amplitude e comprimento de onda aplicam-se a qualquer onda periódica, não se restringindo aos exemplos citados.

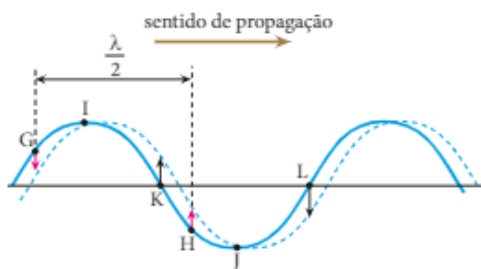
Concordância e oposição de fase

O comprimento de onda também pode ser conceituado como a distância entre dois pontos consecutivos que vibram em **concordância de fase**, isto é, que apresentam a mesma elongação e se movem no mesmo sentido, em qualquer instante.



Os pontos **A** e **B** apresentam a mesma elongação e se movem no mesmo sentido (ambos estão descendo). Por isso, dizemos que os pontos **A** e **B** estão em concordância de fase, sendo λ a distância entre eles. Também estão em concordância de fase os pontos **C** e **D** e os pontos **E** e **F**. Portanto, $CD = EF = AB = \lambda$.

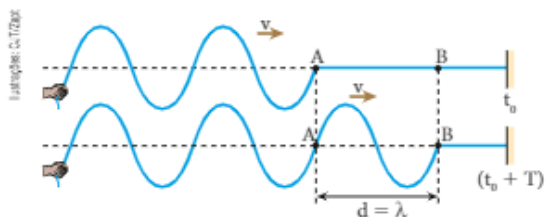
Dizemos que dois pontos vibram em oposição de fase quando apresentam elongações opostas e se movem em sentidos também opostos.



Os pontos G e H vibram em oposição de fase, o mesmo ocorrendo com I e J e com K e L. A “distância” entre dois pontos consecutivos em oposição de fase é $\frac{\lambda}{2}$ (ver figura).

7. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA PERIÓDICA

Quando uma onda se propaga através de um meio, ela percorre uma distância d igual ao seu comprimento de onda ($d = \lambda$), num intervalo de tempo igual a um período ($\Delta t = T$).



Num meio homogêneo, a velocidade de propagação (v) de uma onda é constante, seja ela mecânica, seja ela eletromagnética, valendo a relação:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T}$$

Como $f = \frac{1}{T}$, temos: $v = \lambda f$

Essa relação é fundamental e se aplica à propagação de todas as ondas.

NOTA

Para simplificar a linguagem, toda vez que nos referirmos ao módulo da velocidade da onda, usaremos apenas **velocidade da onda**.

8.0 SOM

O som é constituído de um conjunto de ondas mecânicas que podem ser percebidas pelo sistema auditivo dos seres humanos e de muitos outros animais.

A velocidade de propagação das ondas sonoras depende das condições do meio em que se propagam. No ar, a 15 °C, a velocidade do som é de aproximadamente 340 m/s; na água, de 1 500 m/s; e nos sólidos, pode variar de 3 000 m/s a 6 000 m/s, dependendo da rigidez desse meio.

O sistema auditivo humano é sensível às ondas sonoras que tenham frequência entre 20 Hz e 20 000 Hz, aproximadamente. Esse intervalo varia de pessoa para pessoa e de acordo com a idade de cada um.

Se a frequência for menor que 20 Hz, essa onda será denominada **infrassom**. Se a frequência da onda for maior que 20 000 Hz, ela será chamada de **ultrassom**. Ultrassons e infrassons não são ouvidos por seres humanos. Porém, alguns ultrassons podem ser ouvidos por animais, como o cachorro, o golfinho ou o morcego.



O uso de ultrassom é muito comum na Medicina. Como exemplo, podemos citar as primeiras “fotografias” de um bebê. Nesse caso, ondas sonoras com frequência acima de 20 000 Hz são enviadas através do abdômen da gestante. Essas ondas refletem no feto e originam sinais que, captados por um dispositivo apropriado, produzem imagens em um monitor de vídeo. Os pais recebem o resultado dos exames com as primeiras “fotografias” do bebê.

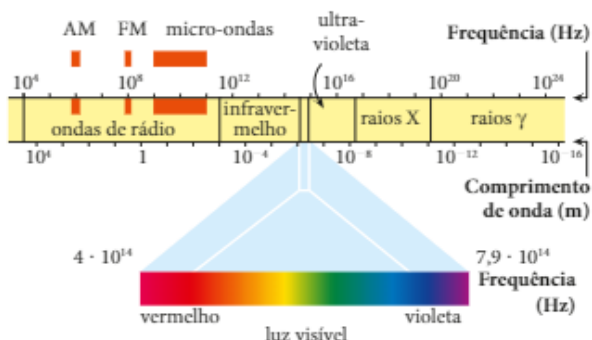


Fotografia (colorida artificialmente) mostrando a ultrassonografia de um feto de três meses e meio.

9. A LUZ

A luz, que é uma onda eletromagnética, só pode sensibilizar nosso sistema visual se tiver sua frequência compreendida entre $4 \cdot 10^{14}$ Hz e $8 \cdot 10^{14}$ Hz, aproximadamente. Nessa faixa, na ordem crescente de frequências, encontramos as cores vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta, que formam as sete cores principais que observamos no arco-íris.

As frequências logo abaixo dos $4 \cdot 10^{14}$ Hz são denominadas **infravermelhas** e as logo acima dos $8 \cdot 10^{14}$ Hz, **ultravioleta**.



Esquema do espectro eletromagnético, com a localização aproximada das faixas de frequência das principais ondas eletromagnéticas.

A diferença entre as ondas eletromagnéticas que podemos “enxergar” (luz visível) e as ondas de rádio, por exemplo, está principalmente na frequência. A propagação de todas as ondas eletromagnéticas se faz no vácuo a uma velocidade próxima de 300 000 km/s. Em meios materiais, essa propagação é feita a velocidades menores, e os valores dependem do meio transparente e da frequência da onda.

O controle remoto de um aparelho eletrônico utiliza ondas eletromagnéticas (raios infravermelhos) para enviar sinais que provocam alterações no funcionamento do aparelho: aumentar ou diminuir a intensidade do som e mudar de canal (em um aparelho de TV), entre outras.

10. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS TRANSVERSAIS EM CORDAS TENSAS

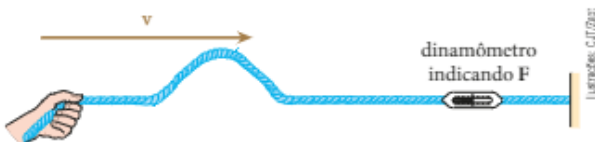
As cordas tensas (esticadas) constituem ótimos meios para observação da propagação de ondas mecânicas transversais.

Considerando uma corda de massa m e comprimento L , temos que a densidade linear δ (delta) dessa corda é a razão entre sua massa m e seu comprimento L .

$$\delta = \frac{m}{L} \quad \text{Unidade no SI: kg/m}$$

A grandeza δ fornece a massa da corda por unidade de comprimento.

Podemos constatar que, na propagação de um pulso transversal ou de uma onda periódica transversal, a velocidade v depende apenas de dois fatores: densidade linear (δ) da corda e intensidade da força tensora (F) a que ela está submetida.



Assim, a expressão da velocidade de uma onda transversal, em corda tracionada, é dada por:

$$v = k F^x \delta^y$$

em que k é a constante que não possui dimensão física (adimensional).

É possível demonstrar que a equação da velocidade fica formatada da seguinte maneira:

$$v = k F^{\frac{1}{2}} \delta^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow v = k \left(\frac{F}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow v = k \sqrt{\frac{F}{\delta}}$$

Realizando experimentos em laboratório, onde os valores numéricos são obtidos, podemos constatar que o valor da constante adimensional k é igual à unidade ($k = 1$). Assim, obtemos:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}}$$

Essa expressão é também chamada **fórmula de Taylor**.

Como as cordas em geral são cilíndricas, podemos escrever essa relação de outra maneira (veja após a ilustração).



A corda tem volume dado por $V = \pi r^2 L$ e densidade absoluta (volumétrica) dada por $\mu = \frac{m}{V}$.

$$\text{Assim: } \mu = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi r^2 L} \Rightarrow m = \mu \pi r^2 L$$

Entretanto, a densidade linear δ é dada por:

$$\delta = \frac{m}{L} \Rightarrow \delta = \frac{\mu \pi r^2 L}{L} \Rightarrow \delta = \mu \pi r^2$$

Substituindo esse resultado na relação do cálculo da velocidade das ondas em cordas, temos:

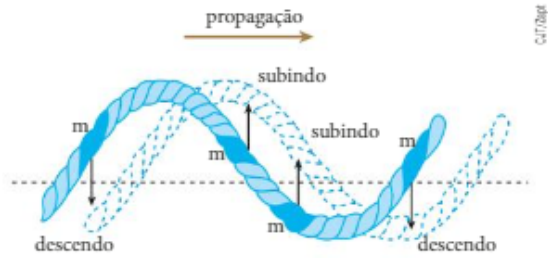
$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}} = \sqrt{\frac{F}{\mu \pi r^2}}. \text{ Portanto: } v = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{F}{\mu \pi}}$$

É importante observar que em cordas tensas também vale a relação vista na seção 7 ($v = \lambda f$).

Energia mecânica na propagação da onda

A propagação ondulatória sempre envolve uma transmissão de energia. No caso das ondas na corda, essa energia, que é mecânica, apresenta-se parte sob a forma de energia cinética e parte sob a forma de energia potencial elástica.

A energia cinética está na massa da corda, que naquele instante está subindo ou descendo. A energia potencial está na parte da corda que apresenta deformação, pois essa corda é um corpo elástico.



Um pequeno pedaço de massa m da corda, em cada instante, está subindo ou descendo. Assim, esse pedaço possui energia cinética (exceto quando por ele passa uma crista ou um vale).

FAÇA VOCÊ MESMO

Verificando a propagação do som através de um barbante

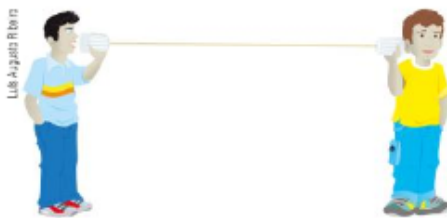
O som, sendo uma onda mecânica, necessita de um meio material para sua propagação. Você pode realizar uma atividade experimental bastante simples que utiliza materiais de fácil acesso e resulta em um efeito de que todos os participantes vão gostar.

Material necessário

- 2 copos plásticos ou de papelão resistente;
- 1 barbante longo, de 5 a 10 metros;
- 1 prego, compatível com o diâmetro do barbante, que será utilizado para furar a base dos copos.

Procedimento

- Com o prego, faça um furo no fundo de cada copo. Em seguida, passe uma das extremidades do barbante pelo furo de um dos copos, de fora para dentro, e dê um nó grande o suficiente para que o barbante não escape pelo orifício. Repita esse procedimento no outro copo.
- Solicite que um colega converse com você por meio do dispositivo fabricado, falando no interior de um dos copos, enquanto você mantém a boca do outro copo colada à orelha.



Atenção: o barbante deve ser mantido esticado durante a conversa. Por isso os copos deverão ser resistentes; caso contrário, ao esticar o barbante, o nó romperá o fundo do copo e escapará.

Analisando o experimento

1. Por que o barbante deve ser mantido esticado? Quanto mais esticado, será melhor ou pior para o funcionamento do dispositivo?
2. O diâmetro do barbante é fundamental para que ocorra a comunicação? O que muda se usarmos barbantes de materiais e espessuras diferentes?
3. A rapidez da comunicação está relacionada com a velocidade de propagação do som. Que procedimento deve ser realizado para aumentar a velocidade de propagação do som no barbante?

4. Se acendermos uma pequena lanterna dentro de um dos copos, a luz se propagará através do barbante, atingindo o outro copo? Explique.
5. Suponha que você e seu colega estejam em uma sala onde existe vácuo. Se você tentar falar, o som não se propagará e seu colega não escutará nada. No entanto, usando o dispositivo fabricado, você conseguirá ser ouvido por seu colega? Explique, levantando todas as hipóteses possíveis.

QUESTÕES COMENTADAS



1 Por que é impossível ouvirmos, aqui na Terra, uma explosão solar?

RESOLUÇÃO

As ondas sonoras, sendo ondas mecânicas, precisam de um suporte material para se propagarem. As ondas sonoras não se propagam no vácuo que separa o Sol da Terra.

Resposta: Ver resolução.

2 Analise as seguintes afirmativas:

- I. O som é onda mecânica.
- II. A luz é onda eletromagnética.
- III. A luz pode ser onda mecânica.
- IV. O som pode propagar-se no vácuo.
- V. A luz pode propagar-se no vácuo.

São verdadeiras:

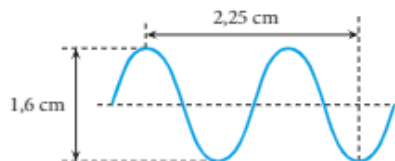
- a) I, II e III.
- b) I, III e IV.
- c) II, III e V.
- d) I, II e V.
- e) todas as afirmativas.

RESOLUÇÃO

- I. **Verdadeira.** O som só se propaga em meios materiais e não no vácuo. O som é uma onda mecânica.
- II. **Verdadeira.** A luz pode se propagar em certos meios materiais e no vácuo. A luz é uma onda eletromagnética.
- III. **Falsa.** A luz é sempre uma onda eletromagnética, e nunca uma onda mecânica.
- IV. **Falsa.** O som necessita de um suporte material em sua propagação. O som nunca se propaga no vácuo.
- V. **Verdadeira.** A luz, sendo onda eletromagnética, pode se propagar no vácuo.

Resposta: Alternativa *d*.

3 A figura representa um trecho de uma onda que se propaga a uma velocidade de 300 m/s.



Para essa onda, determine:

- a) a amplitude;
- b) o comprimento de onda;
- c) a frequência;
- d) o período.

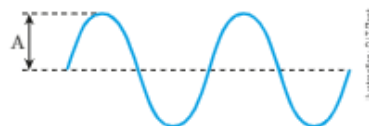
RESOLUÇÃO

a) A amplitude (*A*) é a distância entre o nível de referência (linha horizontal tracejada) e a crista da onda.

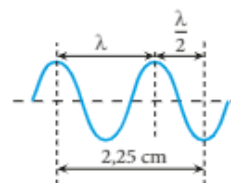
Assim:

$$A = \frac{1,6 \text{ cm}}{2}$$

$$A = 0,80 \text{ cm}$$



b) O comprimento de onda (λ) é a distância entre duas cristas (ou dois vales) consecutivos.



$$\text{Assim: } \lambda + \frac{\lambda}{2} = 2,25 \Rightarrow 1,5 \lambda = 2,25$$

$$\text{Logo: } \lambda = 1,5 \text{ cm} \text{ ou } \lambda = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

c) Usando a **Equação da Propagação das Ondas**, temos:

$$v = \lambda f$$

$$300 = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot f \Rightarrow f = 20\,000 \text{ Hz} = 20 \text{ kHz}$$

d) O período de uma onda é o inverso da sua frequência.

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{20\,000} \text{ s} \Rightarrow T = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Respostas: a) 0,80 cm; b) 1,5 cm; c) 20 000 Hz = 20 kHz; d) $5,0 \cdot 10^{-5}$ s

4 Qual é a frequência de uma onda luminosa, monocromática e de comprimento de onda igual a $6 \cdot 10^3 \text{ \AA}$, quando ela se propaga no ar?

Dado: velocidade da luz no ar = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

RESOLUÇÃO

A relação entre a frequência (f), o comprimento de onda (λ) e a velocidade (v) de uma onda, quando ela se propaga num determinado meio, é: $v = \lambda f$

Assim, sendo $v = 3 \cdot 10^8$ m/s; $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m

e $\lambda = 6 \cdot 10^3 \text{ \AA} = 6 \cdot 10^{-7}$ m, temos:

$$3 \cdot 10^8 = 6 \cdot 10^{-7} \cdot f \Rightarrow f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Resposta: $5 \cdot 10^{14}$ Hz

5 Uma corda homogênea de 2,5 m de comprimento e 2,0 kg de massa está submetida a uma força tensora de 80 N. Suas extremidades são fixadas e produz-se na corda uma perturbação. Determine:

- a densidade linear da corda;
- a velocidade de propagação da onda na corda.

RESOLUÇÃO

a) A densidade linear de uma corda homogênea é dada pela relação: $\delta = \frac{m}{L}$

Como $m = 2,0$ kg e $L = 2,5$ m, temos:

$$\delta = \frac{2,0 \text{ kg}}{2,5 \text{ m}} \Rightarrow \delta = 0,80 \text{ kg/m}$$

b) A velocidade de propagação da onda na corda tensa é determinada por:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{80}{0,8}}$$

Logo: $v = 10$ m/s

Respostas: a) 0,80 kg/m; b) 10 m/s

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

6. Quando uma onda se propaga de um local para outro, necessariamente ocorre:

- transporte de energia.
- transformação de energia.
- produção de energia.
- movimento de matéria.
- transporte de matéria e energia.

7. No vácuo, todas as ondas eletromagnéticas têm:

- mesma frequência.
- mesma amplitude.
- mesmo comprimento de onda.
- mesma quantidade de energia.
- mesma velocidade de propagação.

8. Das ondas citadas a seguir, qual é longitudinal?

- Ondas em cordas tensas.
- Ondas em superfície da água.
- Ondas luminosas.
- Ondas eletromagnéticas.
- Ondas sonoras propagando-se no ar.

9. Analise as afirmativas:

- Toda onda mecânica é sonora.
- As ondas de rádio, na faixa de FM (Frequência Modulada), são transversais.
- Abalos sísmicos são ondas mecânicas.
- O som é sempre uma onda mecânica, em qualquer meio.
- As ondas de rádio AM (Amplitude Modulada) são ondas mecânicas.

São verdadeiras:

- I, II e III.
- II, III e IV.
- I, IV e V.
- I, III e V.
- III, IV e V.

10. Qual das ondas a seguir não se propaga no vácuo?

- Raios *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*).
- Ondas de rádio.
- Micro-ondas.
- Ondas de sonar (*sound navigation and ranging*).
- Ondas de calor (radiação infravermelha).

11. Vê-se um relâmpago; depois, ouve-se o trovão. Isso ocorre porque:

- o som se propaga no ar.
- a luz do relâmpago é muito intensa.
- a velocidade do som no ar é de 340 m/s.
- a velocidade do som é menor que a da luz.
- se esse fenômeno ocorresse no vácuo, o som do trovão e a luz do relâmpago chegariam juntos.

12. Um professor de Física que ministrava a primeira aula sobre ondas dava exemplos de ondas eletromagnéticas. Ele dizia: "São exemplos de ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, a luz, as ondas de radar, os raios X, os raios γ ". Um aluno entusiasmado completou a lista de exemplos, dizendo: "Raios α , raios β e raios catódicos".

Pode-se afirmar que:

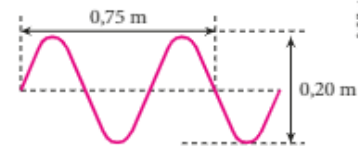
- pelo menos um exemplo citado pelo professor está errado.
- todos os exemplos citados pelo professor e pelo aluno estão corretos.
- apenas um exemplo citado pelo aluno está errado.
- os três exemplos citados pelo aluno estão errados.
- há erros tanto nos exemplos do professor quanto nos do aluno.

13. O gráfico a seguir mostra a variação da elongação de uma onda transversal com a distância percorrida por ela:



Determine o comprimento de onda e a amplitude dessa onda.

14. A figura representa a propagação de uma onda ao longo de uma corda com frequência de 20 Hz.



Qual é a velocidade de propagação dessa onda?

15. Uma das maravilhas da cozinha moderna, o forno de micro-ondas aquece os alimentos utilizando ondas eletromagnéticas de frequências muito próximas de 2,5 GHz ($2,5 \cdot 10^9$ Hz). As partículas de água, açúcar e gordura entram em ressonância com essas ondas, absorvendo parte de sua energia, passando a vibrar intensamente. O atrito entre elas aquece o alimento.



Forno de micro-ondas.

Sabendo-se que no ar as ondas eletromagnéticas se propagam com velocidade igual à da luz (300 000 km/s), determine o comprimento de onda das ondas emitidas pelo magnétron do forno de micro-ondas.

16. Uma emissora de rádio, na faixa de FM (Frequência Modulada), transmite utilizando ondas de 3,0 m de comprimento. Sendo $3,0 \cdot 10^8$ m/s a velocidade das ondas eletromagnéticas no ar, qual é a frequência dessa emissora de rádio? Dê a resposta em MHz.

17. "Vivemos mergulhados em radiações. No vasto espectro das ondas eletromagnéticas, apenas uma pequena porção é percebida pelo nosso limitado aparelho sensorial. Além do visível, o Universo, como descobrimos nas últimas décadas, está repleto de fontes de raios X, raios γ , ultravioleta, infravermelho e ondas de rádio."

(Scientific American Brasil, n. 10, mar. 2003.)

Grote Reber, engenheiro estadunidense de Illinois, foi um dos precursores da radioastronomia. Utilizando recursos próprios, desenvolveu um refletor parabólico com 9 metros de diâmetro para captação de sinais de rádio oriundos do espaço. Esse refletor foi instalado no quintal de sua casa e, em 1939, tendo ajustado seu equipamento para o comprimento de onda de 1,9 m, detectou sinais provenientes do centro da Via Láctea.

Adotando-se para o módulo de velocidade de propagação das ondas de rádio o valor de $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s, é correto afirmar que a frequência dos sinais captados por Reber, do centro da Via Láctea, é mais próxima de:

- a) $1,4 \cdot 10^8$ Hz c) $1,8 \cdot 10^8$ Hz e) $2,2 \cdot 10^8$ Hz
b) $1,6 \cdot 10^8$ Hz d) $2,0 \cdot 10^8$ Hz

18. Um abalo sísmico geralmente é provocado por pressões que ocorrem nas junções de duas placas tectônicas. Pode também ser o resultado de uma falha geológica ou mesmo de vulcanismo. Assim, as regiões mais vulneráveis à ocorrência de terremotos são as mais próximas das bordas de placas tectônicas.

Na América do Sul, os países mais atingidos por esses tremores de terra são o Peru, o Chile e o Equador. O Brasil encontra-se no meio de uma dessas placas, sendo atingido apenas por reflexos, já que a energia liberada em um terremoto se transforma, em parte, em uma onda mecânica que se propaga pela crosta terrestre.



Estrago em rodovia, causado por terremoto. Iquique, norte do Chile. Abril de 2014.

Suponha que um desses tremores com epicentro no sul do Chile, por exemplo, tenha atingido o território brasileiro. O sismógrafo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no Rio Grande do Sul, registrou o primeiro pico dessa onda no instante que consideraremos $t = 0$ s. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), situada em Porto Alegre, distante 252 km, em linha reta, de Santa Maria, detectou o mesmo pico 42 segundos depois, quando o primeiro sismógrafo já detectava o 631º pico.

Com base nesses dados, determine:

- a) a velocidade dessa onda mecânica;
b) o seu comprimento de onda;
c) a frequência da onda.

19. Apesar de seu hábitat ser a água, os golfinhos não são peixes, são mamíferos como os seres humanos. As fêmeas dão à luz um filhote de cada vez e seu tempo de gestação é por volta de 12 meses. O período de amamentação pode chegar a 4 anos. Na idade adulta, o golfinho pode ficar submerso por 20 minutos, mergulhando a até 300 metros de profundidade. Ao nadar, esse animal pode atingir até 40 km/h. Sua comunicação é feita por meio de ondas mecânicas de frequência na faixa de 150 kHz. Imagine agora um desses animais mergulhado a 100 m de profundidade, emitindo um comunicado a outro golfinho. Ele emite uma onda ultrassônica de frequência 150 kHz e recebe o retorno desse som, que foi refletido no corpo do segundo golfinho, depois de 4,0 segundos. Se a velocidade de propagação do som na água é de 1 500 m/s, determine:

a) a distância entre esses dois golfinhos;

b) o comprimento da onda ultrassônica emitida pelo golfinho;

c) a frequência e o comprimento da onda emitida pelo golfinho ao ser captada (no ar) por um pesquisador localizado em um barco. A velocidade das ondas sonoras no ar é de aproximadamente 330 m/s.

20. Uma corda homogênea de densidade linear igual a 0,50 kg/m está tracionada com uma força de intensidade F . Uma perturbação aplicada na corda produz uma onda que se propaga por ela com velocidade de 6,0 m/s. Qual é a intensidade F da força?

21. Traciona-se uma corda homogênea de 4,0 m de comprimento com uma força de intensidade 50 N. Ondas produzidas nessa corda propagam-se com velocidade de 10 m/s. Qual é a massa da corda?

11. REFLEXÃO

Dos fenômenos que podem ocorrer com a luz no nosso dia a dia, o mais comum é a **reflexão**. Excluindo-se os corpos que emitem luz, todos os outros podem ser observados por causa da reflexão da luz em sua superfície.



As ondas luminosas, provenientes do Sol, refletem nas paredes da construção, incidem na superfície do lago e voltam a se propagar no ar.

Uma onda que se propaga em um meio sofre **reflexão** quando, após incidir num segundo meio de características diferentes, volta a se propagar no meio original.

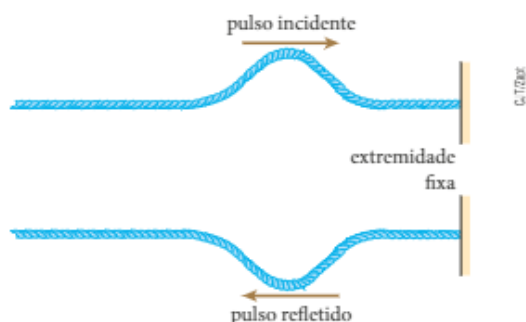
Qualquer que seja o tipo de onda, o módulo de sua velocidade de propagação não se altera na reflexão, pois ela continua a propagar-se no mesmo meio em que estava. Como a frequência, característica da onda que se mantém sempre constante, o comprimento de onda também não varia na reflexão (lembre-se: $v = \lambda f$).

Vejamos dois casos particulares de reflexão: para ondas em cordas e para ondas em superfícies de líquidos. A reflexão de ondas luminosas (luz) será vista na parte de **Óptica**.

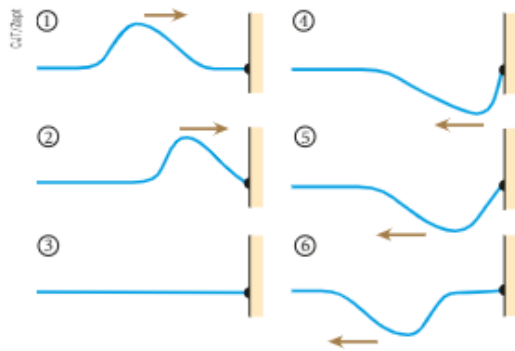
Reflexão de ondas transversais em cordas

A análise da reflexão de pulsos ou de ondas transversais nas extremidades de cordas deve ser dividida em duas partes: Veja a seguir.

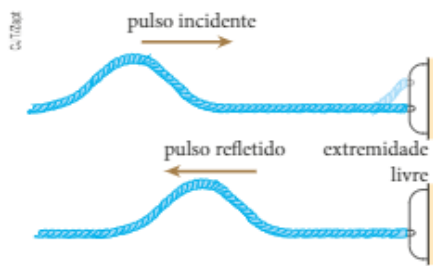
1ª) Em extremidade fixa:



O pulso gerado, à medida que passa pelos pontos da corda, faz cada um deles subir e descer. No entanto, quando esse pulso atinge uma extremidade fixa (uma parede, por exemplo) e tenta movê-la, esta, pela 3ª Lei de Newton (**Princípio da Ação e Reação**), reage sobre a corda, gerando um pulso refletido **invertido** em relação ao pulso incidente. Diz-se, então, que o pulso refletido está em **oposição de fase** em relação ao pulso incidente, pois, se o pulso incidente provoca um sobe e desce, o refletido provoca um desce e sobe. Para entender melhor esse fenômeno, observe a sequência a seguir.

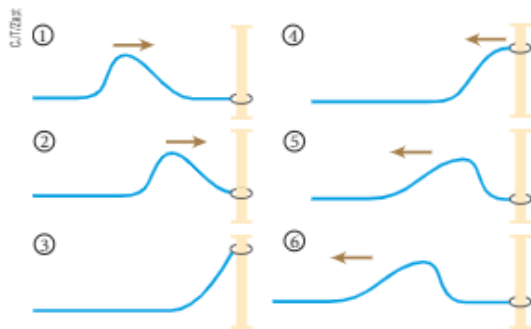


2ª) Em extremidade livre:



A extremidade livre pode ser idealizada por um anel leve, que possa deslizar sem atrito ao longo de uma haste.

Quando o pulso atinge o anel, ele sobe e desce e o pulso é refletido **sem inversão**. Dizemos, então, que o pulso refletido está **em fase** com o pulso incidente, pois tanto um como o outro provocam um movimento de sobe e desce. Tal fato é facilmente aceitável, pois se alguém executasse no anel um movimento de sobe e desce seria gerado um pulso que se propagaria para a esquerda com as mesmas características do pulso refletido. Para entender melhor como ocorre esse fenômeno, observe a sequência a seguir:



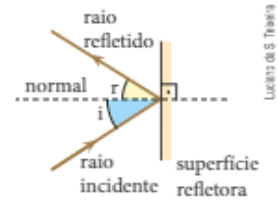
A extremidade livre costuma ser obtida, na prática, amarrando-se um barbante muito leve, flexível e não elástico na extremidade da corda.



Reflexão de ondas que se propagam na superfície de líquidos

As reflexões de ondas bidimensionais e tridimensionais podem ser representadas por seus raios de onda ou pelas próprias frentes de onda.

Usando raios de onda como representação, obtemos a figura ao lado, que é útil para a apresentação das duas leis que regem a reflexão de qualquer tipo de onda.



1ª Lei da Reflexão

O raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície refletora no ponto de incidência estão contidos sempre em um mesmo plano (são coplanares).

2ª Lei da Reflexão

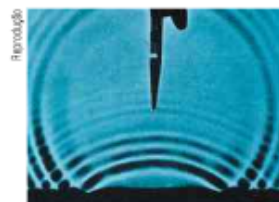
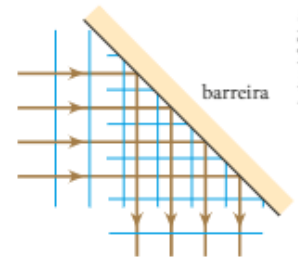
O ângulo formado pelo raio incidente e a normal (ângulo de incidência i) e o ângulo formado pelo raio refletido e a mesma normal (ângulo de reflexão r) são sempre de mesma medida: $i = r$

Observe as fotografias e as figuras a seguir. Elas representam a reflexão de ondas retas e ondas circulares que se propagam na superfície da água e refletem em uma barreira plana.



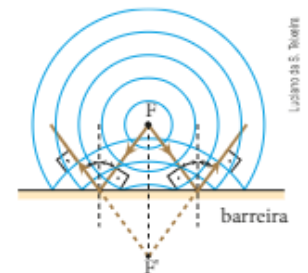
Fotografia de ondas retas.

À direita, representação esquemática da situação observada na fotografia.



Fotografia de ondas circulares.

À direita, representação esquemática da situação observada na fotografia. É importante notar que os raios refletidos "partem" do ponto F' , simétrico a F em relação à barreira plana. Perceba que as ondas refletidas continuam circulares.



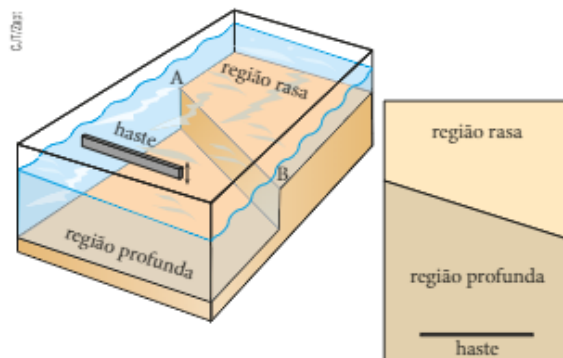
12. REFRAÇÃO

Outro fenômeno ondulatório muito comum é a chamada **refração**, quando uma onda muda de meio.

Chama-se **refração** de uma onda a passagem dessa onda de um meio para outro, de características diferentes.

Qualquer que seja o tipo de onda, sua frequência não se altera na refração. No entanto, devido à mudança de meio, a velocidade se modifica, o mesmo ocorrendo com o comprimento de onda. A onda refratada está sempre em fase com a onda incidente. Isso é válido para todos os tipos de ondas, o que será reforçado em **Óptica**, no estudo da refração da luz.

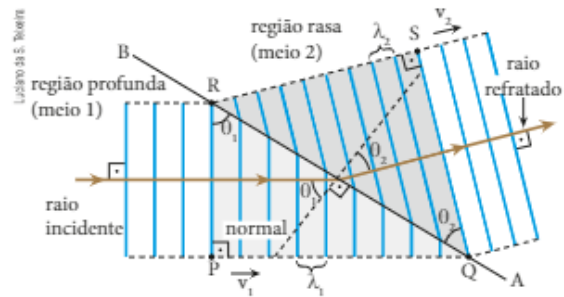
Como modelo de refração, podemos usar ondas que se propagam na superfície de líquidos.



O recipiente mostrado na figura contém água e possui duas regiões, uma profunda e uma rasa. Uma haste bate periodicamente na superfície da água, gerando ondas retas que se propagam da região profunda para a região rasa, determinando uma refração.

É de verificação experimental que a velocidade de propagação de ondas na superfície de um líquido pode depender da profundidade do local. Observa-se que o módulo da velocidade diminui quando as ondas passam de regiões profundas para regiões rasas (aquelas cujas profundidades são menores que o comprimento de onda dessas ondas ou comparáveis a ele). Dessa forma, meios de diferentes profundidades podem ser considerados diferentes meios de propagação. Ondas que se propagam na superfície da água, por exemplo, sofrem refração quando passam de uma região profunda para uma rasa ou de uma região rasa para uma profunda.

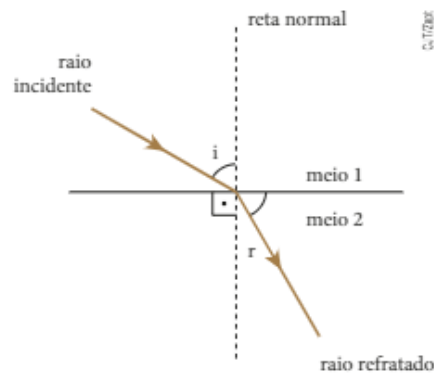
Observe na figura a seguir a representação desse fenômeno.



Representação esquemática e simplificada da refração de ondas que se propagam na superfície da água. A mudança de direção ocorre porque os pontos de uma frente de onda não sofrem mudanças de velocidade simultaneamente.

Nessa figura, θ_1 é o ângulo formado pelo raio incidente e pela normal (ângulo de incidência) na região profunda. Observe que o ângulo formado pelas frentes incidentes e pela fronteira entre as duas regiões também vale θ_1 ; θ_2 é o ângulo formado pelo raio refratado e pela normal (ângulo de refração) na região rasa. Também vale θ_2 o ângulo formado pelas frentes refratadas e pela fronteira entre as duas regiões; v_1 e λ_1 são, respectivamente, a velocidade de propagação e o comprimento de onda na região profunda; v_2 e λ_2 são, respectivamente, a velocidade de propagação e o comprimento de onda na região rasa.

Simplificando a representação da refração, usando um raio de onda, temos:



i é o ângulo de incidência (θ_1)

r é o ângulo de refração (θ_2)

A refração de ondas obedece a duas leis, apresentadas a seguir.

1ª Lei da Refração

O raio incidente, a normal à fronteira no ponto de incidência e o raio refratado estão contidos no mesmo plano (são coplanares).

2ª Lei da Refração

Também denominada **Lei de Snell**, a 2ª Lei da Refração é expressa pela relação:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

(As grandezas θ_1 , θ_2 , v_1 , v_2 , λ_1 e λ_2 estão indicadas na figura esquemática e simplificada da refração de ondas.)

O matemático holandês Willebrord Snell (1581-1626) descobriu experimentalmente a veracidade da relação existente entre os ângulos de incidência e de refração. Em sua homenagem, essa relação matemática recebeu a denominação de **Lei de Snell**.

13. REFRAÇÃO E REFLEXÃO DE ONDAS TRANSVERSAIS EM CORDAS

A refração e a reflexão de ondas transversais em cordas tensas podem ser facilmente visualizadas e também obedecem às regras básicas da refração e da reflexão.

Considere duas cordas de densidades lineares diferentes emendadas. Como primeira hipótese, suponha que a densidade linear da corda **B** seja maior que a da corda **A**.

Um pulso gerado na corda **A** propaga-se e incide na fronteira entre **A** e **B**. Nesse local, parte da energia do pulso incidente transmite-se (sofre refração), passando a propagar-se na corda **B**. Note que o pulso refratado está sempre em fase com o pulso incidente, isto é, ambos os pulsos estão "voltados para cima".



Na mesma fronteira, ocorre reflexão de uma parcela da energia através do pulso refletido. Quando a reflexão ocorre com o pulso propagando-se da corda de menor para a de maior densidade linear, o pulso refletido apresenta-se em **oposição de fase** em relação ao incidente.

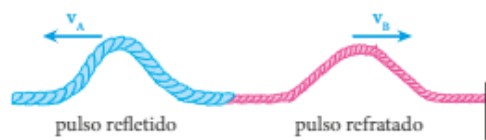


Os pulsos incidente e refletido têm velocidades de mesmo módulo v_A , enquanto o pulso que sofreu refração tem velocidade de módulo v_B . Lembrando que $v = \sqrt{\frac{F}{\delta}}$, concluímos que v_B é menor que v_A , pois $\delta_B > \delta_A$ e a força tensora têm o mesmo valor nas duas cordas (pela 3ª Lei de Newton, a força com que **A** puxa **B** e a força com que **B** puxa **A** têm o mesmo módulo).

Como segunda hipótese, suponha que a corda **B** tenha menor densidade linear que a corda **A**. Assim, obtemos:



Como sempre, o pulso refratado está em fase com o pulso incidente e sua velocidade é, agora, maior que a do pulso incidente, pois $\delta_B < \delta_A$. Note que, nesse caso, o pulso refletido também está **em fase** com o pulso incidente.

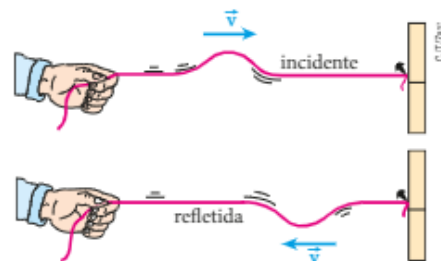


QUESTÕES COMENTADAS

22 Um pulso em uma corda de extremidade fixa, ao refletir, sofre inversão de fase. Observe a figura.

O fato de ocorrer inversão na fase do pulso está ligado à/ao:

- 1ª Lei de Newton.
- Princípio da Conservação da Energia.
- 3ª Lei de Newton.
- Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento.
- Lei de Coulomb.

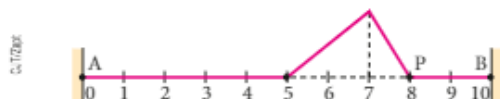


RESOLUÇÃO

No momento da incidência da onda, a corda puxa o obstáculo para cima e, por causa da **3ª Lei de Newton (ação-reação)**, o obstáculo puxa a corda para baixo. Assim, vamos observar uma onda refletida em oposição de fase com a incidente.

Resposta: Alternativa c.

23 Uma corda AB, de comprimento $L = 10$ m, tem ambas as extremidades fixas. No instante $t = 0$ s, o pulso triangular esquematizado a seguir inicia-se em A, atingindo o ponto P no instante $t = 4$ s. Sendo $AP = 8$ m, determine a velocidade de propagação do pulso e o perfil da corda no instante $t = 7$ s.



RESOLUÇÃO

A velocidade de propagação de um pulso num meio homogêneo pode ser calculada pela relação:

$$v = \frac{d}{\Delta t}, \text{ em que } d \text{ é a distância percorrida.}$$

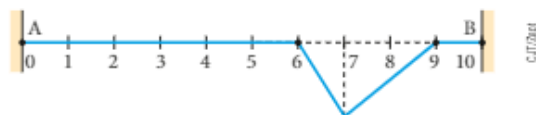
Como, no caso, $d = 8$ m e $\Delta t = 4$ s, temos:

$$v = \frac{8 \text{ m}}{4 \text{ s}} \Rightarrow v = 2 \text{ m/s}$$

Assim, até o instante $t = 7$ s, o pulso terá percorrido:

$$d = v \cdot \Delta t \Rightarrow d = 2 \cdot 7 \Rightarrow d = 14 \text{ m}$$

Como a corda tem apenas 10 m, conclui-se que o pulso refletiu em B, com inversão de fase (já que essa extremidade está fixa), e percorreu mais 4 m de volta, propagando-se de B para A. Portanto, o perfil da corda no instante $t = 7$ s é:



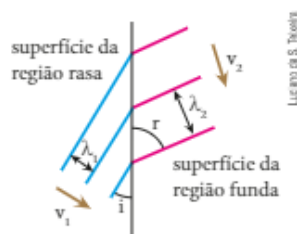
Resposta: 2m/s; ver figura acima.

24 A figura mostra uma cuba com ondas onde há uma região rasa e outra funda. Com uma régua, são provocadas perturbações periódicas retas a cada 0,4 s que se propagam na superfície da água.



Sabendo que λ_1 (comprimento de onda na região rasa) é igual a 2 cm, i (ângulo de incidência) é igual a 30° e v_2 (velocidade da onda na região funda) é igual a $5\sqrt{2}$ cm/s, determine:

- a) a velocidade (v_1) da onda, na região rasa;
- b) o comprimento de onda (λ_2), na região funda;
- c) o ângulo de refração (r).



RESOLUÇÃO

a) A velocidade (v_1) da onda, na região rasa, pode ser calculada pela **Equação Fundamental das Ondas**:

$$v = \lambda f \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T}$$

Sendo $\lambda_1 = 2$ cm e $T = 0,4$ s, temos:

$$v_1 = \frac{2}{0,4} \Rightarrow v_1 = 5 \text{ cm/s}$$

b) Para o cálculo do comprimento de onda (λ_2), na região funda, usamos a mesma relação do item anterior:

$$v = \lambda f \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \lambda = v T$$

Sendo $v_2 = 5\sqrt{2}$ cm/s e $T = 0,4$ s, já que o período não muda na refração, temos:

$$\lambda_2 = 5\sqrt{2} \cdot 0,4 \Rightarrow \lambda_2 = 2\sqrt{2} \text{ cm}$$

c) Pela **Lei de Snell**, podemos calcular o ângulo de refração (r):

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{\text{sen } 30^\circ}{\text{sen } r} = \frac{2}{2\sqrt{2}} \Rightarrow \text{sen } r = \sqrt{2} \cdot \text{sen } 30^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$r = 45^\circ$$

Respostas: a) 5 cm/s; b) $2\sqrt{2}$; c) 45°



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

25. Pessoas atentas ao que ocorre na natureza podem copiar situações e aplicá-las no nosso cotidiano. Do estudo dos morcegos, sabemos que eles possuem a "ecolocalização", um sistema de orientação e localização que os humanos não possuem. Para detectar a presença de obstáculos,

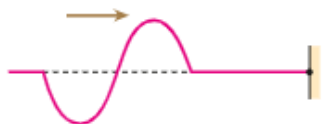
quando de sua localização, eles emitem ultrassons que refletem e retornam, na forma de eco. Pela percepção da direção do eco e o tempo de retorno, o morcego consegue descobrir onde está o obstáculo e a distância até ele. Um dispositivo inspirado na "ecolocalização" é a trena sônica,

que emite ultrassons de 22000 Hz de frequência e com comprimento de onda igual a 15 mm. Aristeu usou-a para medir a distância entre ele e um muro que estava a 66 metros. Apontou essa trena e disparou o ultrassom. Considerando que a velocidade do som no ar é constante, independentemente da frequência, determine o intervalo de tempo que esse ultrassom levou para retornar à trena.

26. Os morcegos são os únicos mamíferos que conseguem voar naturalmente. Isso ocorre porque seus membros superiores apresentam membranas em forma de asas. A grande maioria desses animais (70%) é insetívora. Os demais são frugívoros e apenas três espécies são de hematófagos (vampiros); estes vivem na América do Sul. Os morcegos apresentam um extraordinário sentido de ecolocalização, que utilizam para caçar insetos e se orientar em locais escuros, como cavernas. Os morcegos emitem pelas narinas ou pela boca ondas ultrassônicas (frequências acima de 20000 Hz). Essas ondas refletem em obstáculos e retornam, de modo que, ao recebê-las de volta, o morcego identifica a que distância está o obstáculo, a sua forma e se está ou não em movimento. Suponha um morcego insetívoro parado na entrada de uma caverna. Ele emite ultrassons de frequência 30 kHz, que se propagam para o interior da caverna com velocidade de 330 m/s.

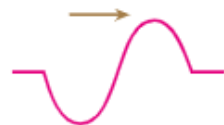
- Faça uma estimativa do comprimento do menor inseto que esse morcego pode detectar.
- Sabendo que as ondas refletidas no fundo da caverna são detectadas pelo morcego após 0,2 s da sua emissão, determine a profundidade da caverna.

27. Uma corda horizontal tem uma de suas extremidades fixa a uma parede. Na extremidade livre, produz-se um pulso, que se propaga ao longo da corda:

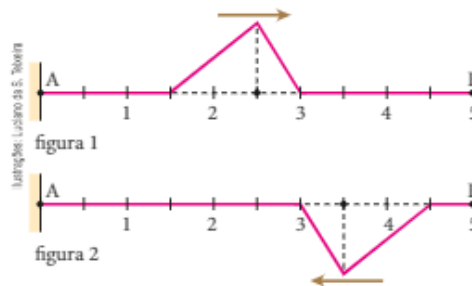


Qual é o aspecto da corda logo após a reflexão do pulso na extremidade fixa?

28. Uma corda horizontal tem suas duas extremidades livres. Em uma delas, produz-se um pulso, que se propaga ao longo da corda: Qual é o aspecto da corda logo após a reflexão do pulso na outra extremidade?

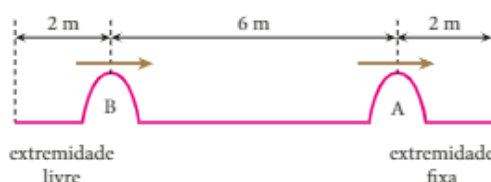


29. Um pulso triangular é produzido na extremidade A de uma corda AB, de comprimento $L = 5,0$ m, cuja outra extremidade B é livre. Inicialmente, o pulso se propaga de A para B com velocidade constante v . A figura 1 representa o perfil da corda no instante t segundos e a figura 2, o perfil da corda no instante $(t + 7)$ segundos.



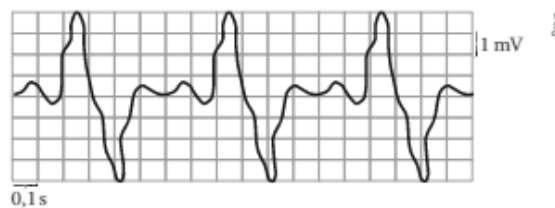
Determine a velocidade (v) de propagação da onda, admitindo que a configuração da figura 2 esteja ocorrendo pela primeira vez após o instante t .

30. Em uma corda homogênea de 10 m de comprimento, propagam-se dois pulsos com velocidades iguais a 1 m/s. No instante $t = 0$ s, a configuração da corda é representada pela figura abaixo.



Qual será a configuração dessa corda no instante $t = 14$ s?

31. Os músculos do coração pulsam devido a pequenas descargas elétricas. O eletrocardiograma (ECG) é um exame utilizado para a prevenção de doenças cardíacas. Nesse exame são colocados eletrodos sensíveis em diferentes pontos do corpo do paciente. O aparelho irá registrar a variação da tensão elétrica (ddp) nos pontos conectados. Os sinais elétricos podem ser vistos na tela de um osciloscópio ou impressos em uma tira de papel quadriculado, como representado na figura a seguir.



O registro da onda do pulso cardíaco do paciente mostra a variação da tensão elétrica, em milivolt (mV), na vertical, e os intervalos de tempo, em segundo, na horizontal. Analisando a representação gráfica expressa na figura, determine:

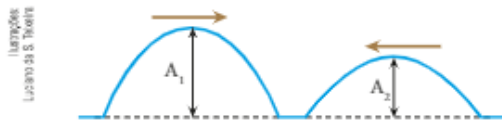
- a amplitude máxima, em milivolt (mV);
- o período e a frequência cardíaca do paciente;
- o comprimento da onda cardíaca, em metro, sabendo-se que a velocidade de propagação dessa onda no equipamento é de 20 cm/s.

14. SUPERPOSIÇÃO DE PULSOS EM CORDAS

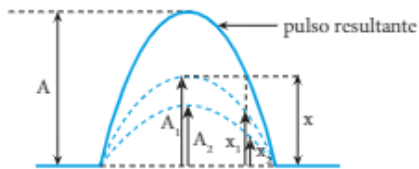
A superposição de duas ou mais ondas de mesma natureza provoca no local da superposição uma perturbação resultante igual à “soma algébrica” das perturbações individuais de cada onda.

Em uma corda tensa fica mais fácil visualizar esse fenômeno. Assim, considere uma corda esticada, disposta horizontalmente. Em suas extremidades vamos produzir dois pulsos de mesma largura e amplitudes diferentes: A_1 e A_2 . O resultado da superposição depende da forma como esses pulsos foram originados. Devemos, então, considerar duas situações. Veja a seguir.

1ª situação: pulsos em fase



No instante da superposição dos pulsos **em fase**, observamos que cada ponto da corda na região de superposição apresenta uma elongação x igual à soma das elongações x_1 e x_2 que cada pulso produziria nesse ponto se lá chegasse sozinho. É evidente que a crista resultante tem uma amplitude igual à soma das amplitudes individuais dos pulsos.



$$A = A_1 + A_2$$

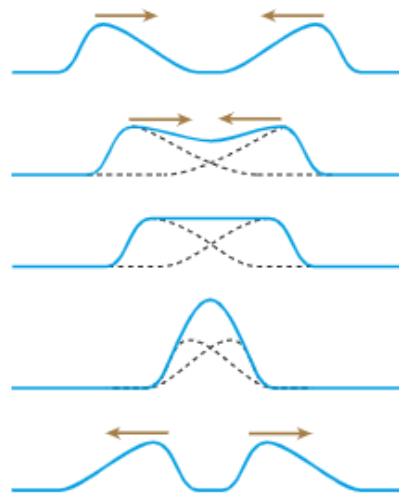
$$x = x_1 + x_2$$

A esse tipo de superposição de pulsos (em fase) dá-se o nome de **interferência construtiva**.

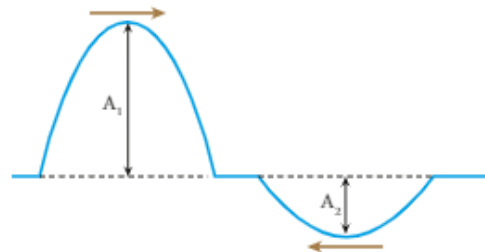
É importante observar que após a superposição os pulsos continuam suas propagações normalmente, como se nada tivesse acontecido. Esse fato justifica-se pelo **Princípio da Independência da Propagação Ondulatória**. Assim, após a superposição, a configuração da corda passa a ser:



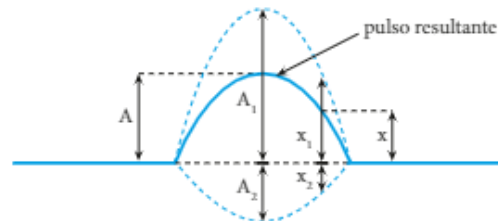
Observe a sequência:



2ª situação: pulsos em oposição de fase



No instante da superposição dos pulsos **em oposição de fase**, observamos que cada ponto da corda na região de superposição apresenta uma elongação x , igual à diferença das elongações x_1 e x_2 que cada pulso produziria nesse ponto se lá chegasse sozinho. É evidente que a crista resultante tem uma amplitude igual à diferença das amplitudes individuais desses pulsos.

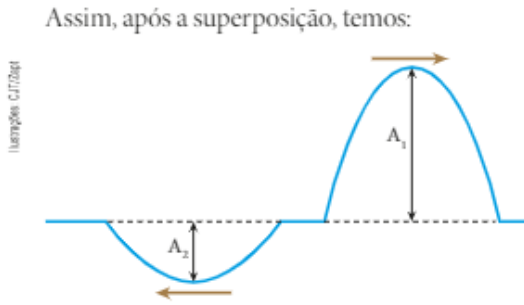


$$A = A_1 - A_2$$

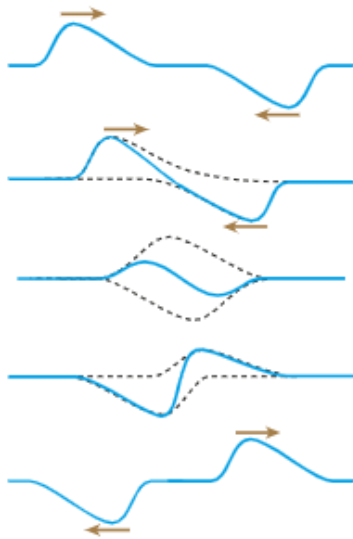
$$x = x_1 - x_2$$

A esse tipo de superposição de pulsos (em oposição de fase) dá-se o nome de **interferência destrutiva**.

Também nesse caso, após a superposição, os pulsos continuam suas propagações normalmente, como se nada tivesse acontecido. Vale o **Princípio da Independência da Propagação Ondulatória**.



O fenômeno da interferência não é privilégio de ondas em cordas, podendo ocorrer também com ondas sonoras, com ondas em superfícies líquidas, com ondas luminosas etc. Observe a sequência:



Caso particular

Devemos fazer um estudo do caso particular em que os dois pulsos que se propagam na corda, em oposição de fase, possuem amplitudes iguais ($A_1 = A_2 = A$).

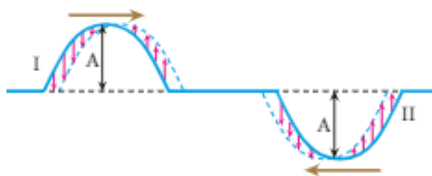
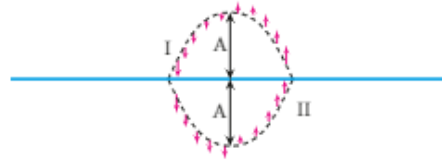


Ilustração esquemática representando dois pulsos de mesma amplitude propagando-se numa corda. As setas verticais indicam as velocidades de vibração dos pontos da corda no instante considerado.

Em cada região por onde os pulsos passam, sempre há energia cinética e energia potencial elástica.

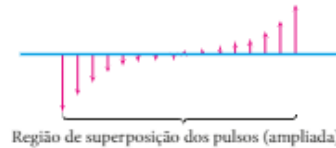
No instante em que se superpõem, os pulsos desaparecem momentaneamente, o mesmo ocorrendo com a deformação da corda e com a energia potencial elástica.

ca. Em compensação, a energia cinética dos pedaços de corda da região se intensifica, o que é evidente, pois os pulsos tendem a provocar deslocamentos transversais no mesmo sentido. Além disso, a energia potencial elástica também se converte em energia cinética.

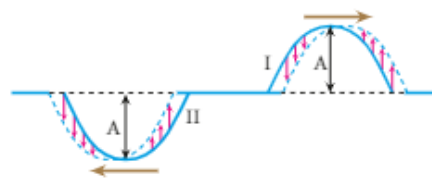


Interferência destrutiva: as amplitudes se subtraem. No caso, a amplitude do pulso resultante é nula.

No momento da superposição total, a deformação da corda desaparece, mas seus pontos na região estão em movimento. É esse movimento que possibilita o reaparecimento dos pulsos logo em seguida, quando a energia potencial que se converteu em cinética volta a ser potencial.

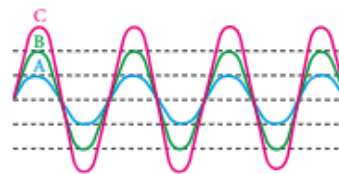


De acordo com o **Princípio da Independência da Propagação Ondulatória**, após a superposição as ondas continuam com suas características iniciais.



15. SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS PERIÓDICAS

A onda resultante da superposição de duas ondas periódicas é obtida pelos mesmos conceitos usados para os pulsos da seção anterior.



Exemplo de interferência construtiva: as ondas A e B, de mesma frequência e em concordância de fase, superpõem-se, resultando a onda C.



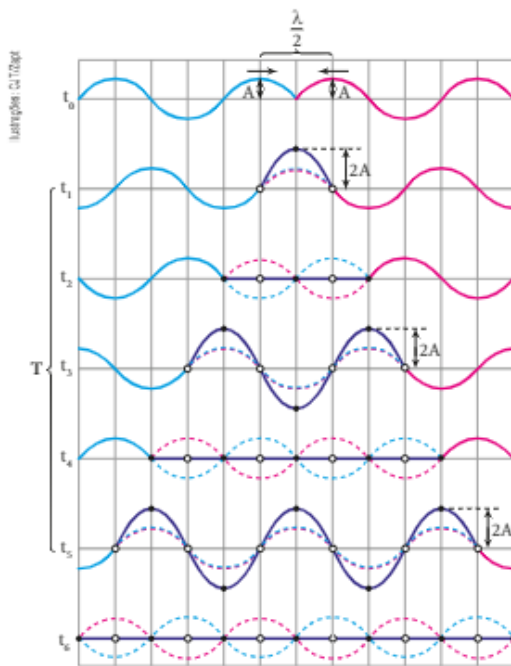
Esse é um exemplo de interferência destrutiva. As ondas A e B, de mesma frequência, mesma amplitude e em oposição de fase, superpõem-se, resultando a onda C, de amplitude nula.

Essa superposição de ondas periódicas pode apresentar um efeito de particular interesse, a formação das **ondas estacionárias**.

O fenômeno ondulatório denominado **ondas estacionárias** é a configuração resultante da superposição de duas ondas idênticas que se propagam na mesma direção e em sentidos opostos.

Esse fenômeno é mais facilmente observado com ondas em cordas, apesar de poder ocorrer também com outros tipos de onda.

Para melhor entendimento, vamos considerar uma corda esticada e duas ondas idênticas propagando-se em sentidos opostos.

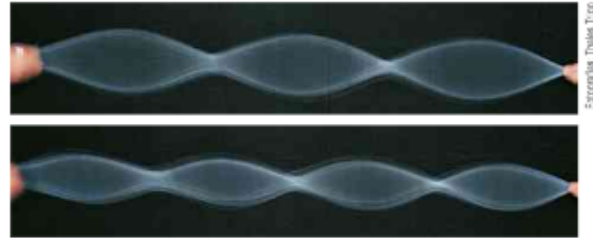


Podemos observar na figura que os pontos da corda representados por pequenos círculos brancos são pontos que não vibram, ocorrendo neles permanente interferência destrutiva. Esses pontos são denominados **nós** ou **nodos** de deslocamento.

Note, ainda, os pontos da corda representados por pequenos círculos pretos, que vibram com amplitude igual a $2A$. Nesses pontos, ocorre permanente interferência construtiva, sendo, por isso, denominados **ventres**, **antinós** ou **antinodos** de deslocamento. Como esses nós e ventres não se propagam, permanecendo sempre nos mesmos locais da corda, a configuração resultante recebe a denominação de **onda estacionária**.

Observe que a distância entre dois nós consecutivos ou dois ventres consecutivos é sempre $\frac{\lambda}{2}$, em que λ

é o comprimento de onda de cada uma das ondas que se superpõem. Além disso, o período (T) das vibrações da onda estacionária é igual ao período das ondas componentes (ver figura anterior).

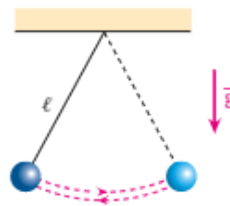


Corda vibrando de maneira estacionária. As diferentes configurações ocorrem porque as frequências das ondas são diferentes em cada situação. Quanto maior é a frequência de vibração, mais ventres são formados na corda.

16. RESSONÂNCIA

Todo sistema físico capaz de vibrar, se for excitado, vibrará numa frequência que lhe é característica, que lhe é natural. Alguns sistemas admitem uma única frequência natural de vibração e outros, mais de uma. Vejamos alguns exemplos.

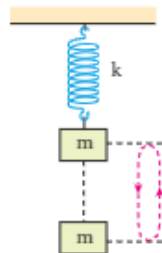
Exemplo 1: Um pêndulo simples é excitado, ou seja, afastado de sua posição de equilíbrio, e, em seguida, é abandonado.



O pêndulo oscila numa única frequência natural, dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

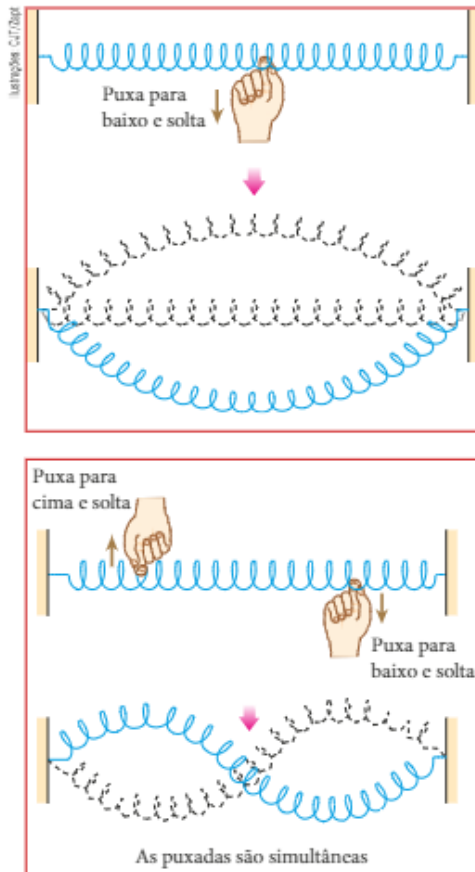
Exemplo 2: A massa m de um sistema massa-mola é excitada e, em seguida, abandonada.



A massa oscila numa frequência natural, também única, dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Exemplo 3: Uma mola, ao contrário dos casos anteriores, pode vibrar em várias frequências naturais, o mesmo ocorrendo com uma corda elástica. A seguir, vemos dois dos muitos modos de vibração de uma mola presa pelas extremidades.



Além desses exemplos, podemos citar as cordas de um violão, a estrutura de um prédio ou a de um estádio de futebol, que vibra quando os torcedores batem os pés, e o próprio corpo humano.

O fenômeno da ressonância ocorre quando um sistema físico **recebe energia** por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências natu-

rais de vibração. Com essa energia, o sistema físico passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores.

Na ressonância, um sistema mecânico pode ter o limite de elasticidade ultrapassado, o que pode provocar seu rompimento. Isso foi o que provavelmente aconteceu na famosa ponte Tacoma Narrows (estado de Washington, EUA), em 7 de novembro de 1940, apenas quatro meses após sua inauguração. O vento pode ter causado a vibração da ponte, com amplitudes cada vez maiores, até que ela se rompeu. Há uma teoria de que o vento iniciou a oscilação, mas foram os cabos de sustentação – que ficaram tensos quando a ponte descia e frouxos quando subia – que amplificaram as vibrações até ocorrer o colapso final.



A imagem mostra o momento em que a ponte pênsil Tacoma Narrows, nos EUA, cai, provavelmente por causa do fenômeno da ressonância. Acredita-se que o responsável por esse desastre tenha sido o vento, que excitou a ponte fornecendo energia para a vibração de sua estrutura.

Um sistema físico é dito em **ressonância** com um agente excitador quando recebe excitações periódicas numa frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração.



Como evitar ladrões de Wi-Fi?

No interior de nossas casas podem ser detectadas muitas ondas eletromagnéticas, algumas úteis e outras nem tanto. Das úteis, podemos citar as ondas de rádio e TV, de telefonia celular e as ondas do Wi-Fi, utilizadas em redes *wireless* (sem fio) para a conexão de computadores e *smartphones* (telefones inteligentes) à internet. O principal fator de diferenciação entre as ondas eletromagnéticas é a frequência de cada uma. As radiações luminosas, por exemplo, têm frequências compreendidas na faixa de $4,5 \cdot 10^{14}$ Hz (vermelho) a $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz (violeta), aproximadamente.

Como evitar que nossas informações e dados sejam “roubados” por ladrões de Wi-Fi? Pesquisadores franceses do Institut Polytechnique de Grenoble, em conjunto com o Centre Technique de Papier, desenvolveram um tipo de papel de parede capaz de bloquear as ondas ele-

tromagnéticas com frequências próximas de 2,4 GHz e 5,0 GHz, que correspondem às frequências utilizadas na conexão sem fio em todo o mundo. No Brasil, trabalha-se com ondas de 2,4 GHz.

O bloqueio dessas ondas ocorre devido a microscópicos cristais de prata ordenados de maneira específica – de modo semelhante a cristais de neve – presos em duas camadas de *kapton* (tecido plástico resistente utilizado em circuitos elétricos flexíveis e também como cobertura externa das roupas dos astronautas estadunidenses).

Os cristais de prata são interligados por uma tinta condutora, formando uma espécie de grade com orifícios muito pequenos, o que impede a passagem das ondas eletromagnéticas com comprimento de onda da ordem do Wi-Fi. Esse revestimento, depois de aplicado às paredes e ao teto de um ambiente, confina os sinais Wi-Fi, não permitindo que “vizinhos indesejáveis” tenham acesso às informações da rede local. As demais ondas, como as da telefonia celular, rádio e TV, entre outras, podem passar através dele sem alterações.



Copyright of the Centre National de la Recherche Scientifique, France and of the Institut Polytechnique de Grenoble, France

Revestimento de superfícies, como pisos e tetos, que bloqueia as ondas Wi-Fi, de frequências 2,4 GHz e 5,0 GHz.

AMPLIANDO O OLHAR

Tacoma – Inspiração para novas tecnologias

A projeção do vídeo feito por um amador, em 1940, intitulado Tacoma Narrows Bridge, que mostra a famosa ponte pênsil que caiu devido às oscilações provocadas pelos ventos que incidiam sobre ela, inspirou o engenheiro David Surin a desenvolver uma nova tecnologia para a obtenção de energia elétrica.

Ele associou o efeito do vento na ponte e os modernos geradores eólicos com suas grandes pás que giram produzindo energia elétrica e substituiu essas pás por um “canudo gigante” feito de fibra de vidro e fibra de carbono, bastante leve.



Parque Eólico de Água Doce. Água Doce-SC. Fevereiro de 2014.



Imagem idealizada de parque eólico formado por aerogeradores sem pás. A data prevista de lançamento de um protótipo comercial desse aerogerador era 2015.

A vorticidade dos ventos, efeito aerodinâmico que produz vórtices giratórios, faz esse canudo de aproximadamente 12 metros de comprimento oscilar. Em sua base, dois ímãs se encarregam de forçá-lo a voltar à posição inicial, isto é, ele oscila para um lado e os ímãs se encarregam de puxá-lo para o sentido oposto.

Assim, o canudo ficará oscilando, bastando para isso uma leve brisa. Um alternador transforma essa energia cinética de oscilação em energia elétrica. A versão testada é capaz de produzir 70% da energia elétrica obtida por geradores eólicos tradicionais (com hélices), com a seguinte vantagem: é possível instalar dois desses “canudos gigantes” no espaço ocupado por um gerador com hélices. Além disso, seu custo é praticamente a metade de uma turbina tradicional, ele é mais silencioso e não mata pássaros.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

Como determinar a massa de um astronauta?

Aqui na Terra quase tudo que fazemos exige um esforço muscular. Portanto, sempre estamos “trabalhando” alguns músculos. No entanto, quando um astronauta está viajando por regiões onde a gravidade é próxima de zero (microgravidade) ou não proporciona a sensação de peso (como nas espaçonaves em órbita ao redor da Terra), ele precisa fazer certos exercícios físicos, pois sua massa muscular irá diminuir devido à atrofia das fibras.

Nesse caso, um rígido controle da massa do astronauta deve ser feito. Mas como fazê-lo? Uma balança como a que usamos aqui na Terra não funciona lá no espaço.

Para resolver esse problema, os engenheiros da NASA desenvolveram um dispositivo que recebeu a denominação *Body Mass Measuring Device* (BMMD), que em português podemos chamar de Aparelho que Mede a Massa do Corpo.



Body Mass Measuring Device (BMMD), aparelho em forma de cadeira projetado por engenheiros da NASA para monitorar as perdas de massa corpórea dos astronautas. Nesta fotografia, a astronauta Karen Nyberg realiza atividades de monitoramento e medição de massa.

A cadeira é montada presa a uma mola e o astronauta sentado na cadeira irá oscilar. O número de oscilações completas dividido pelo intervalo de tempo corresponde à frequência de oscilação do sistema. O período de oscilação é o inverso da frequência.

Com o período de oscilação determinado podemos obter a massa total do sistema.

Essa massa é a soma das massas do astronauta mais a massa da cadeira (conhecida).

O conjunto astronauta + BMMD é o conhecido sistema massa-mola.

Para a determinação diária da massa do astronauta, podemos utilizar uma equação simples, estudada no ensino médio:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}, \text{ em que } M = m_c + m_a$$

Assim, sendo conhecida a massa da cadeira (m_c) e a constante K da mola, podemos conhecer a massa (m_a) do astronauta: $m_a = \frac{T^2 K}{4\pi^2} - m_c$

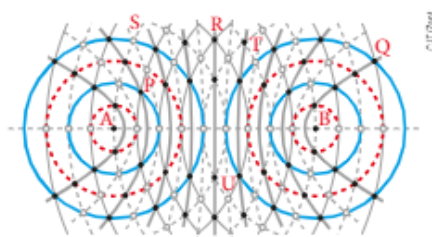
17. INTERFERÊNCIA DE ONDAS BIDIMENSIONAIS E TRIDIMENSIONAIS

Para ilustrar o fenômeno da interferência de ondas bidimensionais, vamos considerar dois estiletes que vibram verticalmente, produzindo na superfície da água ondas idênticas e em fase, ou seja, quando um estilete produz uma crista, o outro faz o mesmo. Algum tempo após o início das vibrações dos estiletes, a superfície livre da água apresenta-se como na fotografia a seguir.



Interferência de ondas circulares na superfície da água.

Na figura a seguir, as circunferências azuis representam as cristas das ondas, enquanto as circunferências vermelhas representam os vales das ondas.

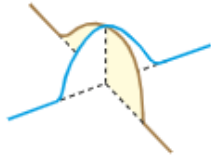


Representação esquemática da interferência de ondas circulares na superfície da água.

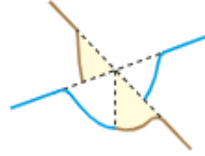
Uma análise mais detalhada do que está acontecendo nos pontos onde ocorre superposição dessas ondas mostra duas situações de grande interesse.

1ª situação:

Nos pontos onde ocorre a superposição de duas cristas ou de dois vales, a amplitude da perturbação resultante é igual à soma das amplitudes individuais dessas ondas. Nesses pontos, está ocorrendo uma **interferência construtiva**.



No local da superposição de duas cristas, ocorre uma interferência construtiva.

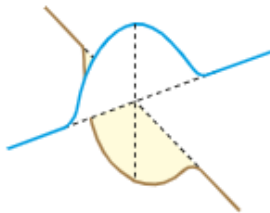


A interferência construtiva também ocorre nos pontos de superposição de dois vales.

Esses locais de interferência construtiva estão representados, na figura da representação esquemática da interferência de ondas circulares, por pequenos círculos cheios (em preto).

2ª situação:

Nos pontos onde uma crista e um vale se superpõem, ocorre interferência destrutiva.



No local de superposição de uma crista e um vale, ocorre interferência destrutiva. Se as amplitudes são iguais, o nível da água normaliza-se, tornando-se igual ao nível de equilíbrio.

Esses locais de interferência destrutiva estão representados na figura da representação esquemática da interferência de ondas circulares por pequenas circunferências (em cinza).

É importante observar que nessa figura os pontos de interferência construtiva (círculos cheios) e os pontos de interferência destrutiva (círculos vazios) pertencem a hipérboles intercaladas, todas de focos coincidentes com as fontes **A** e **B**. As hipérboles determinadas pelos pontos de interferência construtiva são denominadas **linhas ventrais** e as determinadas pelos pontos de interferência destrutiva são denominadas **linhas nodais**. Essas linhas são curvas hiperbólicas porque todos os pontos de uma mesma hipérbole apresentam a mesma diferença de distância em relação às fontes (focos) **A** e **B**.

Quando comparadas com as amplitudes de vibração dos pontos vizinhos, notamos que nas linhas ventrais os pontos vibram com amplitudes máximas,

enquanto nas linhas nodais os pontos não vibram (ou praticamente não vibram).

No segmento **AB**, que liga as duas fontes, observamos a formação de ondas estacionárias. Nos demais locais, formam-se ondas progressivas de amplitude máxima nas linhas ventrais.

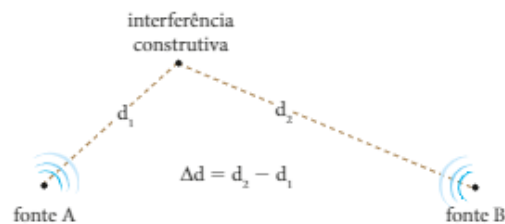
Condição de interferência construtiva

Na figura esquemática da interferência de ondas circulares notamos que, para qualquer ponto ventral (interferência construtiva), a diferença das distâncias entre um ponto e as fontes é nula ou um múltiplo par de meios comprimentos de onda.

Como exemplos, observe os pontos **P**, **Q** e **R** dessa figura:

- O ponto **P** dista 1λ de **A** e 4λ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é igual a 3λ , ou $\frac{6\lambda}{2}$.
- O ponto **Q** dista $5,5\lambda$ de **A** e $1,5\lambda$ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é igual a 4λ , ou $\frac{8\lambda}{2}$.
- O ponto **R** dista 3λ de **A** e 3λ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é zero.

Portanto, na interferência de ondas geradas por fontes coerentes (mesma frequência e em concordância de fase), para que um ponto pertença a uma linha ventral, isto é, para que nesse ponto as ondas interfiram construtivamente, a diferença entre as distâncias desse ponto às fontes deve ser nula ou um número par de meios comprimentos de onda:



$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad \text{em que } N = 0, 2, 4, 6, \dots$$

Caso as fontes estejam em **oposição de fase**, situação em que uma fonte gera um vale enquanto a outra gera uma crista, a condição muda para **N** igual a um número ímpar de meios comprimentos de onda:

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad \text{em que } N = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Condição de interferência destrutiva

Voltando à figura esquemática de interferência de ondas circulares (página 143), notamos que, para qualquer ponto nodal (interferência destrutiva), a diferença das distâncias de um ponto à fonte **A** e desse mesmo ponto à fonte **B** é um número ímpar de meios comprimentos de onda.

Como exemplos, consideremos os pontos **S**, **T** e **U** dessa figura:

- O ponto **S** dista 2λ de **A** e $4,5\lambda$ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é igual a $2,5\lambda$, ou $\frac{5\lambda}{2}$.
- O ponto **T** dista $3,5\lambda$ de **A** e 2λ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é igual a $1,5\lambda$, ou $\frac{3\lambda}{2}$.
- O ponto **U** dista 3λ de **A** e $2,5\lambda$ de **B**. Assim, a diferença entre essas distâncias é igual a $0,5\lambda$, ou $\frac{1\lambda}{2}$.

Portanto, na interferência de ondas geradas por fontes coerentes (mesma frequência e em concordância de fase), para que um ponto pertença a uma linha

nodal, isto é, para que nesse ponto as ondas interfiram destrutivamente, é preciso que a diferença entre as distâncias desse ponto às fontes seja um número ímpar de meios comprimentos de onda:



$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad \text{em que } N = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Caso as fontes estejam em **oposição de fase**, a condição muda para **N** nulo ou igual a um número par de meios comprimentos de onda:

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad \text{em que } N = 0, 2, 4, 6, \dots$$

AMPLIANDO O OLHAR

Forno de micro-ondas

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequência entre a faixa de frequências de ondas curtas de rádio e a de radiação infravermelha. Essas ondas se propagam pelo espaço devido às oscilações de campos elétricos e campos magnéticos. Nos aparelhos que utilizam as micro-ondas para o aquecimento de alimentos, os fornos domésticos, a frequência das ondas utilizadas está na faixa de 2,45 GHz.

Nos alimentos encontramos quase sempre moléculas de água, de açúcares e de gorduras, que são polares, isto é, apresentam carga positiva em uma extremidade e negativa na outra. As micro-ondas produzem ressonância nessas partículas, fazendo-as vibrar ao se alinharem com campo elétrico. Esse campo oscila e faz as referidas partículas acompanharem essas oscilações. Nesse movimento das moléculas ocorre uma espécie de atrito entre elas e entre elas e as demais partículas que não vibram (não polares). O atrito produz calor que irá aquecer os alimentos.

O aquecimento ocorre praticamente em quase toda a porção e essas ondas podem penetrar até 8 cm dependendo da textura do alimento, sendo que as partículas mais internas são aquecidas por condução do calor gerado na parte mais externa.

As paredes internas do forno são metálicas; refletem as micro-ondas e acabam produzindo uma onda estacionária com nós e ventres. Nos ventres temos maior concentração de energia e nos nós, pouca energia. Para evitar que partes dos alimentos queimem e outras partes fiquem cruas, utiliza-se o prato giratório. Cada ponto do alimento passa por locais de interferência construtiva e interferência destrutiva, sequencialmente, produzindo um cozimento mais uniforme.

Vasilhas metálicas não devem ser usadas, pois as micro-ondas refletem em sua superfície. Se essas vasilhas apresentarem pontas, podem ocorrer descargas elétricas através dessas regiões, sendo visíveis as faíscas.



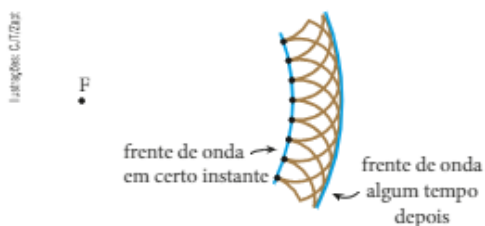
Forno de micro-ondas.

18. PRINCÍPIO DE HUYGENS

Christiaan Huygens (1629-1695), físico e astrônomo holandês, publicou, em 1690, a obra *Tratado da luz*, em que formula a teoria ondulatória para a luz. Suas ideias contrariavam a teoria corpuscular, aceita pela comunidade científica da época e defendida por Isaac Newton.

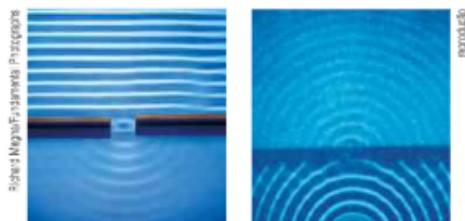
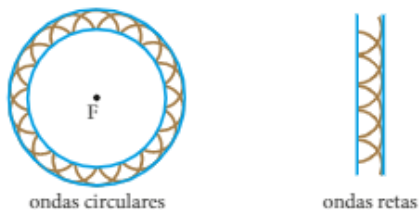
Huygens propôs, em seu *Tratado da luz*, um método de construção gráfica de frentes de onda que ficou conhecido como **Princípio de Huygens**. Segundo esse princípio:

Cada ponto de uma frente de onda comporta-se como uma nova fonte de ondas elementares, que se propagam para além da região já atingida pela onda original e com a mesma frequência que ela.



Em um instante considerado, cada ponto da frente de onda, representado por uma bolinha preta, comporta-se como fonte das ondas elementares de Huygens. Passado algum tempo, a frente de onda envolve as ondas elementares.

Podemos observar que, em meios homogêneos e isotrópicos, a frente de onda desloca-se mantendo sua forma geométrica. Portanto, uma frente circular continua circular, uma frente reta continua reta, uma frente esférica continua esférica, e assim por diante, desde que não haja obstáculos que afetem a propagação.



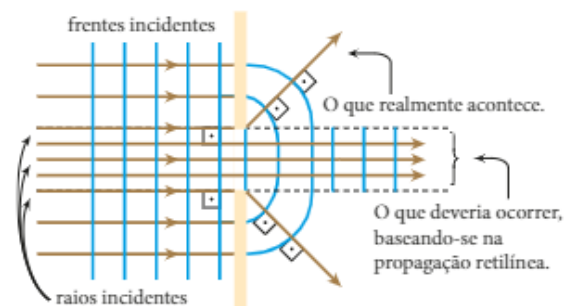
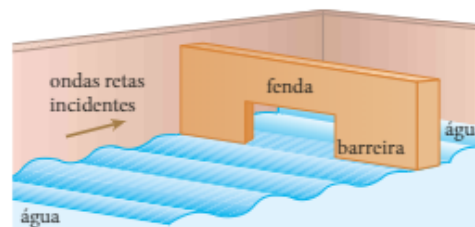
As fotografias mostram as ondas elementares de Huygens na superfície da água. Note que elas são circulares, independentemente de as ondas originais também o serem ou não.

19. DIFRAÇÃO

A difração é um fenômeno ondulatório que só pode ser explicado utilizando-se o **Princípio de Huygens**.

Chama-se **difração** de uma onda o encurvamento sofrido por seus raios quando a onda encontra obstáculos à sua propagação. O fenômeno da difração prova ser incorreta a generalização de que os raios de onda são retilíneos (ainda que em meios homogêneos e isotrópicos).

Como ilustração, considere um exemplo bastante simples: um trem de ondas retas propagando-se na superfície da água e atingindo uma barreira onde existe uma fenda.



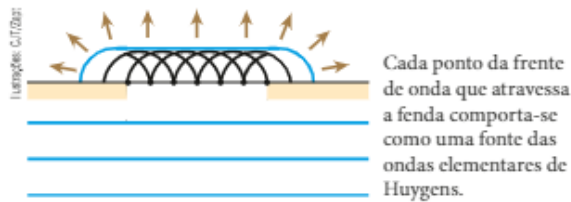
Esquema da difração de ondas retas que se propagam na superfície da água.

Note que a parte da frente de onda que incide na barreira é refletida, mas a parte que atinge a fenda passa por ela.

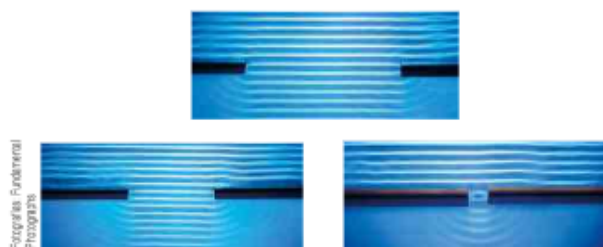
Se a propagação das ondas ocorresse sempre em linha reta, elas continuariam retas após atravessar a fenda, e observaríamos apenas uma faixa de largura igual à da fenda. No entanto, podemos notar que, nas bordas da fenda, as ondas sofrem um desvio. Esse desvio é observado quando a largura da fenda é da ordem do comprimento de onda das ondas incidentes.

A rigor, a difração de uma onda em fendas sempre ocorre. Entretanto, o desvio torna-se tanto mais acentuado quanto menor é a largura da fenda.

Particularmente no caso em que as dimensões da largura são bem inferiores às do comprimento de onda, as ondas difratadas tornam-se aproximadamente circulares, mesmo que as ondas incidentes não o sejam.

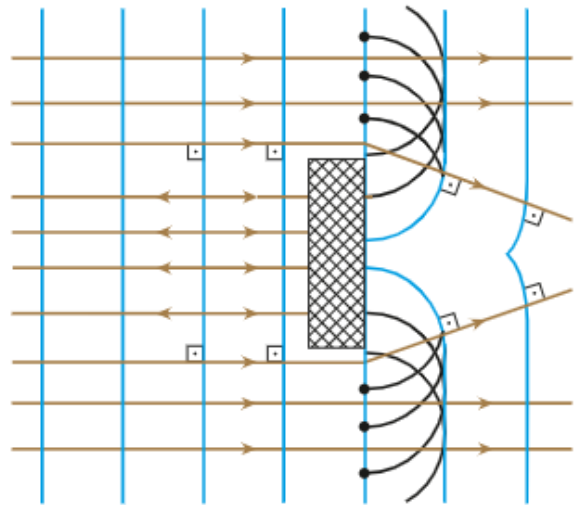


Observe, na sequência de fotografias feitas com ondas retas na superfície da água, que a diminuição da largura da fenda acentua o fenômeno da difração.



Fotografias mostrando a difração.

Se, em vez de uma fenda, essas ondas encontrassem um obstáculo, continuaríamos tendo difração. Nesse caso, as ondas se desviariam, contornando o obstáculo.

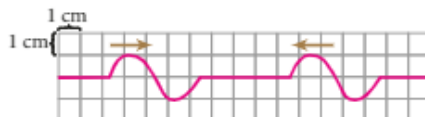


A difração intensifica-se quando as dimensões da fenda ou do obstáculo são inferiores às do comprimento da onda ou pelo menos da mesma ordem de grandeza.

QUESTÕES COMENTADAS



32 No esquema abaixo, observamos duas ondas de mesmo comprimento de onda e mesma amplitude, que se propagam numa mesma corda homogênea em sentidos opostos:

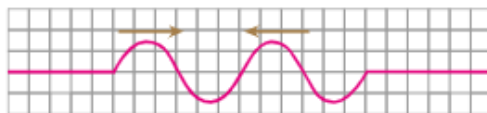


Sabendo que a situação indicada ocorreu no instante $t = 0$ s e que a velocidade das ondas é igual a 1 cm/s, determine o perfil da corda nos instantes:

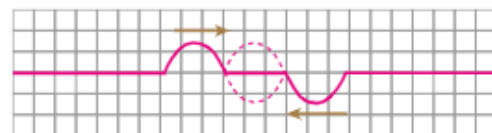
- a) $t_1 = 2$ s; b) $t_2 = 3$ s; c) $t_3 = 4$ s; d) $t_4 = 7$ s.

RESOLUÇÃO

a) Até o instante $t_1 = 2$ s, as ondas deslocam-se 2 cm cada uma, no sentido de suas propagações:

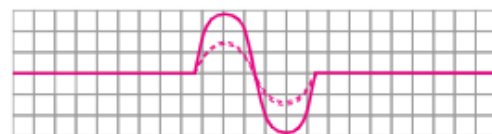


b) Do instante $t_1 = 2$ s até $t_2 = 3$ s, as ondas avançam mais 1 cm cada uma. Então, temos a seguinte configuração:

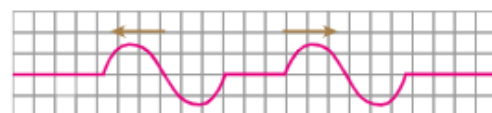


Note que na parte central da corda houve uma interferência destrutiva.

c) No instante $t_3 = 4$ s, as ondas se superpõem em concordância de fase, ocorrendo uma interferência construtiva:

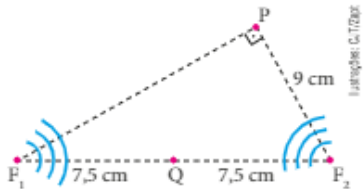


d) De $t_3 = 4$ s até $t_4 = 7$ s, as ondas percorrem mais 3 cm. Temos, então, o seguinte perfil na corda:



Resposta: Ver gráficos.

33 Numa cuba de ondas de profundidade constante, dois estiletes funcionam como fontes de ondas circulares, vibrando em fase com frequência de 5 Hz. Sabendo que a velocidade dessas ondas na superfície da água é de 10 cm/s, determine o tipo de interferência que ocorre nos pontos **P** e **Q** da figura.



RESOLUÇÃO

Ponto **Q**: Como o ponto **Q** está a igual distância das fontes e estas vibram em fase, a interferência nesse local é **construtiva**, pois $\Delta d = 0$. E sendo $\Delta d = N \frac{\lambda}{2}$, temos $N = 0$.

Para $N = 0, 2, 4, 6, 8, \dots$, teremos interferência construtiva (IC) e para $N = 1, 3, 5, 7, \dots$, teremos interferência destrutiva (ID), caso as fontes estejam em concordância de fase (se estiverem em oposição, as condições se invertem).

Ponto **P**: Para o ponto **P**, temos $PF_2 = 9$ cm e PF_1 pode ser calculado pelo Teorema de Pitágoras, já que o triângulo F_1PF_2 é retângulo.

$$(F_1F_2)^2 = (PF_1)^2 + (PF_2)^2$$

$$15^2 = (PF_1)^2 + 9^2 \Rightarrow (PF_1)^2 = 225 - 81 = 144 \Rightarrow PF_1 = 12 \text{ cm}$$

$$\text{Assim: } \Delta d = PF_1 - PF_2 = 12 - 9 \Rightarrow \Delta d = 3 \text{ cm}$$

$$\text{Da relação } \Delta d = N \frac{\lambda}{2}, \text{ sendo } \lambda = \frac{v}{f} = \frac{10 \text{ cm/s}}{5 \text{ Hz}} = 2 \text{ cm,}$$

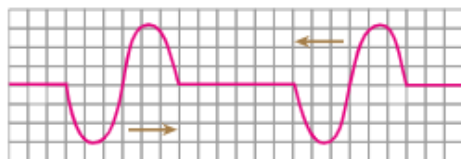
$$\text{temos: } 3 = N \cdot \frac{2}{2} \Rightarrow N = 3$$

Portanto, em **P** a interferência é destrutiva.

Resposta: Em **Q**: construtiva; em **P**: destrutiva.

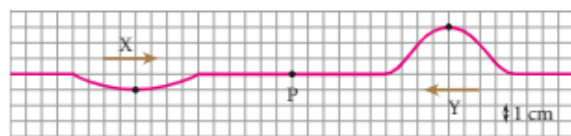
QUESTÕES PROPOSTAS FAÇA NO CADERNO.

34. A figura a seguir mostra, em um certo instante, duas ondas que se propagam numa corda longa, com o mesmo período $T = 4$ s.



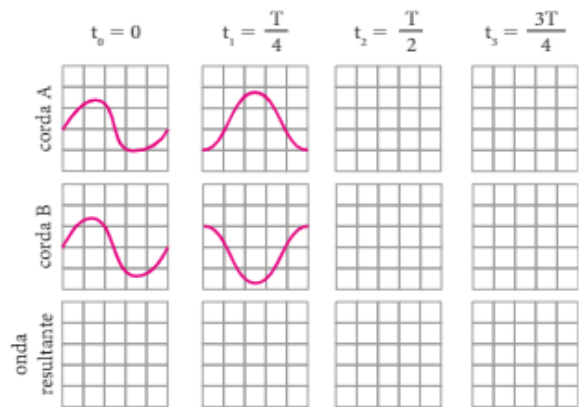
Qual será a forma da onda resultante três segundos após o instante mostrado acima?

35. Dois pulsos, **X** e **Y**, propagam-se ao longo de um fio homogêneo, como indicado na figura a seguir:



Quando os pulsos estiverem exatamente superpostos, qual será a amplitude do pulso resultante no ponto **P**?

36. Duas ondas harmônicas, de mesma frequência e igual comprimento de onda, propagam-se em duas cordas idênticas. Os esquemas representam o perfil de um mesmo trecho das cordas nos instantes $t_0 = 0$ e $t_1 = \frac{T}{4}$, em que T é o período das ondas:



Determine:

- o sentido de propagação das ondas, em cada corda;
- o perfil das cordas nos instantes $t_2 = \frac{T}{2}$ e $t_3 = \frac{3T}{4}$;
- o perfil de uma única corda, nos instantes considerados, supondo que as ondas se superpõem, ocorrendo interferência entre elas.

37. Um afinador de pianos, ao realizar seu trabalho, vale-se de diapasões que emitem sons de frequências-padrão. Para afinar certa nota, após acioná-la, ele percute o diapasão correspondente e ouve os dois sons. A afinação da nota será considerada finda quando o afinador não observar entre os sons do piano e do diapasão:

- interferência.
- polarização.
- batimentos.
- ressonância.
- reflexão.

38. Em uma corda vibrante, é possível observar ondas estacionárias. Elas se formam devido aos fenômenos de:

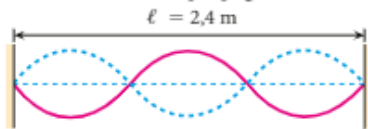
- a) reflexão e refração. d) reflexão e interferência.
b) dispersão e reflexão. e) interferência e polarização.
c) refração e polarização.

39. Uma onda estacionária é estabelecida numa corda, de modo a formar três ventres e quatro nós, como está esquematizado na figura:

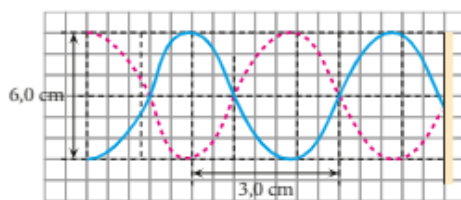


Sabendo que a distância entre os nós extremos é de 1,5 m e a velocidade da onda é de 10 m/s, determine a frequência dessa onda.

40. Uma corda de comprimento $\ell = 2,4$ m vibra com frequência de 300 Hz no estado estacionário representado na figura. Qual é a velocidade de propagação da onda na corda?



41. O esquema a seguir, fora de escala, representa a configuração estacionária formada numa corda elástica, que tem uma extremidade fixa e outra vibrante:



A respeito da onda estacionária formada na corda, aponte a alternativa verdadeira:

- a) Embora sua velocidade de propagação seja nula, transporta energia.
b) Sua amplitude vale 6,0 cm.
c) Seu comprimento de onda vale 3,0 cm.
d) A distância entre dois de seus nós pode ser de 6,0 cm.
e) A distância entre dois de seus ventres é de 4,0 cm.

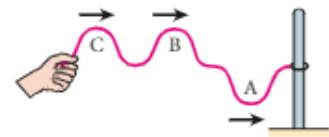
42. Um sistema físico que vibra por causa da ressonância:

- a) deve vibrar com sua máxima amplitude possível.
b) deve vibrar com uma frequência maior que sua frequência natural.
c) deve receber energia de uma onda que tem frequência igual à sua frequência natural de vibração.
d) deve ser feito do mesmo material que a fonte emissora de ondas.
e) deve ter tamanho menor que o comprimento de onda emitido pela fonte de vibração.

43. Durante uma aula de ondulatória, o professor de Física levou a classe para o pátio da escola. Utilizando uma corda e uma mola, mostrou aos alunos ondas que se propagavam ao longo desses dispositivos. Em um dos experimentos, o mestre fixou uma das extremidades da corda em um anel que foi encaixado, com folga, em um pequeno poste fixo ao chão e, com movimentos verticais, produziu na outra três pulsos transversais que se propagaram para a direita. Veja a situação representada na figura a seguir.

A partir do instante visualizado, até que ocorra a reflexão total do último pulso, ocorrerão, sequencialmente:

- a) duas interferências construtivas.
b) duas interferências construtivas e uma destrutiva.
c) uma interferência destrutiva, uma construtiva e outra destrutiva.
d) duas interferências destrutivas.
e) duas interferências destrutivas e uma construtiva.



DESCUBRA MAIS

ATENÇÃO!

Não realize este experimento: perigo de queimaduras.

- Se uma porção de água for colocada (em recipiente não metálico) no interior de um forno de micro-ondas por alguns minutos para aquecer, ao ser retirada, a agitação do recipiente poderá desencadear uma reação violenta, provocando uma "explosão" de massa líquida (nunca agite um vasilhame com líquido que você acabou de aquecer no forno de micro-ondas: perigo de queimaduras graves!). Como você explica essa "explosão" da água? Quais são as condições para que isso ocorra? Por que o recipiente não pode ser metálico?
- Nos fornos de micro-ondas antigos, não existia o prato giratório, porém, nos mais novos, encontramos esse dispositivo. Esse prato giratório é realmente necessário? Ele proporciona alguma vantagem para o usuário?
- O aquecimento dos alimentos utilizando as micro-ondas pode fazer mal à saúde?

Férias, praia... Cuidado com o sol

Imagine a Terra sem o Sol. A grande maioria dos seres vivos que hoje conhecemos não existiria. A superfície de nosso planeta seria sempre escura (sempre noite), coberta de gelo em sua maior parte e árida e desértica no restante. Apesar da atmosfera, a temperatura permaneceria próxima de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, muito baixa.

A radiação solar produziu um grande “milagre”, tornou nosso planeta habitável por belas e variadas espécies animais e vegetais. A Terra é aquecida por essa radiação e a energia emitida por sua superfície é retida, em parte, pela atmosfera, ocorrendo assim o chamado efeito estufa, que mantém as temperaturas mínima e máxima dentro de um intervalo razoável para o desenvolvimento da vida no planeta.

Essa radiação solar que atinge a superfície da Terra, em média 300 W/m^2 , é constituída de uma parte visível, denominada luz branca, que ao ser decomposta apresenta as radiações vermelha, alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta. A principal diferença entre elas é a frequência, que varia de $4,5 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$ a $7,5 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$, aproximadamente. O vermelho é composto de radiações de menores frequências (por volta de $4,5 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$) e comprimentos de onda maiores (por volta de $7 \cdot 10^{-7}\text{ m}$). Ao subirmos na escala de cores vamos encontrando radiações com frequências cada vez maiores. O violeta possui as maiores frequências (por volta de $7,5 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$) e os menores comprimentos de onda (por volta de $4 \cdot 10^{-7}\text{ m}$).

Na parcela invisível encontramos, na parte inferior do espectro, as radiações infravermelhas, com frequências menores que a da vermelha. Essas radiações, que não conseguimos enxergar, ao serem absorvidas são as que mais se transformam em energia térmica, aquecendo os corpos. Nas aplicações práticas do infravermelho vamos encontrar o controle remoto dos aparelhos eletrônicos, que se comunicam utilizando essas radiações. No famoso *bluetooth* – a troca de informações entre dois ou mais celulares – também é utilizado o infravermelho. Na Medicina essas radiações são usadas para a reconstituição de certos músculos do corpo humano – o aquecimento por infravermelho pode provocar a restauração desses tecidos.

Na parte superior do espectro vamos encontrar as radiações ultravioleta, com frequências maiores que as radiações violeta. Essas radiações, chamadas de UV (ultravioleta), possuem frequências maiores que $7,5 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$. Tomando como referência os efeitos sobre a saúde humana e o meio ambiente, elas são divididas em três faixas denominadas: UVA (com frequências em torno de $8,3 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$), UVB (em torno de $1,0 \cdot 10^{15}\text{ Hz}$) e UVC (em torno de $1,9 \cdot 10^{15}\text{ Hz}$). É importante notar que esses valores de frequências e comprimentos de ondas são valores médios, ou seja, cada radiação citada corresponde, na verdade, a uma faixa.



Nascer do sol na praia do Vilarejo de Joanes. Ilha de Marajó (PA). Novembro de 2015.

As radiações UVA, de menores frequências e maiores comprimentos de onda, representam quase 99% das radiações ultravioleta que atingem a Terra. Esse tipo de onda possui intensidade praticamente constante durante todo o ano e penetra profundamente na pele, sendo o principal responsável pelo fotoenvelhecimento e pelas fotoalergias e, ainda, predispõe a pele ao câncer. A radiação UVB atinge a superfície de nosso planeta com maior intensidade no verão e entre as 10 horas e as 16 horas. Sua penetração na pele é apenas superficial e ela pode causar as "queimaduras" que tanto incomodam os banhistas nas praias. Essas radiações também provocam alterações celulares, predispondo ao câncer de pele. Assim, cuidado, pois no inverno a incidência de UVB é muito pequena, mas a UVA continua agredindo sua pele da mesma forma que no verão.



O uso de protetor solar pode prevenir "queimaduras" causadas por exposição aos raios solares.

As radiações UVC, de maiores frequências e menores comprimentos de onda, praticamente não atingem a superfície da Terra, já que são absorvidas por nossa atmosfera e pelo ozônio (O_3) existente na capa protetora que envolve nosso planeta. Essa camada de ozônio também retém parte da UVA e da UVB. O uso indiscriminado de aerossóis à base de clorofluorcarboneto (CFC), substâncias que também fazem parte dos gases utilizados em geladeiras antigas e aparelhos de ar-condicionado, agride o ozônio transformando-o em O_2 e diminuindo a retenção dos raios UV, que podem destruir a vida no planeta se chegarem com 100% de sua intensidade. No bronzeamento artificial, a radiação UVA é emitida com intensidade até 10 vezes maior do que a recebida por meio dos raios solares. Como o efeito da radiação UV é cumulativo, frequentes exposições podem, no futuro, produzir resultados danosos a nosso organismo.



Pessoa em máquina de bronzeamento artificial.

Compreensão, pesquisa e debate

1. Nosso planeta é protegido dos raios ultravioleta pela capa de ozônio (O_3) que envolve a Terra. Pesquise e descubra se estamos mesmo bem protegidos.
2. Quais os cuidados que todos devemos tomar para evitar a destruição da camada de ozônio que envolve a Terra?
3. Pesquise e descubra como as células de nossa pele envelhecem mais rapidamente quando ficam expostas à radiação ultravioleta.
4. Pesquise também o processo biológico da transformação de uma célula saudável em uma célula cancerígena pelo excesso de UV.
5. O uso de óculos escuros de baixa qualidade pode fazer o usuário se arriscar mais na exposição às radiações UV. Assim, é melhor não usar esses óculos. Como os óculos escuros de baixa qualidade podem facilitar que os raios UV provoquem danos irreparáveis em nossa visão?
6. Descubra como é o tecido da retina de nossos olhos e como a radiação UV pode afetá-lo.



ACÚSTICA

1. INTRODUÇÃO

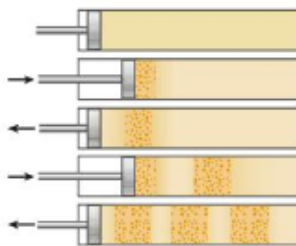
Prosseguindo em nossos estudos de **Ondulatória**, abordaremos agora outro assunto de grande importância prática: a **Acústica**.

Em Acústica, estudamos as fontes das ondas sonoras, os receptores de ondas sonoras – como nossas orelhas, por exemplo – e os fenômenos ondulatórios que podem ocorrer durante a propagação dessas ondas. Recordemos que as ondas sonoras são ondas mecânicas e que, quando se propagam em meios fluidos – como o ar, por exemplo –, também são longitudinais.

Entre as **fontes sonoras**, além de nosso aparelho fonador, merecem destaque as cordas, as colunas de ar e as membranas vibrantes, especialmente por serem usadas na maioria dos instrumentos musicais.

Ao fazer uma fonte sonora vibrar, ela também faz vibrar o meio em que se encontra, em geral, o ar; assim acontece a emissão do som.

Como modelo de produção e propagação de ondas sonoras, podemos pensar em um êmbolo que gera compressões e rarefações no ar do interior de um tubo cilíndrico, como ilustra a figura a seguir.



Suponhamos que o êmbolo seja posto a oscilar periodicamente. Quando se desloca para a direita, ele gera uma compressão no ar interno ao tubo. Essa compressão, então, se propaga. Em seguida, o êmbolo volta à posição inicial. Durante essa volta, ele gera uma rarefação, que também se propaga.

Logo após, mais uma compressão é produzida, depois outra rarefação, e assim por diante.

Gera-se assim, no ar interno ao tubo, uma onda periódica de comprimento de onda λ e que consiste de compressões e rarefações que se propagam.

Essas compressões e rarefações propagam-se de maneira análoga às ondas longitudinais em molas, assunto visto no capítulo anterior. É importante destacar, porém, que as ondas sonoras geralmente se propagam em três dimensões pelo espaço. São, portanto, ondas tridimensionais, como representa a figura a seguir, em que a fonte sonora representada é um alto-falante.

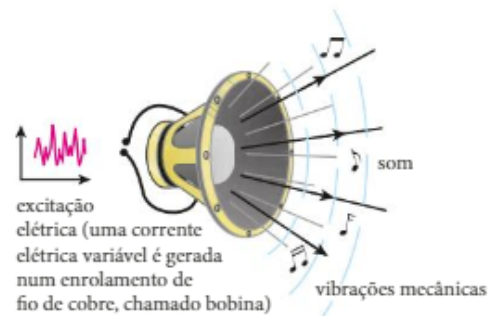


Ilustração: CBT/Dez

Nesse dispositivo, um diafragma (cone) é posto a vibrar e produz compressões e rarefações que se propagam, constituindo as ondas sonoras emitidas. Quando ouvimos uma música em um alto-falante, por exemplo, o cone do aparelho vibra simultaneamente em várias frequências, sendo o som emitido por ele também constituído por essas várias frequências.

Cada corda de um instrumento musical é outro bom exemplo de fonte sonora. Quando fazemos uma corda vibrar, ela o faz simultaneamente em diversas frequências, que são as mesmas do som que ela emite.



Thomson/Getty Images

Violino sendo executado.

Em instrumentos de sopro, o som produzido na embocadura – região em que o músico sopra – é composto de muitas frequências diferentes. Entretanto, só sons de determinadas frequências fazem vibrar intensamente a coluna de ar interna ao instrumento. Essa coluna de ar emite, então, para o ar externo ao instrumento, um som também constituído por essas frequências.

Músico tocando saxofone.



O som emitido por membranas vibrantes também é composto de várias frequências.



Instrumento que produz som ao ser percutido.

Entre os fenômenos ondulatórios que podem ocorrer com as ondas sonoras, destacamos a **reflexão**, a **refração**, a **interferência**, a **ressonância**, a **difração** e o **efeito Doppler**.

Vamos abordar esses fenômenos por meio de situações em que as ondas envolvidas são ondas sonoras (com exceção do efeito Doppler, os demais já foram apresentados no capítulo anterior).

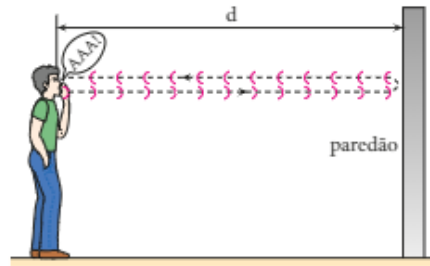
Reflexão

Quando ondas sonoras incidem em um paredão, por exemplo, elas sofrem **reflexão** segundo as mesmas leis válidas para os outros tipos de onda.

Como acontece com qualquer onda, o som refletido também tem a mesma **velocidade** de propagação (em módulo), a mesma **frequência** e o mesmo **comprimento de onda** que o som incidente.

A reverberação e o eco são decorrências da reflexão do som e da persistência acústica. A persistência acústica é o intervalo de tempo durante o qual continuamos a ter a sensação sonora de um som que recebemos, mas que já se extinguiu, e vale cerca de 0,1 s.

Observe a ilustração a seguir, em que uma pessoa emite um som diante de um paredão e recebe o som refletido por ele. Essa pessoa ouve dois sons: o **som direto**, no momento em que ele é emitido, e, algum tempo depois, o **som refletido** pelo paredão.



Se v o módulo da velocidade de propagação do som no ar, o som refletido chegará à pessoa após um intervalo de tempo Δt , tal que:

$$v = \frac{2d}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{2d}{v}$$

Se esse intervalo de tempo for a 0,1 s, o som refletido chegará à pessoa quando ela ainda estiver com a sensação do som direto. A pessoa perceberá, então, um prolongamento do som direto, que é denominado **reverberação**. Entretanto, se o intervalo de tempo for superior a 0,1 s, o som refletido chegará depois de cessada a sensação do som direto. Assim, o som refletido será percebido separado do som direto, fenômeno que recebe o nome de **eco**.

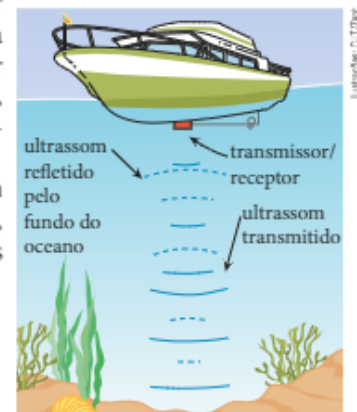


A ilustração representa dois bons refletores de som parabólicos, com cerca de 2 m de diâmetro cada um. Se uma pessoa falar naturalmente nas proximidades do foco F_1 , outra pessoa no foco F_2 a ouvirá perfeitamente, mesmo que a distância entre os refletores seja grande, como 50 m, por exemplo.

Sonar e radar

O sonar instalado num barco emite ultrassom dirigido para o fundo do mar. O ultrassom refletido é recebido pelo sonar, que determina a que distância dele está o corpo refletor, a partir do tempo de ida e volta do sinal. Assim, o sonar permite determinar a profundidade do mar e localizar objetos, submarinos e cardumes, por exemplo.

O radar também usa esse princípio, mas opera com ondas eletromagnéticas.



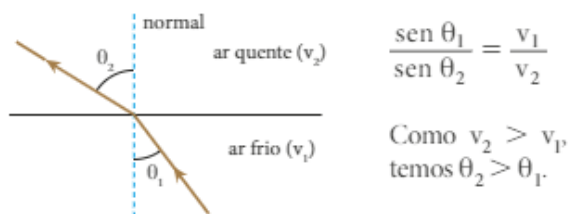
Representação de barco equipado com sonar.

Refração

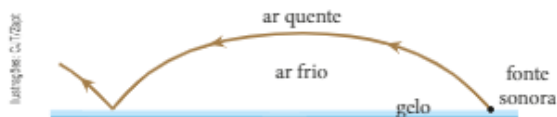
A **refração** das ondas sonoras ocorre quando elas atravessam a fronteira entre dois meios, sempre com alteração do módulo da velocidade de propagação. Uma pessoa totalmente imersa na água de uma piscina, por exemplo, ouve sons produzidos fora da água graças à refração. A refração sonora também ocorre de acordo com as mesmas leis estudadas para outras ondas e sem alteração da frequência.

Ar frio, ar quente e a refração do som

A velocidade do som no ar quente é **maior** do que no ar frio. Por isso, um raio de onda sonora que se propaga no ar frio afasta-se da normal quando se refrata ao incidir obliquamente no ar quente, como está representado no modelo a seguir:



A figura a seguir representa uma fonte sonora nas proximidades da superfície de um lago congelado, onde o ar está muito frio. Dessa região para cima, a temperatura aumenta. Se imaginarmos que o ar, acima do lago, é constituído de finas camadas a temperaturas crescentes com a altitude, o raio de onda sonora representado parte da fonte e vai se afastando da normal, retornando à superfície. Na superfície, o raio reflete-se, e o processo continua.



É por esse motivo que as ondas sonoras podem percorrer grandes distâncias nas proximidades da superfície de um lago congelado.

Interferência

A **interferência** de ondas sonoras também é o resultado da superposição dessas ondas.

Em razão da interferência sonora ocorre a formação de ondas estacionárias em colunas de ar internas aos instrumentos de sopro, que definem as frequências dos sons emitidos por eles.

A interferência sonora ainda possibilita medir o comprimento de onda λ de um som puro, isto é, de um som em que as vibrações tenham uma única frequência.

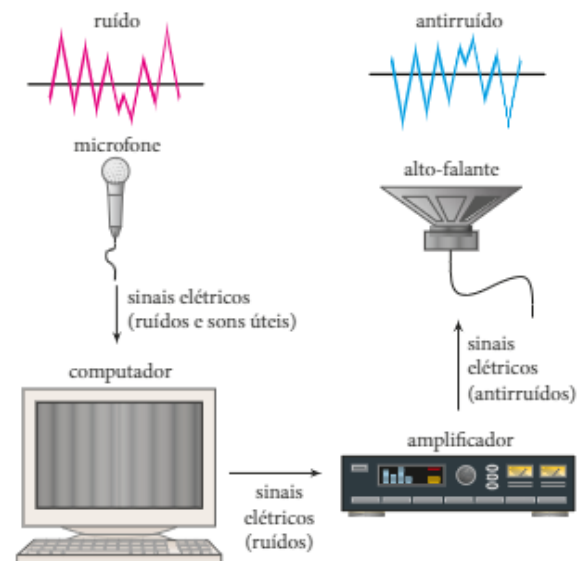
Com base nessa medição e conhecendo-se a frequência f desse som, podemos determinar sua velocidade de propagação v usando a expressão $v = \lambda f$.

Os batimentos sonoros também decorrem da interferência de ondas sonoras de frequências próximas (f_1 e f_2) e só podem ser percebidos claramente por nosso aparelho auditivo se a frequência f_{bat} desses batimentos não ultrapassar 7 Hz ($f_{\text{bat}} = f_2 - f_1$, sendo f_2 maior que f_1). Eles podem ser percebidos, por exemplo, acionando-se simultaneamente duas teclas adjacentes de um piano que correspondam a notas de mais baixas frequências, ou seja, a sons mais graves.

Ruídos incomodando

Os sons agradáveis, também conhecidos por sons musicais, são aqueles constituídos de vibrações **periódicas**. Caso contrário, o som é chamado ruído.

A interferência de ondas sonoras vem sendo usada cada vez mais para reduzir o nível de ruído de ambientes. Basicamente o processo é o seguinte: um microfone capta os sons úteis e os ruídos produzidos em determinado ambiente e gera sinais elétricos correspondentes aos sons e aos ruídos.



Esses sinais são levados a um computador, que os analisa, separando aqueles que correspondem aos ruídos e enviando-os a um amplificador. O amplificador, por sua vez, inverte a fase dos sinais recebidos e os amplifica. Os sinais invertidos e amplificados são levados a um alto-falante, que então emite os antirruídos no ambiente. A interferência dos ruídos com os antirruídos acarreta um significativo cancelamento dos ruídos.

Esse recurso é bastante útil em cabines de aviões, automóveis e ventiladores, por exemplo.

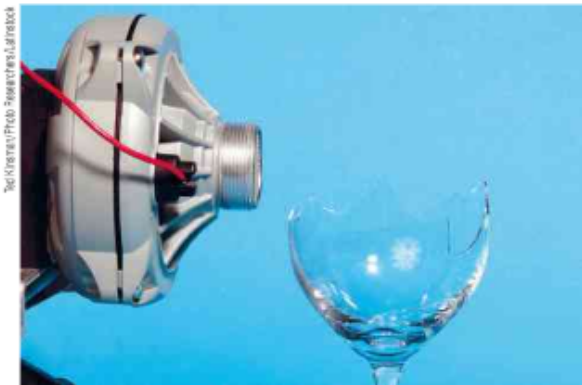
Ressonância

A **ressonância** sonora pode ser constatada com o uso de um diapasão, que é uma peça metálica em forma de U acoplada a uma caixa oca de madeira, que tem uma face lateral aberta (caixa de ressonância). Batendo-se na peça metálica, o diapasão vibra, emitindo uma onda sonora pura (única frequência) que costuma ser utilizada como padrão de frequência para a afinação de instrumentos.

A montagem descrita a seguir permite a constatação do fenômeno da ressonância.



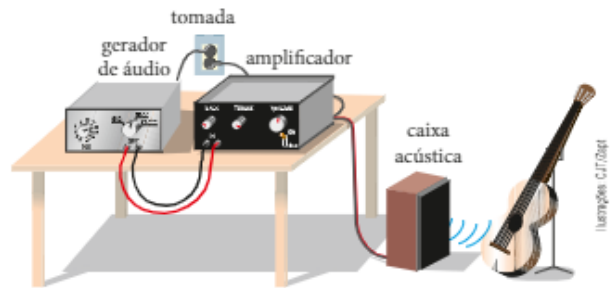
Na figura, A e B são diapasões idênticos. Batendo-se apenas no diapasão A, observamos que o diapasão B também vibra. Isso ocorre porque B é excitado pelas ondas sonoras provenientes de A, cuja frequência é igual à sua frequência de vibração natural. Esse fenômeno é a ressonância. De modo análogo, se tocarmos a corda de um violão perto de outro, estando ambos com essa corda afinada igualmente, a corda do outro também vibrará (ressonância).



A taça foi excitada continuamente por um som bastante intenso e de frequência adequada. Desse modo, ela entrou em ressonância com o som, passando a vibrar cada vez mais intensamente até se estilhaçar.

O gerador de áudio é um aparelho que contém um circuito capaz de gerar sinais elétricos dentro de uma ampla faixa de frequências. Quando esses sinais são injetados na entrada de um amplificador, cuja saída está ligada a uma caixa acústica, eles produzem sons audíveis (frequências entre 20 Hz e 20 kHz, aproximadamente), infrassons ou ultrassons.

No sistema representado na ilustração a seguir, a caixa acústica está perto de um violão.



Quando se aumenta a frequência do sinal produzido pelo gerador de áudio a partir de zero, observa-se que, para diversas frequências, as cordas do violão começam a vibrar sem que ninguém as tenha tocado. Isso acontece porque, para diversas frequências, as cordas entram em ressonância com o som produzido.

Difração

A **difração** é um fenômeno que ocorre frequente e acentuadamente com as ondas sonoras. Essa acentuação dá-se quando os obstáculos atingidos apresentam dimensões inferiores às do comprimento de onda ou, pelo menos, da mesma ordem de grandeza. E pelo fato de o som ter comprimentos de onda que variam de aproximadamente 17 mm até 17 m, ele encontra grande facilidade para se difratar.

Os sons de frequências mais baixas (sons mais graves), por terem maior comprimento de onda, difratam-se mais que os de frequências mais altas (sons mais agudos). Isso é facilmente notado em uma caixa acústica, já que os sons agudos são mais direcionais que os graves. Por isso, uma pessoa bem afastada lateralmente em relação à caixa ouve muito melhor os graves que os agudos.



Um observador em O, embora não veja o automóvel em A, consegue ouvir muito bem o ruído produzido por ele. Note na figura, em linhas tracejadas, as ondas elementares de Huygens justificando a difração.

Efeito Doppler

Quando, em uma corrida, um carro se aproxima e depois se afasta, a plateia ouve seus ruídos respectivamente mais agudos e mais graves do que se o veículo estivesse parado. Isso é um exemplo do **efeito Doppler**, que também pode ser percebido quando assistimos a uma corrida pela televisão.

FAÇA VOCÊ MESMO

Ressonância entre pêndulos

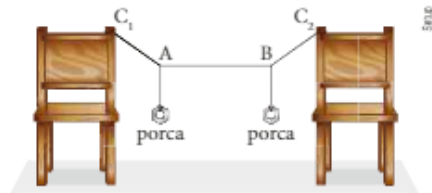
Nesta atividade, vamos montar um aparato que permite investigar um dos fenômenos ondulatórios apresentados anteriormente.

Material necessário

- 2 cadeiras;
- 3 metros de linha para pipa;
- 2 porcas para parafuso de $\frac{1}{2}$ polegada (esse material pode ser substituído por duas borrachas escolares);
- 1 fita métrica ou uma régua;
- 1 clipe metálico grande de aproximadamente 6 cm de comprimento.

Procedimento

- Posicione uma cadeira ao lado da outra para montar o sistema ilustrado na figura ao lado.
- Corte um pedaço de linha com cerca de 1 metro de comprimento e amarre suas pontas nas cadeiras, em C_1 e C_2 . Corte dois pedaços de linha com aproximadamente 40 cm cada e amarre uma das extremidades de cada um deles em uma porca e a outra nos pontos A e B da linha já suspensa entre C_1 e C_2 . Só consolide os nós após confirmar que os trechos verticais de linha estão com o **mesmo comprimento** (uns 20 cm, por exemplo).
- Com a montagem pronta e as porcas em repouso, faça o que se pede:
 - Desloque uma das porcas em sua direção e solte-a, de modo que o pêndulo porca/pedaço de linha passe a oscilar em um plano perpendicular ao plano da figura. Durante cerca de 1 minuto, observe o comportamento de cada porca e anote o que você perceber.
 - Desloque uma das porcas lateralmente e solte-a para que passe a oscilar no mesmo plano da figura. Durante cerca de 1 minuto, observe o comportamento de cada porca e anote suas impressões.
 - Encaixe o clipe sobre uma das porcas e repita o que foi realizado no item *a*.
 - Bem perto do ponto B, corte a linha em que está presa uma das porcas e retire-a da porca. Corte outro pedaço de linha e suspenda novamente em B a porca que foi removida, mas dobrando o comprimento do novo trecho vertical, que vai ficar com cerca de 40 centímetros. Em seguida, repita o que foi realizado no item *a*.



Analisando o experimento

- Descreva e justifique o que você observou em *a*, em *b* e em *c*. Qual é o nome do fenômeno ocorrido?
- Descreva e justifique o que você observou em *d*.

2. ALTURA DE UM SOM

A **altura** de um som é a sensação de grave ou agudo que ele provoca. Costuma-se dizer que um som de frequência f_1 é mais alto (ou mais agudo) que outro de frequência f_2 se f_1 é maior que f_2 ; e mais baixo (ou mais grave) se f_1 é menor que f_2 .

Não se deve confundir alto e baixo com forte e fraco – esses últimos estão relacionados com a **intensidade** do som, que estudaremos adiante.

Pense, por exemplo, nos sons produzidos por um boi mugindo e por um gato miando. O som emitido pelo boi é mais baixo (mais grave, de menor frequência) que o emitido pelo gato, embora o som do boi normalmente seja mais forte (mais intenso) que o do felino.

Em uma caixa acústica, como a da fotografia, é comum haver três tipos de alto-falantes: o *woofer*, que é o maior e reproduz uma faixa de frequências baixas (sons mais graves); o *tweeter*, que é o menor e reproduz uma faixa de frequências altas (sons mais agudos); e o *mid-range*, que reproduz uma faixa de frequências intermediárias. Os sinais elétricos provenientes do amplificador contêm as três faixas, que passam por um circuito denominado divisor de frequências. Ele separa as três faixas e as distribui aos alto-falantes adequados.



Caixa acústica com três tipos de alto-falantes: *woofer*, *tweeter* e *mid-range*.

3. INTERVALO ACÚSTICO ENTRE DOIS SONS

O intervalo acústico entre dois sons de frequências f_1 e f_2 é o quociente dessas frequências:

$$i = \frac{f_2}{f_1} \quad (f_2 > f_1)$$

Como f_1 e f_2 são medidas na mesma unidade (o hertz, no SI), o intervalo acústico i é uma grandeza adimensional, isto é, um simples número.

Se f_2 for o dobro de f_1 , por exemplo, teremos $i = 2$; dizemos, nesse caso, que o intervalo entre os dois sons é de uma **oitava**.

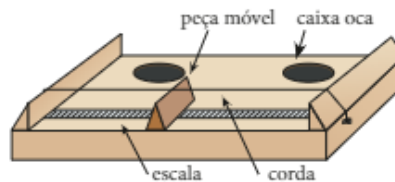
Intervalo acústico	Razão de frequência
Unísono	1 : 1
Oitava	2 : 1
Quinta	3 : 2
Quarta	4 : 3
Terça maior	5 : 4
Terça menor	6 : 5
Sexta maior	5 : 3
Sexta menor	8 : 5
Tom maior (M)	9 : 8
Tom menor (m)	10 : 9
Semitom (s)	16 : 15

AMPLIANDO O OLHAR

Os intervalos acústicos e os matemáticos gregos

A partir do século VI a.C., os matemáticos gregos, discípulos de Pitágoras, observaram que dois sons provocam uma sensação agradável quando a razão entre suas frequências é "simples", isto é, formada de números inteiros e pequenos, como $\frac{3}{4}$, por exemplo. Entretanto, se essa razão for "complexa", como $\frac{137}{171}$, a sensação será desagradável.

Diversos intervalos acústicos foram definidos com o uso de um instrumento conhecido por monocórdio, que tinha, em sua versão mais simples, uma única corda (de tripa) esticada sobre uma caixa oca dotada de aberturas. Uma peça móvel, comprimida pela corda, podia deslizar sobre uma escala graduada construída sobre a caixa, dividindo a corda em duas partes.



Representação esquemática do monocórdio.

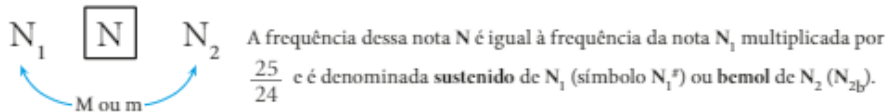
Quando a corda era tangida sem a presença da peça móvel, produzia-se determinado som. Colocando-se essa peça no meio da corda, cada metade dela emitia um som uma **oitava** acima do primeiro. Quando a peça dividia a corda na razão três para dois, os sons emitidos pelas duas partes determinavam o intervalo acústico de uma **quinta**. Do mesmo modo, o monocórdio era usado para observar outros intervalos acústicos.

Escalas musicais

Escala musical é uma sequência de notas musicais dispostas em ordem crescente de frequências convencionais, havendo entre elas intervalos acústicos bem definidos. Chama-se **gama** o conjunto de notas dentro de uma oitava. A gama representada no pentagrama ao lado é denominada **escala natural**. Nessa escala, as gamas se sucedem, mantendo-se as denominações das notas e a sequência de intervalos.

Representação de escala musical natural.

O tom maior e o tom menor são intervalos aproximadamente iguais, porém maiores que o semitom. Assim, na escala natural, entre duas notas N_1 e N_2 , separadas por um tom maior ou menor, pode-se intercalar outra nota N :



Assim, obtemos uma gama constituída de treze notas, que são:

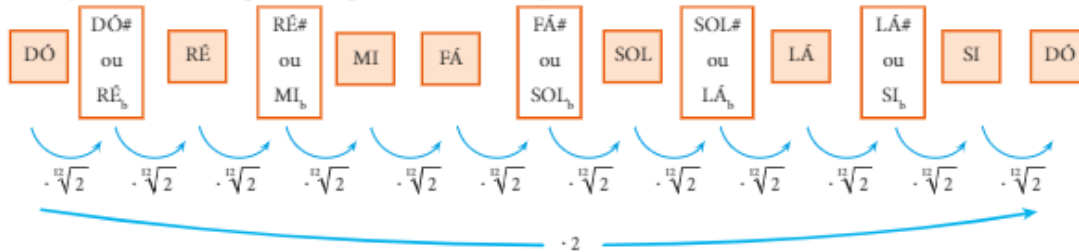


Como essas treze notas estão separadas por intervalos **quase** iguais, foi conveniente a criação de outra escala, denominada **escala temperada**, em que cada gama é constituída de treze notas separadas por doze intervalos realmente iguais. É a escala temperada que se usa, por exemplo, nos pianos e órgãos. Nessa escala, o intervalo entre duas notas consecutivas é igual a $\sqrt[12]{2}$ ($\sqrt[12]{2} \cong 1,05946$).



Num piano ou teclado, as teclas pretas correspondem às notas intermediárias da escala.

Representamos, a seguir, uma gama de escala temperada:



4. INTENSIDADE SONORA

Por ser uma propagação ondulatória, o som é um processo de transporte de energia (no caso, mecânica).

Para garantir uma boa qualidade de audição, é importante, para um ouvinte, a quantidade de energia sonora que o atinge por unidade de área e por unidade de tempo. Por isso, definimos mais uma grandeza – a **intensidade sonora**.

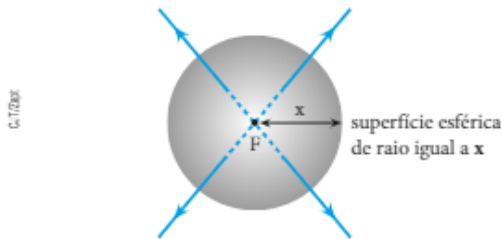
A **intensidade sonora** é a quantidade de energia sonora que atravessa a unidade de área de uma superfície disposta perpendicularmente à direção de propagação, na unidade de tempo. Em outras palavras, é a potência sonora recebida por unidade de área da superfície. No SI, a unidade de medida da intensidade sonora é $\frac{J}{m^2s}$ ou $\frac{W}{m^2}$.

Observe o esquema a seguir, em que 1 e 2 são duas posições que uma pessoa pode escolher para ouvir o som emitido por um alto-falante.



Suponha que a onda sonora se propague sem dissipação de energia. Assim, à medida que essa propagação ocorre, a **mesma** potência emitida pelo alto-falante se “dilui” cada vez mais, pois fica espalhada numa superfície cada vez maior. Então, o canal auditivo de uma pessoa (que podemos considerar tendo uma unidade de área) recebe mais energia por unidade de tempo na posição 1 que na posição 2. Isso significa que a intensidade sonora é maior em 1 que em 2.

Na figura abaixo, uma fonte sonora F , considerada puntiforme, está emitindo som num meio homogêneo em que a velocidade de propagação da onda é a mesma em todas as direções (meio acusticamente isotrópico ou isotrópico).



A superfície esférica de raio igual a x e centro na fonte sonora é uma superfície perpendicular às direções de propagação do som. Supondo que a energia emitida pela fonte não seja absorvida pelo meio de propagação (caso ideal), a potência sonora da fonte será totalmente recebida na superfície esférica considerada.

Simbolizando por Pot a potência da fonte e por A a área da superfície esférica ($A = 4\pi x^2$), temos:

$$I = \frac{Pot}{A} \Rightarrow I = \frac{Pot}{4\pi x^2},$$

em que I é a intensidade do som.

Note que, nessa expressão, se desprezarmos a absorção do meio, a intensidade de uma onda sonora esférica será inversamente proporcional ao quadrado da distância até a fonte. Assim, se a intensidade do som é I a uma distância d da fonte sonora, ela será $\frac{1}{4}$ a uma distância $2d$.

Para finalizar, é importante salientar que a intensidade da onda sonora é, para uma dada frequência e um dado meio, proporcional ao quadrado da **amplitude**. Assim, a uma distância maior da fonte, a intensidade e a amplitude da onda são menores.

AMPLIANDO O OLHAR

A ecolocalização no mundo animal

A maioria das espécies de morcegos voa com uma precisão fantástica mesmo na mais completa escuridão, conseguindo evitar colisões, encontrar alimentos e locais para se abrigar. Para isso, baseiam-se nos ecos dos sinais que emitem (geralmente ultrassônicos), como se fossem equipados por um sonar.

Alguns outros animais também se utilizam desse sistema. O texto a seguir revela algumas informações referentes à "navegação" dos morcegos durante seus voos.

Um dos mitos mais comuns que envolvem os morcegos é o de que tais animais são cegos. Na verdade, eles não são cegos: têm olhos funcionais, como a maioria dos mamíferos, e algumas espécies enxergam relativamente bem. Entretanto, a visão não é o melhor método de orientação para animais noturnos, como os morcegos. Para contornar esse problema, eles utilizam um sistema de emissão e recepção de sons conhecidos como "ecolocalização", que lhes permite uma orientação mais eficaz no escuro, mesmo durante o voo.

A partir do eco desses sons, ou seja, da sua reflexão em obstáculos de todo tipo, desde construções e árvores até pequenos insetos e mesmo fios elétricos, os morcegos conseguem saber sua posição no espaço à sua volta e com isso podem interagir com o ambiente. Para os humanos, seria como atravessar rapidamente uma sala escura e mobiliada sem bater em nada, utilizando apenas os ecos gerados pela voz como referencial de distância até os móveis. Golfinhos, baleias e algumas espécies de esquilos e pássaros também usam a ecolocalização, mas nos morcegos e nos golfinhos esse sistema atingiu maior grau de sofisticação.

Nem todos os morcegos utilizam a ecolocalização. Esse sistema de orientação é encontrado em todas as espécies da subordem Microchiroptera (cerca de 850), um dos dois grandes grupos em que se dividem os morcegos. Na outra subordem, Megachiroptera, que reúne em torno de 150 espécies da África, da Ásia e da Oceania, apenas uma (*Rousettus aegyptiacus*) comprovadamente usa a ecolocalização – os demais megaquirópteros dependem principalmente da visão.



Os morcegos conhecidos como raposas-voadoras, integrantes da família *Pteropodidae*, são representantes da subordem dos megaquirópteros, na qual apenas um gênero tem sistema de ecolocalização desenvolvido.

Para as espécies que se servem da ecolocalização, diferenças na duração e na intensidade entre o sinal emitido e seu eco carregam as informações necessárias para que os morcegos consigam, por exemplo, desviar de obstáculos ou encontrar alimento e abrigo [...]

Os sons de alta frequência têm comprimentos de onda mais curtos que os de baixa frequência. Isso tem uma importante implicação para a ecolocalização, pois ecos de sons de alta frequência podem permitir uma informação mais detalhada sobre um objeto. Entretanto, esse tipo de som é absorvido mais rapidamente pela atmosfera, o que reduz a distância em que seu uso é eficaz para detectar objetos. Por esse motivo a ecolocalização “funciona” apenas a curtas distâncias. Dos morcegos que a usam, a maioria emite sinais entre 20 kHz e 100 kHz, mas há espécies com emissões próximas de 10 kHz e outras que alcançam cerca de 200 kHz. [...]



O morcego *Chrotopterus auritus* (família *Phyllostomidae*), um dos maiores do Brasil (até 70 cm de envergadura), tem ao redor das narinas uma “folha nasal”, estrutura relacionada à emissão e à recepção dos sinais de ecolocalização – a espécie utiliza sinais entre 20 kHz e 100 kHz, de curta duração e baixa intensidade, e alimenta-se de insetos, frutos e pequenos animais (sapos, lagartos e pequenos roedores).

Outra característica dos sinais produzidos pelos morcegos é que normalmente são de curtíssima duração, cerca de alguns milésimos de segundo, ou milissegundos (ms). Ao detectar uma presa, o morcego geralmente diminui o intervalo entre os sinais emitidos, para que os ecos produzidos tragam mais informações em menos tempo. Algumas espécies, durante essa operação, podem emitir 200 sinais por segundo, cada um com uma fração de milissegundos de duração. [...]

Os sinais sonoros emitidos por morcegos apresentam diferenças em relação ao local onde são produzidos (na laringe ou na boca), à intensidade do sinal (forte ou fraco) e à maneira como o eco é detectado (separação por tempo ou por frequência). Todos os microquirópteros produzem seus sinais na laringe, através da vibração das cordas vocais pela passagem do ar. Por isso, seus sinais são considerados vocalizações e a frequência do sinal emitido é regulada de acordo com a tensão das cordas vocais (alterada pela maior ou menor contração dos músculos da laringe). [...]

[...] Algumas espécies [...] usam o chamado efeito Doppler (alteração ocorrida na frequência em função do movimento do obstáculo onde o som é refletido, gerando o eco). [...]

[...] Assim, os ecos recebidos por um morcego que se aproxima de um inseto parado terão uma frequência maior que a do sinal que o gerou. Se o inseto estiver se aproximando do morcego, a frequência será maior ainda. [...]

Outra questão interessante é: o sinal de um morcego interfere na “navegação” de outro? Geralmente não, pois o eco é comparado com a “voz” que o gerou. Além disso, algumas espécies alteram a frequência, a intensidade ou o intervalo de seus sinais ao perceber que outras espécies estão usando a mesma área. Já nas situações onde milhares de morcegos estão juntos, como em cavernas, eles costumam utilizar a memória espacial, “desligando” temporariamente seus “sonares”. [...]

BERNARD, Enrico. Ecos na escuridão: o fascinante sistema de orientação dos morcegos. *Ciência Hoje*, Rio de Janeiro: SBPC, v. 32, n. 190, jan/fev. 2003. p. 14-20.

QUESTÕES COMENTADAS



1 O aparelho auditivo recebe sinais sonoros que fazem uma membrana (tímpano) vibrar. As vibrações dessa membrana dão origem a impulsos elétricos que chegam ao cérebro causando a sensação da audição. Por que o tímpano vibra?

RESOLUÇÃO

O som que atinge o tímpano é uma onda longitudinal constituída de compressões e rarefações propagando-se em um meio fluido (geralmente o ar).

Em relação à pressão nesse meio em equilíbrio (geralmente a pressão atmosférica), nas compressões a pressão é um pouco maior e nas rarefações, um pouco menor.

Assim, as compressões e as rarefações fazem o tímpano se deslocar, respectivamente, um pouco para dentro e um pouco para fora de sua posição de equilíbrio, ou seja, fazem o tímpano vibrar.

Resposta: Ver explicação.

2 Uma fonte sonora emite um som com 440 Hz de frequência à beira de um lago. Nas condições em que o ar se encontra, o som se propaga nele a 352 m/s. Na água, sua velocidade de propagação é de 1 496 m/s, aproximadamente. Calcule o comprimento de onda do som dessa fonte:

- a) no ar; b) na água.

RESOLUÇÃO

a) Sendo $f = 440 \text{ Hz}$ e $v = 352 \text{ m/s}$, e lembrando que $v = \lambda f$, temos:

$$v = \lambda f \Rightarrow 352 = \lambda \cdot 440 \Rightarrow \lambda = 0,80 \text{ m}$$

b) Como você já sabe, a frequência de uma onda não se altera quando ela passa de um meio para outro (refração). Então, na água temos $f = 440 \text{ Hz}$ e $v = 1\,496 \text{ m/s}$.

$$v = \lambda f \Rightarrow 1\,496 = \lambda \cdot 440 \Rightarrow \lambda = 3,4 \text{ m}$$

Respostas: a) 0,80 m; b) 3,4 m



QUESTÕES PROPOSTAS

**FAÇA NO CADERNO.**

3. Durante um *show* à beira do mar, uma guitarra emite uma onda sonora que se propaga no ar com velocidade v , comprimento de onda λ e frequência f . Essa onda penetra na água, onde se propaga com velocidade v' , comprimento de onda λ' e frequência f' . Sabendo que v' é maior que v , compare λ' com λ e f' com f .

4. Uma roda, contendo em sua borda 20 dentes regularmente espaçados, gira uniformemente dando 5 voltas por segundo. Seus dentes se chocam com uma palheta produzindo sons que se propagam no ar a 340 m/s.

- a) Qual é a frequência do som produzido?
b) Qual é o comprimento de onda do som produzido?

5. Em um experimento de batimento, colocam-se a vibrar simultaneamente dois diapasões com frequências de 200 Hz e 206 Hz.

- a) Determine a frequência dos batimentos.
b) Para se obterem batimentos de frequência igual a 3 Hz, em que frequência deve vibrar um diapasão, junto com o diapasão de 200 Hz?

6. Consideremos dois violões com as cordas *lá* igualmente afinadas. Estando um violão próximo ao outro, tangemos a corda *lá* de um deles e verificamos que a corda *lá* do outro também vibra. Qual fenômeno explica esse acontecimento?

7. Um ser humano com boa audição é capaz de ouvir vibrações acústicas entre 20 Hz e 20 000 Hz aproximadamente. Considerando a velocidade do som no ar igual a 340 m/s, determine os comprimentos de onda do som mais grave (mais baixo) e do som mais agudo (mais alto) que ele consegue ouvir.

8. Julgue as afirmações a seguir:

- I. Todo som alto tem grande intensidade.
II. Sons baixos são aqueles que têm pequena intensidade.
III. Quanto maior a frequência de um som, mais alto ele é.
IV. A diferença entre um som forte e um som fraco está na frequência.

Podemos dizer que é (são) correta(s):

- a) todas.
b) somente a I e a II.
c) somente a III e a IV.
d) somente a III.
e) somente a I, a II e a IV.

9. A nota *lá* padrão tem frequência igual a 440 Hz (frequência padrão por convenção internacional). Num piano, é possível atingir três oitavas acima e quatro oitavas abaixo dessa nota. Calcule, então, as frequências mínima e máxima das notas *lá* desse instrumento.

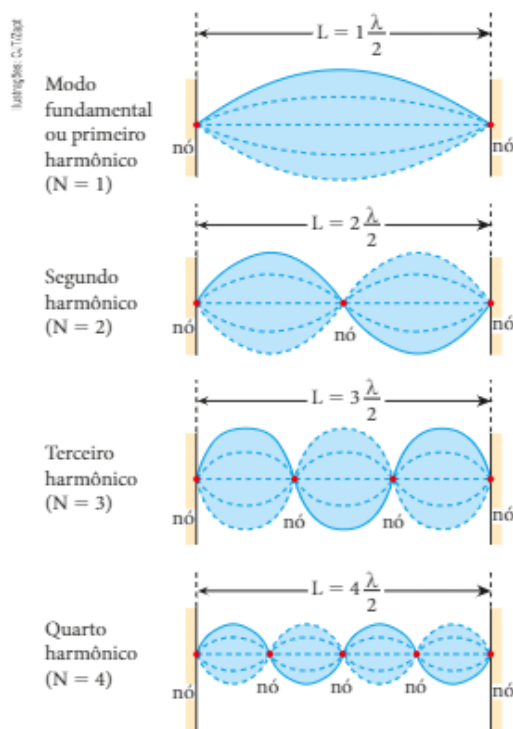
5. CORDAS SONORAS

Modos de vibração da corda

Uma corda elástica apresenta várias frequências naturais de vibração, denominadas **modos de vibração**, que podem ser obtidas sacudindo-se uma das extremidades da corda em uma de suas frequências naturais. Dessa maneira, a corda entra em ressonância com o agente que a sacode.

Uma vez atingido determinado modo de vibração, ainda que se pare de sacudir a extremidade da corda, ela continuará vibrando até perder toda a energia de vibração. Essa maneira de obter os modos de vibração permite tratar cada modo como uma configuração de onda estacionária, resultante da superposição da onda que emitimos quando balançamos a corda com a onda refletida na outra extremidade.

A figura a seguir mostra os quatro primeiros modos de vibração de uma corda de comprimento L , presa pelas extremidades. Evidentemente, apenas algumas frequências podem gerar ondas estacionárias, uma vez que nas extremidades fixas há, necessariamente, **nós**.



É imprescindível lembrar que, em uma configuração de onda estacionária, a distância entre dois nós consecutivos é igual à metade do comprimento de onda das ondas que se superpõem.

O modo mais simples de vibrar uma corda denomina-se **modo fundamental** ou **primeiro harmônico**. Temos, nesse caso:

$$L = 1 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2L$$

Sendo v a velocidade de propagação das ondas na corda e lembrando que $v = \lambda f$, temos:

$$v = 2L f \Rightarrow f = \frac{1v}{2L} \quad (\text{frequência fundamental de vibração da corda ou primeiro harmônico})$$

O segundo modo de vibração chama-se **segundo harmônico**, e para ele temos:

$$L = 2 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{2} \quad (\text{é conveniente deixar assim})$$

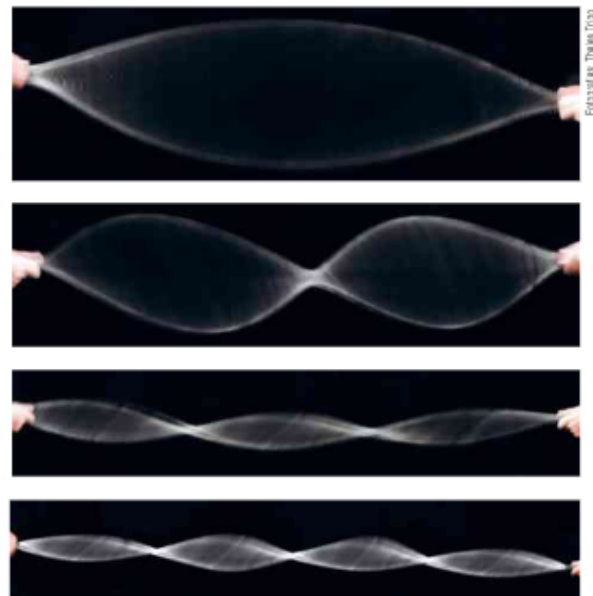
Como $v = \lambda f$, temos:

$$v = \frac{2L}{2} f \Rightarrow f = \frac{2v}{2L} \quad (\text{segundo harmônico})$$

Com relação ao **terceiro harmônico**, temos:

$$L = 3 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{3}$$

$$v = \lambda f \Rightarrow v = \frac{2L}{3} f \Rightarrow f = \frac{3v}{2L} \quad (\text{terceiro harmônico})$$



Fotografia de ondas estacionárias produzidas em uma corda elástica. As imagens revelam os quatro primeiros modos de vibração da corda. Cada modo corresponde a uma frequência com que a corda é sacudida.

Procedendo da mesma maneira, podemos determinar a frequência de vibração correspondente a qualquer outro harmônico. Note que a ordem do harmônico (primeiro, segundo, terceiro etc.) representa quantas vezes a frequência desse harmônico é maior que a frequência correspondente ao modo fundamental. Sendo N a quantidade de meios comprimentos de onda (ou ordem do harmônico), podemos, então, generalizar escrevendo a seguinte expressão para as frequências de vibração:

$$f = \frac{Nv}{2L} \quad (N = 1, 2, 3, \dots)$$

Veja que só poderemos gerar ondas estacionárias numa corda presa pelas extremidades se a fizermos vibrar em determinadas frequências, de modo que entre as extremidades “caiba” um número inteiro de $\frac{\lambda}{2}$.

Quando uma corda (de violão, por exemplo) é tangida, ela vibra no modo fundamental e, simultaneamente, em vários harmônicos. Nesse caso, a forma da corda vibrando é muito mais complexa do que a forma correspondente a cada harmônico.

Som emitido por uma corda vibrante

Em um instrumento de corda, não podemos confundir as ondas na corda, que são transversais, com as ondas sonoras emitidas, que, como sabemos, são longitudinais. Na verdade, a corda vibrante é a fonte das ondas sonoras e, por isso, elas têm a **mesma frequência** das vibrações da corda. Mas a velocidade de propagação do som emitido e seu comprimento de onda nada têm a ver com a velocidade e o comprimento de onda das ondas produzidas na corda.

Quando uma pessoa dedilha a corda de um instrumento musical, ela fornece energia à corda, que, por sua vez, vibra o ar ao seu redor, fornecendo-lhe energia. Ocorre, assim, a emissão do som. Se a corda vibra no modo fundamental, o som emitido é também denominado **som fundamental**. A mesma linguagem vale para os demais harmônicos.

Frequências naturais de vibração de uma corda em função das características da corda

Considerando apenas cordas cilíndricas, temos, a partir do que foi estudado no capítulo anterior:

$$v = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad (\text{I})$$

em que: v é a velocidade de propagação de ondas transversais na corda; r é o raio da seção transversal da corda; F é a intensidade da força tensora na corda; μ é a massa específica do material de que é feita a corda.

As frequências naturais de vibração da corda são dadas por: $f = \frac{Nv}{2L}$ (II)

Substituindo (I) em (II), obtemos

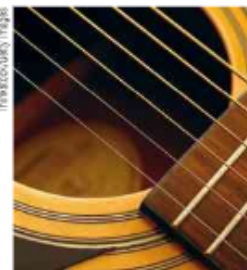
$$f = \frac{N}{2Lr} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \quad \text{ou} \quad f = \frac{N}{DL} \sqrt{\frac{F}{\mu\pi}}$$

em que $D = 2r$ é o diâmetro da seção transversal da corda.

Na última expressão, podemos notar que a frequência fundamental de vibração da corda ($N = 1$), que é a mesma do som fundamental emitido, depende do diâmetro (D) e do comprimento (L) da corda, da massa específica (μ) do material de que ela é feita e da intensidade da força (F) que a traciona.

A seguir, analisamos a influência de cada variável na frequência do som fundamental.

Supondo fixas as demais variáveis, a frequência do som fundamental emitido é inversamente proporcional ao diâmetro da corda.



Em instrumentos de corda, como o violão, por exemplo, as cordas mais grossas emitem sons mais graves (menor frequência), enquanto as mais finas emitem sons mais agudos (maior frequência).

Supondo fixas as demais variáveis, a frequência do som fundamental emitido é inversamente proporcional ao comprimento da corda.



Pressionando uma mesma corda em diferentes posições (casas), alteramos o comprimento do trecho que vibra quando ela é tangida. Quanto menor é esse comprimento, mais agudo é o som emitido.

Supondo fixas as demais variáveis, a frequência do som fundamental emitido é diretamente proporcional à raiz quadrada da força tensora.

Quando um violonista está afinando um violão, ele varia a frequência, alterando a força tensora na corda.

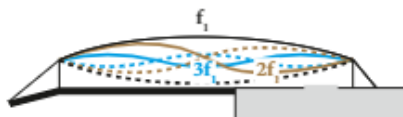
Supondo fixas as demais variáveis, a frequência do som fundamental emitido é inversamente proporcional à raiz quadrada da massa específica do material de que é feita a corda.

Num violão, se substituirmos uma corda de náilon por uma corda metálica (maior massa específica), de mesmo diâmetro e sujeita à mesma tensão, obteremos um som mais grave, ou seja, de menor frequência.

6. TIMBRE DE UM SOM

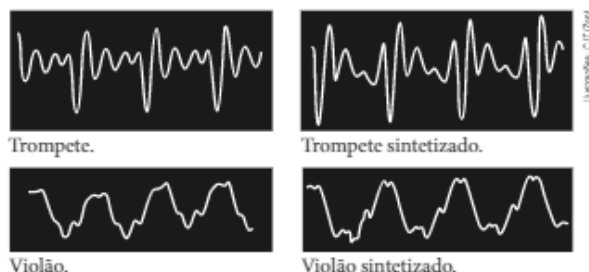
O **timbre** de um som é a sensação característica causada pela presença de harmônicos acompanhando o som fundamental. Influem no timbre tanto a quantidade de harmônicos como suas intensidades relativas.

É o timbre que nos permite distinguir a mesma nota (mesmo som fundamental) emitida por instrumentos diferentes, ainda que essa nota tenha a mesma intensidade nas duas emissões.

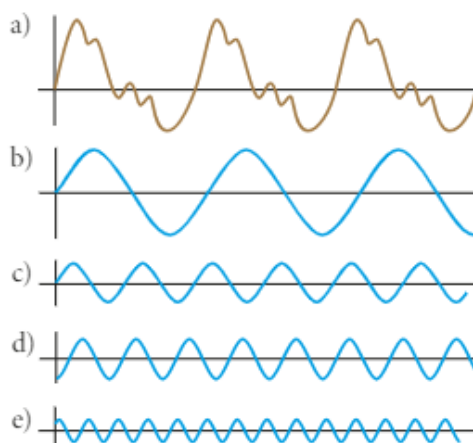


Quando uma corda de violão é tangida, ela vibra simultaneamente em diversas frequências, o que caracteriza o timbre do som emitido. A ilustração mostra os modos de vibração correspondentes aos três primeiros harmônicos, de frequências f_1 , $2f_1$ e $3f_1$.

A presença dos harmônicos, em quantidades e intensidades diferentes, determina formas de onda variadas, isto é, diferentes representações gráficas da elongação em função do tempo. Nas figuras a seguir, aparecem formas de onda da mesma nota **fá** emitida por um trompete, um trompete sintetizado, um violão e um violão sintetizado.



As figuras a seguir mostram a análise de uma nota musical emitida por um violino:

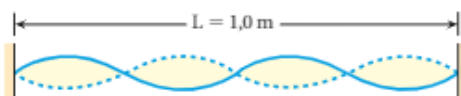


Em **a**, temos a forma de onda correspondente a uma nota emitida por um violino. Em **b**, **c**, **d** e **e** estão os quatro principais harmônicos que compõem essa nota.

QUESTÕES COMENTADAS



10 Uma corda esticada entre duas paredes vibra como mostra a figura:



Sabendo que a velocidade de propagação do som no ar é $v_s = 340$ m/s e que a velocidade de propagação de ondas transversais na corda é $v_c = 500$ m/s, determine:

- a frequência do som emitido pela corda;
- o comprimento de onda do som emitido pela corda;

c) a frequência do som fundamental que essa corda pode emitir.

RESOLUÇÃO

a) Lembrando que a distância entre dois nós consecutivos é igual à metade do comprimento de onda, temos, para as ondas na corda:

$$L = 4 \frac{\lambda_c}{2} \Rightarrow 1 = 4 \frac{\lambda_c}{2} \Rightarrow \lambda_c = 0,5 \text{ m}$$

$$v_c = \lambda_c f \Rightarrow 500 = 0,5f \Rightarrow f = 1000 \text{ Hz}$$

Essa é a frequência de vibração da corda e, consequentemente, a frequência do som emitido.

b) Para o som emitido, temos:

$$v_s = \lambda_s f \Rightarrow 340 = \lambda_s \cdot 1000 \Rightarrow \lambda_s = 0,34 \text{ m}$$

c) O modo de vibração da corda apresentada corresponde ao quarto harmônico:

$$f_4 = 4f_1 \Rightarrow 1000 = 4f_1 \Rightarrow f_1 = 250 \text{ Hz}$$

Respostas: a) 1000 Hz; b) 0,34 m; c) 250 Hz

11 Um violonista tange no instrumento duas cordas de diâmetros diferentes, feitas do mesmo material e igualmente tracionadas, e consegue produzir a mesma nota. Explique como isso é possível.

RESOLUÇÃO

Produzir a mesma nota significa produzir um som com a mesma frequência fundamental.

Essa frequência é dada por: $f = \frac{v}{2L}$ (I)

em que L é o comprimento vibratório da corda e v é o módu-

lo da velocidade de ondas transversais que se propagam nela.

O valor de v é dado por: $v = \sqrt{\frac{F}{\delta}}$ (II)

em que F é a intensidade da força tensora na corda e δ é sua densidade linear (massa de corda por unidade de comprimento).

Substituindo (II) em (I), temos: $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\delta}}$ (III)

Com relação a duas cordas de diâmetros diferentes e feitas do mesmo material, a mais grossa tem densidade linear (δ) **maior** que a da outra. Lembrando que F é igual para as duas cordas citadas, a mais grossa pode emitir um som de frequência fundamental f igual à do emitido pela outra, desde que ela seja pressionada (com o dedo) de modo que se reduza adequadamente seu comprimento vibratório (L). Confira, na expressão (III), que a corda mais grossa (δ maior), vibrando com comprimento reduzido (L), pode, de fato, emitir um som com a mesma frequência fundamental f do som emitido pela outra corda.

Resposta: Ver explicação.



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

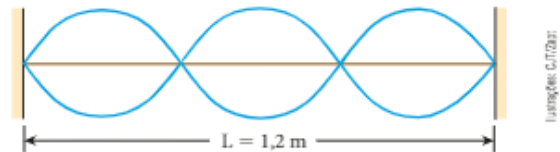
12. Em uma corda tensa, abalos transversais propagam-se a 100 m/s. Sendo de 2 m o comprimento da corda, calcule sua frequência de vibração:

a) no modo fundamental; b) no terceiro harmônico.

13. Ondas estacionárias são produzidas numa corda, sendo de 60 cm o comprimento de onda. Determine, em centímetros, os três menores valores possíveis para o comprimento da corda.

14. Considere uma corda de violão de 60 cm de comprimento. Quais são os três maiores comprimentos de onda de ondas estacionárias que podemos produzir nela?

15. Uma corda de massa $m = 240 \text{ g}$ e comprimento $L = 1,2 \text{ m}$ vibra com frequência de 150 Hz, no estado estacionário esquematizado a seguir:



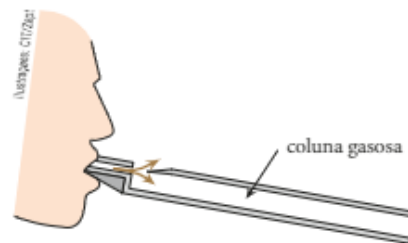
Determine a velocidade de propagação das ondas que originam o estado estacionário nessa corda e a intensidade da força tensora.

16. Durante um processo de investigação, uma conversa telefônica foi gravada e surgiu a necessidade de se confirmar se uma determinada voz era ou não do senhor X. Para isso, a voz gravada foi analisada em laboratório.

Qual qualidade fisiológica do som é decisiva para se concluir se essa voz era ou não do senhor X?

7. TUBOS SONOROS

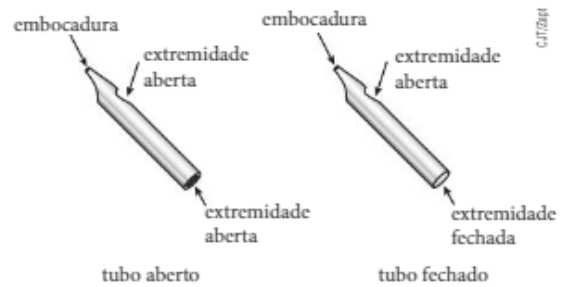
Uma coluna gasosa também possui suas frequências naturais de vibração (longitudinal). Assim, quando uma dessas colunas é excitada em uma ou mais de suas frequências naturais, ocorre ressonância e o som amplifica-se. Essas colunas gasosas, normalmente de ar, estão confinadas em tubos sólidos e ocas denominados **tubos sonoros**.



O ar soprado na embocadura de uma flauta gera um jato vibrante, dirigido ora para fora, ora para dentro, que emite um som de muitas frequências.

Muitos instrumentos musicais utilizam tubos sonoros como ressoadores (por exemplo, a flauta, o saxofone, o órgão de foles). Nesse tipo de instrumento, os sons são produzidos por fluxos de ar numa das extremidades. Esses sons compõem-se de várias frequências, mas só ressoam, ou se amplificam, aquelas que correspondem a frequências naturais, isto é, ao som fundamental e aos harmônicos da coluna gasosa.

Os tubos são classificados em abertos e fechados. Os tubos **abertos** são aqueles que têm as duas extremidades abertas (uma delas próxima da embocadura). Os **fechados** são aqueles que têm uma extremidade aberta, próxima da embocadura, e a outra fechada.



FAÇA VOCÊ MESMO

Estudando tubos sonoros

O objetivo principal da atividade proposta a seguir é fazer investigações acústicas em colunas de ar vibrantes confinadas nos chamados tubos sonoros.

Material necessário

- 4 canudos;
- 1 régua escolar de 30 centímetros;
- 1 tesoura.

Procedimento

I. Usando dois dos quatro canudos e a tesoura, corte três pedaços de canudo, que vamos chamar de tubos **A**, **B** e **C**, de comprimentos respectivamente iguais a 5 cm, 10 cm e 15 cm.

Com os dedos, aperte bastante uma das extremidades de cada tubo, achatando-a:



Com a tesoura, corte os "cantos" de cada ponta achatada, como indica a figura a seguir:

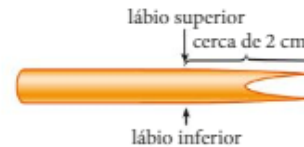


II. Repita essa operação nos outros dois canudos (inteiros), que vamos chamar de tubos **D** e **E**. Antes, porém, meça seus comprimentos e, com a tesoura, deixe um deles, que será o **D**, cerca de 2 mm mais curto que o tubo **E**.

Analizando o experimento

Uma coluna de ar, como a que preenche o interior de um canudo, possui várias frequências naturais de vibração. Quando ela é excitada nessas frequências (pelo sopro), ocorrem ressonâncias e ela emite ondas acústicas com essas mesmas frequências. Semelhantemente ao que acontece com as cordas vibrantes, cada uma dessas ressonâncias corresponde a uma **onda estacionária** – no caso, longitudinal – gerada na coluna de ar.

III. Coloque na boca um tubo de cada vez, primeiro **A**, depois **B**, **C**, **D** e **E**, posicionando o tubo e os lábios como na figura a seguir, comprimindo o tubo com os lábios, e sopra.



Enquanto sopra e ouve o som produzido, encoste brevemente a língua na ponta do tubo e, depois, encoste delicadamente um dedo na outra boca do tubo. Após soprar os cinco tubos e ouvir os sons produzidos, compare as frequências desses sons e anote os resultados.

IV. Sopre os tubos **D** e **E**, separadamente, prestando atenção nos sons que cada um produz. Em seguida, coloque os **dois** (justapostos) na boca e sopra. Você deve ter uma sensação sonora diferente da que teve quando soprou cada um deles separadamente. Anote o que percebeu.

1. Com relação aos procedimentos I, II e III, responda:
 - a) Os tubos usados são abertos ou fechados?
 - b) O que você percebeu quando encostou a língua em uma ponta do tubo e um dedo na outra ponta? Por que isso acontece? Você julga haver ventre ou nó de deslocamento nessas pontas?
 - c) Que tubo emitiu o som mais alto? Coloque em ordem decrescente as frequências emitidas pelos cinco tubos.
2. Lembrando que a frequência de um som – como uma nota musical, por exemplo – é igual à frequência de seu harmônico fundamental ou primeiro harmônico, expresse a frequência f do som emitido por um dos tubos usados em função de L , que é o comprimento da coluna de ar vibrante ou comprimento do tubo, e de v , a velocidade do som no ar.
3. Descreva o que você percebeu de “novidade” no procedimento IV e dê o nome desse fenômeno.
4. A frequência da nota **lá** padrão é igual a 440 Hz. Você conseguiria, procedendo conforme esta atividade, fazer um canudo e produzir o **lá** padrão? E outro **lá**, uma oitava acima do padrão? Considere a velocidade do som, no ambiente em que você está, igual a 350 m/s.
5. Cite pelo menos três instrumentos musicais cujo princípio de funcionamento é a vibração de coluna de ar.

Modos de vibração da coluna gasosa de um tubo sonoro

Do mesmo modo que nas cordas, as vibrações das colunas gasosas podem ser estudadas como ondas estacionárias resultantes da interferência do som enviado na embocadura com o som refletido na outra extremidade do tubo.

Em uma extremidade aberta, forma-se um **ventre** de deslocamento, o que mantém a pressão nesse local igual à pressão externa, ou seja, igual à pressão atmosférica. A demonstração formal da geração desse ventre é muito complexa, o que valoriza a seção **Faça você mesmo** apresentada anteriormente. Em um ventre, a pressão não varia. Por isso, dizemos que se forma um nó de pressão na extremidade aberta.

Em uma extremidade fechada, por sua vez, forma-se um **nó** de deslocamento.

Resumindo: na formação de ondas estacionárias em tubos, devem ser obedecidas as seguintes condições, que determinam as frequências possíveis de vibração:

Em extremidade aberta, sempre existe um **ventre de deslocamento** (ou nó de pressão).

Em extremidade fechada, sempre existe um **nó de deslocamento** (ou ventre de pressão).

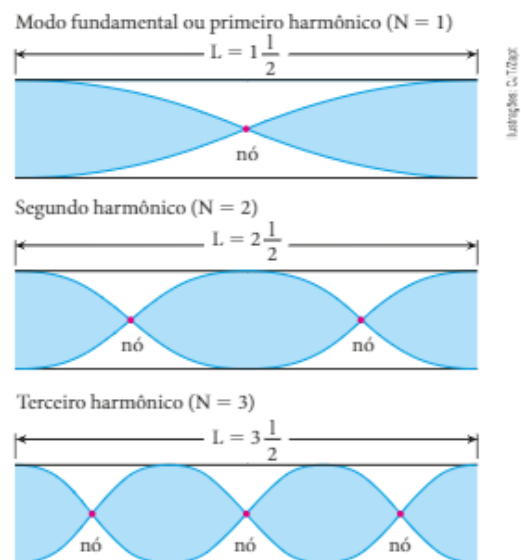
Agora, veremos esquematicamente como ficam as ondas estacionárias em tubos abertos e em tubos fechados.

Tubos abertos

A figura a seguir mostra os três primeiros modos de vibração de um tubo aberto de comprimento L .

Observe, nas três situações, ventres de deslocamento nas extremidades abertas.

Para simplificar, os nós e os ventres estão representados como se as ondas fossem transversais, quando na realidade elas são longitudinais. Para efeito de cálculo, porém, esse artifício é válido.



Sendo v o valor da velocidade do som no gás interno ao tubo, temos, para o modo fundamental:

$$L = 1 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2L \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1v}{2L}$$

Para o segundo harmônico:

$$L = 2 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{2} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2v}{2L}$$

Para o terceiro harmônico:

$$L = 3 \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{3} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3v}{2L}$$

Generalizando para um harmônico de ordem N qualquer, obtemos:

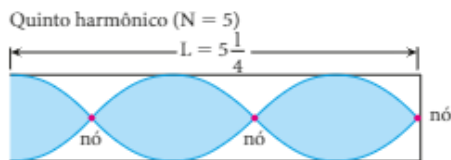
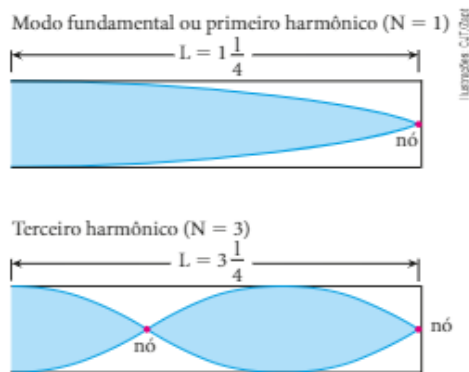
$$f = \frac{Nv}{2L} \quad (N = 1, 2, 3, \dots)$$

O número N é a ordem do harmônico e corresponde à quantidade de meios comprimentos de onda em cada configuração de onda estacionária.

Tubos fechados

A figura a seguir representa os três primeiros modos de vibração num tubo fechado de comprimento L .

Observe, nas três situações, ventres de deslocamento nas extremidades abertas e nós de deslocamento nas extremidades fechadas.



Para o modo fundamental, temos:

$$L = 1 \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = 4L \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1v}{4L}$$

Para o terceiro harmônico, temos:

$$L = 3 \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4L}{3} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3v}{4L}$$

Para o quinto harmônico, temos:

$$L = 5 \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4L}{5} \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{5v}{4L}$$

Note, então, que os tubos fechados apenas emitem o som fundamental e os harmônicos de ordem ímpar, isto é, os harmônicos, cujas frequências são múltiplos ímpares da frequência do som fundamental. Assim, generalizando para um harmônico qualquer de ordem ímpar, temos:

$$f = \frac{Nv}{4L} \quad (N = 1, 3, 5, 7, \dots)$$

Nesse caso, o número N continua sendo a ordem do harmônico, porém corresponde à quantidade de quartos de comprimento de onda.

NOTA

A rigor, tudo o que foi dito a respeito dos tubos sonoros é válido para os tubos finos, ou seja, tubos em que o diâmetro (d) é muito menor que o comprimento ($d \ll L$). Caso contrário, é preciso fazer um pequeno ajuste no valor de L porque os ventres se formam um pouco fora das extremidades abertas.

QUESTÕES COMENTADAS

17 Um tubo sonoro de 3,0 m de comprimento emite um som de frequência 125 Hz. Considerando a velocidade do som no ar igual a 300 m/s, determine:

- se o tubo é aberto ou fechado;
- o harmônico correspondente a essa frequência.

RESOLUÇÃO

- a) Para um tubo sonoro aberto, a frequência do som emitido é calculada por: $f = \frac{Nv}{2L}$
- $$(N = 1, 2, 3, \dots)$$

em que N é a ordem do harmônico, v é a velocidade do som no gás dentro do tubo (v_{ar}) e L é o comprimento do tubo. Sendo $f = 125$ Hz, $v = 300$ m/s e $L = 3,0$ m, calculamos N :

$$125 = \frac{N \cdot 300}{2 \cdot 3,0} \Rightarrow N = 2,5$$

Como o valor obtido para N não é inteiro, concluímos que o tubo que emitiu o referido som não pode ser aberto. Para um tubo fechado, a frequência do som emitido é dada por: $f = \frac{Nv}{4L}$

$$(N = 1, 3, 5, \dots)$$

Fazendo $v = 300 \text{ m/s}$, $f = 125 \text{ Hz}$ e $L = 3,0 \text{ m}$, obtemos:

$$125 = \frac{N \cdot 300}{4 \cdot 3,0} \Rightarrow N = 5$$

Como N resultou ímpar, concluímos que o som foi realmente emitido por um tubo fechado.

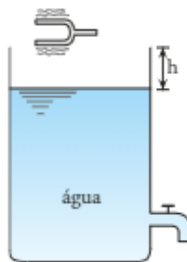
- b) No item anterior, obtivemos o valor 5 para a ordem N do harmônico, o que nos permite concluir que esse tubo fechado está emitindo um som correspondente ao seu **quinto harmônico**.

Respostas: a) Fechado; b) Quinto harmônico.

18 Na extremidade aberta do tubo de Quincke mostrado na figura a seguir, é colocado um diapasão, que emite um som puro (única frequência).

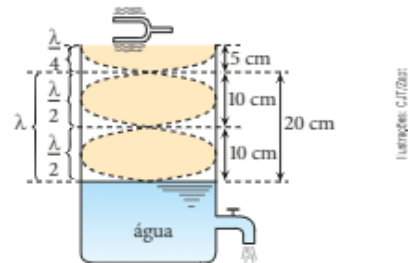
Abrindo-se a torneira, a água escoia lentamente e, para certos valores de h , ocorre um aumento na intensidade do som que sai do tubo. Os três menores valores de h são 5 cm, 15 cm e 25 cm. Determine:

- o comprimento de onda do som emitido pelo diapasão;
- a velocidade desse som no ar, sabendo que sua frequência é 1600 Hz.



RESOLUÇÃO

- a) Enquanto a água escoia, a região de altura h comporta-se como um tubo sonoro fechado de comprimento variável. Para certos valores de h , a coluna de ar do interior da região entra em ressonância com o som emitido pelo diapasão.



Da figura, concluímos que: $\lambda = 20 \text{ cm}$

- b) Da relação $v = \lambda f$, temos:

$$v_{\text{som}} = 0,20 \text{ m} \cdot 1600 \text{ Hz} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{\text{som}} = 320 \text{ m/s}$$

Respostas: a) 20 cm;

b) 320 m/s



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

19. Um tubo sonoro aberto, contendo ar, tem 33 cm de comprimento. Considerando a velocidade do som no ar igual a 330 m/s, determine a frequência:

- do som fundamental emitido pelo tubo;
- do quarto harmônico que esse tubo pode emitir.

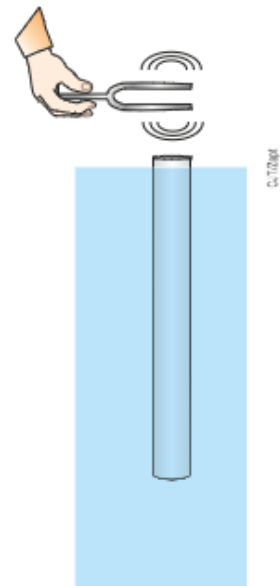
20. Na orelha externa do ser humano, o conduto auditivo tem em média 2,5 cm de comprimento por $0,66 \text{ cm}^2$ de área de secção transversal e é fechado numa de suas extremidades pela membrana do tímpano. Sabendo que a velocidade de propagação do som no ar é de 340 m/s e que esse conduto comporta-se como um tubo sonoro, determine sua frequência fundamental de ressonância.

21. Um tubo de PVC, com 5 cm de diâmetro e 180 cm de comprimento, tendo as duas extremidades abertas, encontra-se quase totalmente imerso na água de uma lagoa, como representa a figura ao lado.

Um diapasão de frequência igual a 256 Hz é posto a vibrar bem perto da extremidade superior do tubo. Erguendo-se

o tubo lenta e verticalmente, com o diapasão sempre vibrando nas proximidades de sua extremidade superior, ouve-se, pela primeira vez, um reforço do som (ressonância) quando o comprimento da parte emersa do tubo é igual a 33 cm.

- Calcule a velocidade de propagação do som no ar no local do experimento.
- Erguendo-se mais o tubo, até sua extremidade inferior atingir a superfície livre da água, outros reforços do som são percebidos. Determine os comprimentos da parte emersa, em centímetros, nessas ocasiões.



8. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM

Como regra geral, o som propaga-se com velocidade maior nos meios sólidos que nos líquidos, e maior nos meios líquidos que nos gasosos. No ar, por exemplo, a velocidade de propagação do som é de aproximadamente 340 m/s, valendo cerca de 1 500 m/s na água e aproximadamente 5 000 m/s no ferro.

O quadro a seguir fornece valores mais precisos da velocidade do som em alguns meios. No caso de meios sólidos à temperatura ambiente, nos quais as ondas sonoras podem ter componentes longitudinais e transversais – caso do chumbo, do alumínio, do aço e do berílio –, os valores fornecidos referem-se às componentes longitudinais.

Meio	Velocidade do som (m/s)	Meio	Velocidade do som (m/s)
Oxigênio (a 0 °C)	316	Chumbo	1 210
Ar (a 0 °C)	331	Água (a 20 °C)	1 482
Ar (a 15 °C)	340	Alumínio	5 000
Hidrogênio (a 0 °C)	1 284	Aço	5 960
Mercúrio (a 20 °C)	1 450	Berílio	12 870

Um fato importante é que a velocidade de propagação do som emitido por uma fonte sonora não depende da velocidade da fonte, mas apenas de características e condições do meio de propagação (isso vale para qualquer onda). Assim, quando a buzina de um automóvel em movimento é acionada, o som emitido no ar propaga-se com a mesma velocidade que se propagaria se o veículo estivesse em repouso.

Outra regra geral é que a velocidade de propagação do som não depende de sua intensidade ou de sua frequência. De fato, podemos imaginar como seria difícil o entendimento de uma conversa se os sons agudos, graves, fortes e fracos se propagassem com velocidades diferentes.

9. EFEITO DOPPLER

Em 1842, o físico austríaco Christian Johann **Doppler** (1803-1853) escreveu um artigo afirmando que a frequência sonora percebida por um observador depende do movimento relativo entre fonte e observador.

Imagem de Christian Johann **Doppler**, autor desconhecido. Coleção particular.



Reprodução

Esse fenômeno, denominado **efeito Doppler**, pode ser definido da seguinte maneira:

Efeito Doppler é a alteração da frequência percebida pelo observador em virtude do movimento relativo de **aproximação** ou de **afastamento** entre fonte e observador.

Embora se trate de um fenômeno característico de qualquer propagação ondulatória, o efeito Doppler sonoro é mais comumente percebido.

Quando um automóvel se aproxima de nós buzinando, percebemos o som da buzina mais agudo (maior frequência) do que perceberíamos se o veículo estivesse em repouso. Contudo, quando o automóvel se afasta buzinando, percebemos um som mais grave (menor frequência) do que perceberíamos se o veículo estivesse em repouso. Nos dois casos, o efeito fica mais evidente quando o automóvel está em alta velocidade. Isso também é frequentemente notado com relação ao barulho do motor dos automóveis, como é possível perceber ao assistir a uma corrida de Fórmula 1. Sirenes de ambulâncias também permitem perceber o efeito Doppler de forma bastante clara.

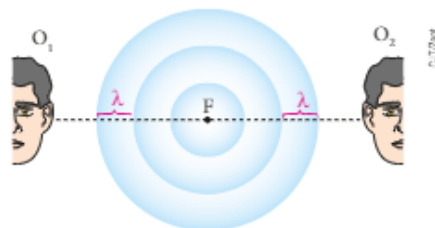


Corbis/Photography/Corbis/Alamy

Quando um trem, de preferência em alta velocidade, passa apitando por uma estação, as pessoas que estão na plataforma percebem um som de frequência diferente daquela que perceberiam se o trem estivesse parado.

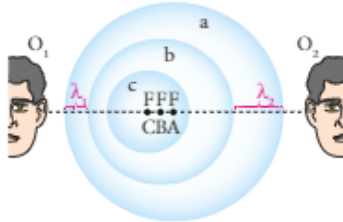
Nas deduções a seguir, vamos considerar o meio de propagação do som (o ar, por exemplo) em repouso em relação ao solo. Desse modo, torna-se indiferente referir a velocidade do som ao meio ou ao solo.

Observe a figura:



A fonte sonora puntiforme F emite frentes esféricas concêntricas com frequência f . Tanto a fonte F como os observadores O_1 e O_2 estão fixos. Por isso, não havendo aproximação nem afastamento entre observador e fonte, não se verifica o efeito Doppler, e tanto O_1 como O_2 percebem o mesmo comprimento de onda λ e a mesma frequência f .

Analisemos, agora, esta nova situação:



Nesse caso, os observadores O_1 e O_2 estão fixos, mas a fonte F desloca-se para a esquerda, emitindo frentes esféricas com frequência f e comprimento de onda λ . O centro de cada frente de onda corresponde à posição da fonte F no momento em que ela a emitiu. Assim, as frentes a , b e c foram emitidas quando F passou, respectivamente, pelos pontos A , B e C .

O movimento da fonte faz com que as frentes de onda juntem-se mais do lado esquerdo e separem-se mais do lado direito. Consequentemente, o observador O_1 recebe, num mesmo intervalo de tempo, mais frentes de onda do que receberia se a fonte não se movesse. Assim, o observador O_1 percebe uma frequência f_1 maior que f e um comprimento de onda λ_1 menor que λ , enquanto O_2 percebe uma frequência f_2 menor que f e um comprimento de onda λ_2 maior que λ .

Para o que acabamos de ver, e para o que vem a seguir, devemos lembrar que a velocidade de propagação das ondas não depende do movimento da fonte.

Nosso problema, agora, é calcular a frequência Doppler percebida por O_1 e O_2 , ou seja, calcular f_1 e f_2 em função de f (frequência da fonte), v_F (velocidade da fonte, que se supõe constante) e v (velocidade de propagação do som).

Cálculo de f_1 :

Entre a emissão de uma frente de onda e a emissão da seguinte, a fonte percorre uma distância igual a $v_F T$, em que T é o período do som emitido pela fonte.

$$\lambda_1 = \lambda - v_F T \Rightarrow \frac{v}{f_1} = \frac{v}{f} - \frac{v_F}{f}$$

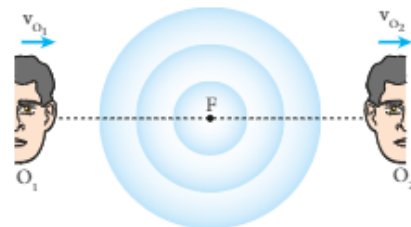
$$\text{Logo: } f_1 = \frac{fv}{v - v_F} \quad (I)$$

Cálculo de f_2 :

$$\lambda_2 = \lambda + v_F T \Rightarrow \frac{v}{f_2} = \frac{v}{f} + \frac{v_F}{f}$$

$$\text{Logo: } f_2 = \frac{fv}{v + v_F} \quad (II)$$

Até aqui, consideramos apenas o **efeito Doppler** causado pelo movimento da fonte. Considere, a seguir, que a fonte seja fixa, mas que os observadores estejam em movimento:



Cálculo de f_1 :

Se O_1 estivesse em repouso, ele receberia, em determinado intervalo de tempo Δt , N ondas completas, percebendo a frequência $f = \frac{N}{\Delta t}$, que é a frequência da fonte. Entretanto, pelo fato de estar em movimento com velocidade v_{O_1} , O_1 percorre a distância $v_{O_1} \Delta t$ durante esse intervalo de tempo. Consequentemente, esse observador recebe $\frac{v_{O_1} \Delta t}{\lambda}$ vibrações além daquelas N que receberia se estivesse em repouso. De fato, $\frac{v_{O_1} \Delta t}{\lambda}$ representa o número de comprimentos de onda, ou vibrações, que cabem na distância $v_{O_1} \Delta t$ percorrida por O_1 . Assim, esse observador percebe uma frequência f_1 que é dada por:

$$f_1 = \frac{N + \frac{v_{O_1} \Delta t}{\lambda}}{\Delta t} = \frac{N}{\Delta t} + \frac{v_{O_1}}{\lambda} = f + \frac{v_{O_1} f}{v}$$

$$f_1 = \frac{f(v + v_{O_1})}{v} \quad (III)$$

Cálculo de f_2 :

Nesse caso, o observador O_2 recebe $\frac{v_{O_2} \Delta t}{\lambda}$ vibrações a menos do que receberia se estivesse em repouso, percebendo uma frequência f_2 dada por:

$$f_2 = \frac{N - \frac{v_{O_2} \Delta t}{\lambda}}{\Delta t} = \frac{N}{\Delta t} - \frac{v_{O_2}}{\lambda} = f - \frac{v_{O_2} f}{v}$$

$$f_2 = \frac{f(v - v_{O_2})}{v} \quad (IV)$$

Observemos que, se v_{O_2} é igual a v , temos $f_2 = 0$. Assim, o observador não percebe vibrações, uma vez que, pelo fato de estar viajando com as ondas, permanece numa região de pressão constante. Portanto, seus tímpanos não vibram.

Evidentemente, tanto o observador como a fonte podem estar em movimento. Nesse caso, reunimos as expressões (I), (II), (III) e (IV), obtendo, assim, a fórmula geral para a frequência Doppler (f_D), também chamada de frequência aparente:

$$f_D = f \frac{v \pm v_O}{v \pm v_F}$$

Os sinais \pm podem ser obtidos pela seguinte convenção: o segmento de reta ligando o observador O até a fonte F é orientado sempre de O para F, quaisquer que sejam as posições de O e de F.



Caso as velocidades do observador e da fonte não estejam alinhadas com a reta que passa por eles, deve-se operar com as componentes dessas velocidades segundo a referida reta.

As fotografias a seguir mostram ondas produzidas na superfície da água por uma haste oscilando verticalmente e deslocando-se para a direita:



Nesta situação, o deslocamento da haste é mais rápido que a propagação das ondas, e ocorre a formação das chamadas ondas de choque.

Nesta situação, o deslocamento da haste é mais lento que a propagação das ondas, e ocorre o efeito Doppler.



Mais veloz que o som?

Nesta fotografia, quando o projétil sai do cano do rifle, os gases gerados no disparo são prontamente expelidos. A perturbação produzida pela saída desses gases, bem como a do projétil, origina uma onda mecânica (sonora) esférica que se propaga no ambiente a partir de um ponto muito próximo da extremidade do cano da arma. A velocidade do projétil é maior do que a do som no ar (aproximadamente 340 m/s ou 1 224 km/h), o que o faz ultrapassar a onda sonora originada pelo disparo. Pode-se observar na imagem – bidimensional – o triângulo que constitui um corte da onda de choque formada pelo avanço da bala. Essa onda de choque, vista no espaço, em três dimensões, tem forma cônica.



Fotografia de disparo de um rifle. Imagem obtida por meio de máquina fotográfica ajustada para registrar fenômenos em alta velocidade.

Quando um corpo se move com velocidade igual à do som no ar, dizemos que sua velocidade é sônica. Para valores maiores, entretanto, temos velocidades supersônicas. Em homenagem ao físico austríaco Ernst Mach, a velocidade do som no ar foi denominada **Mach 1**. A maior velocidade já registrada por um avião supersônico foi cerca de Mach 6,1 (algo em torno de 7 297 km/h).

10. SONORIDADE

Na seção 4 deste capítulo, conceituamos intensidade sonora. Tratava-se, naquele caso, de uma intensidade física, definida em termos puramente energéticos. Entretanto, quando uma mesma onda sonora atinge duas pessoas, as sensações sonoras podem ser diferentes. É possível, até, que uma das pessoas ouça bem e a outra não perceba nenhuma sensação sonora. Estamos nos referindo, agora, à **sensação sonora** ou **sonoridade**.



Na ilustração vemos dois observadores recebendo ondas sonoras idênticas de mesma intensidade. A quantidade de energia que cada um recebe por unidade de área e por unidade de tempo é a mesma (igual intensidade), mas as sensações sonoras percebidas podem ser diferentes (sonoridades diferentes).

É evidente que, para um ouvinte normal, a sonoridade aumenta quando a intensidade de determinado som também aumenta. A sonoridade depende ainda da frequência do som, pois o aparelho auditivo é mais sensível a algumas frequências que a outras.

A máxima sensibilidade do aparelho auditivo é verificada para frequências entre 2 kHz e 4 kHz. Isso significa que, se um mesmo ouvinte receber dois sons de mesma intensidade, porém um de 2 kHz e o outro de 12 kHz, por exemplo, o primeiro será sentido mais fortemente (maior sonoridade) que o segundo. Podemos dizer, ainda, que, se as ondas tiverem frequências infrassônicas ou ultrassônicas, a sonoridade evidentemente será nula, qualquer que seja a intensidade dessas ondas.

A **sonoridade** ou **sensação sonora** depende da intensidade sonora, do ouvinte e da sequência do som considerado.

Weber e Fechner verificaram que as sensações sonoras (e outras) são, para cada ouvinte, aproximadamente proporcionais ao logaritmo da excitação, ou seja, da intensidade sonora. Essa conclusão é conhecida como **Lei Psicofísica de Weber-Fechner**.

A **altura** (sensação que um som nos causa em virtude de sua frequência), o **timbre** (sensação que um som nos causa em virtude dos harmônicos presentes nele) e a **sonoridade** (sensação da intensidade de um som) são denominados **qualidades fisiológicas** do som.

Para as nossas necessidades a partir de agora, o conceito de **logaritmo** será apresentado em um caso particularíssimo:

O **logaritmo decimal** de um número positivo N , indicado $\log N$, é o expoente n de uma potência de 10, tal 10^n seja igual a N .

$$(\log N = n, \text{ pois } 10^n = N)$$

Exemplos:

$$\log 1\,000 = 3, \text{ pois } 10^3 = 1\,000;$$

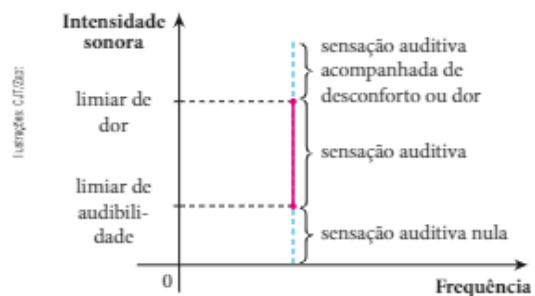
$$\log 0,01 = -2, \text{ pois } 10^{-2} = 0,01;$$

$$\log 1 = 0, \text{ pois } 10^0 = 1.$$

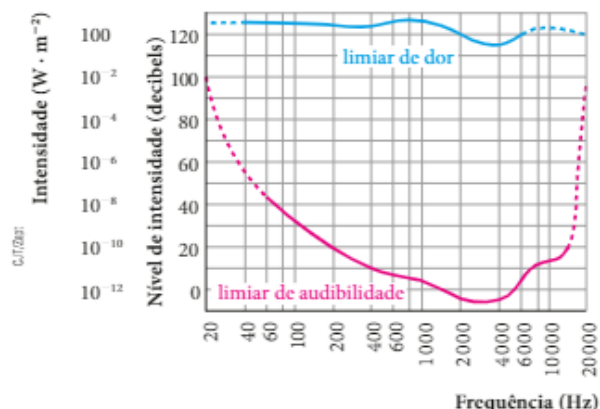
11. NÍVEL RELATIVO DE INTENSIDADE

Suponha que uma pessoa receba um som de frequência constante, cuja intensidade é aumentada gradativamente a partir de zero. Enquanto não atingir uma intensidade mínima, esse som não será percebido, ainda que o ouvinte escute normalmente. A intensidade mínima que um som precisa ter para ser ouvido denomina-se **limiar de sensação auditiva** ou **limiar de audibilidade**. Esse limiar depende da frequência do som.

Aumentando-se a intensidade sonora a partir desse limiar, o som é percebido cada vez mais fortemente, até que, a partir de certo valor da intensidade, a sensação sonora acrescenta-se uma sensação de desconforto ou de dor. A esse valor dá-se o nome de **limiar de sensação dolorosa** ou **limiar de dor**, que também depende, mas apenas ligeiramente, da frequência.



Como dissemos, os limiares variam com a frequência do som. Medidas obtidas em laboratório em toda a faixa audível levaram à construção da **curva de audibilidade** ou **audiograma**, conforme mostra a figura da próxima página. É claro que o audiograma varia de acordo com o ouvinte, mas, em média, é isso que vamos considerar.



Como podemos observar, o aparelho auditivo é mais sensível a frequências compreendidas entre 2000 Hz e 4000 Hz. Isso significa que é nesse intervalo que conseguimos ouvir os sons de menor intensidade.

Em audição normal, o aparelho auditivo humano percebe sons cujas intensidades podem variar na ampla faixa de 10^{-12} W/m^2 a 1 W/m^2 . Esses valores em si e a faixa extremamente extensa em que comparecem contribuem para dificultar seu uso na prática. Por isso, e também com o incentivo dado pela **Lei de Weber-Fechner**, definiu-se o nível relativo de intensidade sonora (N) pela expressão: $N = k \log \frac{I}{I_{\text{ref}}}$; em que: k é

uma constante de proporcionalidade; I é a intensidade sonora de um som; N é seu nível relativo de intensidade em relação a um som de referência de intensidade I_{ref} .

O som de referência adotado tem intensidade igual a 10^{-12} W/m^2 e corresponde, aproximadamente, ao limiar de sensação auditiva na frequência de 1 kHz.

Inicialmente, adotou-se k igual a 1. Nesse caso, o nível N é medido em **bels** (plural de **bel**, símbolo **B**), nome dado em homenagem ao físico escocês Alexander

Graham Bell (1847-1922), inventor, entre outras coisas, do telefone.

Assim: $N = \log \frac{I}{I_{\text{ref}}}$, em bels (B)

Entretanto, pelo fato de a unidade **bel** ser muito grande, prefere-se utilizar, na prática, uma unidade que corresponde a um décimo do bel, ou seja, o **decibel**.

Desse modo, temos, fazendo $k = 10$:

$$N = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}}, \text{ em decibels (dB)}$$

Para um som de intensidade $I = I_{\text{ref}}$ temos:

$$N = 10 \log \frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}} = 10 \cdot 0 \Rightarrow N = 0 \text{ dB}$$

No limiar de sensação dolorosa, temos I por volta de 1 W/m^2 , e sendo $I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, temos:

$$N = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} \Rightarrow N = 120 \text{ dB}$$

O limiar de sensação dolorosa é, então, igual a 120 dB, o que significa que os sons desconfortantes estão em níveis superiores a 120 dB.

É importante notar que o uso do nível de intensidade sonora (N), em substituição à intensidade sonora (I), permite comparar sons lidando com números bem mais simples. Assim, em vez de falarmos num som de 10^{-9} W/m^2 , falamos num som de 30 dB.

NOTA

As unidades **bel** e **decibel** foram estabelecidas originariamente para medir atenuações de sinais em linhas telefônicas. Com o tempo, o uso dessas unidades difundiu-se, sendo hoje largamente empregadas em eletricidade para comparar níveis de sinais elétricos de tensão, potência etc.

QUESTÕES COMENTADAS

22 Duas fontes sonoras, **A** e **B**, emitem sons puros de mesma frequência, igual a 680 Hz. A fonte **A** está fixa no solo e **B** move-se para a direita, afastando-se de **A** com velocidade de 62 m/s em relação ao solo. Um observador entre as fontes move-se para a direita, com velocidade de 30 m/s também em relação ao solo. Determine:

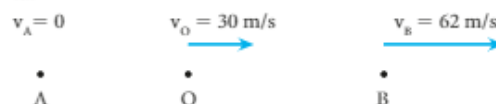
- a frequência do som proveniente da fonte **A**, ouvida pelo observador;
- a frequência do som proveniente da fonte **B**, ouvida pelo observador;

c) a frequência do batimento devido à superposição dessas ondas, admitindo-se que suas amplitudes sejam iguais (ou aproximadamente iguais).

Dado: velocidade do som no ar = 340 m/s.

RESOLUÇÃO

Façamos, inicialmente, um esquema mostrando a situação descrita:



Para o cálculo da frequência f_D ouvida pelo observador (frequência Doppler), devemos estabelecer um sentido de referência, sempre do observador para a fonte, e aplicar a

$$\text{fórmula: } f_D = f \frac{v \pm v_O}{v \pm v_F}$$

a) Assim, para o som proveniente da fonte A, temos:



$$f = 680 \text{ Hz}, v = 340 \text{ m/s}, v_O = 30 \text{ m/s}, v_F = v_A = 0$$

$$f_D = 680 \frac{340 - 30}{340} \Rightarrow f_D = 620 \text{ Hz}$$

b) Para o som proveniente da fonte B, temos:



$$f = 680 \text{ Hz}, v = 340 \text{ m/s}, v_O = 30 \text{ m/s}, v_F = v_B = 62 \text{ m/s}$$

$$f_D = 680 \frac{340 + 30}{340 + 62} \Rightarrow f_D = 626 \text{ Hz}$$

c) A superposição de duas ondas sonoras de amplitudes iguais (ou aproximadamente iguais) e frequências próximas resulta no fenômeno denominado **batimento**, cuja frequência é dada pela diferença:

$$f_{\text{bat}} = f_2 - f_1 \quad (f_2 > f_1)$$

$$\text{Assim: } f_{\text{bat}} = 626 - 620 \Rightarrow f_{\text{bat}} = 6 \text{ Hz}$$

Respostas: a) 620 Hz; b) 626 Hz; c) 6 Hz

✍️ QUESTÕES PROPOSTAS ! FAÇA NO CADERNO.

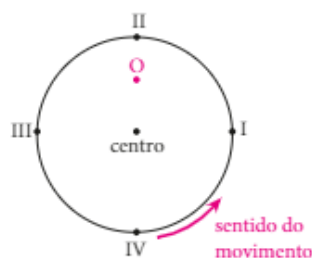
23. Dois trens, A e B, têm apitos idênticos. Um observador parado numa estação ouve o apito de A mais agudo que o de B. Qual (quais) das situações abaixo pode(m) viabilizar o caso proposto?

- I. Os trens A e B aproximam-se do observador.
- II. Os trens A e B afastam-se do observador.
- III. O trem B afasta-se do observador, enquanto o trem A está parado.
- IV. O trem A afasta-se do observador, enquanto o trem B está parado.
- V. O trem B afasta-se do observador, enquanto o trem A aproxima-se.

- a) Somente I e II.
- d) Somente I, II e III.
- b) Somente III e IV.
- e) Somente V.
- c) Somente I, II, III e V.

24. Um automóvel percorre uma pista circular em movimento uniforme. A buzina é acionada quando ele passa pelos pontos I, II, III e IV. Um observador em repouso no

ponto O ouve o som da buzina mais agudo quando ela é acionada em que ponto?



25. Um avião emite um som de frequência $f = 600 \text{ Hz}$ e percorre uma trajetória retilínea com velocidade $v_a = 300 \text{ m/s}$. O ar apresenta-se imóvel. A velocidade de propagação do som é $v = 330 \text{ m/s}$. Determine a frequência do som recebido por um observador estacionário junto a trajetória do avião:

- a) enquanto o avião aproxima-se do observador;
- b) quando o avião afasta-se do observador.

🧩 DESCUBRA MAIS

- 1 Quando encostamos nossa orelha na abertura de uma concha marinha, ouvimos um som característico: o "barulho do mar". Qual é a causa desse "barulho"?
- 2 O gás hélio é muito usado para inflar aqueles balões de borracha frequentemente vendidos em parques de diversão. Se uma pessoa aspirar o gás hélio de um desses balões e falar em seguida, perceberá que o timbre de sua voz foi drasticamente alterado. Explique por que isso acontece. Não realize esse experimento. Embora o hélio seja um gás inerte, sua aspiração reduz a pressão parcial de oxigênio nos pulmões, o que pode causar asfixia.

UNIDADE

3

ÓPTICA GEOMÉTRICA

A **Óptica** é a parte da Física que estuda os fenômenos determinados por energia radiante, em especial energia radiante em forma de luz. A **óptica geométrica** trata particularmente da reflexão e da refração de raios luminosos, englobando-se aí sistemas ópticos capazes de refletir a luz, como espelhos em geral, ou refratar os raios luminosos, como dióptros, lâminas, prismas e lentes, entre outros.

As lentes de contato utilizam princípios da óptica geométrica para corrigir defeitos da visão.

NESTA
UNIDADE

9

FUNDAMENTOS
DA ÓPTICA
GEOMÉTRICA

10

REFLEXÃO
DA LUZ

11

REFRAÇÃO
DA LUZ

12

LENTES
ESFÉRICAS

13

INSTRUMENTOS
ÓPTICOS E
ÓPTICA DA VISÃO



FUNDAMENTOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

1. INTRODUÇÃO

Vimos, no Capítulo 7, que a luz é uma forma de energia radiante. Sabe-se também que a luz difere das demais radiações eletromagnéticas por sua frequência característica, que se estende desde $4 \cdot 10^{14}$ Hz (vermelho) até $8 \cdot 10^{14}$ Hz (violeta), aproximadamente.

Entretanto, o conceito de luz que utilizaremos em nosso estudo de **Óptica** tem um caráter mais específico. Diremos que:

Luz é o agente físico que, atuando nos órgãos visuais, produz a sensação da visão.



A vida na Terra está subordinada à energia radiante recebida do Sol. Todos os seres vivos se nutrem dessa energia, produzida pela fusão nuclear do hidrogênio, que, ao ser submetido a temperaturas de milhões de graus Celsius, se transforma em hélio.

2. ÓPTICA: DIVISÃO E APLICAÇÕES

Espelhos, prismas e lentes associados de maneira adequada permitem compor equipamentos sofisticados, que descortinam mundos inacessíveis a olho nu. Graças a microscópios e telescópios dispomos atualmente de um amplo conhecimento sobre os microrganismos e também sobre o cosmos.

Os espelhos podem produzir, por reflexão, diversos tipos de imagem. Em espelhos planos, de uso geral, as imagens guardam simetria em relação aos respectivos objetos. Não há inversões, tampouco aumentos ou diminuições da imagem refletida. Já naqueles de formato esférico as aplicações são mais específicas. São largamente usados em sistemas de iluminação e telescópios,

como ocorre com os espelhos côncavos, e em retrovisão, como acontece com os espelhos convexos. É oportuno lembrar que praticamente todos os veículos automotores modernos utilizam espelhos retrovisores convexos. Seu emprego é recomendado em razão do maior campo visual que proporcionam, se comparado com o oferecido por espelhos planos de semelhantes dimensões.

As fibras ópticas, que funcionam com base na reflexão total da luz em suas paredes internas, trouxeram um extraordinário avanço tecnológico à ciência. Elas são fundamentais em medicina e em telecomunicações. Hoje as grandes cidades do mundo estão conectadas por terra ou mar por meio de infodutos de fibra óptica, que possibilitam o intercâmbio de grande quantidade de dados digitais à velocidade da luz.

As lentes são o componente óptico primordial no estudo da **Óptica**, prestando-se à correção da visão humana, como ocorre na hipermetropia e na presbiopia, que requerem lentes convergentes, e na miopia, que exige lentes divergentes. São utilizadas ainda como componentes de máquinas fotográficas, filmadoras, projetores, telescópios, lunetas, binóculos e microscópios, além de sua aplicação em outros sistemas ópticos.

A **Óptica** é a parte da Física que trata dos fenômenos que têm como causa determinante a energia radiante, em particular a luz.

Por questões didáticas, costuma-se estudá-la em dois grandes capítulos: **óptica geométrica** e **óptica física**.

Óptica geométrica: estuda os fenômenos ópticos com enfoque nas trajetórias seguidas pela luz. Fundamenta-se na noção de raio de luz e nas leis que regulamentam seu comportamento.

Óptica física: estuda os fenômenos ópticos que exigem uma teoria sobre a natureza constitutiva da luz.

A **Óptica** é um ramo da Física que tem largo emprego prático. Algumas de suas aplicações são:

- correção de defeitos da visão;
- construção de instrumentos de observação: lupas, microscópios, periscópios, lunetas e telescópios;
- fixação de imagens (fotografia e cinematografia);
- construção de equipamentos de iluminação;
- medidas geométricas de alta precisão (interferômetros);
- estudo da estrutura do átomo.

3. FONTES DE LUZ

Os diversos corpos que nos cercam podem ser vistos porque deles recebemos luz, que, incidindo sobre nossos órgãos visuais, promove os estímulos geradores da sensação da visão. O Sol, a Lua, uma pessoa e um livro, por exemplo, enviam luz aos olhos, o que possibilita enxergá-los.

No entanto, os corpos absolutamente negros não são visíveis. Desses corpos não emana luz de espécie alguma e, eventualmente, nota-se sua presença em razão do contraste com as vizinhanças.

São considerados **fontes de luz** todos os corpos dos quais se pode receber luz.

Dependendo da procedência da luz distribuída para o meio, os corpos em geral podem ser classificados em duas categorias: **fontes primárias** e **fontes secundárias**.

- **Fontes primárias:** são os corpos que emitem luz própria. Por exemplo: o Sol, a chama de uma vela, as lâmpadas (quando acesas) etc.
- **Fontes secundárias:** são os corpos que enviam a luz que recebem de outras fontes. O processo ocorre por **difusão**, ou seja, a luz é espalhada aleatoriamente, em geral por reflexão ou mesmo por refração, para todas as direções dos arredores do corpo. Por exemplo: a Lua, as nuvens, uma árvore, as lâmpadas (quando apagadas) etc.

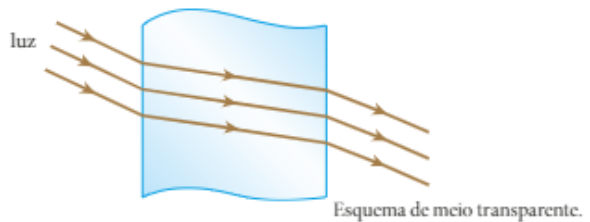
Uma fonte de luz é considerada **pontual** (ou **puntiforme**) quando suas dimensões são irrelevantes em comparação com as distâncias aos corpos iluminados por ela. A grande maioria das estrelas observadas da Terra comporta-se como fonte pontual de luz. De fato, embora as dimensões dessas estrelas sejam enormes, as distâncias que as separam de nosso planeta são muito maiores.

Fontes de luz de dimensões não desprezíveis são denominadas **extensas**. O Sol, observado da Terra, comporta-se como uma fonte extensa de luz.

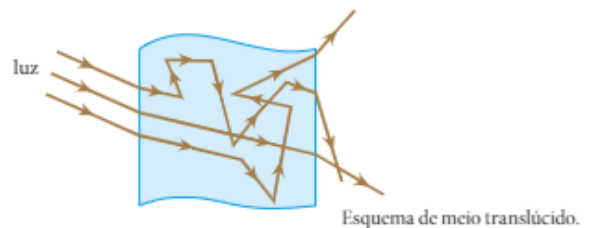
4. MEIOS TRANSPARENTES, TRANSLÚCIDOS E OPACOS

Meios transparentes são aqueles que permitem que a luz os atravesse descrevendo trajetórias regulares e bem definidas.

O único meio absolutamente transparente é o vácuo. Contudo, em camadas de espessura não muito grande, também podem ser considerados transparentes o ar atmosférico, a água pura, o vidro hialino e outros.



Meios translúcidos são aqueles em que a luz descreve trajetórias irregulares com intensa difusão (espalhamento aleatório), provocada pelas partículas desses meios. É o que ocorre, por exemplo, quando a luz atravessa a neblina, o vidro leitoso, o papel vegetal e o papel-manteiga.



Meios opacos são aqueles através dos quais a luz não se propaga. Depois de incidir em um meio opaco, a luz é parcialmente absorvida e parcialmente refletida por ele, sendo a parcela absorvida convertida em outras formas de energia, como a térmica.

Quando se apresentam em camadas de razoável espessura, são opacos os seguintes meios: alvenaria, madeira, papelão, metais etc.

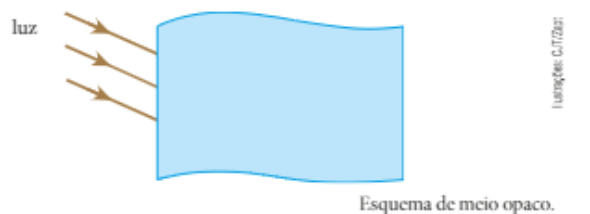


Ilustração: C. T. Z. B.

5. FRENTE DE LUZ – RAIO DE LUZ

Considere uma lâmpada **L** acesa em uma região de vácuo. Nessas condições, da lâmpada emanam ondas luminosas, que atingem todos os pontos de sua vizinhança.

Frente de luz é a fronteira entre a região já atingida por um pulso luminoso e a região ainda não atingida.

No caso da lâmpada **L**, a propagação luminosa se faz por meio de ondas eletromagnéticas esféricas, concêntricas com a lâmpada. Cada frente de luz emitida pela lâmpada **L** se expande através do vácuo propagando-se com velocidade igual a c .

Raio de luz é uma linha orientada que tem origem na fonte de luz e é perpendicular às frentes de luz. Os raios de luz indicam a direção e o sentido de propagação da luz em um meio ou sistema.

A figura seguinte representa uma frente de luz em um instante t e um raio de luz.



A região interna à superfície esférica (frente de luz) já foi atingida pelo pulso luminoso, enquanto a região externa ainda não foi. Para uma onda luminosa esférica, os raios de luz são retilíneos e radiais.

Em pontos situados a grandes distâncias da lâmpada **L**, as frentes de luz lá recebidas têm raio de curvatura muito grande, podendo ser consideradas praticamente planas.

Isso ocorre com a luz que a Terra recebe do Sol. Essa luz constitui-se de ondas eletromagnéticas esféricas. Entretanto, o diâmetro da Terra (aproximadamente 12800 km) é desprezível em comparação com a distância do planeta ao Sol (cerca de 150 milhões de quilômetros), permitindo-nos geralmente considerar planas as frentes de luz que nos atingem.



Os raios solares que atingem a Terra geralmente podem ser considerados paralelos entre si (caracterização em cores fantasia).

Uma frente de luz tem existência física, mas isso não ocorre com um raio de luz, que apenas indica a direção e o sentido da propagação luminosa em certo local.

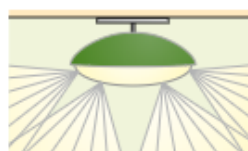
6. PINCEL DE LUZ – FEIXE DE LUZ

Observe a figura a seguir, que representa uma lanterna comum colocada diante de um anteparo que tem um orifício de diâmetro relativamente pequeno (da ordem de 2 mm). O conjunto encontra-se sobre uma mesa, em um ambiente escurecido.



Se acendermos a lanterna e espalharmos fumaça na região da montagem, notaremos, à direita do anteparo, uma região cônica do espaço diretamente iluminada. Essa região, que tem pequena abertura angular em virtude do pequeno diâmetro do orifício, denomina-se **pinçel de luz**.

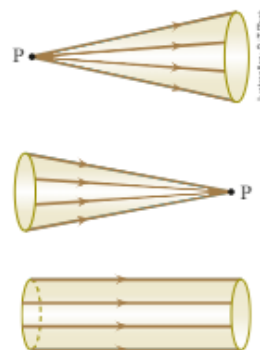
Considere, agora, uma lâmpada instalada no interior de um globo difusor. Com a lâmpada acesa, partem de cada elemento de superfície do globo vários pinçéis de luz. Reunindo-se os pinçéis emanados de um mesmo elemento de superfície, obtém-se uma região iluminada de abertura angular relativamente grande, que recebe o nome de **feixe de luz**.



Na figura estão representados quatro feixes de luz emanados do globo difusor (caracterização em cores fantasia). Cada feixe é um conjunto de pinçéis de luz.

Os pinçéis de luz (e também os feixes de luz) admitem a seguinte classificação:

- **Cônicos divergentes:** os raios de luz divergem a partir de um mesmo ponto **P**.
- **Cônicos convergentes:** os raios de luz convergem para um mesmo ponto **P**.
- **Cilíndricos:** os raios de luz são paralelos entre si.



Telescópios e microscópios

Os telescópios e os microscópios descortinaram aos olhos do ser humano um verdadeiro universo de conhecimento. Aquilo que era inacessível a olho nu veio à tona por meio desses instrumentos, que possibilitaram reformular e ampliar conceitos e teorias.



Fotografia de um telescópio de reflexão do *European Southern Observatory*, Chile.

O advento da luneta astronômica, idealizada originalmente pelo holandês Hans Lippershey, em 1606, permitiu que constelações inteiras tivessem sua existência registrada. Ao saber da novidade, Galileu aperfeiçoou o instrumento, que

lhe permitiu mapear as crateras lunares, observar os anéis de Saturno e os satélites de Júpiter e estudar as manchas solares. Outros planetas, além dos já conhecidos, foram descobertos, estendendo-se as fronteiras do Sistema Solar.

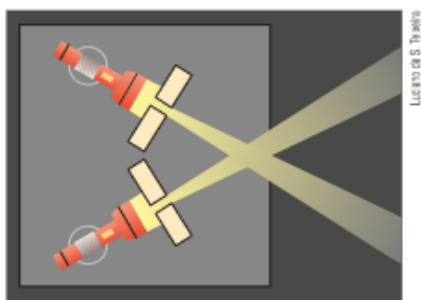
O microscópio, por sua vez, inventado pelo também holandês Zacharias Janssen na mesma época da luneta astronômica, desvendou, logo no início do século XVIII, muitos mistérios dos microrganismos. Iniciou-se o estudo da célula, que trouxe um avanço sem precedentes à Medicina. Conseguiu-se a cura para muitas doenças e várias delas foram erradicadas. Vacinas e métodos terapêuticos foram descobertos, ampliando a média de vida do ser humano.



Microscópio do século XVIII. Museu *des Hospices Civils*, Lyon.

7. PRINCÍPIO DA INDEPENDÊNCIA DOS RAIOS DE LUZ

Considere a situação experimental seguinte, em que há, sobre uma mesa no interior de um quarto escuro, duas lanternas dirigidas para os orifícios existentes em dois anteparos.



Representação do aparato visto de cima.

Ligando-se as lanternas e espalhando-se fumaça na região da montagem, dos anteparos "sairão" dois pincéis de luz que se cruzam, provocando na região da interseção

o fenômeno de interferência. No entanto, o experimento mostra que, após essa interseção, cada pincel de luz segue seu caminho, como se não houvesse o cruzamento.

Com base nesse e em outros experimentos similares, podemos enunciar que:

A propagação de um pincel de luz não é perturbada pela propagação de outros na mesma região; um independe da presença dos outros.

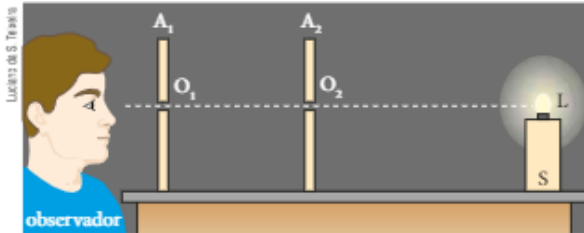
Utilizando a noção de raio de luz, podemos dizer que:

Quando ocorre cruzamento de raios de luz, cada um deles continua sua propagação independentemente da presença dos outros.

A importância prática do **Princípio da Independência dos Raios de Luz** é que, nos problemas de **Óptica**, podemos concentrar nossa atenção em determinado raio de luz sem nos preocuparmos com a presença de outros, que certamente não perturbam o raio em estudo.

8. PRINCÍPIO DA PROPAGAÇÃO RETILÍNEA DA LUZ

Observe a montagem da figura seguinte, em que a lâmpada **L** (presa ao suporte **S**) tem dimensões muito pequenas. Os anteparos **A₁** e **A₂**, feitos de material opaco, são dotados dos orifícios **O₁** e **O₂**, de diâmetros também muito pequenos. Para que o resultado do experimento seja mais pronunciado, admitamos que os componentes da montagem estejam no interior de um quarto escuro.



Ao se acender a lâmpada **L**, um observador, com um dos olhos próximo de **O₁**, perceberá luz direta da lâmpada somente se **L**, **O₂** e **O₁** estiverem alinhados.

Esse e outros experimentos de mesma natureza formam a base prática que permite a seguinte conclusão:

Nos meios transparentes e homogêneos, a luz propaga-se em linha reta.

É importante observar que **meio homogêneo** é aquele que apresenta as mesmas características em todos os elementos de volume.

O ar contido em equipamentos ópticos, como microscópios e telescópios, ou mesmo aquele existente em ambientes pequenos, como uma sala de aula, pode ser considerado um meio transparente e homogêneo em que a luz se propaga em linha reta.

Se pensarmos, no entanto, na atmosfera terrestre como um todo, essa consideração já não poderá ser feita em virtude das diferentes constituições físico-químicas encontradas no ar. À medida que se aumenta a altitude, verifica-se que o ar vai ficando mais rarefeito (menos denso) e praticamente isento de vapor de água. A temperatura e a pressão vão se tornando diferentes das encontradas nas proximidades do solo e esses fatores bastam para dizer que a atmosfera terrestre é um meio heterogêneo. Por isso, em geral, a luz não se propaga em linha reta ao atravessar a atmosfera, realizando curvas espetaculares em situações de incidência oblíqua. Isso ocorre em razão da sucessão de refrações que a luz sofre até sua chegada ao solo, o que será explicado com mais detalhes no Capítulo 11.

NOTA

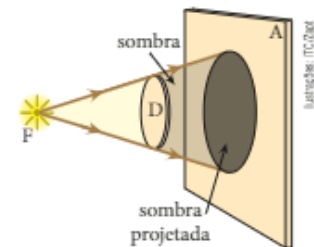
- Do ponto de vista óptico, chama-se **meio isótropo** (ou isotrópico) todo aquele em que a velocidade de propagação da luz e as demais propriedades ópticas independem da direção em que é realizada a medida.
- Chama-se **meio ordinário** todo aquele que é ao mesmo tempo transparente, homogêneo e isótropo. O vácuo é um meio ordinário.

9. SOMBRA E PENUMBRA

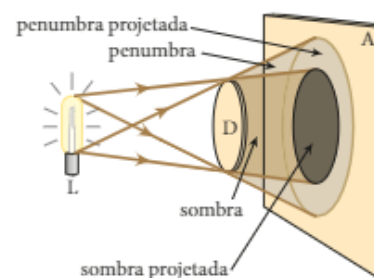
Na montagem experimental sugerida na figura a seguir, **F** é uma fonte luminosa **puntiforme**, **D** é um disco opaco e **A** é um anteparo também opaco.

Tendo em vista que a propagação da luz é retilínea no local do experimento, teremos, na região entre **D** e **A**, um tronco de cone desprovido de iluminação direta de **F**. Essa região é denominada **sombra**. Em **A**, notaremos uma região circular também isenta de iluminação direta de **F**. Essa região é chamada de **sombra projetada**.

É importante observar que o fato de a sombra de um corpo ser semelhante a ele atesta que a luz se propaga em linha reta no meio considerado.



Admita agora o esquema seguinte, em que **L** é uma fonte **extensa** de luz, **D** é um disco opaco e **A** é um anteparo também opaco.



Nesse caso, pelo fato de a fonte de luz ser extensa, além das regiões de sombra e de sombra projetada, teremos ainda regiões de **penumbra** e de **penumbra projetada**. Nas regiões de penumbra, a iluminação será parcial, e aí se observará transição entre sombra e iluminação total.

Eclipses são fenômenos astronômicos regulares e previsíveis, mas que aterrorizaram sobremaneira nossos ancestrais em eras não muito distantes. Acreditava-se que essas ocorrências eram manifestações da ira dos deuses e serviam de alerta quanto à chegada de pestes, pragas e catástrofes naturais.

A explicação dos eclipses está relacionada ao fato de a luz propagar-se em linha reta. É com base nesse princípio que se justifica o desaparecimento temporário da Lua em certas ocasiões de lua cheia ou mesmo do Sol em algumas situações de lua nova.

Dois casos merecem destaque:

1º caso: Eclipse da Lua

Neste caso, a Lua situa-se no cone de sombra da Terra.

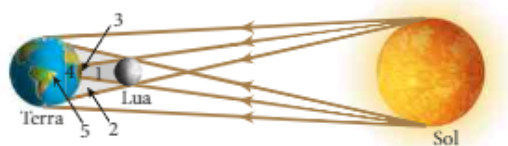


O eclipse da Lua ocorre na fase de lua cheia.



2º caso: Eclipse do Sol

Neste caso, a Lua projeta sobre a Terra uma região de sombra e uma de penumbra.



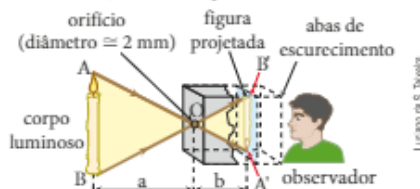
A região 1 é a sombra da Lua; a região 2 é a penumbra; a região 3 é a sombra da Lua projetada na Terra – nessa região ocorre o eclipse total ou anular do Sol; a região 4 é a penumbra projetada – nessa região ocorre o eclipse parcial do Sol, caso em que uma parte do “disco solar” permanece visível; na região 5 não há eclipse e o “disco solar” é visualizado integralmente.

O eclipse do Sol ocorre na fase de lua nova.

10. CÂMARA ESCURA DE ORIFÍCIO

Esse dispositivo nada mais é que uma caixa de paredes opacas, sendo uma delas dotada de um orifício O, diante do qual é colocado um corpo luminoso.

Os raios emanados desse corpo, após atravessarem O, incidem na parede do fundo da caixa, lá projetando uma figura semelhante ao corpo considerado, em forma e em colorido. Tal figura, no entanto, apresenta-se **invertida** em relação ao corpo.



Observando o esquema, pode-se constatar que os triângulos OAB e OA'B' são semelhantes. $\frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a}$

Para uma mesma câmara e um mesmo corpo luminoso, os comprimentos **b** (profundidade da câmara) e AB (comprimento do corpo luminoso) são constantes. Por isso, podemos afirmar que, nesse caso, A'B' (comprimento da figura projetada) é **inversamente proporcional** à distância **a** do corpo luminoso à parede frontal da câmara. Se, por exemplo, dobrarmos **a**, A'B' se reduzirá à metade.

É importante destacar que a figura projetada na parede do fundo da câmara pode ser contemplada por um observador situado na posição sugerida no esquema. Para tanto, basta que ele substitua a parede do fundo por uma lâmina de vidro fosco ou papel vegetal, por exemplo.

Para obter uma boa definição na figura projetada (boa nitidez), não se deve aumentar o diâmetro do orifício além de 2 mm.

Pode-se dizer que a câmara escura de orifício constitui um ancestral da câmara fotográfica, sendo ainda um dispositivo que comprova o **Princípio da Propagação Retilínea da Luz**.

O renascentista italiano **Leonardo da Vinci** (1452-1519) utilizou a técnica das câmaras escuras de orifício, já conhecidas em sua época, em seus estudos sobre propagação da luz. Esses dispositivos serviram também de ferramenta para a elaboração de algumas de suas perspectivas e pinturas. Há em seus livretos de anotações – os códices – citações sobre a obtenção de figuras luminosas invertidas projetadas em anteparos planos.

Leonardo da Vinci foi um verdadeiro gênio. Já no século XV esboçava aquilo que serviria de base para a tecnologia de nossos tempos. Idealizou uma série de engenhos de rara sofisticação, até mesmo para os padrões atuais. Há em seus desenhos sistemas utilizando engrenagens, parafusos e rolamentos. São dele as primeiras concepções do automóvel (com transmissão empregando diferencial), do helicóptero, da bicicleta e do paraquedas.

FAÇA VOCÊ MESMO

Câmara escura de orifício

Vamos construir uma câmara escura de orifício e verificar algumas consequências da propagação retilínea da luz?

Material necessário

- 1 lata de conservas, utilizada para embalar legumes;
- 1 pedaço de papel vegetal ou papel-manteiga;
- 1 elástico ou 1 pedaço de barbante;
- 1 trena ou régua;
- 1 vela;
- fósforos;
- 1 prego de aproximadamente 2 mm de diâmetro;
- 1 martelo pequeno.

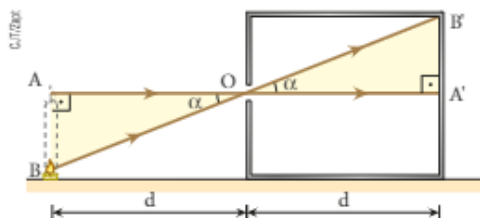
Procedimento

I. Utilizando o prego e o martelo, faça um pequeno furo no centro da base da lata de conservas. Tape a boca da lata com o papel vegetal ou o papel-manteiga, fixando-o por meio do elástico ou do barbante. O papel deve ficar bem esticado. Em um ambiente escurecido, ilumine a base furada da lata com a luz da vela, como mostra a fotografia a seguir.



Você perceberá a projeção de uma imagem invertida da vela no papel que tapa a boca da lata. Observe que, além da chama propriamente dita, apenas a região mais iluminada da vela, próxima à base da chama, aparecerá projetada. Note que, se você aproximar a vela da lata, o tamanho da imagem projetada aumentará e, se você afastar a vela da lata, o tamanho da imagem projetada diminuirá.

II. Faça com que a vela fique com seu pavio à mesma altura do furo no centro da base da lata. Corte a vela, se necessário. Meça com a trena ou a régua a profundidade d da lata e coloque a vela a uma distância igual em relação ao furo, conforme ilustra o esquema, e acenda-a.



Deixe a vela queimar. À medida que seu comprimento diminuir, você notará a imagem projetada subindo na parede oposta ao furo, de tal maneira que, quando a vela estiver praticamente terminada, a projeção da imagem de sua chama estará no ponto mais alto do papel, no topo da parede do fundo da lata.

A semelhança existente entre a imagem projetada no papel e a vela propriamente dita é uma evidência de que a luz se propaga em linha reta no ambiente do experimento. Deve-se notar ainda a congruência entre os triângulos ABO e $A'B'O$, destacados na figura, o que também pode ser justificado pelo fato de a luz se propagar em linha reta.

Analisando o experimento

1. O que ocorreria com a figura projetada no papel vegetal ou papel-manteiga se o furo circular feito no centro da base da lata tivesse um diâmetro com cerca de 2 cm?
2. Pode-se afirmar que o comprimento vertical da figura projetada no papel vegetal é inversamente proporcional à distância horizontal da vela ao furo circular existente no centro da base da lata? Justifique matematicamente sua resposta.
3. Que outras situações ou experimentos você conhece que também atestam que a luz se propaga em linha reta? Enumere-os e troque impressões com seus colegas.

QUESTÕES COMENTADAS



1 A distância do Sol à Terra vale, aproximadamente, $1,5 \cdot 10^8$ km. Sabendo que a velocidade da luz no vácuo é de $3,0 \cdot 10^5$ km/s, calcule o intervalo de tempo decorrido desde a emissão de um pulso luminoso no Sol até sua recepção na Terra.

RESOLUÇÃO

Tendo em conta que a luz se propaga em movimento uniforme, podemos calcular o intervalo de tempo pedido por:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta s}{v}$$

Sendo $\Delta s = 1,5 \cdot 10^8$ km e $v = 3,0 \cdot 10^5$ km/s, temos:

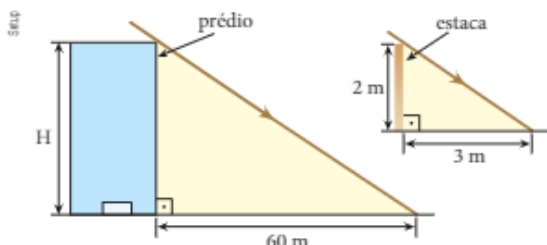
$$\Delta t = \frac{1,5 \cdot 10^8}{3,0 \cdot 10^5} \text{ (s)} \Rightarrow \Delta t = 5,0 \cdot 10^2 \text{ s} = 8 \text{ min } 20 \text{ s}$$

Resposta: 8 min 20 s

2 Desejando medir a altura H de um prédio, um estudante fixou verticalmente no solo uma estaca de 2,0 m de comprimento. Em certa hora do dia, ele percebeu que o prédio projetava no solo uma sombra de 60 m de comprimento, enquanto a estaca projetava uma sombra de 3,0 m de comprimento. Considerando os raios solares paralelos, que valor o estudante encontrou para H ?

RESOLUÇÃO

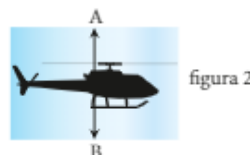
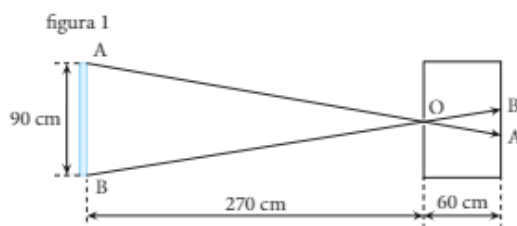
O processo descrito está representado na figura seguinte.



Como podemos considerar os raios solares paralelos, os triângulos retângulos correspondentes às regiões de sombra do prédio e da estaca são semelhantes. Assim, podemos escrever que: $\frac{H}{2,0 \text{ m}} = \frac{60 \text{ m}}{3,0 \text{ m}} \Rightarrow H = 40 \text{ m}$

Resposta: 40 m

3 Uma placa retangular de acrílico translúcido tem altura AB , estando iluminada por trás de modo que projete a silhueta negra de um helicóptero na parede do fundo de uma câmara escura de orifício. Observe as medidas, indicadas na figura 1, e veja também, na figura 2, como um observador, olhando o orifício O , veria a silhueta do helicóptero impressa na placa de acrílico.



- Determine a altura $A'B'$ do retângulo projetado na parede do fundo da câmara escura de orifício.
- Faça um esquema mostrando como seria a figura projetada na parede do fundo da câmara vista por um observador que a olhasse a partir do orifício O .

RESOLUÇÃO

- Os triângulos ABO e $A'B'O$ são semelhantes, logo:

$$\frac{A'B'}{90 \text{ cm}} = \frac{60 \text{ cm}}{270 \text{ cm}} \Rightarrow A'B' = 20 \text{ cm}$$

- A imagem projetada na parede do fundo da câmara, vista por um observador que a olhasse a partir do orifício O , é **invertida** tanto transversal como longitudinalmente, conforme representa a figura.



Respostas: a) 20 cm; b) Ver figura na resolução.



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

4. Define-se um ano-luz como a distância percorrida por um sinal luminoso no vácuo durante um ano terrestre. Sabendo que, no vácuo, a luz viaja a uma velocidade de $3,0 \cdot 10^5$ km/s, calcule, em metros, o comprimento equivalente a um ano-luz.

5. Considere os seguintes dados: distância do Sol à Terra: $1,5 \cdot 10^8$ km; velocidade da luz no vácuo: $3,0 \cdot 10^5$ km/s. Admita que a partir de determinado instante o Sol deixasse de emanar energia, isto é, "apagasse". Quanto tempo após o referido instante esse fato seria registrado na Terra?

6. Considere a seguinte citação, extraída de um livro de Física: "Quando contemplamos o céu numa noite de tempo bom, recebemos das estrelas um relato do passado". Utilizando argumentos científicos, comente o pensamento do autor.

7. Na fotografia a seguir, observamos o palco de um *show* musical em que diversos pincéis luminosos de *laser* provenientes de um sofisticado sistema de iluminação se cruzam, mas seguem se propagando mesmo depois desses cruzamentos.



Efeitos de iluminação em *show*.

Veja que o ambiente está um tanto esfumaçado pela presença de gotículas de água colocadas em suspensão por moléculas de CO_2 gasoso, logo após a sublimação dessa substância (**Lembre-se:** gelo seco – CO_2 sólido – a temperaturas muito baixas sublima-se ao ser colocado em contato com água em temperatura ambiente.). Isso realça sobremaneira a presença dos pincéis de *laser*, permitindo sua visualização de qualquer ponto da plateia.

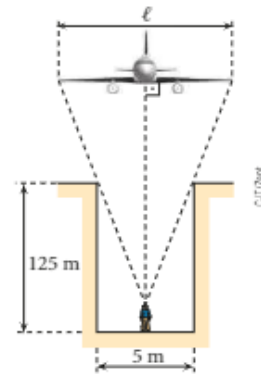
- Nessa imagem, podem ser comprovados dois princípios em que se baseia o estudo de **óptica geométrica**. Quais são eles? Enuncie esses princípios.
- Por que o ambiente esfumaçado favorece a visualização dos pincéis luminosos de *laser* de qualquer ponto da plateia?

8. Admita que as órbitas de Marte e da Terra em torno do Sol sejam circunferências coplanares de raios medindo, respectivamente, $228 \cdot 10^6$ km e $150 \cdot 10^6$ km. Esses planetas percorrem suas respectivas órbitas no mesmo sentido, apresentando-se periodicamente alinhados com o Sol, ora maximamente próximos entre si, separados por uma distância d_{\min} , ora maximamente afastados entre si, separados por uma distância d_{\max} . Na situação de máxima aproximação da Terra, Marte pode ser observado nas noites do nosso planeta com grande brilho e dimensões aparentes significativamente maiores que em outras ocasiões. Admitindo-se para a velocidade da luz o valor $c = 3,0 \cdot 10^8$ km/s, determine:

- os valores de d_{\min} e d_{\max} ;
- o intervalo de tempo gasto pela luz, em minutos, para sair do Sol, iluminar Marte e atingir a Terra em situações de máxima aproximação entre os dois planetas.

9. Do fundo de um poço, um observador de altura desprezível contempla um avião, que está 500 m acima de seus olhos. No instante em que a aeronave passa sobre a abertura do poço, o observador tem a impressão de que a envergadura (distância entre as extremidades das asas) abrange exatamente o diâmetro da abertura.

Considerando os elementos da figura ilustrativa abaixo, fora de escala, calcule a envergadura ℓ do avião.



10. Um grupo de escoteiros deseja construir um acampamento em torno de uma árvore. Por segurança, eles devem colocar as barracas a uma distância tal da base da árvore que, se esta cair, não venha a atingi-los. Aproveitando o dia ensolarado, eles mediram, ao mesmo tempo, os comprimentos das sombras da árvore e de um deles, que tem 1,5 m de altura; os valores encontrados foram 6,0 m e 1,8 m, respectivamente. Qual deve ser a menor distância das barracas à base da árvore?

11. A primeira medição da distância entre a Terra e o Sol foi realizada pelo filósofo grego Anaxágoras, cerca de quatro séculos antes de Cristo. Ele não conhecia o paralelismo dos raios solares que atingem nosso planeta, porém sabia que estacas verticais cravadas no solo não projetavam sombra em Siena, mas projetavam sombra em Alexandria, ao meio-dia do solstício de verão – 21 de junho, no hemisfério Norte.

Anaxágoras considerava a Terra plana e sabia que a distância de Siena a Alexandria era de 5000 *stadia* (1 *stadium* equivale a 183 metros). Sendo h a altura da estaca, a medida de sua sombra em Alexandria era de $0,126 h$.

Determine, em quilômetros, a distância entre a Terra e o Sol (na realidade, de Siena ao Sol) obtida por Anaxágoras. Analise o resultado, comparando-o com a medida atual.

12. Um objeto luminoso e linear é colocado a 20 cm do orifício de uma câmara escura, obtendo-se, em sua parede do fundo, uma figura projetada de 8,0 cm de comprimento. O objeto é então afastado, sendo colocado a 80 cm do orifício da câmara. Calcule o comprimento da nova figura projetada na parede do fundo da câmara.

13. Leia atentamente o texto abaixo.

“Quinta-feira, 3 de novembro de 1994. Faltam 15 minutos para as 11 h da manhã, na cidade de Foz do Iguaçu, no Paraná. Em qualquer dia normal, o sol de primavera já estaria brilhando bem acima do horizonte. Mas este não é um dia normal. Às 10 h 44, a Lua se coloca entre o Sol e impede que sua luz atinja uma parte da superfície terrestre.

A gigantesca sombra, com 200 quilômetros de diâmetro, progride a cerca de 3000 quilômetros por hora do Oceano Pacífico para a América do Sul, entra no Brasil por Foz do Iguaçu e sai para o Oceano Atlântico, sobre a divisa dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. É a chamada faixa de totalidade – o trecho da Terra que recebe em cheio a sombra da Lua. De um lado e de outro dessa faixa, uma penumbra se estende sobre boa parte do continente sul-americano.

Fenômenos como esse acontecem pelo menos duas vezes ao ano. Mas raramente no mesmo lugar. E é isto que faz esse eclipse tão fantástico: muita gente vai ver. Como Foz do Iguaçu, outras cidades localizadas na faixa de totalidade, ao sul do país, vão mergulhar numa curta noite em plena manhã.

Nessa região, o ritmo da Natureza vai mudar: o céu vai ficar tão escuro que será possível ver as estrelas. Os animais vão ficar agitados e os pássaros vão se recolher aos ninhos. As flores sensíveis à luz, como a ‘dama-da-noite’, vão se abrir.

No resto do país, o eclipse será parcial. Somente uma parte do Sol desaparece. É que quem se afasta da faixa de totalidade vê a Lua cada vez mais de perfil, cruzando uma porção menor da esfera luminosa. [...] Aproveite. Porque o próximo eclipse total no Brasil, só no ano 2046.”

Fonte: Revista *Superinteressante*, ed. 85, ano 8, n. 10, out. 1994.

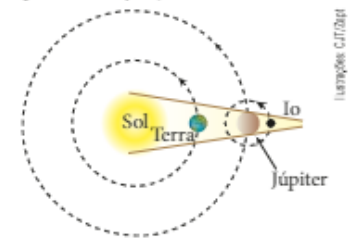
Com base em seus conhecimentos e nas informações contidas no texto, responda:

- Em que fase da Lua (lua cheia, lua minguante, lua nova ou lua crescente) ocorre o eclipse total do Sol?
- Qual foi a duração máxima do eclipse citado para uma pessoa que observou o fenômeno de um local em Foz do Iguaçu?

14. Em 1672, o astrônomo dinamarquês Ole Christensen Römer (1644-1710), estudando eclipses do satélite Io de Júpiter, obteve um valor bastante razoável para a velocidade da luz. Römer observou o instante do início de dois eclipses do satélite – imersão de Io no cone de sombra de Júpiter: o

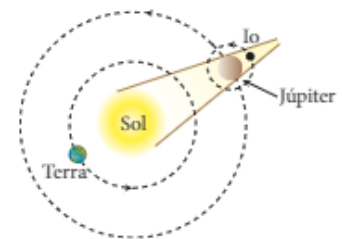
primeiro, com a Terra em conjunção com Júpiter, e o segundo, com a Terra em oposição a Júpiter, conforme ilustram os esquemas a seguir.

Terra e Júpiter em conjunção



Representação com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Terra e Júpiter em oposição



Representação com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Ele notou que, no segundo caso, a informação luminosa demorava um intervalo de tempo a mais para atingir a Terra que no primeiro caso. Então questionou: como poderia um fenômeno astronômico regular e previsível ter seu início retardado em função do local do espaço de onde era observado? A explicação dada pelo astrônomo foi a seguinte: com a Terra em oposição a Júpiter, a luz indicativa do início do eclipse teria de percorrer uma distância maior – um segmento de reta adicional – para atingir a Terra, o que justificaria o atraso verificado. Essa distância seria o diâmetro da órbita terrestre. Realizando-se a medição da velocidade da luz pelo método Römer com recursos atuais, determina-se um atraso de 16 min 34 s entre o início dos dois eclipses de Io. Sabendo-se que o raio médio da órbita terrestre em torno do Sol é igual a 149 milhões de quilômetros, responda:

- Os eclipses, de um modo geral, confirmam qual princípio da óptica geométrica?
- Que valor se obtém modernamente para a velocidade da luz pelo método de Römer?

11. FENÔMENOS FÍSICOS ESSENCIAIS NA ÓPTICA GEOMÉTRICA

A óptica geométrica trata basicamente das trajetórias da luz em sua propagação. São de especial inte-

resse nesse estudo dois fenômenos físicos fundamentais: a **reflexão** e a **refração**.

Considere uma superfície Σ separadora de dois meios transparentes, **1** e **2**. Admita um pincel luminoso cilíndrico que, propagando-se no meio **1**, incide sobre Σ .

Uma parte da energia luminosa incidente retorna ao meio **1**, caracterizando, assim, o fenômeno da reflexão.

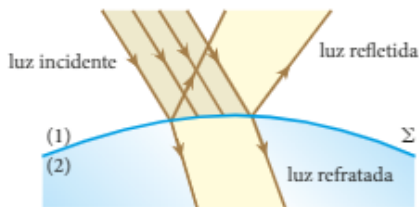
Reflexão é o fenômeno que consiste no fato de a luz voltar a se propagar no meio de origem, após incidir na superfície de separação deste com outro meio.

Outra parte da energia luminosa incidente poderá passar para o meio 2, caracterizando, assim, o fenômeno da refração.

Refração é o fenômeno que consiste no fato de a luz passar de um meio para outro diferente.

Considerando o que foi visto no Capítulo 7, vale lembrar que na reflexão se conservam a frequência e a intensidade da velocidade de propagação, enquanto na refração a frequência conserva-se, mas a intensidade da velocidade de propagação varia na proporção direta do comprimento de onda.

A figura a seguir ilustra a reflexão e a refração da luz.



Imagine, por exemplo, que você está em um local bastante iluminado, diante de uma porta de vidro transparente que dá acesso a outro ambiente mais escurecido. Parte da luz difundida por seu corpo sofrerá reflexão na porta de vidro, permitindo que você veja uma imagem sua. Outra parte da luz difundida por seu corpo atravessará a porta de vidro, refratando-se e possibilitando que pessoas situadas dentro do outro ambiente – o mais escurecido – também o vejam.

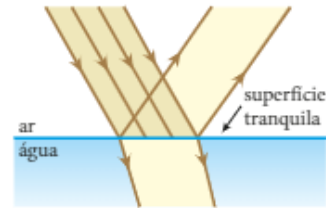
Reflexão e refração regulares e difusas

A maior ou menor regularidade da superfície sobre a qual incide a luz pode determinar dois tipos de reflexão e de refração: a **regular** e a **difusa**.

Considere, por exemplo, a superfície da água de um lago isenta de qualquer perturbação. Nessas condições, essa superfície apresenta-se praticamente desprovida de ondulações ou irregularidades.

Fazendo incidir sobre a água do lago um pincel cilíndrico de luz monocromática (uma só cor ou frequência), podemos observar reflexão e refração regulares. Os pincéis luminosos refletido e refratado também serão cilíndricos; os raios de luz componentes desses pincéis serão paralelos entre si, da mesma forma que os raios luminosos constituintes do pincel

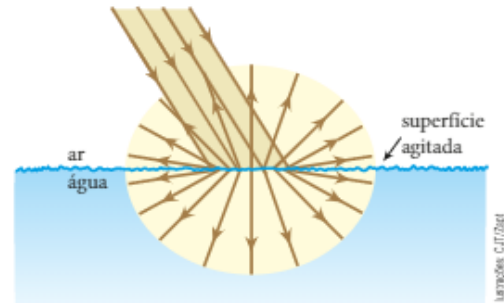
incidente. A figura a seguir ilustra a reflexão e a refração regulares.



Imagine, agora, que a superfície da água do lago seja perturbada pelas gotas de uma chuva torrencial.

Fazendo incidir sobre a água do lago um pincel cilíndrico de luz monocromática, poderemos observar reflexão e refração difusas. Os pincéis luminosos refletido e refratado não serão cilíndricos; os raios de luz componentes desses pincéis terão direções diversas, expandindo-se de modo aleatório por todo o espaço.

A figura a seguir ilustra a reflexão e a refração difusas.



Na reflexão e na refração difusas, ao contrário do que se pode imaginar, valem as leis da reflexão e da refração, que veremos nos Capítulos 10 e 11, respectivamente.

As direções diversas assumidas pelos raios refletidos e refratados devem-se às irregularidades da superfície de incidência.

As águas da lagoa Araraquara, em Baía Formosa (RN), são bem escuras, semelhantes aos refrigerantes tipo cola. Isso ocorre devido à decomposição sistemática da vegetação subaquática e ciliar, constituída principalmente de junco, pau-rosa, pau-brasil e maçaranduba. Por serem escuras, essas águas absorvem intensamente a luz solar que é refratada de maneira difusa, fazendo com que a temperatura nas camadas superficiais fique bastante elevada.



Lagoa Araraquara, Baía Formosa (RN).

Como não há superfície perfeitamente lisa, sempre que ocorre reflexão ou refração uma parte da luz incidente é difundida. É claro que tal parcela será tanto menor quanto mais regular for a superfície.

A difusão da luz é decisiva para a visão das coisas que nos cercam. Um pincel de luz que atravessa um quarto escuro, por exemplo, poderá ser observado se na região abrangida por ele espalharmos fumaça, cujas partículas constituintes difundem a luz, enviando-a aos nossos olhos.

Reflexão e refração seletivas

A luz solar (ou a luz emitida por uma lâmpada fluorescente) é denominada **luz branca**.

A luz branca solar é policromática, isto é, composta de diversas cores, das quais se costumam destacar sete: vermelha, alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta.

Por volta de 1665, o cientista inglês Isaac Newton (1642-1727) verificou que as luzes coloridas, como a amarela e a azul, não eram modificações da luz branca, como se acreditava na época, mas componentes dela. Ele utilizou um prisma para dispersar um estreito pincel de luz branca solar, obtendo em um anteparo, posto em frente ao prisma, um espectro multicolorido constituído por sete cores principais. Considerando-se a trajetória original do pincel de luz branca, a cor que apresentava o menor desvio na travessia do prisma era a vermelha, seguida da alaranjada, da amarela, da verde, da azul, da anil e da violeta, que se desviava mais. Ele tentou, sem sucesso, decompor um feixe de luz monocromática amarela, confirmando a sua teoria de que apenas a luz branca poderia ser decomposta.



Isaac Newton, retratado em gravura do século XIX, realizando experimento para estudo da luz branca. Autor desconhecido. Bibliothèque Nationale, Paris, França. Coleção particular.

Quando iluminadas pela luz solar, as folhas de uma árvore nos parecem verdes, por quê?

Porque essas folhas “selecionam” no espectro solar principalmente a cor componente verde, refletindo-a de modo difuso para o meio. Ao recebermos luz verde em nossos olhos, enxergamos as folhas em verde.

Cumprido observar que as demais cores componentes da luz branca são predominantemente absorvidas pelas folhas.

A figura a seguir (com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia) ilustra a reflexão seletiva.

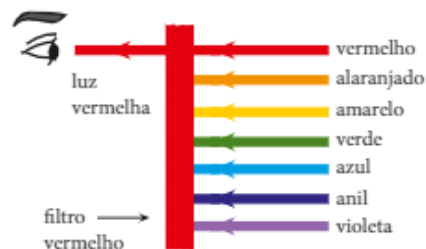


Atenção para os seguintes pontos:

- Se vemos um corpo branco, é porque ele está refletindo todas as cores do espectro solar.
- Se “vemos” um corpo preto, é porque ele está absorvendo todas as cores do espectro solar.
- Um corpo que nos parece vermelho quando iluminado pela luz branca solar se apresentará escuro quando iluminado por luz monocromática de cor diferente da vermelha (azul, por exemplo).

Observando os objetos que nos cercam através de uma lâmina de acrílico vermelha, por exemplo, distinguiremos nesses objetos apenas regiões vermelhas e regiões bem escuras. Isso ocorre porque a lâmina de acrílico constitui um **filtro**, que refrata (deixa passar) seletivamente a luz vermelha, absorvendo substancialmente as demais cores do espectro.

Os filtros são largamente utilizados em fotografia, permitindo que penetrem no interior da câmara apenas as colorações desejadas.



Esquema da refração seletiva.

Combinando cores

Entre os sentidos humanos, a visão é o mais nobre, já que disponibiliza o maior número de informações. Uma pessoa pode obter impressões de forma, comprimento, profundidade e cor, o que é capturado por meio de seus olhos e processado no cérebro.

No fundo do olho, precisamente na retina, situam-se as células sensoriais da visão. São os **bastonetes** e os **cones**. Os bastonetes são muito sensíveis e dão a percepção de claro e escuro, além da visualização de preto e branco e de todas as gradações de cinza. Já os cones, permitem enxergar as diversas cores, com maior sensibilidade para algumas delas, de acordo com a teoria tricromática de Young-Helmholtz. Os cones, embora em menor número que os bastonetes, correspondem a algo em torno de 6 milhões de células em cada olho.

Enxergamos tudo o que, de alguma forma, envia luz aos nossos olhos. De pequenos insetos a corpos celestes... Em teoria, podemos perceber uma infinidade de colorações e são essas incontáveis tonalidades as responsáveis pela caracterização de cada objeto, ambiente ou pôr do sol. O que possibilita percebermos cada matiz são as frequências luminosas que interagem com nossos olhos, podendo diferir em quantidade e/ou intensidade.

Cores primárias são aquelas a partir das quais podem ser obtidas as demais cores, chamadas secundárias. Na pintura artística, costuma-se definir como cores primárias o azul, o amarelo e o vermelho. Já na indústria gráfica, as cores primárias são o ciano, o magenta e o amarelo.

As cores provenientes de pinturas ou impressões gráficas são **combinações subtrativas**, já que os pigmentos utilizados em ambos os casos absorvem todas as frequências da luz branca incidente menos aquelas difundidas, correspondentes à cor visualizada.

Observe na figura ao lado que, combinando-se em iguais intensidades amarelo com magenta, obtém-se vermelho; magenta com ciano, obtém-se azul; ciano com amarelo, obtém-se verde, e a combinação dessas três cores primárias gera um marrom escuro, quase preto.

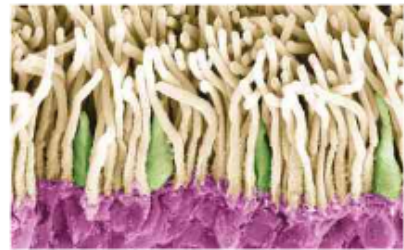
Em aparelhos eletrônicos, como televisores, monitores de computador, máquinas fotográficas, projetores, telefones celulares etc., estabelecem-se como cores primárias o vermelho, o verde e o azul. Aquilo que visualizamos nesses dispositivos são **combinações aditivas**, já que as diversas colorações são obtidas pela superposição de radiações com frequências diferentes emitidas de suas telas ou *displays*.

Observe na figura ao lado que, combinando-se em iguais intensidades verde com vermelho, obtém-se amarelo; vermelho com azul, obtém-se magenta; azul com verde, obtém-se ciano, e a combinação dessas três cores primárias gera uma tonalidade leitosa, quase branca.



Thomaz/Duty, iStock

Visão: porta de entrada de infindáveis informações.



Steve Gschmeissner/ISTOCK/Imago

Eletromicrografia de células da retina (cores artificiais); ampliação de cerca de 990 vezes. Região da fóvea, onde ficam as células sensoriais da visão: bastonetes (em bege) e cones (em verde).



Cores primárias na indústria gráfica.



Ilustrações: S&AD

Cores primárias nos aparelhos eletrônicos.

12. SISTEMAS ÓPTICOS ESTIGMÁTICOS, APLANÉTICOS E ORTOSCÓPICOS

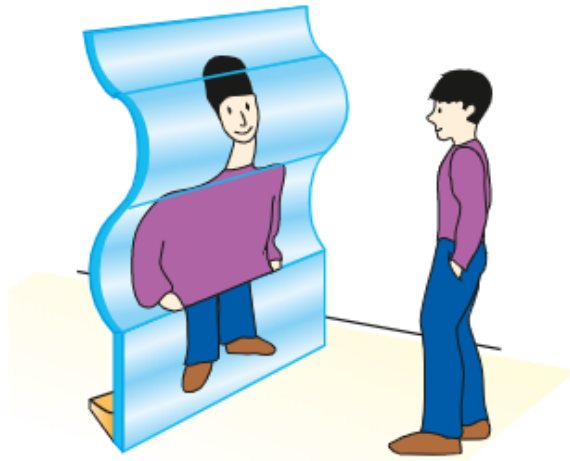
Um sistema óptico é **estigmático** quando a um ponto objeto conjuga um e somente um ponto imagem.

Um sistema óptico é **aplanético** quando a um objeto plano e frontal conjuga uma imagem também plana e frontal.

Um sistema óptico é **ortoscópico** quando a um objeto conjuga uma imagem geometricamente semelhante.

O único sistema óptico rigorosamente estigmático, aplanético e ortoscópico para qualquer posição do objeto é o espelho plano.

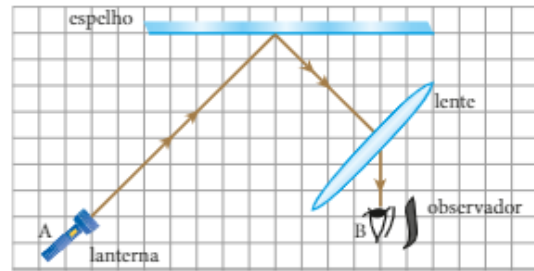
O “espelho mágico” representado na figura a seguir é constituído de uma região convexa, uma côncava e outra plana. Exceto a região plana, as demais regiões **não** são estigmáticas, nem aplanéticas, nem ortoscópicas. A imagem que o sistema conjuga é sensivelmente distorcida em relação ao objeto.



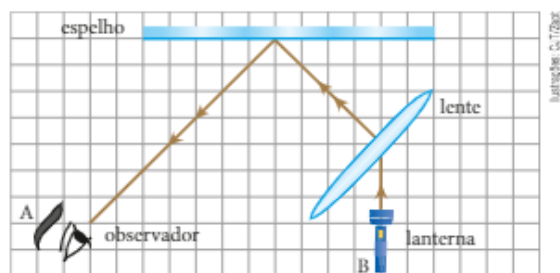
13. REVERSIBILIDADE NA PROPAGAÇÃO DA LUZ

O experimento que será relatado envolve um observador, um espelho, uma lente e uma pequena lanterna capaz de emitir um estreito pincel cilíndrico de luz monocromática.

Ligando a lanterna – ver a figura a seguir –, inicialmente situada na posição **A**, o pincel luminoso emitido por ela descreverá a trajetória mostrada, atingindo o olho do observador situado na posição **B**.



Permutando, agora, as posições da lanterna e do olho do observador, notaremos que, acendendo a lanterna na posição **B**, a luz emitida por ela descreverá a mesma trajetória do caso anterior, atingindo o olho do observador situado na posição **A**. A figura a seguir ilustra o exposto.



Esse experimento e outros similares constituem a evidência de que a propagação da luz é reversível, isto é:

Em idênticas condições, a trajetória seguida pela luz independe do sentido de propagação.

Exemplo: É comum um motorista de táxi ver a imagem dos olhos do passageiro sentado no banco de trás por meio do espelho retrovisor plano interno do veículo.



Graças à reversibilidade da luz, se o motorista consegue ver no espelho a imagem do passageiro, este também consegue ver, no mesmo espelho, a imagem do motorista.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

POR QUE O CÉU DIURNO É AZUL?

A luz branca solar – policromática, pois é constituída de diversas cores, como vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta –, depois de atravessar cerca de 150 milhões de quilômetros no vácuo desde sua emissão no Sol, adentra a atmosfera terrestre, sofrendo sucessivas refrações até atingir o solo.

Nessa penetração, ela tem suas componentes de maior frequência – o azul e o violeta – bastante difundidas pelas partículas dos gases que compõem o ar, especialmente o nitrogênio (N_2), que ressoam intensamente com essas duas radiações. As luzes azul e violeta são então espalhadas em todas as direções. O resultado disso é que essas duas frequências – em especial a azul, que é mais abundante no espectro da luz branca – incidem de forma predominante em nossos olhos, fazendo-nos perceber o céu diurno na tonalidade azul.

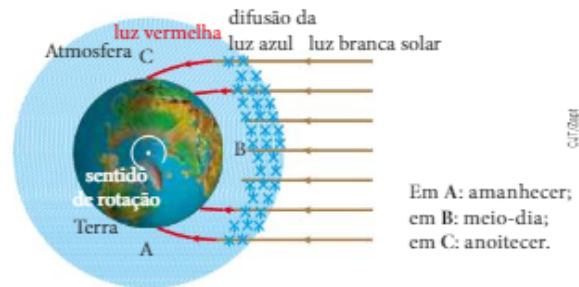


Fotografia de visão diurna: partículas dos gases do ar definem predominantemente a cor azul.

As nuvens em geral são visualizadas brancas pelo fato de as partículas de água que as constituem difundirem de forma praticamente igual as sete cores fundamentais.

Ao amanhecer e ao anoitecer, entretanto, o céu apresenta-se avermelhado na direção do Sol. Isso se explica porque, nessas ocasiões, a luz percorre na atmosfera um caminho mais longo que o percorrido, por exemplo, ao meio-dia. O azul é difundido logo nas camadas de entrada da luz, e o que chega aos nossos olhos são principalmente as radiações de baixa frequência (vermelho, alaranjado e amarelo) difundidas por partículas sólidas em suspensão nas camadas mais baixas da atmosfera.

Você sabe como seria o céu diurno caso a Terra não tivesse atmosfera? Seria negro, como o céu lunar. Veríamos iluminados o solo, os objetos e as pessoas. O Sol apareceria brilhante e imponente, porém imerso em uma imensidão escura que possibilitaria, mesmo durante o dia, a visão de outros corpos celestes – luminosos e iluminados –, como só ocorre em condições reais durante a noite.



Em A: amanhecer; em B: meio-dia; em C: anoitecer.

O céu do meio-dia é azul, enquanto o céu do amanhecer e do anoitecer é avermelhado. (Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.)

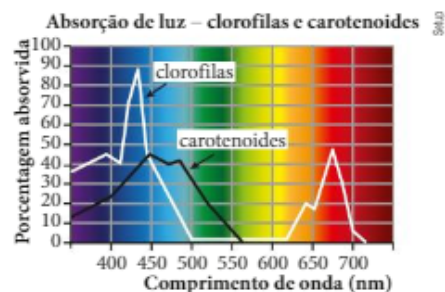
QUESTÕES COMENTADAS

15 Em alguns países, especialmente no hemisfério Norte, o outono é marcado pela natureza de forma pronunciada e bela. Árvores de diversas espécies têm suas folhas modificadas, adquirindo tons avermelhados que vão do ocre ao lilás. Isso significa que essas folhas se tornam ricas em pigmentos carotenoides que superam em quantidade os pigmentos clorofilas.



Paisagem em rua de Moscou. Setembro de 2013.

No diagrama a seguir, estão representadas as curvas que associam, para as clorofilas e os carotenoides, a porcentagem de absorção de luz, em ordenadas, em função do comprimento de onda de radiação visível, em abscissas.



Com base no diagrama da página anterior, responda:

- Qual é a coloração predominante manifestada por folhas ricas em pigmentos clorofila quando iluminadas pela luz do sol?
- Folhas ricas em pigmentos carotenoides difundem mais intensamente, sob a luz do Sol, quais comprimentos de onda?

RESOLUÇÃO

- Folhas ricas em pigmentos clorofila manifestam predominantemente, quando iluminadas pela luz do Sol, coloração verde ou verde amarelada. Isso ocorre porque,

conforme o diagrama, comprimentos de onda pequenos, compatíveis com o violeta, o anil e o azul, são intensamente absorvidos, o mesmo ocorrendo com comprimentos de onda grandes, compatíveis com o alaranjado e o vermelho. Sendo assim, apenas o verde e o amarelo — sobretudo o verde — são difundidos em maior porcentagem.

- Conforme o diagrama, são difundidos mais intensamente pelos pigmentos carotenoides os comprimentos de onda grandes, maiores que 560 nm, compatíveis com o amarelo, o alaranjado e o vermelho.

Respostas: a) Verde ou verde amarelada;
b) Maiores que 560 nm.



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

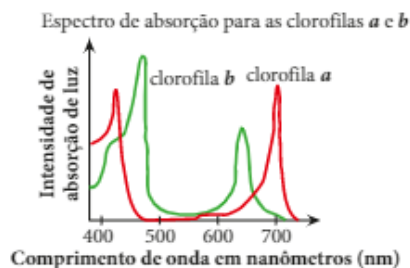
16. A bandeira do Brasil esquematizada na figura é confeccionada em tecidos puramente pigmentados.

Estando estendida sobre uma mesa no interior de um recinto absolutamente escuro, a bandeira é iluminada por luz monocromática. Determine de que cores serão vistas as regiões designadas por 1, 2, 3 e 4 no caso de:

- a luz monocromática ser verde.
- a luz monocromática ser vermelha.



17. O gráfico abaixo representa a intensidade de radiação visível absorvida em função do comprimento de onda da luz incidente (espectro de absorção), respectivamente, para as clorofilas *a* (curva vermelha) e *b* (curva verde), geralmente presentes na maioria dos vegetais.



Comprimento de onda (nm)	Cor
380 – 450	Violeta
450 – 490	Azul
490 – 520	Ciano
520 – 570	Verde
570 – 590	Amarelo
590 – 620	Alaranjado
620 – 740	Vermelho

Fonte de pesquisa: BRESINSKY, A. *Tratado de botânica de Strasburger*. 36. ed. Porto Alegre: Artmed, 2011.

Com base nessas informações, responda:

- Considerando-se que a luz se propaga no ar com velocidade $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s, qual é a frequência máxima associada à luz verde (ou mínima associada à luz ciano)?
- Em um experimento, dois vasos com plantas de crescimento rápido e da mesma espécie foram submetidos às seguintes condições: vaso 1: exposição à luz solar; vaso 2: exposição à luz verde. A temperatura e a disponibilidade hídrica foram as mesmas para os dois vasos. Depois de algumas semanas, verificou-se que o crescimento das plantas diferiu entre os vasos. Qual é a razão dessa diferença?
- Por que as pessoas, com visão normal para as cores, enxergam como verdes, as folhas da maioria das plantas?



DESCUBRA MAIS

- Você assiste à decolagem de um avião de um local próximo à sua posição. Depois, você visualiza a mesma aeronave distante, já voando em grande altitude. Por que o avião parece mais lento em voo que em solo quando, na realidade, ocorre o contrário?
- Por que as nuvens de chuva são vistas acinzentadas por um observador situado no solo terrestre?

INTERSABERES

Luz: esse ente físico essencial

Apresentamos no início deste capítulo uma definição um tanto simplista para a luz, quando dissemos que "luz é o agente físico que, atuando nos órgãos visuais, produz a sensação da visão". Talvez pudéssemos ter dito que a luz é um tipo de energia radiante — onda eletromagnética — que pode se propagar no vácuo com velocidade de aproximadamente $3,0 \cdot 10^8$ m/s, como também ocorre com sinais de rádio, TV, micro-ondas, raios X e raios γ .

Seria ainda lícito dizer que a luz tem caráter corpuscular — partículas de energia denominadas fótons —, havendo em cada um dos ínfimos grãos luminosos uma dose de energia — *quantum* — diretamente proporcional à frequência considerada.

Sim, a luz tem caráter dual!

Conforme as teorias de James C. Maxwell (1831-1879) e forte base experimental, em certos fenômenos como difração e interferência, ela se comporta como onda eletromagnética. Já segundo Max Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955) e outros cientistas, a luz se manifesta como feixes de discretos pacotes de energia capazes de interagir com a matéria, como ocorre no efeito fotoelétrico (Capítulo 12, do Volume 3) e na fotossíntese, inerente aos vegetais.

É fundamental registrar que a luz tem papel essencial, estando associada a rotinas e tecnologias que vão muito além do simples ato de enxergar. Basta dizer que, com base na luz, desenvolveram-se a Astronomia, a Medicina e as telecomunicações.

A Unesco (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) deliberou em 2013 pela criação de um ano internacional da luz. Designou-se para isso o ano de 2015. Durante esse período foram realizadas mundo afora conferências, palestras e debates sobre a importância da luz na sociedade moderna e as tecnologias a ela associadas, como pode ser lido no texto a seguir.



Cartaz representando o Ano Internacional da Luz.

2015: Ano Internacional da Luz

No dia 20 de dezembro de 2013, a 68ª Sessão da Assembleia Geral das Nações Unidas proclamou o ano de 2015 como o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz (*International Year of Light and Light-based Technologies - IYL 2015*).

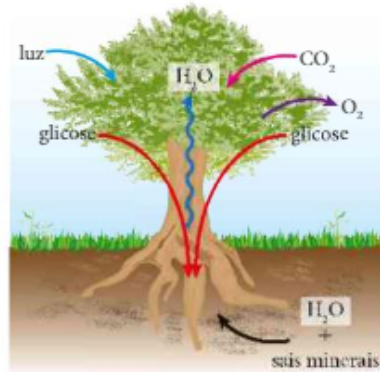
O Ano Internacional da Luz é uma iniciativa mundial que vai destacar a importância da luz e das tecnologias ópticas na vida dos cidadãos, assim como no futuro e no desenvolvimento das sociedades de todo o mundo. Essa é uma oportunidade única para se inspirar, para se educar e para se unir em escala mundial.

Ao proclamar um Ano Internacional com foco na ciência óptica e em suas aplicações, as Nações Unidas reconhecem a importância da conscientização mundial sobre como as tecnologias baseadas na luz promovem o desenvolvimento sustentável e fornecem soluções para os desafios mundiais nas áreas de energia, educação, agricultura, comunicação e saúde. A luz exerce um papel essencial no nosso cotidiano e é uma disciplina científica transversal obrigatória para o século XXI. Ela vem revolucionando a medicina, abrindo a comunicação internacional por meio da internet e continua a ser primordial para vincular aspectos culturais, econômicos e políticos da sociedade mundial.

Juntamente com a Unesco, um grande número de organismos científicos participará dessa iniciativa, que, em 2015, vai reunir diversas partes interessadas, inclusive sociedades e associações científicas, instituições de ensino, plataformas de tecnologia, organizações sem fins lucrativos e parceiros do setor privado.

"Um Ano Internacional da Luz é uma grande oportunidade para garantir que gestores de políticas internacionais e partes interessadas se conscientizem sobre o potencial de solução de problemas que a tecnologia óptica apresenta. Nós temos agora uma oportunidade única para promover essa conscientização em âmbito mundial" (John Dudley, presidente do Comitê de Promoção do IYL 2015). [...]

Como foi dito, a fotossíntese, própria dos seres autotróficos (vegetais, algas e cianobactérias capazes de sintetizar a matéria orgânica necessária ao seu ciclo vital), consiste na produção de seiva elaborada a partir de luz. A seguir apresentamos um esquema e uma "equação" que dá uma noção básica do processo.



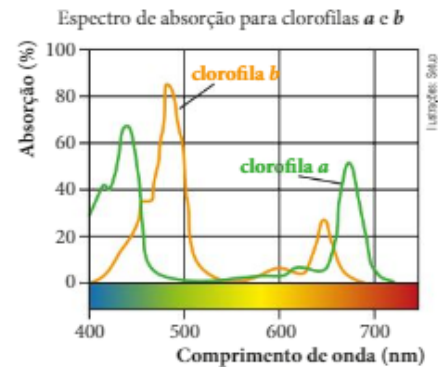
Na explicação da fotossíntese, exige-se uma noção quântica da luz que, uma vez absorvida por pigmentos clorofila presentes nas folhas das plantas, promove saltos de elétrons para níveis mais elevados de energia. Com isso, ao retornarem aos seus orbitais originais, esses elétrons emitem energia radiante que é aproveitada fundamentalmente como energia química nas reações bioquímicas de produção de matéria orgânica.

Nem todas as radiações visíveis, porém, são capazes de produzir fotossíntese.

Theodor W. Engelmann (1843-1905) realizou um notável experimento que revelou serem apenas as luzes de baixo comprimento de onda (violeta, anil e azul) e de alto comprimento de onda (alaranjado e vermelho) as responsáveis pela realização do processo. Isso ocorre porque essas luzes são intensamente absorvidas pela maioria das plantas.

Luzes verdes e amarelas são fortemente difundidas (refletidas) pelas clorofilas, o que torna a cor manifestada pela maior parte das folhas verde ou verde amarelada.

No gráfico estão indicados os níveis de absorção de luz pelas clorofilas **a** (presente em todos os vegetais e algas) e **b** em função dos comprimentos de onda da luz incidente.



Fonte: RAVEN, H.; EICHHORN, S. E.; EVERT R. F. BIOLOGIA VEGETAL. RIO DE JANEIRO: GUANABARA KOOGAN, 2014.

Disponível em: <www.unesco.org/new/pt/brasil/ia/about-this-office/prizes-and-celebrations/2015-international-year-of-light/>. Acesso em: 15 jan. 2016.

Compreensão, pesquisa e debate

1. A medicina diagnóstica moderna se vale de vários exames clínicos que utilizam luz. Informe-se a respeito e cite alguns desses exames.
2. Atualmente belos efeitos visuais noturnos são conseguidos iluminando-se jardins repletos de grama, palmeiras e samambaias com luminárias que emitem luz verde. Isso favorece, durante a noite, a realização de fotossíntese por parte dessas plantas?
3. A Terra recebe energia radiante do Sol que envia ao nosso planeta não apenas luz e calor, mas, também, outras formas de radiações, como raios X e raios γ , que são significativamente absorvidos pela atmosfera e impedidos de atingir a superfície do planeta. Se raios X e raios γ chegassem à crosta e aos oceanos, existiria por aqui vida nos padrões que conhecemos hoje?
4. Reúna-se com seus colegas e professores e proponha um debate sobre a importância da luz e suas tecnologias. Realize uma pesquisa para discutir a respeito da natureza dual da luz; aborde os períodos pré e pós-luz elétrica na sociedade e analise de que modo a luz influenciou no conhecimento humano sobre o cosmo e a vida no planeta Terra.



REFLEXÃO DA LUZ

1. REFLEXÃO: CONCEITO, ELEMENTOS E LEIS

A mitologia grega é mesmo pródiga.

Segundo a narrativa do poeta romano Ovídio em seu livro *Metamorfoses*, Narciso foi um jovem belíssimo que, por ter recusado o amor da ninfa Eco, foi condenado por Nêmesis, deusa da vingança e da ética, a apaixonar-se por sua própria imagem refletida nas águas de um lago tranquilo. Narciso, nome derivado de *narke*, que em grego significa entorpecido, teria ficado obcecado por admirar-se, até sua completa inanição, o que lhe ceifou a vida, transformando-o em uma flor: o narciso.

Narciso tem inspirado artistas de vários segmentos ao longo do tempo, como Caravaggio (1571-1610), pintor do barroco italiano que retratou esse símbolo máximo de vaidade. Observe a imagem abaixo.



Narciso, óleo sobre tela. Obra de Caravaggio, pintada por volta de 1594-1596.

Note que a superfície da água se comporta como um bom espelho plano, o qual, refletindo a luz difundida pelo corpo do rapaz, produz a imagem encantadora, razão de seu autodeslumbramento.

Este capítulo refere-se ao fenômeno da reflexão da luz e suas aplicações em sistemas ópticos, como espelhos planos e esféricos. Dentro de equipamentos ópticos

"É que Narciso acha feio o que não é espelho [...]"

(Verso da canção *Sampa*, de Caetano Veloso)

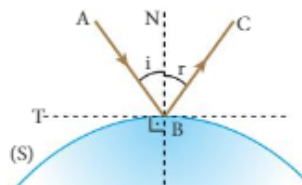
cos de larga utilização, a luz também se reflete, o que pode ser verificado em algumas câmeras fotográficas, periscópios, binóculos e telescópios.

Em *Ondulatória* e no capítulo anterior, vimos que:

Reflexão é o fenômeno que consiste no fato de a luz voltar a se propagar no meio de origem, após incidir na superfície de separação desse meio com outro.

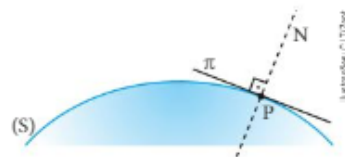
Elementos

Considere a figura a seguir, que representa a reflexão de um raio de luz, destacando os elementos nela envolvidos.

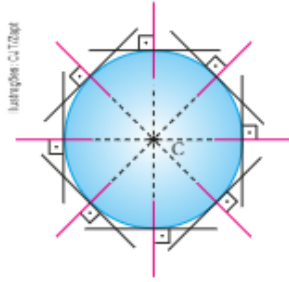


S é a superfície polida e refletora;
 AB é o raio incidente; BC é o raio refletido;
 N é a reta normal a S no ponto de incidência;
 T é a reta tangente a S no ponto de incidência;
 i é o ângulo de incidência, formado pelo raio incidente (AB) e pela reta normal (N);
 r é o ângulo de reflexão, formado pelo raio refletido (BC) e pela reta normal (N).

A reta normal a uma superfície em determinado ponto é a reta perpendicular a um plano tangente à superfície no ponto considerado. Veja a figura a seguir:



S é a superfície considerada;
 π é o plano tangente a S no ponto P;
 N é a reta normal a S no ponto P.



As retas normais a uma superfície esférica são **radiais**, isto é, têm a direção do raio da superfície em cada ponto.

Ao plano que contém o raio incidente e a reta normal dá-se o nome de **plano de incidência**.

Leis

O fenômeno da reflexão é regido por duas leis, que podem ser verificadas teórica e experimentalmente.

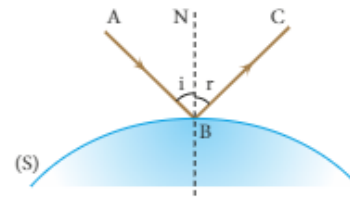
1ª Lei da Reflexão

O raio refletido pertence ao plano de incidência, ou seja, o raio refletido, a reta normal no ponto de incidência e o raio incidente são **coplanares**.

2ª Lei da Reflexão

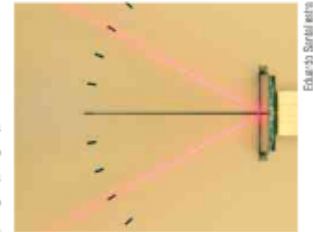
O ângulo de reflexão é sempre **igual** ao ângulo de incidência.

Veja o esquema a seguir, que representa a reflexão de um raio luminoso em uma superfície S.



De acordo com as leis da reflexão, se AB e N estiverem contidos no plano do papel, o mesmo deverá acontecer com BC, e teremos ainda a igualdade $r = i$.

Nesta fotografia, um estreito pincel cilíndrico de luz proveniente de um apontador *laser* é refletido por um pequeno espelho.



Podemos observar que os pincéis incidente e refletido são coplanares, isto é, estão quase totalmente contidos no plano de apoio do espelho, e também que o ângulo de reflexão é igual ao de incidência. É possível verificar ainda a reversibilidade da luz. Repare que, independentemente de a luz provir de cima ou de baixo, sua trajetória é a mesma.

A distância da Terra à Lua é monitorada pela reflexão da luz

A Lua, único satélite natural da Terra, sempre exerceu enorme fascínio sobre a mente humana. É realmente encantador contemplar a lua cheia em noites de pouca nebulosidade e deixar a imaginação indagar a respeito das mais profundas questões. E os devaneios do homem traduziram-se em ousadia, colocando-o materialmente em solo lunar no histórico 20 de julho de 1969. A missão Apollo 11, tripulada por Neil A. **Armstrong**, Michael **Collins** e Buzz **Aldrin**, permitiu, pela primeira vez, a um habitante terrestre caminhar sobre a superfície da Lua, dando início à maior saga da humanidade em sua busca por conhecimentos sobre o cosmo.

Passada a emoção do pioneirismo, dois desses astronautas, Armstrong e Aldrin, deixaram suas emblemáticas pegadas no arenoso solo lunar e iniciaram os procedimentos e experimentações previstos. Colheram farto material para posterior análise, fotografaram detalhadamente o ambiente lunar e saltitaram com leveza sob a ação de uma aceleração da gravidade menos intensa que a da Terra (cerca de $1,67 \text{ m/s}^2$ ante $9,81 \text{ m/s}^2$, respectivamente). Faltando aproximadamente uma hora para abandonar o local, deixaram no chamado Mar da Tranquilidade (na verdade, uma grande cratera árida) um equipamento que é utilizado até os dias de hoje para monitoramento da distância entre a Terra e a Lua: o refletor lunar de feixes *laser* ou, em inglês, *lunar laser retroreflector array*.



Refletor lunar de feixes *laser* deixado no solo da Lua. Ele é formado por células prismáticas dispostas lado a lado.

O processo de medição da distância da Terra à Lua é relativamente simples: dispara-se um estreito feixe *laser* de grande potência a partir de determinado telescópio terrestre e cronometra-se o intervalo de tempo gasto pelo feixe para atingir a Lua, sofrer reflexão no equipamento lá deixado e ser captado de volta pelo mesmo telescópio. Com a medida do referido intervalo de tempo (cerca de 2,56 s) e o conhecimento da velocidade de propagação da luz ($3,0 \cdot 10^8$ m/s), torna-se possível determinar a distância do satélite ao nosso planeta. Os valores obtidos são próximos de 384 000 km, em média.

Sendo Δt o intervalo de tempo medido pelo equipamento e c a intensidade da velocidade da luz, o cálculo da distância d da Terra à Lua é feito automaticamente pelos computadores do telescópio com base nos conceitos do movimento uniforme:

$$c = \frac{2d}{\Delta t} \Rightarrow d = \frac{c \Delta t}{2}$$

O feixe *laser*, no entanto, espalha-se durante sua propagação, atingindo a Lua com um diâmetro próximo de 7 km e a Terra, em seu retorno, com um diâmetro em torno de 20 km. Por isso os sensores de captação existentes nos telescópios são muito sensíveis, chegando até a registrar a incidência de uns poucos fótons de luz. O método permite a obtenção de medidas com grande precisão, afetadas por uma margem de erro de apenas alguns centímetros.

Além do equipamento deixado pela missão Apollo 11, missões posteriores, incluindo uma soviética, também instalaram, em outros locais da Lua, sistemas semelhantes. Dessa forma, é possível manter um monitoramento preciso da órbita lunar em torno da Terra, bem como dos movimentos desse satélite. Isso é feito em alguns telescópios terrestres, instalados em sua maioria nos Estados Unidos e na Europa. Tais avaliações possibilitaram aos astrônomos saber, entre outras informações, que a Lua está se afastando de nosso planeta cerca de 3,8 cm ao ano.

As viagens tripuladas à Lua foram de importância singular por terem agregado, ao que já se sabia, conhecimentos essenciais sobre o satélite, o Sistema Solar, o Universo e a própria espécie humana.

A última missão norte-americana tripulada à Lua foi a Apollo 17, em dezembro de 1972. Nesta fotografia, o comandante da expedição, o astronauta Eugene A. Cernan, reverencia a bandeira de seu país deixada no solo lunar como um marco dessa grande aventura humana.



Um potente feixe *laser* é disparado do observatório da Côte d'Azur, Nice, França, em direção à Lua.

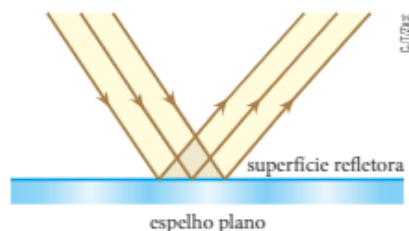


2. ESPELHOS PLANOS

Chama-se **espelho plano** qualquer superfície plana, polida e com alto poder refletor.

Bons espelhos planos são obtidos com o polimento de chapas metálicas. Entretanto, os espelhos obtidos assim nem sempre são baratos e funcionais. Em geral, os espelhos planos são confeccionados a partir de uma lâmina de vidro hialino (transparente) de faces paralelas, sendo uma delas recoberta por uma película de nitrato de prata que se reduz a prata metálica. A fixação dessa película é obtida colocando-se sobre ela uma fina camada de cobre que recebe demãos de tinta e verniz.

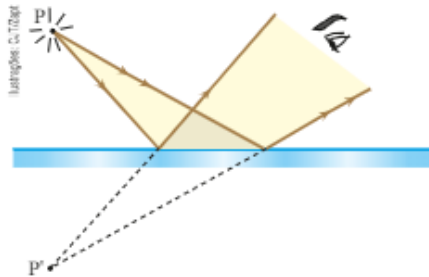
Os espelhos planos têm emprego bastante diversificado. São utilizados domesticamente, prestando-se a variados fins, e também como componentes de vários sistemas ópticos. Adotaremos o esquema abaixo para representar os espelhos planos.



Convém notar que, em um espelho plano, há predominância da reflexão regular.

Construção gráfica de imagens nos espelhos planos

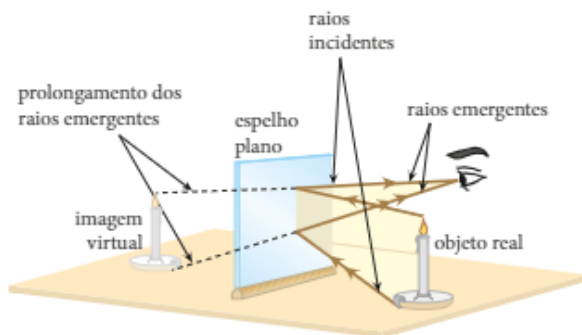
Consideremos o espelho plano abaixo e o ponto luminoso **P**. Pretendemos traçar a imagem de **P** conjugada pelo espelho. Para isso, utilizamos dois raios luminosos (pelo menos) que, partindo de **P**, incidem no espelho. Esses raios incidentes determinam raios refletidos, cujos prolongamentos se intersectam no ponto **P'**.



O ponto **P'**, que é o vértice do pincel luminoso emergente do sistema, é a imagem do objeto **P**, conjugada pelo espelho.

Observe que, no caso, **P** é um objeto real, enquanto **P'** é uma imagem virtual (formada "atrás do espelho", isto é, obtida pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios refletidos).

É importante destacar que, em relação ao olho do observador, **P'** se comporta como objeto real, como se a luz fosse proveniente desse ponto.

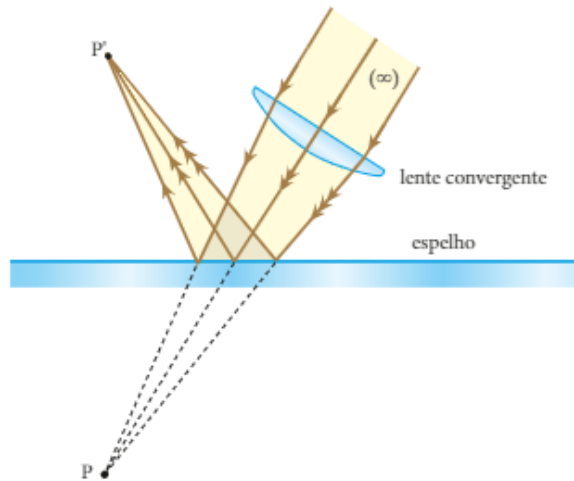


Nesta ilustração, você pode notar a imagem virtual da vela situada "atrás do espelho". Essa imagem não tem existência material, mas funciona como objeto real em relação ao olho do observador.



Nesta fotografia, vemos um brinquedo de madeira e sua respectiva imagem fornecida por um espelho plano vertical.

Façamos, agora, o traçado da imagem conjugada ao ponto **P** pelo espelho plano indicado na figura abaixo.



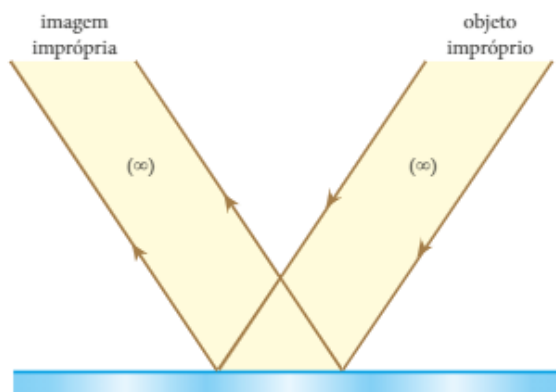
Note que, nesse caso, em relação ao espelho, **P** é um objeto virtual (formado "atrás do espelho", ou seja, obtido pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios incidentes), enquanto **P'** é uma imagem real (vértice efetivo do pincel luminoso emergente do sistema).

O que acaba de ser exposto, além de mostrar o processo de construção gráfica das imagens, permite uma conclusão importante:

Nos espelhos planos, o objeto e a respectiva imagem têm sempre **naturezas opostas**, isto é, se o primeiro for real, o outro será virtual e vice-versa.

Em razão da reflexão regular da luz nos espelhos planos, a um objeto impróprio ("situado no infinito") corresponde uma imagem imprópria ("situada no infinito").

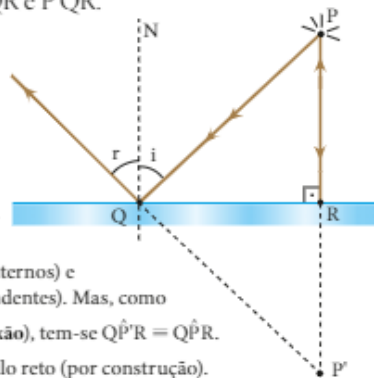
Pelo fato de conjugarem uma imagem imprópria a um objeto impróprio, os espelhos planos são sistemas ópticos **afocais**.



Propriedade Fundamental dos Espelhos Planos: a simetria

Considere o espelho plano representado na figura a seguir, diante do qual se situa um objeto luminoso pontual **P**. Os raios luminosos **PR** e **PQ** incidem no espelho, respectivamente, normal e obliquamente. O raio **PR** se refletirá sobre si mesmo, enquanto **PQ** dará origem a um raio refletido oblíquo em relação ao espelho. A imagem de **P** é **P'**, obtida pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios refletidos.

A fim de apresentar a **Propriedade Fundamental dos Espelhos Planos**, demonstramos a congruência dos triângulos **PQR** e **P'QR**.



- O lado **QR** é comum aos dois triângulos.
- $\widehat{QPR} = \widehat{Q'P'R}$ (alternos internos) e $\widehat{PQR} = \widehat{P'QR}$ (correspondentes). Mas, como $r = i$ (**2ª Lei da Reflexão**), tem-se $\widehat{QPR} = \widehat{Q'P'R}$.
- $\widehat{QRP} = \widehat{Q'R'P'} = \widehat{\text{ângulo reto}}$ (por construção).

Demonstrada a congruência dos dois triângulos, podemos afirmar que: $PR = P'R$.

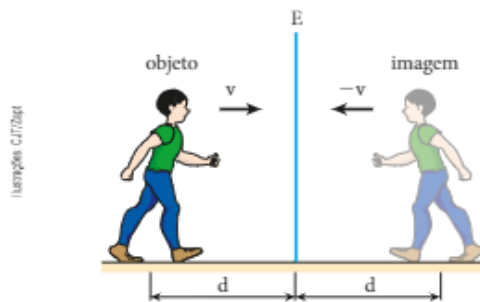
Isso significa que a distância do objeto ao espelho (**PR**) é igual à distância da imagem ao espelho (**P'R**). Tal verificação é conhecida por **Propriedade Fundamental dos Espelhos Planos** e pode ser enunciada assim:

Nos espelhos planos, a imagem é sempre **simétrica** do objeto em relação ao espelho.

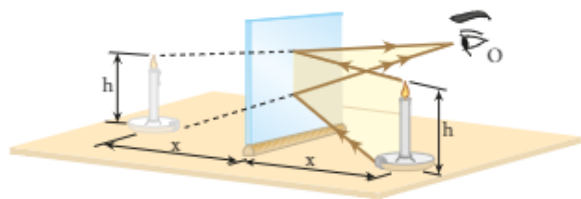


Estas fotografias ilustram satisfatoriamente a Propriedade Fundamental dos Espelhos Planos: a **simetria**. Observe que a distância da imagem ao espelho é igual à distância do objeto ao espelho.

Na situação esquematizada a seguir, uma pessoa se aproxima de um espelho plano **E**, fixo, com velocidade de módulo **v**. Por causa da **simetria**, a imagem também se aproxima do espelho com velocidade de módulo **v**. Se, entretanto, adotarmos a pessoa como referencial, a imagem se aproximará dela com velocidade de módulo **2v**.

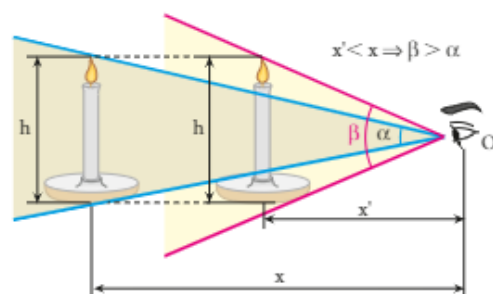


Na situação representada na figura a seguir, um observador **O** contempla a imagem de uma vela de altura **h** por meio de um espelho plano vertical.



Em razão da **simetria** entre o objeto e a respectiva imagem, a altura da imagem também será **h**, mesmo que a vela seja aproximada ou afastada do espelho.

No caso de uma aproximação, por exemplo, o observador terá a **sensação** de que a altura da imagem aumenta, mas isso apenas decorre do aumento do **ângulo visual** de observação.



Quanto mais próxima do olho estiver a imagem, maior será o ângulo visual de observação, dando a impressão de aumento em sua altura.

FAÇA VOCÊ MESMO

Fogo que não queima

O experimento que apresentamos a seguir até parece um passe de mágica, mas, fundamentado em seus conhecimentos sobre **Óptica – Espelhos planos**, você certamente saberá justificar cada um dos fatos observados.

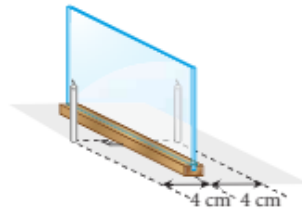
O experimento produz resultados mais contundentes se for realizado em um ambiente com pouca luminosidade, semiescurecido.

Material necessário

- 2 velas idênticas, com comprimento próximo de 15 cm;
- 1 placa retangular de vidro transparente, com dimensões 30 cm × 25 cm, aproximadamente;
- 1 base de madeira em forma de paralelepípedo, dotada de uma reentrância longitudinal, para servir de suporte à placa de vidro. Fixações alternativas para essa placa também podem ser cogitadas;
- 1 régua ou trena;
- fósforos ou isqueiro para acender uma das velas.

Procedimento

- I.** Utilizando uma mesa como bancada, aloje a lâmina de vidro na base de madeira de modo que a lâmina permaneça disposta verticalmente. Posicione as velas simetricamente em relação à lâmina de vidro, uma de cada lado, como indicado na figura ao lado.



Distâncias de 4 cm a 5 cm entre as velas e as respectivas faces da lâmina são ideais. Utilize a régua ou a trena para aferir com exatidão essas distâncias e se certifique de que elas são iguais. Observe que inicialmente nenhuma vela deve estar acesa.

Você e outras pessoas que porventura presenciem o “número” notarão que o material colocado em contato com a chama aparente não se queimará.

E, é claro, se você apagar a vela, a chama “virtual” também se apagará. Simultaneamente!

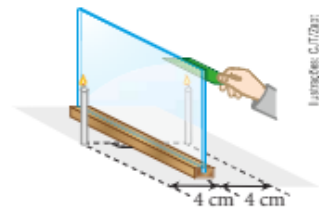
Analisando o experimento

1. Como você explica o “acendimento” da vela situada do lado oposto da lâmina de vidro em relação ao seu ponto de observação?
2. Por que o material inflamável colocado em contato com a chama “virtual” não entra em combustão?
3. Se as velas não estivessem dispostas conforme o sugerido – posicionadas simetricamente em relação à lâmina de vidro – o efeito descrito teria sido observado com perfeição?
4. O sucesso do experimento tem alguma relação com a propriedade da simetria inerente aos espelhos planos, isto é, a imagem é simétrica do objeto em relação ao espelho?

ATENÇÃO!

Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do professor. Cuidado ao manusear a placa de vidro.

- II.** Com cuidado, acenda agora uma das velas – aquela posicionada do lado do seu ponto de observação – e olhe através da lâmina de vidro. Você visualizará a outra vela também acesa, com seu pavio ardendo exatamente do mesmo modo que o da vela situada do lado do seu ponto de observação!

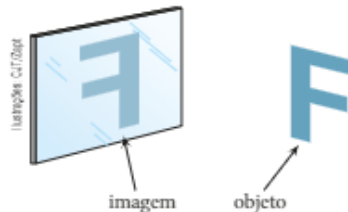


Este seria um bom número de ilusionismo, não é? Para deixar o efeito ainda mais impressionante, coloque algo inflamável, como uma folha de papel dobrada, ou mesmo a palma de sua mão, em contato com a chama “virtual”.

Imagem e objeto não superponíveis

É importante observar que, devido à simetria, a imagem de um objeto extenso fornecida por um espelho plano, embora idêntica a ele, não lhe é, em geral, superponível.

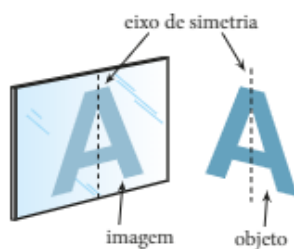
Considere, por exemplo, a ilustração abaixo, que representa um espelho plano diante do qual se coloca a letra F.



Nessas condições, a imagem fornecida pelo espelho é um F ao contrário não superponível por translação ao objeto que lhe deu origem. Há uma aparente inversão lateral da letra. Diz-se que a imagem é **enantiomorfa**, isto é, tem forma contrária à do objeto.

Entretanto, a imagem fornecida por um espelho plano de um objeto monocromático que admite um eixo de simetria é superponível a ele.

Se, por exemplo, tivermos uma letra A vertical e simétrica diante de um espelho plano vertical, o objeto produzirá uma imagem que lhe será superponível.



Em viaturas utilizadas em emergências, como ambulâncias e carros de bombeiros, é comum pintar a palavra que as designa "ao contrário". O objetivo é proporcionar aos motoristas que estão à frente uma leitura adequada em seus espelhos retrovisores.



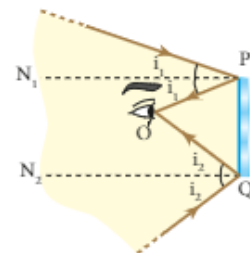
Fotografia mostrando como as letras aparecem estampadas em uma ambulância.

Campo de um espelho plano

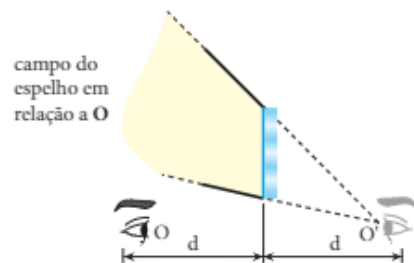
Chama-se **campo de um espelho plano**, para determinado observador, a região do espaço que pode ser contemplada por ele pela reflexão da luz no espelho.

A demarcação do campo do espelho é feita da seguinte maneira: **O** é o olho do observador e **PO** e **QO** são raios refletidos na periferia do espelho, que atingem **O**.

A região destacada corresponde ao campo do espelho em relação a **O**.

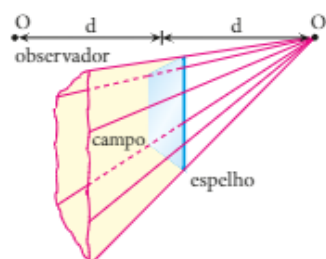


A demarcação do campo pode ser feita de forma mais imediata. Dada a posição do observador **O**, determina-se a posição simétrica **O'** em relação à superfície refletora. A região do espaço visível por reflexão é determinada ligando-se o ponto **O'** ao contorno periférico do espelho.



Tudo se passa como se o observador **O** estivesse olhando a partir de **O'**.

Convém apontar que o campo de um espelho qualquer é uma região **tridimensional**.



Vista espacial do campo de um espelho plano retangular em relação ao observador **O**.

FAÇA VOCÊ MESMO

Verificação experimental da 2ª Lei da Reflexão

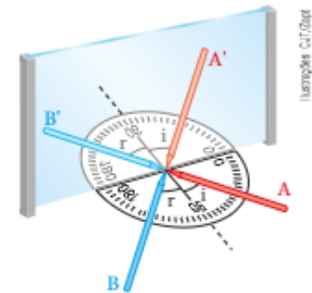
Apresentamos a seguir um experimento bastante simples que você pode realizar na escola ou mesmo em casa para verificar a **2ª Lei da Reflexão**: o *ângulo de reflexão é sempre igual ao ângulo de incidência*. Será que essa lei é sempre verdadeira?

Material necessário

- 1 espelho plano de base reta com molduras de apoio nas laterais;
- 1 transferidor semicircular;
- 2 lápis apontados (ou canetas) diferentes, de preferência um de cada cor.

Procedimento

- Coloque o espelho sobre o transferidor de modo que sua base coincida com a linha de base desse instrumento. Com isso, a linha indicativa de 90° do transferidor ficará perpendicular à superfície do espelho (essa linha fará o papel de reta normal à superfície refletora).
- Pegue um dos lápis (vermelho, por exemplo, que chamaremos de lápis **A**) e encoste sua ponta no espelho no local em que a linha indicativa de 90° do transferidor encontra a superfície espelhada. Esse lápis **A** fará o papel de raio incidente.
- Pegue outro lápis (azul, por exemplo, que chamaremos de lápis **B**) e também encoste sua ponta no espelho, fazendo-a coincidir com a ponta do lápis **A**. O lápis **B** fará o papel de raio refletido.
- Alinhe, agora, da maneira mais precisa possível, o lápis **B** com a imagem do lápis **A**. Cuide para que os lápis fiquem devidamente apoiados sobre o transferidor. Veja a situação proposta no esquema ao lado.
- Meça os ângulos formados entre os lápis **A** e **B** e a linha indicativa de 90° do transferidor. Observe que esses ângulos são iguais, o que comprova a **2ª Lei da Reflexão**.



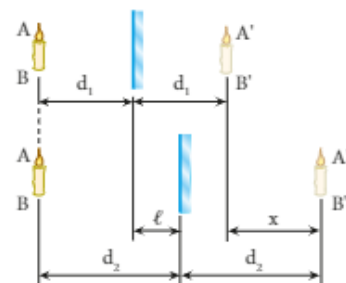
Analisando o experimento

- Modificando a inclinação do lápis **A** em relação à linha indicativa de 90° do transferidor, você perceberá a necessidade de ajustar também a posição do lápis **B** para que ele fique devidamente alinhado com a imagem do lápis **A**. Isso revela que o resultado do experimento é válido, independentemente do ângulo formado entre o lápis **A** e a linha indicativa de 90° do transferidor?
- Você também pode checar a **2ª Lei da Reflexão** utilizando um apontador *laser*, desses utilizados em palestras e aulas especiais, com seu feixe dirigido contra a superfície de um espelho plano. Elabore um experimento com esse fim envolvendo tal aparato.

Translação de um espelho plano

No esquema ao lado, tem-se um objeto **AB** situado diante de um espelho plano. Nesse caso, o espelho conjuga a **AB** a imagem **A'B'** indicada. O espelho é então transladado, paralelamente a si mesmo, afastando-se de **AB**.

Agora, em sua nova posição, o espelho conjuga ao objeto **AB** a nova imagem **A''B''**.



Sejam ℓ o comprimento correspondente à translação do espelho e x o comprimento correspondente à translação da imagem de AB. Relacionando x e ℓ por meio dos outros comprimentos referidos na figura, temos:

$$x = 2d_2 - 2d_1 \Rightarrow x = 2(d_2 - d_1) \quad (\text{I})$$

$$\ell = d_2 - d_1 \quad (\text{II})$$

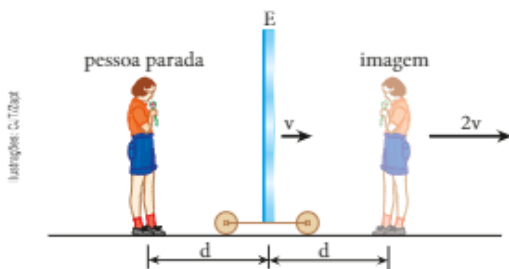
Substituindo (II) em (I), tem-se:

$$x = 2\ell$$

Concluimos, portanto, o seguinte:

Quando um espelho plano é transladado paralelamente a si mesmo, a imagem de um objeto fixo sofre translação no mesmo sentido, com o dobro do comprimento em relação à do espelho.

Na situação esquematizada a seguir, um espelho plano E afasta-se, com velocidade v , de um objeto fixo (a pessoa parada na ilustração). O espelho está a uma distância d da pessoa e a imagem a uma distância $2d$ dela. Considerando determinado intervalo de tempo, podemos afirmar que: se a velocidade do espelho em relação à pessoa é v , então a velocidade da imagem é $2v$.

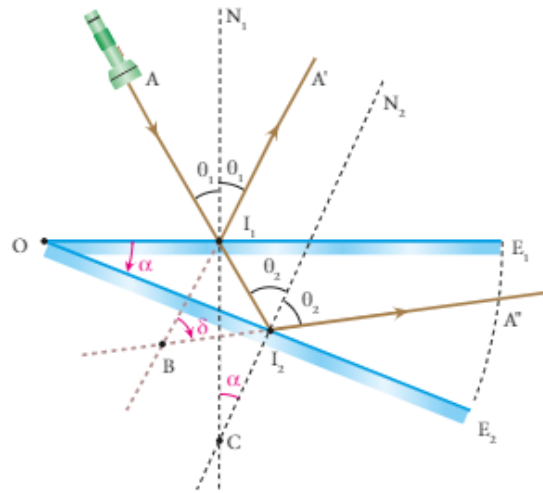


Se, entretanto, adotarmos o espelho como referencial, a velocidade da imagem em relação a ele será v .

Rotação de um espelho plano

Veja a figura a seguir, em que um raio luminoso A incide no ponto I_1 de um espelho plano, situado inicialmente na posição E_1 . O raio A determina, nessa situação, o raio refletido A' .

Admita, agora, que o espelho seja girado em torno do eixo O, sofrendo uma rotação equivalente ao ângulo α e passando à nova posição E_2 . Nesse caso, o raio A incide no espelho no ponto I_2 , determinando o novo raio refletido A'' .



Se δ o ângulo formado pelas direções dos raios refletidos A' e A'' , relacionemos δ com α .

No triângulo I_1I_2B , temos $\widehat{B}I_1I_2 = 2\theta_1$. Aplicando o Teorema do Ângulo Externo, temos:

$$\delta + 2\theta_1 = 2\theta_2 \Rightarrow \delta = 2(\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{I})$$

No triângulo I_1I_2C , temos $\widehat{C}I_1I_2 = \theta_1$. Aplicando também o Teorema do Ângulo Externo, temos:

$$\alpha + \theta_1 = \theta_2 \Rightarrow \alpha = \theta_2 - \theta_1 \quad (\text{II})$$

Substituindo (II) em (I), obtemos:

$$\delta = 2\alpha$$

Concluimos, então, que:

Quando um espelho plano sofre uma rotação de um ângulo α em torno de um eixo normal ao plano de incidência de um raio de luz proveniente de uma fonte fixa, o raio refletido correspondente sofre uma rotação, no mesmo sentido, de um ângulo que equivale ao **dobro de α** .

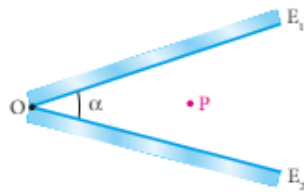
Imagens múltiplas em dois espelhos planos associados

A figura a seguir representa dois espelhos planos, E_1 e E_2 , que formam entre suas superfícies refletoras um ângulo diedro α . O ponto P representa um objeto pontual colocado diante dos espelhos.

A luz emanada de P sofrerá múltiplas reflexões, até emergir do sistema. Por causa disso, a associação de espelhos conjugará a P várias imagens, que se apresentarão distribuídas ao longo de uma circunferência de centro em O e raio OP.

O número n de imagens fornecidas pela associação fica determinado pela expressão empírica:

$$n = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1$$



em que α , ângulo formado pelos espelhos, deve ser divisor de 360° .

NOTAS

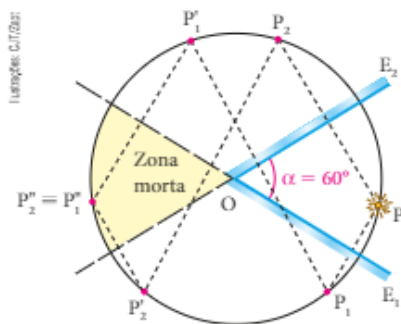
- Se o quociente de $\frac{360^\circ}{\alpha}$ for par, a expressão será aplicável qualquer que seja a posição de P entre os espelhos.
- Se o quociente de $\frac{360^\circ}{\alpha}$ for ímpar, a expressão só será aplicável se P estiver no plano bissetor do diedro formado pelos espelhos.

Para exemplificar melhor, vamos analisar o caso em que se tem um objeto P situado entre as superfícies refletoras de dois espelhos planos que formam entre si um ângulo diedro $\alpha = 60^\circ$. O número n de imagens que poderão ser observadas é:

$$n = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1 \Rightarrow n = \frac{360^\circ}{60^\circ} - 1$$

$$n = 5 \text{ imagens}$$

Na figura abaixo, fazemos uma representação esquemática correspondente à situação em estudo.

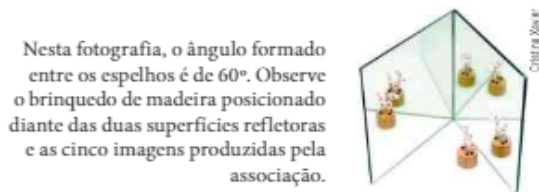


- P_1 é a imagem formada por E_1 , por simples reflexão. Essa imagem é enantiomorfa em relação a P .
- P_2 é a imagem formada por E_2 , por dupla reflexão. Essa imagem é igual a P .
- P_1' é a imagem formada por E_1 , por tripla reflexão. Essa imagem é enantiomorfa em relação a P .

- P_2 é a imagem formada por E_2 , por simples reflexão. Essa imagem é enantiomorfa em relação a P .
- P_2' é a imagem formada por E_1 , por dupla reflexão. Essa imagem é igual a P .
- P_1'' é a imagem formada por E_2 , por tripla reflexão. Essa imagem é enantiomorfa em relação a P .

NOTA

- As imagens formadas por um número ímpar de reflexões são sempre enantiomorfas em relação ao objeto dado.
- As imagens P_1' e P_2'' , superpostas, constituem na realidade uma só imagem.
- O ponto $P_1'' \equiv P_2''$, pelo fato de estar situado na zona morta da associação, isto é, atrás tanto de E_1 como de E_2 , não produz imagens subsequentes.



Nesta fotografia, o ângulo formado entre os espelhos é de 60° . Observe o brinquedo de madeira posicionado diante das duas superfícies refletoras e as cinco imagens produzidas pela associação.

Na fotografia a seguir, os espelhos planos formam 90° entre suas superfícies refletoras. A associação conjuga três imagens ao boneco: duas enantiomorfas (formadas por simples reflexão da luz) e a outra igual ao objeto (obtida por dupla reflexão da luz).



Fotografia mostrando os espelhos perpendiculares e as três imagens de um boneco.

Se os espelhos planos forem dispostos paralelamente entre si, um objeto colocado entre suas superfícies refletoras produzirá "infinitas" imagens.

Essas "infinitas" imagens, entretanto, não serão totalmente observáveis em razão da gradual diminuição sofrida pelo ângulo visual de observação à medida que o número de reflexões da luz no sistema for se sucedendo. Além disso, as múltiplas reflexões impõem uma sucessiva dissipação da energia luminosa, que vai sendo absorvida pelos espelhos e pelo meio existente entre eles.

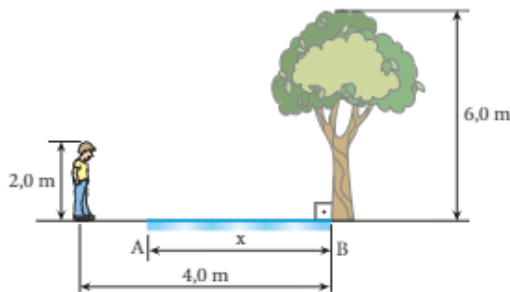
Imagens fornecidas por dois espelhos planos paralelos, de uma ampulheta colocada entre eles.



QUESTÕES COMENTADAS



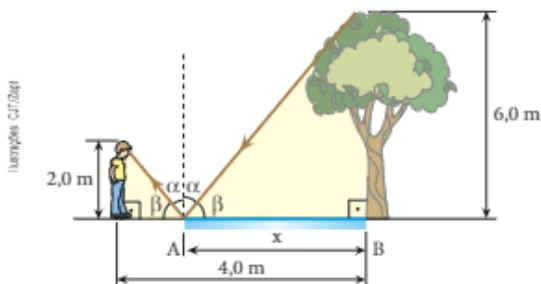
1 No esquema, fora de escala, o observador deseja visar a imagem da árvore por meio do espelho plano AB deitado sobre o solo.



Qual deve ser o menor comprimento x do espelho para que o observador veja a imagem completa da árvore, isto é, do topo até o pé?

RESOLUÇÃO

Se o comprimento x do espelho é o menor possível para que o observador veja a imagem completa da árvore, um raio de luz proveniente do seu topo deve refletir-se na borda esquerda do espelho e atingir o olho do observador, conforme o esquema a seguir.



Os triângulos retângulos destacados são semelhantes.

$$\text{Logo: } \frac{x}{4,0 - x} = \frac{6,0}{2,0} \Rightarrow x = 3,0(4,0 - x)$$

$$x = 12 - 3,0x \Rightarrow 4,0x = 12 \Rightarrow x = 3,0 \text{ m}$$

Resposta: 3,0 m

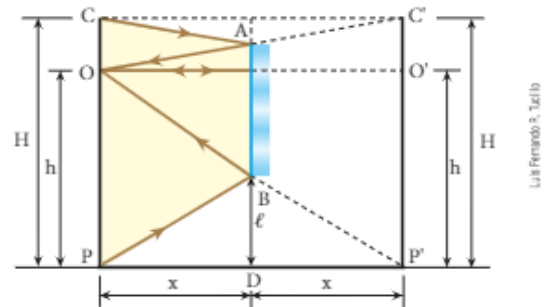
2 Um observador de altura H deseja mirar-se de corpo inteiro, utilizando para tanto um espelho plano circular disposto verticalmente. Sendo h a altura de seus olhos em relação ao solo, plano e horizontal:

- calcule o mínimo diâmetro d que o espelho deve ter para que o observador realize seu intento;
- obtenha a distância ℓ do extremo inferior do espelho ao solo;

c) responda: as dimensões d e ℓ dependem ou não da distância x do observador em relação ao espelho?

RESOLUÇÃO

Nas condições do esquema seguinte, o observador C.P consegue mirar-se de corpo inteiro, utilizando para isso o espelho plano com diâmetro mínimo:



C é o extremo superior da cabeça do observador;

O é o olho do observador;

P é o extremo inferior do pé do observador;

C', O' e P' são imagens de C, O e P, respectivamente, fornecidas pelo espelho;

AB é o espelho ($AB = d$);

a) Os triângulos OAB e OC'P' são semelhantes. Logo:

$$\frac{d}{H} = \frac{x}{2x} \Rightarrow d = \frac{H}{2}$$

O diâmetro mínimo do espelho deve corresponder à metade da altura do observador.

b) Os triângulos OPP' e BDP' são semelhantes. Logo:

$$\frac{\ell}{h} = \frac{x}{2x} \Rightarrow \ell = \frac{h}{2}$$

A distância do extremo inferior do espelho ao solo deve corresponder à metade da altura dos olhos do observador.

c) As dimensões d e ℓ independem de x , que foi cancelado nos cálculos.

Respostas: a) $\frac{H}{2}$; b) $\frac{h}{2}$; c) As dimensões d e ℓ não dependem de x .

3 Na situação esquematizada a seguir, está representado um carrinho elétrico, controlado por controle remoto, que se movimenta em linha reta sobre o solo plano e horizontal. Esse carrinho está equipado com um espelho plano vertical, firmemente acoplado à sua caçamba, e se desloca com velocidade escalar constante igual a 50 cm/s.

Ao observar sua imagem refletida no espelho, um assustado cãozinho põe-se a perseguir o carrinho, deslocando-se na mesma direção que o veículo com velocidade escalar constante igual a 150 cm/s.

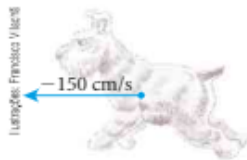


Qual é a velocidade escalar da imagem do cãozinho em relação ao solo?

RESOLUÇÃO

É conveniente resolver esse tipo de questão pelo método da **superposição dos efeitos**.

I. Considerando o carrinho parado, estuda-se o efeito produzido na imagem exclusivamente pelo movimento do cãozinho.



Nesse caso, por causa da propriedade da simetria, a imagem tem uma velocidade escalar constante igual a -150 cm/s.

II. Considerando o cãozinho parado, estuda-se o efeito produzido na imagem exclusivamente pelo movimento do carrinho.



Nesse caso, por causa da translação do espelho, a imagem tem velocidade escalar constante igual a 100 cm/s, ou seja, o dobro da velocidade escalar do carrinho.

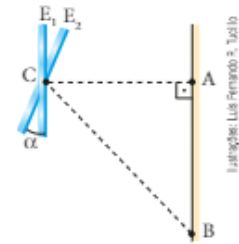
III. Fazendo a superposição dos efeitos, a velocidade escalar constante V da imagem do cãozinho em relação ao solo fica determinada por:

$$V = (-150 + 100) \text{ cm/s} \Rightarrow V = -50 \text{ cm/s}$$

Considerando a figura do enunciado, é importante notar que o resultado negativo indica que a imagem do cãozinho se desloca para a esquerda em relação ao solo.

Resposta: -50 cm/s

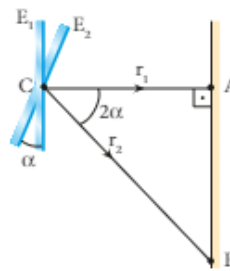
4 A figura a seguir representa um espelho plano que pode girar em torno de um eixo contendo seu centro C . Estando na posição E_1 , o espelho capta a luz proveniente de uma fonte pontual A , fixa no anteparo, refletindo-a de volta ao ponto de partida.



O espelho sofre, então, uma rotação equivalente a um ângulo α , passando para a posição E_2 . Nesse caso, ao receber a luz emitida por A , reflete-a para o ponto B . Sabendo que $AB = \sqrt{3} AC$, calcule o ângulo α .

RESOLUÇÃO

A figura a seguir representa os raios refletidos r_1 e r_2 , que correspondem, respectivamente, às posições E_1 e E_2 do espelho. É importante observar que, se o espelho sofre rotação α , o raio refletido sofre uma rotação 2α no mesmo sentido.



No triângulo ABC , temos:

$$\text{tg } 2\alpha = \frac{AB}{AC}$$

Mas sendo $AB = \sqrt{3} AC$, obtemos

$$\text{tg } 2\alpha = \frac{\sqrt{3} AC}{AC}$$

$$\text{tg } 2\alpha = \sqrt{3}$$

Portanto: $2\alpha = 60^\circ$

$$\alpha = 30^\circ$$

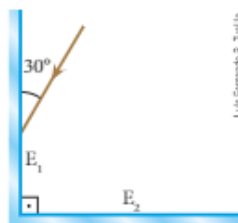
Resposta: 30°

QUESTÕES PROPOSTAS FAÇA NO CADERNO.

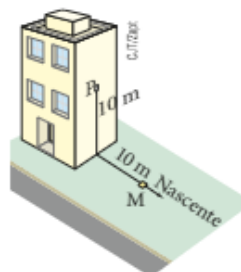
5. Na figura, os espelhos planos E_1 e E_2 são perpendiculares.

Um raio luminoso incide no espelho E_1 formando 30° com a superfície refletora, conforme está indicado.

Copie a figura em seu caderno e represente a trajetória da luz até que esta deixe o sistema de espelhos.

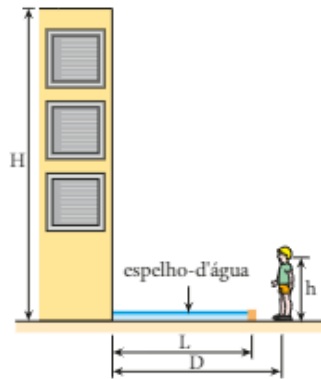


6. Observe a figura.

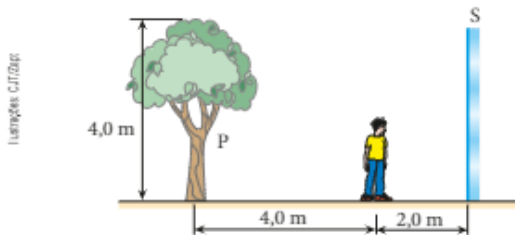


Em um dia de céu claro, o Sol estava no horizonte (0°) às 6 h da manhã. Às 12 h, ele se encontrava no zênite (90°). A que horas a luz solar, refletida no espelhinho plano M deitado sobre o solo, atingiu o ponto P ?

7. Um garoto, cujo bulbo ocular está a uma altura h em relação ao solo, observa que a imagem completa de um prédio de altura H , situado a uma distância D da vertical do seu corpo, abrange toda a extensão L de um espelho-d'água existente defronte do prédio. Sabendo que $h = 1,5$ m, $L = 3,2$ m e $D = 3,6$ m, calcule o valor de H .



8. O esquema abaixo representa um homem de frente para um espelho plano S , vertical, e de costas para uma árvore P , de altura igual a 4,0 m. Qual deverá ser o comprimento mínimo do espelho para que o homem possa ver nele a imagem completa da árvore?



9. Um espelho plano vertical está apoiado por sua espessa base reta sobre uma bancada horizontal. Ana Cláudia coloca sobre a bancada uma caneta esferográfica, dessas comuns, encostando a ponta do objeto na superfície refletora do espelho e observa a respectiva imagem.

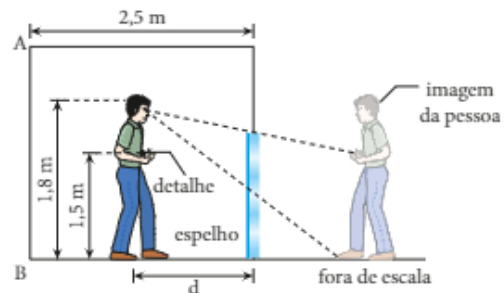
Responda às questões:

- Como é classificada, quanto à natureza, a imagem da caneta conjugada pelo espelho plano: real ou virtual?
- Para que a imagem fornecida pelo espelho seja perpendicular ao objeto, qual deve ser a medida do ângulo formado entre a caneta e a superfície refletora do espelho? Que propriedade dos espelhos planos deve ser utilizada para justificar a resposta?
- Qual deve ser a medida do ângulo formado entre o objeto e a superfície refletora para que a distância entre a extremidade da caneta (não encostada no espelho) e sua respectiva imagem seja igual ao comprimento da caneta?

10. Um homem com 1,80 m de altura deseja mirar-se dos pés à cabeça em um espelho plano quadrado, disposto verticalmente e com sua base paralela ao solo. Sendo a altura de seus olhos ao solo igual a 1,70 m, calcule:

- a menor medida admissível para o lado do espelho, a fim de que o homem consiga seu objetivo;
- a distância da borda inferior do espelho ao solo, no caso de o homem estar se vendo no espelho de corpo inteiro.

11. Uma pessoa de 1,8 m de altura está parada diante de um espelho plano apoiado no solo e preso em uma parede vertical. Como o espelho está mal posicionado, a pessoa não consegue ver a imagem de seu corpo inteiro, apesar de o espelho ser maior do que o mínimo necessário para isso. De seu corpo, ela enxerga apenas a imagem da parte compreendida entre seus pés e um detalhe de sua roupa, que está a 1,5 m do chão. Atrás dessa pessoa há uma parede vertical AB , a 2,50 m do espelho.

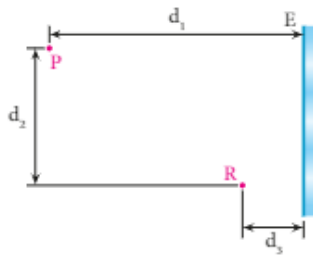


A distância entre os olhos da pessoa e a imagem da parede AB conjugada pelo espelho é de 3,3 m. Considerando em uma mesma vertical os olhos da pessoa, os pés e o detalhe em sua roupa, determine:

- a distância d , indicada no esquema, entre a pessoa e o espelho;
- a menor distância que o espelho deve ser deslocado verticalmente para cima de modo que a pessoa possa ver sua imagem de corpo inteiro refletida no espelho. Despreze nesse cálculo a distância entre os olhos da pessoa e o topo de sua cabeça.

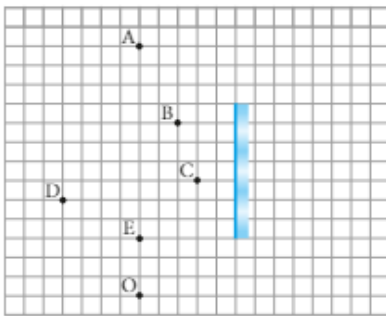
12. Fotografias obtidas diante de um ou mais espelhos planos são bastante comuns. Com essa técnica, que exige especiais cuidados do fotógrafo, belos e curiosos efeitos visuais podem ser registrados.

No esquema a seguir se vê, de cima, o jovem Paulo, um fotógrafo principiante, posicionado no local P diante da superfície refletora de um espelho plano vertical E . Paulo deseja fotografar a imagem fornecida por E do corpo de sua irmã, Regina, posicionada no local R . Os comprimentos d_1 , d_2 e d_3 , indicados na figura, são tais que $d_1 = 4,0$ m, $d_2 = 3,6$ m e $d_3 = 0,8$ m.



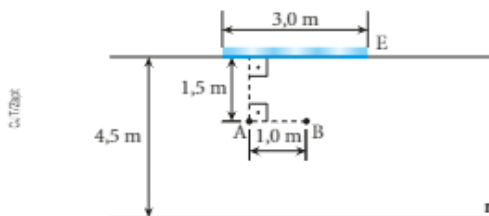
- a) Para que distância Paulo deverá regular sua câmera para obter uma fotografia devidamente focalizada da imagem de Regina? Em relação a E, essa imagem é de natureza real ou virtual?
- b) Supondo que Paulo queira obter uma fotografia de sua própria imagem utilizando um *flash* acoplado à câmera (o que não deve ser feito quando se dirige, como no caso de Paulo, o eixo do equipamento perpendicularmente ao espelho, sob pena de inserir na imagem um brilho comprometedor), qual é o intervalo de tempo, em nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$), gasto pela luz do *flash* para retornar à câmera após o disparo?
- Adote para a velocidade da luz o valor $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

13. O esquema representa um espelho plano diante do qual se encontram cinco objetos luminosos: A, B, C, D e E. O ponto O corresponde à posição do bulbo ocular de um observador.



Que ponto (ou pontos) o observador **não poderá** ver pela reflexão da luz no espelho?

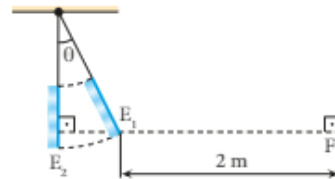
14. Juliana está parada no ponto A, indicado na figura a seguir, contemplando sua imagem num espelho plano vertical E, de largura 3,0 m. Rodrigo, um colega de classe, vem caminhando ao longo da reta r, paralela à superfície refletora do espelho, com velocidade de intensidade 2,0 m/s.



Desprezando as dimensões de Juliana e de Rodrigo, responda:

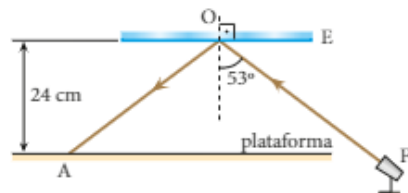
- a) Por quanto tempo Juliana poderá observar a imagem de Rodrigo em E?
- b) Se Juliana estivesse na posição B, qual seria o tempo de observação da imagem de Rodrigo?

15. O esquema a seguir representa um pêndulo. Na extremidade do fio, está preso um espelho plano. Incrustada no anteparo há uma lâmpada pontual F que emite um pincel luminoso cilíndrico na direção horizontal para a esquerda. O pêndulo é posto a oscilar, fazendo com que o espelho passe pelas posições E_1 e E_2 e varra, de uma para a outra, um ângulo $\theta = 30^\circ$ no plano da figura:



Calcule a extensão do anteparo percorrida pelo pincel luminoso proveniente de F e refletido pelo espelho, quando o espelho vai de E_1 para E_2 .

16. Na situação esquematizada a seguir, F é uma pequena lanterna fixa que emite um estreito feixe cilíndrico de luz e E é um espelho plano que pode girar em torno de um eixo O perpendicular ao plano desta página. A luz proveniente de F incide em E sob um ângulo de 53° , como indica a figura, produzindo um feixe refletido que ilumina o ponto A de uma plataforma também fixa.



O espelho sofre, então, uma rotação de 8° no sentido anti-horário, e o feixe refletido atinge um outro ponto B da mesma plataforma. Sabendo que $\sin 53^\circ = \cos 37^\circ = 0,80$ e $\cos 53^\circ = \sin 37^\circ = 0,60$, a distância entre os pontos A e B vale:

- a) 32 cm c) 18 cm e) 12 cm
b) 24 cm d) 14 cm

17. Um diretor de cinema registrou uma cena em que apareceram 24 bailarinas. Ele utilizou na filmagem apenas três atrizes, trajadas com roupas iguais, colocadas diante de uma associação de dois espelhos planos verticais cujas superfícies refletoras formavam entre si um ângulo diedro α . Qual é o valor de α ?

3. ESPELHOS ESFÉRICOS

Classificação e elementos geométricos

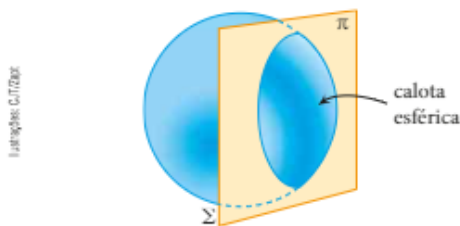
Você já deve ter notado que, além dos sempre comuns espelhos planos, há também espelhos com outros formatos, como os esféricos. Estes estão presentes em situações em que se almeja produzir imagens aumentadas (espelhos côncavos) ou campos visuais maiores, necessários em determinados ambientes (espelhos convexos).

O desenhista e pintor holandês Mauritz Cornelis Escher (1898-1972) tem um trabalho fundamentado em xilografias, litografias e meios-tons que instiga a imaginação do observador. São figuras impressionantes, algumas verdadeiras distorções da realidade. Em sua obra reproduzida ao lado, o artista se autorretrata em seu escritório refletido em uma esfera espelhada – um espelho convexo – que permite uma visualização mais ampla do ambiente.

Autorretrato de M. C. Escher segurando uma esfera refletora. Litografia de janeiro de 1935.

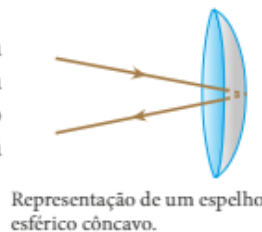


Considere a superfície esférica Σ da figura a seguir, seccionada por um plano π . O seccionamento corta Σ e determina uma “casca” esférica denominada **calota**.



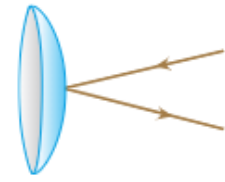
Chama-se **espelho esférico** qualquer calota esférica polida e com alto poder refletor.

Se a superfície refletora da calota estiver voltada para dentro da esfera, o espelho esférico correspondente será denominado **côncavo**.



Representação de um espelho esférico côncavo.

Se a superfície refletora da calota estiver voltada para fora da esfera, o espelho esférico correspondente será denominado **convexo**.

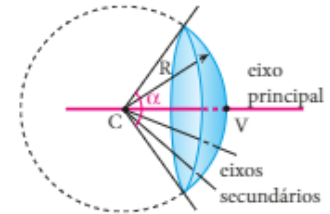


Representação de um espelho esférico convexo.

Uma colher de aço inoxidável tem comportamento semelhante ao dos espelhos esféricos. A face sobre a qual são colocados os alimentos é um **espelho côncavo**, enquanto a face oposta é um **espelho convexo**. É importante observar, entretanto, que essas colheres em geral não são superfícies esféricas.



Veja ao lado o esquema de um espelho esférico com seus principais elementos geométricos.



O centro C da esfera que originou a calota é chamado de **centro de curvatura** do espelho.

O polo V da calota é chamado de **vértice** do espelho. A reta que passa por C e V é chamada de **eixo principal** do espelho.

Todas as demais retas que contêm o centro C são chamadas de **eixos secundários**.

O ângulo α , que tem o vértice no centro C e os lados passando por pontos diametralmente opostos da calota, é chamado de **abertura** do espelho.

O raio R da esfera que originou a calota é denominado **raio de curvatura** do espelho.

Qualquer plano perpendicular ao eixo principal é denominado **plano frontal**.

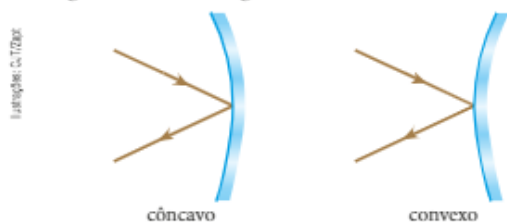
Espelhos esféricos gaussianos

Em geral, os espelhos esféricos não são sistemas ópticos estigmáticos, nem aplanéticos, nem ortoscópicos, como ocorre nos espelhos planos, uma vez que as imagens fornecidas por eles são sensivelmente distorcidas em comparação com os objetos correspondentes. As distorções provocadas por esses espelhos são denominadas **aberrações de esfericidade**.

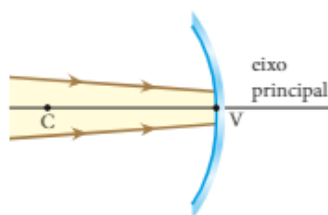
Entretanto, o físico e matemático alemão Carl Friedrich **Gauss** (1777-1855) observou que, operando-se com raios luminosos pouco inclinados e pouco afastados em relação ao eixo principal (raios **paraxiais**), as aberrações de esfericidade inerentes aos espelhos esféricos ficavam sensivelmente minimizadas. Filho de uma família alemã humilde, Gauss notabilizou-se logo na juventude por seus estudos em Matemática e Astronomia. Publicou em 1807 – época em que era diretor do Observatório de Göttingen – uma série de trabalhos sobre Óptica, em especial envolvendo sistemas de várias lentes. Destacou-se também pelas contribuições em Eletricidade e Magnetismo, tendo estabelecido um sistema de unidades magnéticas fundamentado nas noções de comprimento, massa e tempo.

Em nosso estudo, salvo recomendação em contrário, abordaremos os espelhos esféricos gaussianos, isto é, aqueles em que os raios luminosos envolvidos são pouco inclinados e pouco afastados em relação ao eixo principal. Raios luminosos “pouco afastados” em relação ao eixo principal são aqueles cuja distância do ponto de incidência ao referido eixo é pequena em comparação com o raio de curvatura do espelho.

A representação esquemática dos espelhos esféricos gaussianos é a seguinte:



Em relação ao pincel luminoso incidente representado na figura a seguir, o espelho esférico côncavo pode ser considerado gaussiano. Note que, nessas condições, o ângulo de abertura da região do espelho sobre a qual a luz incide não deve exceder 10° .



Espelhos esféricos: muitas aplicações práticas

Os espelhos esféricos côncavos são utilizados como espelhos de aumento nos estojos de maquiagem, como refletores atrás das lâmpadas de sistemas de iluminação e projeção – lanternas, faróis, holofotes

e projetores em geral – e como objetivas de telescópios, entre diversas outras aplicações.



Nesta fotografia temos um espelho côncavo que não é gaussiano. Veja as aberrações de esfericidade.



Nesta fotografia temos um espelho côncavo que é gaussiano.

Os espelhos esféricos convexos são utilizados como espelhos retrovisores de veículos – como motos e carros de passeio – e em pontos estratégicos de garagens, cruzamentos de ruas estreitas, portas de elevadores e ônibus. A vantagem dos espelhos convexos sobre os espelhos planos, nesses casos, é proporcionar, em idênticas condições, um campo visual maior. Deve-se notar, no entanto, que as imagens produzidas pelos espelhos convexos para objetos reais são menores que os respectivos objetos.



Nesta fotografia, o espelho convexo está sendo utilizado para retrovisão.

Focos dos espelhos esféricos

De maneira geral:

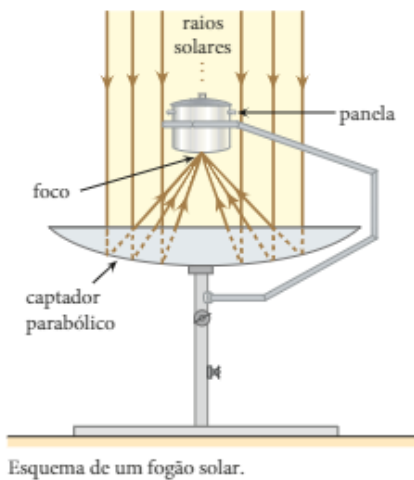
O **foco** de um sistema óptico qualquer é um ponto que tem por conjugado um ponto impróprio (“situado no infinito”).

Exemplo 1: Radiotelescópios são equipamentos que rastreiam o espaço em busca de sinais – ondas eletromagnéticas compatíveis com as radiofrequências provenientes dos mais remotos pontos do Universo. O elemento receptor desses dispositivos é uma superfície parabólica, cuja parte côncava tem alto poder de reflexão. Ondas planas incidem sobre o sistema, originando ondas esféricas refletidas que convergem para o foco do paraboloide, onde está instalado o elemento detector das informações.



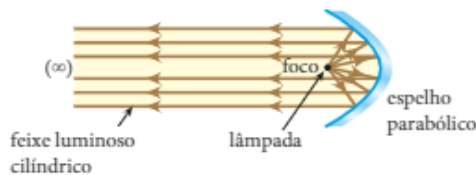
Fotografia mostrando radiotelescópios.

O fogão solar, projetado para ser utilizado no campo, funciona de maneira similar aos radiotelescópios. Raios solares paralelos incidem sobre um captador parabólico e, depois de refletidos, convergem para o foco do sistema, onde é colocada a panela contendo os alimentos.

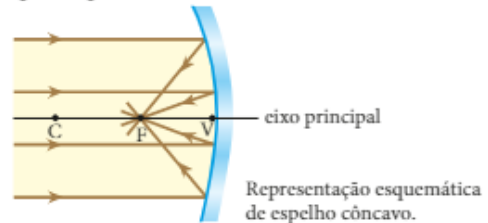


Esquema de um fogão solar.

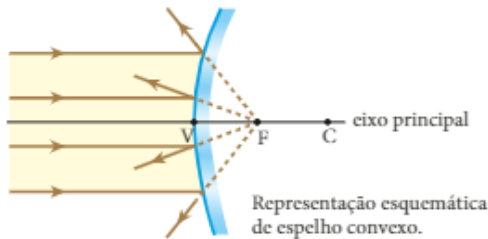
Exemplo 2: Nos colimadores, holofotes e refletores que emitem feixes luminosos cilíndricos (constituídos de raios paralelos), uma pequena lâmpada é instalada sobre o foco de um espelho parabólico côncavo que conjuga à fonte de luz uma imagem imprópria.



Considere os espelhos esféricos gaussianos a seguir, nos quais incidem raios luminosos paralelos entre si e ao eixo principal. A experiência mostra que as direções dos raios refletidos passam, necessariamente, por um mesmo ponto do eixo principal, denominado **foco principal (F)**:



Representação esquemática de espelho côncavo.

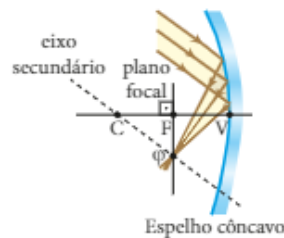


Representação esquemática de espelho convexo.

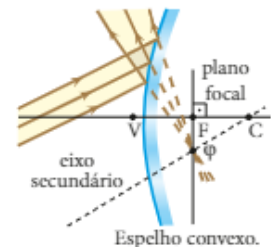
Suponhamos, agora, o caso em que incidem nesses espelhos raios luminosos paralelos entre si e a um dos eixos secundários. Pode-se verificar, também nessa situação, que as direções dos raios refletidos passam por um mesmo ponto, mas do eixo secundário considerado. Esse ponto é denominado **foco secundário (ϕ)**.

Prova-se, ainda, que o foco principal e os infinitos focos secundários de um espelho esférico gaussiano se alojam em um mesmo plano frontal, denominado **plano focal**.

É importantíssimo perceber que os focos de um espelho côncavo são **reais**, enquanto os de um espelho convexo são **virtuais**. A explicação para esse fato é simples: nos espelhos côncavos, os focos são determinados efetivamente pelos raios de luz (os focos apresentam-se “na frente” do espelho), enquanto nos espelhos convexas os focos são determinados pelos prolongamentos dos raios (os focos apresentam-se “atrás” do espelho).



Espelho côncavo.



Espelho convexo.

FAÇA VOCÊ MESMO

Procurando o foco

Vamos determinar a posição do foco principal de um espelho esférico côncavo? Para isso, sugerimos um experimento muito simples que requer poucos apetrechos para sua realização.

O experimento deve ser realizado ao ar livre, em um dia ensolarado, preferencialmente no período da manhã.

ATENÇÃO!

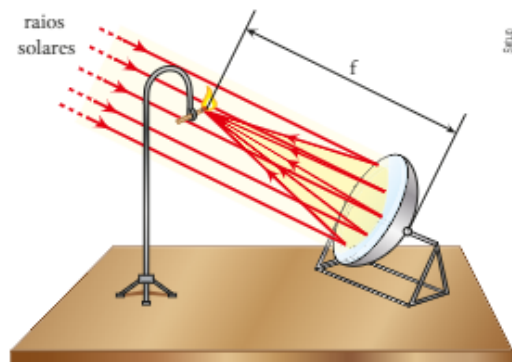
Este experimento envolve fogo. Realize-o apenas com a supervisão do professor.

Material necessário

- 1 espelho esférico côncavo com pequeno ângulo de abertura (espelho gaussiano) articulado em um suporte que permita sua rotação em torno de um eixo diametral paralelo ao plano de apoio. Pode ser um desses espelhos de aumento, utilizados para maquiagem, devidamente adaptado;
- alguns palitos de fósforo;
- 1 suporte de pequena espessura para fixação dos palitos de fósforo (pode ser de arame, por exemplo);
- 1 folha de papel A4 branca;
- 1 régua ou trena.

Procedimento

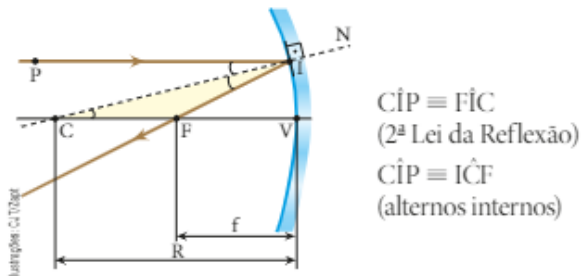
- I. Dirija o eixo principal do espelho para a região central do Sol. Isso equivale a dizer que você deverá dispor o sistema óptico de modo que uma linha imaginária contenha seu vértice (polo da calota) e o centro do Sol.
Nesse caso, o espelho receberá um feixe de raios luminosos paralelos entre si e paralelos ao eixo principal. Como se sabe, depois de refletidos, esses raios convergem para o foco principal do espelho, estabelecendo nesse ponto um local de alta concentração energética.
- II. Utilize um pedaço de folha de papel em branco para localizar o foco principal do espelho. Isso poderá ser notado quando a luz refletida pela calota esférica determinar sobre esse pedaço um círculo iluminado com a menor área possível.
- III. Fixe alguns palitos de fósforo na extremidade do suporte e faça com que suas extremidades inflamáveis coincidam com a posição determinada para o foco principal do espelho.
Em pouco tempo, você notará a produção de fogo. Os palitos de fósforo se incendiarão devido à grande intensidade da energia luminosa estabelecida sobre eles.
- IV. Meça, finalmente, a distância entre o vértice do espelho e os palitos de fósforo e você terá um valor bastante razoável para a distância focal f .
Veja a montagem do experimento na ilustração ao lado.



Analisando o experimento

1. Posicionando os palitos de fósforo sobre o eixo principal do espelho um pouco além da posição focal, eles também se incendiarão? Em caso afirmativo, em mais tempo ou menos tempo que na posição determinada para o foco no experimento inicial?
2. Admitindo-se que o Sol se eleve com o passar do tempo e que o espelho seja mantido sempre na mesma posição, o que ocorre com o intervalo de tempo necessário para acender os palitos de fósforo na nova posição focal? Aumenta, diminui ou permanece o mesmo da primeira situação?

Observe agora o espelho esférico côncavo representado a seguir, no qual incide um raio luminoso paralelo ao eixo principal. Ao se refletir, o raio intersecta o eixo principal do espelho no ponto F (foco principal).



Portanto, $FIC \equiv ICF$, e o triângulo FIC é isósceles, valendo a igualdade $CF = FI$.

Mas $FI \equiv FV$, pois o raio incidente considerado é paraxial. Assim: $CF \equiv FV$.

Logo: $f \approx \frac{R}{2}$

A conclusão acima permite afirmar:

Nos espelhos esféricos gaussianos, o **foco principal** é aproximadamente equidistante do centro de curvatura e do vértice.

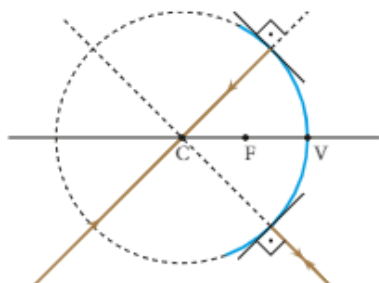
Raios luminosos particulares

Nos espelhos esféricos, alguns raios luminosos particulares de simples traçado apresentam grande interesse, pois facilitam a construção gráfica das imagens.

1ª raio particular

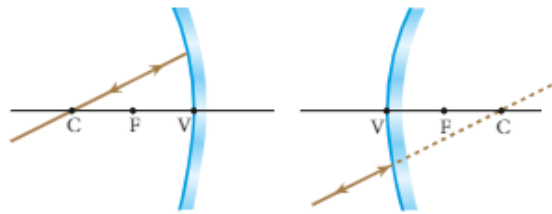
Todo raio luminoso que incide no espelho alinhado com o centro de curvatura se reflete sobre si mesmo.

Essa afirmação pode ser constatada de imediato, pois um raio luminoso que incide alinhado com o centro de curvatura é **normal** à superfície refletora.



Como a incidência é normal, o ângulo de incidência é nulo, o mesmo devendo ocorrer com o ângulo de reflexão. Daí dizermos que “o raio se reflete sobre si mesmo”

Usando a representação gaussiana, temos as figuras:

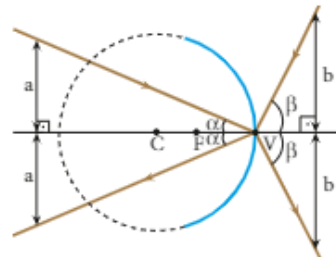


A propriedade que esse raio tem de refletir-se sobre si mesmo é verificada em qualquer tipo de espelho esférico, gaussiano ou não.

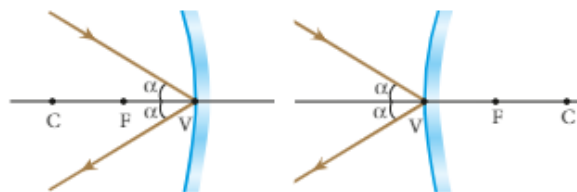
2ª raio particular

Todo raio luminoso que incide no vértice do espelho gera, relativamente ao eixo principal, um raio refletido simétrico.

Essa afirmação é consequência da **2ª Lei da Reflexão**. A reta normal à superfície refletora em V é o próprio eixo principal. Como o ângulo de reflexão deve ser igual ao de incidência, justifica-se a simetria citada.



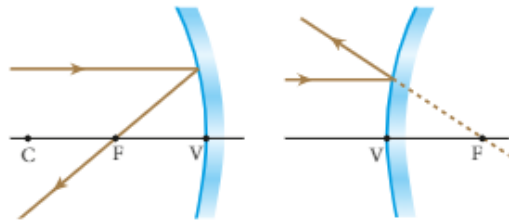
Usando a representação gaussiana, temos as figuras:



A propriedade que esse raio tem de refletir-se simetricamente em relação ao eixo principal também é verificada com qualquer tipo de espelho esférico, gaussiano ou não.

3ª raio particular

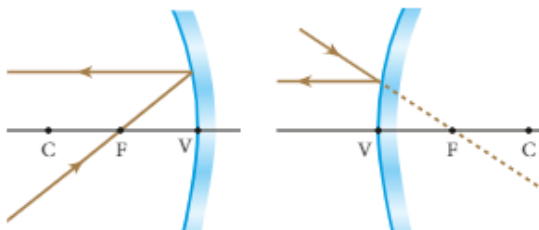
Todo raio luminoso que incide paralelamente ao eixo principal se reflete alinhado com o foco principal.



Note que essa afirmação decorre da própria definição de foco principal.

Considerando a reversibilidade dos raios de luz, podemos enunciar também:

Todo raio luminoso que incide alinhado com o foco principal se reflete paralelamente ao eixo principal.



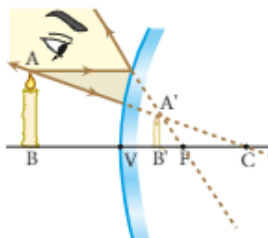
Esse raio só é verificado em espelhos esféricos gaussianos.

Construção gráfica das imagens nos espelhos esféricos

Para construir a imagem de um ponto conjugada por um sistema óptico, necessitamos de pelo menos dois raios luminosos incidentes. Em relação ao traçado das imagens fornecidas pelos espelhos esféricos, devemos utilizar os raios luminosos particulares descritos na seção anterior.

Considere, por exemplo, o espelho convexo abaixo, diante do qual há um objeto AB que tem o extremo B no eixo principal. Nesse caso, para obter a imagem de AB, basta obtermos a imagem do extremo A, pois a imagem correspondente ao extremo B estará situada no eixo principal.

Observe que, nessa situação, a imagem formada é:



- virtual: obtida pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios refletidos (situada "atrás do espelho");
- direita: "de cabeça para cima" em relação ao objeto;
- menor: o "tamanho" da imagem é menor que o do objeto.

É importante destacar que:

A um objeto real, um espelho esférico convexo conjuga uma imagem sempre virtual, direita e menor, compreendida entre o foco principal e o vértice, independentemente da distância do objeto à superfície refletora.

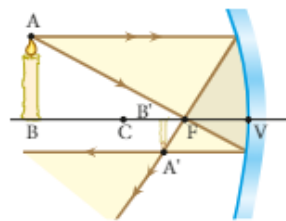


Aumentando ou diminuindo a distância entre a vela e a superfície refletora do espelho convexo, a imagem mantém suas características: virtual, direita e menor que o objeto.

As características das imagens produzidas pelos espelhos côncavos, por sua vez, dependem da posição do objeto em relação ao espelho. Há cinco casos importantes a serem considerados:

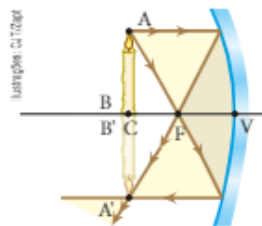
1. Objeto além do centro de curvatura

Características da imagem:



- real: formada pelo cruzamento efetivo dos raios refletidos;
- invertida: "de cabeça para baixo" em relação ao objeto;
- menor: o "tamanho" da imagem é menor que o do objeto.

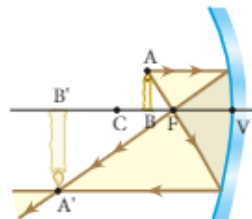
2. Objeto no plano frontal, que contém o centro de curvatura



Características da imagem:

- real;
- invertida;
- do mesmo tamanho que o objeto.

3. Objeto entre o centro de curvatura e o foco



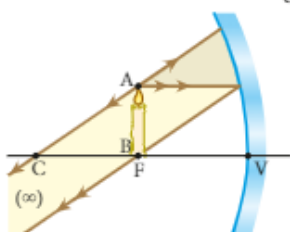
Características da imagem:

- real;
- invertida;
- maior: o "tamanho" da imagem é maior que o do objeto.

Observe que as imagens reais obtidas de objetos também reais são sempre invertidas.

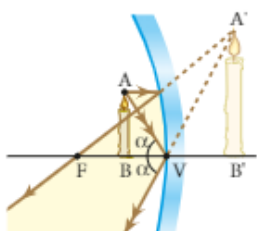
4. Objeto no plano focal

Características da imagem:



Nesse caso, como os raios luminosos emergentes do sistema são paralelos entre si, a imagem “forma-se no infinito”, sendo, portanto, **imprópria**.

5. Objeto entre o foco e o vértice



Características da imagem:

- virtual;
- direita;
- maior.

Esse é o único caso em que, de um objeto real, o espelho côncavo conjuga imagem virtual.

Uma ferramenta obrigatória no exercício da Odontologia é o “espelinho”, utilizado pelo dentista para observar a parte de trás dos dentes do paciente.



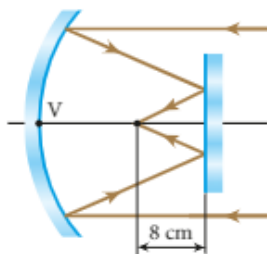
David Laury/Usamag/Contrasto

Esse “espelinho” é côncavo e tem distância focal próxima de 40 mm. Com isso, o dente a ser examinado fica compreendido entre o plano focal e o vértice, fazendo com que o utensílio óptico produza uma imagem virtual, direita e ampliada do dente.

QUESTÕES COMENTADAS



18 João Laerte, interessado em estudar propriedades dos espelhos, montou o arranjo representado a seguir, em que aparecem um espelho esférico côncavo gaussiano, de raio de curvatura 50 cm, e um pequeno espelho plano, perpendicular ao eixo principal do espelho esférico. Reduzindo a iluminação do ambiente, ele fez incidir no espelho côncavo um feixe luminoso cilíndrico de eixo coincidente com o eixo principal desse espelho. Os raios luminosos refletidos pelo espelho côncavo refletiram-se também no espelho plano e convergiram em um ponto do eixo principal distante 8 cm do espelho plano. A que distância **d** do vértice **V** do espelho côncavo João Laerte posicionou o espelho plano?



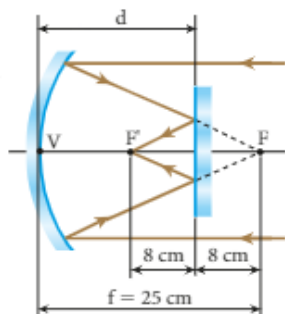
RESOLUÇÃO

A distância focal **f** do espelho côncavo fica determinada por:

$$f = \frac{R}{2}$$

$$f = \frac{50 \text{ cm}}{2}$$

$$f = 25 \text{ cm}$$

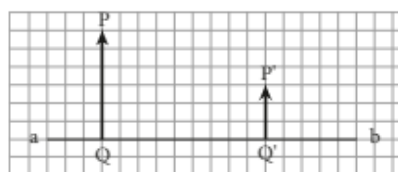


O ponto **F**, foco principal do espelho côncavo, comporta-se como objeto virtual em relação ao espelho plano. Este, por sua vez, conjuga uma imagem real **F'**, simétrica de **F** em relação à superfície plana.

A distância **d** do espelho plano ao vértice **V** do espelho esférico fica determinada fazendo-se: $d = (25 - 8) \text{ cm} \Rightarrow d = 17 \text{ cm}$

Resposta: 17 cm.

19 No esquema seguinte, **ab** é o eixo principal de um espelho esférico gaussiano, **PQ** é um objeto luminoso contido em um plano frontal e **P'Q'** é a imagem que o espelho conjuga ao objeto considerado:



Reproduza essa figura no seu caderno e obtenha graficamente a posição e o tipo do espelho, bem como as posições de seu centro de curvatura e de seu foco principal.

RESOLUÇÃO

Posição do espelho:

Inverte-se o objeto, obtendo-se seu simétrico **QR** em relação ao eixo principal. Liga-se **R** a **P'** (raio **I**). Onde o segmento **RP'** intersecta o eixo principal, tem-se o vértice **V** do espelho.

Natureza do espelho:

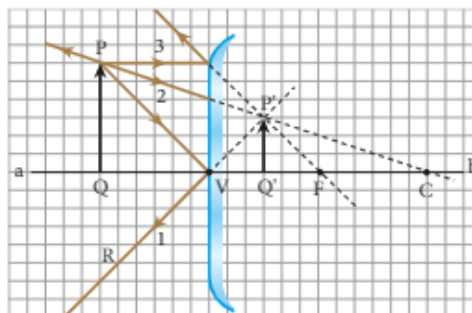
O espelho é **convexo**, pois a um objeto real está conjugando uma imagem virtual, direita e menor que o objeto.

Posição do centro de curvatura:

A partir de P, traça-se uma reta passando por P' (raio 2). Na interseção dessa reta com o eixo principal, tem-se a posição do centro de curvatura.

Posição do foco principal:

A partir de P, traça-se um segmento paralelo ao eixo principal (raio 3). Do ponto em que esse segmento toca o espelho, traça-se uma reta passando por P'. Ao cruzar o eixo principal, essa reta determina a posição do foco principal.



Luzes: C. T. 2011

Resposta: Ver resolução.

QUESTÕES PROPOSTAS FAÇA NO CADERNO.

20. Terceiro navio do *Greenpeace* a ostentar o nome Guerreiro do Arco-Íris (*Rainbow Warrior*), a embarcação foi lançada ao mar em outubro de 2011, mas já se tornou um ícone em sustentabilidade. Cada detalhe foi pensado para reduzir ao máximo seu impacto sobre o meio ambiente, desde o uso da força dos ventos como principal motor até um sistema de tratamento de água e resíduos.

O motor de propulsão diesel-elétrica do *Rainbow Warrior* é acionado apenas sob condições climáticas desfavoráveis ou em ações que exijam potência máxima. Mesmo assim, o *design* inovador do casco permite que menos combustível seja gasto, com menos emissão de gases poluentes.



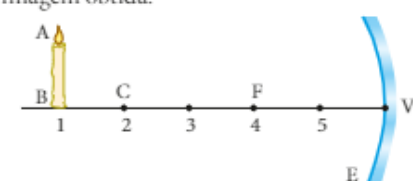
Em visita ao Brasil em 2012, por ocasião da conferência Rio +20, um dos equipamentos do navio que mais chamou atenção foi um fogão solar, como o que aparece na fotografia abaixo, de grande eficiência e isento de poluição.



Admita que a calota espelhada seja esférica (na verdade, ela é parabólica), com raio de curvatura igual a 2,0 m e em operação de acordo com as condições de estigmatismo de Gauss. O cozimento de alimentos será realizado de maneira mais rápida se a panela for colocada sobre um plano frontal à calota, distante do vértice (ou polo) do espelho:

- a) 0,5 m b) 1,0 m c) 1,5 m d) 2,0 m e) 2,5 m

21. No esquema a seguir, E é um espelho esférico côncavo de centro de curvatura C, foco principal F e vértice V. AB é um objeto luminoso posicionado diante da superfície refletora. Levando em conta as condições de Gauss, construa graficamente, em seu caderno, a imagem de AB considerando as posições 1, 2, 3, 4 e 5. Em cada caso, dê a classificação da imagem obtida.



- 22.** Diante de uma enorme bola de Natal de grande raio de curvatura que tem a superfície externa espelhada, um observador dispõe um lápis, que é aproximado e afastado da superfície refletora. A respeito da imagem que a bola conjuga ao lápis, podemos afirmar que:
- a) é virtual, direita e reduzida, qualquer que seja a posição do lápis.
 - b) pode ser real ou virtual, dependendo da posição do lápis.
 - c) é real, invertida e aumentada, qualquer que seja a posição do lápis.
 - d) é simétrica do lápis em relação à superfície refletora.
 - e) nenhuma proposição anterior é correta.

23. Leia a notícia a seguir.
Como foi que um arranha-céus "derreteu" um carro?

"É uma questão de reflexo. Se um prédio é curvilíneo e tem várias janelas planas, que funcionam como espelhos, os reflexos se convergem em um ponto, focando e concentrando a luz," diz Chris Shepherd, do Instituto de Física de Londres. O edifício de 37 andares [...] é de fato um prédio curvilíneo. [...] O carro, [...] estava estacionado em uma rua próxima ao prédio, exatamente no ponto atingido por um foco de luzes refletidas.

O carro não foi o único que sofreu estrago. Houve também relatos de um banco de bicicleta derretido, de tecido queimado e de uma pintura empolada. [...]

Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2013/09/130904_como_luzrefletida_derrete_carro_an>. Acesso em: 29 Jan. 2016

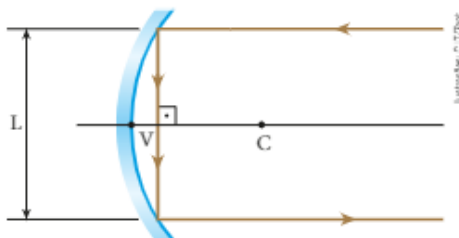
O fenômeno relatado na notícia é consequência da posição do Sol em determinada época do ano. Acredita-se que diariamente o astro permaneça em condições de gerar reflexos perigosos nos vidros do prédio durante duas horas. Assim, seus raios incidem de maneira oblíqua em relação às janelas, produzindo raios refletidos convergentes em certa região. Admitindo-se esférico e gaussiano o grande espelho constituído pelas vidraças do edifício, pode-se dizer que o veículo danificado pelos raios solares refletidos estava posicionado:



Arranha-céus conhecido como Walkie-Talkie, em Londres.

- a) no centro de curvatura do espelho.
- b) no foco principal do espelho.
- c) no vértice do espelho.
- d) no ponto médio entre o centro de curvatura e o foco principal do espelho.
- e) em um foco secundário do espelho.

24. A figura representa um espelho esférico côncavo de centro de curvatura C e vértice V. Um raio de luz, ao incidir paralelamente ao eixo \overleftrightarrow{CV} , reflete-se duas vezes, deixando o espelho também paralelamente ao eixo \overleftrightarrow{CV} .



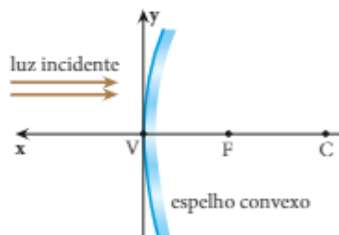
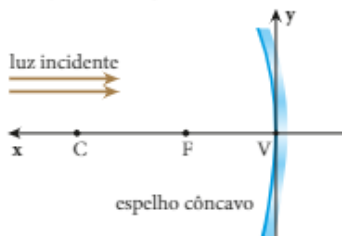
Sabendo que o raio de curvatura do espelho vale $\sqrt{2}$ m, calcule o comprimento L.

4. ESTUDO MATEMÁTICO DOS ESPELHOS ESFÉRICOS

O referencial gaussiano

Podemos nos fundamentar em dados matemáticos e equações para discutir as características das imagens produzidas em espelhos esféricos. É importante salientar que tudo o que se pode concluir graficamente – por meio de esquemas – também pode ser determinado analiticamente, isto é, por meio dos procedimentos que apresentamos a seguir. Observe, porém, que a recíproca nem sempre é verdadeira, o que revela a maior abrangência do estudo analítico.

Para tanto, devemos considerar o **referencial gaussiano**, que nada mais é que um sistema cartesiano constituído de dois eixos orientados perpendicularmente entre si, Ox e Oy , com origem no vértice V do espelho.



O eixo das abscissas (Ox) será orientado no sentido oposto ao da luz incidente, conforme mostram os dois esquemas anteriores.

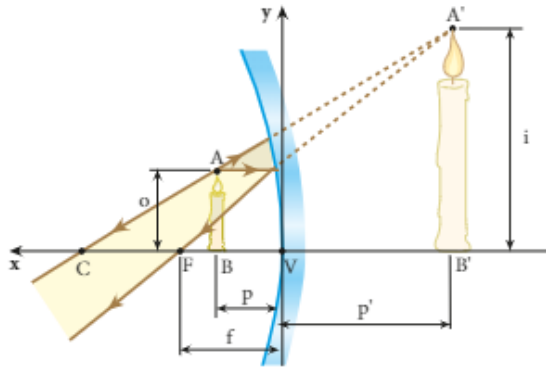
Do referencial gaussiano, decorre o seguinte:

Elementos reais (objetos ou imagens situados na frente do espelho): **abscissa positiva**.

Elementos virtuais (objetos ou imagens situados atrás do espelho): **abscissa negativa**.

Convém salientar que nos espelhos côncavos a abscissa do foco principal é positiva, enquanto nos espelhos convexos essa abscissa é negativa.

Veja o exemplo a seguir, em que é traçada a imagem do objeto AB situado diante de um espelho côncavo.



Considerando o referencial gaussiano, temos, nesse caso:

- $p > 0$ (objeto real);
- $p' < 0$ (imagem virtual);
- $f > 0$ (no espelho côncavo, o foco principal é real);
- $o > 0$ e $i > 0$.

A simbologia adotada nesse exemplo será utilizada também nas próximas situações:

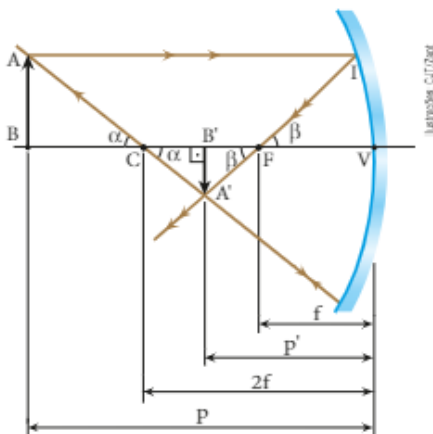
p é a abscissa do objeto; p' é a abscissa da imagem; f é a abscissa focal; o é a ordenada do objeto; i é a ordenada da imagem.

NOTA

O módulo de f recebe o nome de **distância focal**.

Função dos pontos conjugados (Equação de Gauss)

Chamada por alguns autores de Equação de Gauss, a **função dos pontos conjugados** tem grande importância no curso de óptica geométrica. Para demonstrá-la, usaremos a situação a seguir, em que AB é um objeto frontal e A'B' é a imagem correspondente conjugada por um espelho esférico côncavo.



Observando as condições de Gauss, percebemos que o arco VI é praticamente retilíneo e de mesmo comprimento que o segmento AB. Assim:

$$VI \cong AB \quad (I)$$

Lembre-se de que nos espelhos esféricos gaussianos o foco principal (F) é equidistante do vértice (V) e do centro de curvatura (C). Assim:

$$FV = f \Rightarrow CV = 2f$$

Os triângulos ABC e A'B'C são semelhantes. Logo:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C}{BC} \Rightarrow \frac{A'B'}{AB} = \frac{2f - p'}{p - 2f} \quad (II)$$

Os triângulos A'B'F e IVF são semelhantes. Daí:

$$\frac{A'B'}{VI} = \frac{B'F}{VF} \Rightarrow \frac{A'B'}{VI} = \frac{p' - f}{f} \quad (III)$$

Substituindo (I) em (III), temos:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p' - f}{f} \quad (IV)$$

Comparando (II) e (IV), segue que:

$$\frac{2f - p'}{p - 2f} = \frac{p' - f}{f}$$

$$(p - 2f)(p' - f) = f(2f - p')$$

$$pp' - fp - 2fp' + 2f^2 = 2f^2 - fp'$$

$$pp' = fp' + fp$$

Dividindo ambos os membros por $pp'f$, temos:

$$\frac{pp'}{pp'f} = \frac{fp'}{pp'f} + \frac{fp}{pp'f}$$

Portanto:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (\text{função dos pontos conjugados})$$

Convém destacar que, ao utilizar essa função, devem ser considerados os sinais algébricos dados pelo referencial gaussiano.

Aumento linear transversal

Representemos por o a ordenada de um objeto linear colocado diante de um espelho esférico e por i a ordenada da respectiva imagem, ambas dadas em relação ao referencial gaussiano.

Por definição, o **aumento linear transversal** é a grandeza adimensional A , calculada pelo quociente da ordenada da imagem (i) pela ordenada do objeto (o):

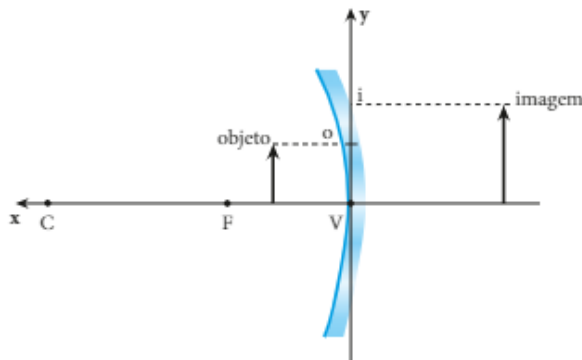
$$A = \frac{i}{o}$$

O aumento é denominado **linear** por referir-se exclusivamente às alterações do comprimento da imagem em relação ao comprimento do objeto e **transversal** por relacionar apenas ordenadas, isto é, dimensões ortogonais ao eixo principal do espelho.

O termo "aumento" deve ser entendido como ampliação ou redução. Se $|A| > 1$, a imagem é ampliada em comparação com o objeto e, se $|A| < 1$, a imagem é reduzida em comparação com o objeto.

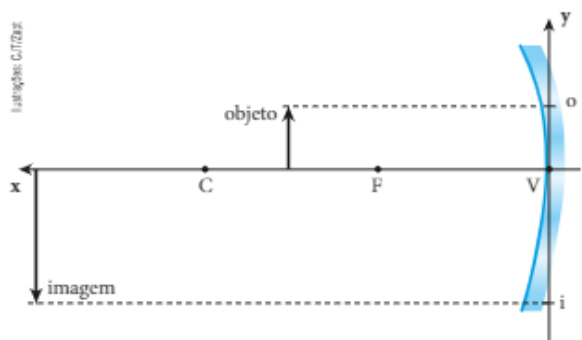
Dependendo dos sinais das ordenadas i e o , o aumento linear transversal pode ser positivo ou negativo.

Se o aumento é positivo ($A > 0$), i e o têm o mesmo sinal e a imagem é **direita**.



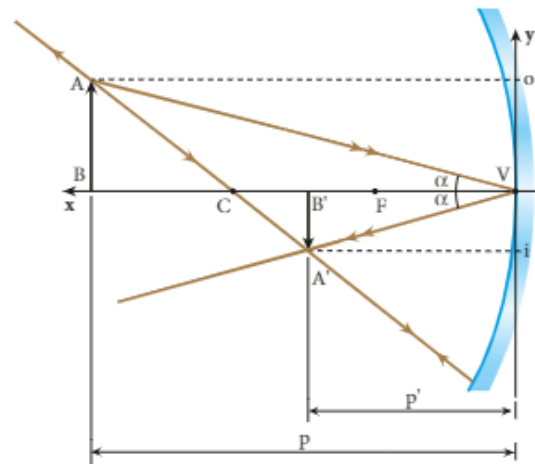
Neste exemplo, $o > 0$ e $i > 0$: a imagem é **direita**.

Se o aumento é negativo ($A < 0$), i e o têm sinais opostos e a imagem é **invertida**.



Neste exemplo, $o > 0$ e $i < 0$: a imagem é **invertida**.

Considere, agora, a situação da figura a seguir.



Os triângulos ABV e $A'B'V$ são semelhantes. Por isso, podemos escrever: $\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'V}{BV}$

Mas, da figura, temos:

$$AB = |o|, A'B' = |i|, BV = |p| \text{ e } B'V = |p'|$$

Substituindo esses termos na expressão anterior,

$$\text{segue que: } \frac{|i|}{|o|} = \frac{|p'|}{|p|}$$

Note que, no caso da situação proposta, $i < 0$, $o > 0$, $p > 0$ (objeto real) e $p' > 0$ (imagem real). Considerando os sinais algébricos de i , o , p e p' e lembrando que $A = \frac{i}{o}$, podemos escrever:

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

Com base nessa expressão, convém comentar aqui duas situações importantes. Em cada caso, faremos a discussão analítica correspondente.

1ª situação: Aumento positivo.

Se $A > 0$, devemos ter:

- i e o com o mesmo sinal: a imagem é **direita**;
- p' e p com sinais opostos: o objeto e a imagem têm naturezas opostas (se um é real, o outro é virtual).

2ª situação: Aumento negativo.

Se $A < 0$, devemos ter:

- i e o com os sinais opostos: a imagem é **invertida**;
- p' e p com o mesmo sinal: o objeto e a imagem têm a mesma natureza (ambos são reais ou ambos são virtuais).

QUESTÕES COMENTADAS



25 Um homem situado a 2,0 m do vértice de um espelho esférico visa sua imagem direita e ampliada três vezes.

Determine:

- a distância focal do espelho.
- sua natureza (côncavo ou convexo).

RESOLUÇÃO

a) O aumento linear transversal vale $A = +3$ ($A > 0$, porque a imagem é direita).

Sendo a distância do objeto ao espelho $p = 2,0$ m, calculemos p' , que é a distância da imagem ao espelho:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow 3 = -\frac{p'}{2,0}$$

Logo: $p' = -6,0$ m (imagem virtual)

A distância focal f pode ser obtida pela função dos pontos conjugados (equação de Gauss):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{2,0} - \frac{1}{6,0} \Rightarrow$$

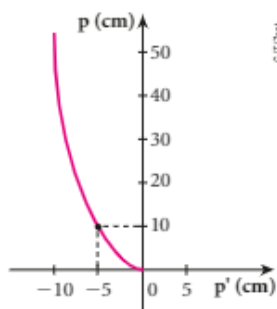
$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{3-1}{6,0} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{6,0} \Rightarrow f = 3,0 \text{ m}$$

b) Como $f > 0$, o foco é real e o espelho é **côncavo**.

Respostas: a) 3,0 m; b) Côncavo.

26 Um objeto é colocado sobre o eixo de um espelho convexo. O gráfico ao lado representa, respectivamente, as abscissas p e p' do objeto e de sua imagem, ambas em relação ao vértice do espelho.

Qual é a distância focal desse espelho em centímetros?



RESOLUÇÃO

Conforme vimos, para os espelhos esféricos gaussianos apli-

ca-se a função dos pontos conjugados. Assim: $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$

Analisando o gráfico, observamos um ponto de coordenadas conhecidas. Vê-se, então, que para $p = 10$ cm, $p' = -5$ cm.

Calculemos f , que é a distância focal do espelho:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{10} - \frac{1}{5} \Rightarrow f = -10 \text{ cm}$$

Observe que o resultado negativo deve ser atribuído ao fato de os espelhos esféricos convexos terem focos virtuais.

Resposta: -10 cm

27 Um pequeno objeto linear é colocado sobre o eixo principal, em frente da superfície refletora de um espelho esférico gaussiano. Sabendo que a abscissa focal do espelho vale f e que a abscissa do objeto vale p , expresse o aumento linear transversal A em função de f e de p .

RESOLUÇÃO

O aumento linear transversal é tal que:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = -Ap \quad (\text{I})$$

Sabemos, da função dos pontos conjugados, que:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (\text{II})$$

Substituindo (I) em (II), obtemos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} - \frac{1}{Ap} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{A-1}{Ap} \Rightarrow Af - f = Ap \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A(f-p) = f \Rightarrow A = \frac{f}{f-p}$$

NOTA

Essa expressão pode ser utilizada na resolução de exercícios, constituindo um instrumento simplificador de cálculos.

Resposta: $A = \frac{f}{f-p}$



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

28. Diante de um espelho esférico, perpendicularmente ao seu eixo principal, é colocado um objeto luminoso a 15 cm do vértice. Deseja-se que a imagem correspondente seja projetada num anteparo e tenha quatro vezes o comprimento do objeto. Determine:

a) se a imagem é real ou virtual, direita ou invertida;

b) a distância do anteparo ao vértice do espelho para que a imagem seja nítida;

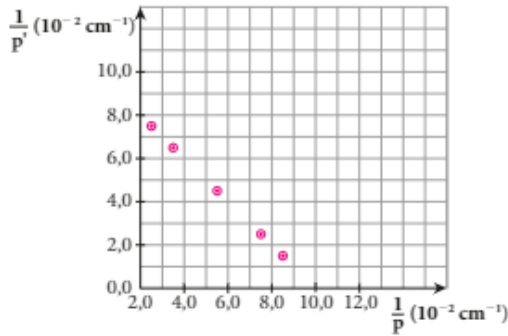
c) a distância focal do espelho.

29. A distância entre um objeto luminoso e sua respectiva imagem conjugada por um espelho esférico gaussiano é de

1,8 m. Sabendo que a altura da imagem é quatro vezes a do objeto e que está projetada em um anteparo, responda:

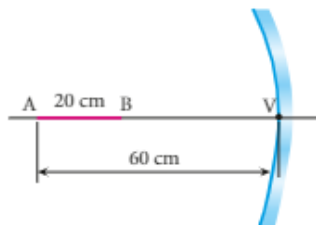
- a) O espelho é côncavo ou convexo?
- b) Qual é o seu raio de curvatura?

30. Em certo experimento, mediram-se a distância p entre um objeto e a superfície refletora de um espelho esférico côncavo que obedece às condições de Gauss e a distância p' entre esse espelho e a correspondente imagem real produzida, em vários pontos. O resultado dessas medições está apresentado no gráfico abaixo:



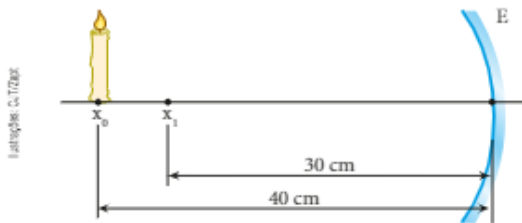
Examinando cuidadosamente o gráfico, determine a distância focal do espelho.

31. Uma barra AB de 20 cm de comprimento está colocada sobre o eixo principal de um espelho esférico côncavo. A extremidade B encontra-se sobre o centro de curvatura do espelho, enquanto a extremidade A encontra-se a 60 cm do espelho, como representa a figura.



- Determine:
- a) a distância focal do espelho;
 - b) o comprimento da imagem da barra conjugada pelo espelho.

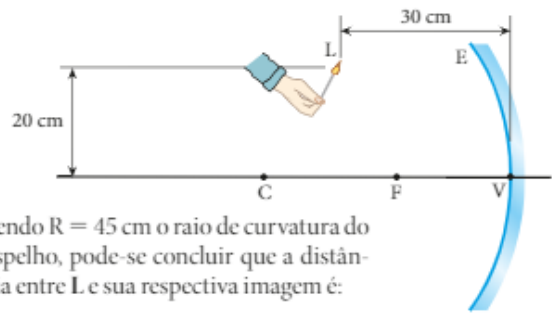
32. Em um experimento de óptica geométrica dispuseram-se um toco de vela e um espelho côncavo gaussiano E, de distância focal igual a 20 cm, como representa a figura:



O toco de vela foi deslocado de x_0 a x_1 , com velocidade escalar de módulo 1,0 cm/s. Enquanto o toco de vela foi deslocado, qual foi o módulo da velocidade escalar média da imagem, expresso em centímetros por segundo?

33. Embora menos utilizados que os espelhos planos, os espelhos esféricos são empregados em finalidades específicas, como em sistemas de iluminação e telescópios, no caso dos espelhos côncavos, e retrovisão, no caso dos espelhos convexos.

Na situação esquematizada, E é um espelho esférico côncavo que opera de acordo com as condições de estigmatismo de Gauss. C é o centro de curvatura, F é o foco principal e V é o vértice do espelho. Uma chama de dimensões desprezíveis, L, é colocada diante da superfície refletora de E, distante 30 cm do espelho e a uma altura de 20 cm em relação ao eixo principal, conforme indicado na figura.



Sendo $R = 45 \text{ cm}$ o raio de curvatura do espelho, pode-se concluir que a distância entre L e sua respectiva imagem é:

- a) 60 cm
- b) 70 cm
- c) 80 cm
- d) 90 cm
- e) 100 cm

34. Um objeto linear é colocado diante da superfície refletora de um espelho esférico côncavo, de raio de curvatura igual a 120 cm e que obedece às condições de Gauss. Sabendo que a altura da imagem é quatro vezes a do objeto, calcule a distância do objeto ao espelho.

35. Considere a situação esquematizada a seguir, em que os centros da Lua e da Terra estão separados por uma distância d . Admita que o raio da Terra seja igual a R e que o Oceano Pacífico, refletindo a luz da lua cheia, comporte-se como um espelho esférico gaussiano. Sendo L o diâmetro da Lua, determine em função de d , R e L :

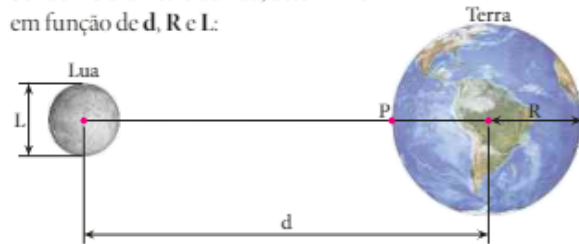
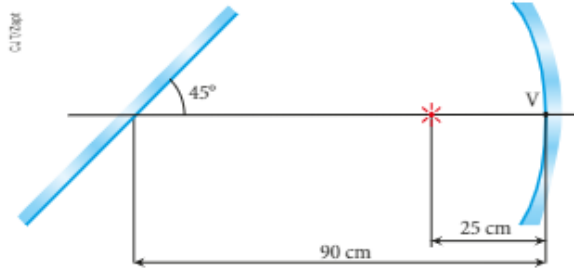


Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

- a) a distância entre a imagem da Lua e o ponto P.
- b) o diâmetro da imagem da Lua.

36. Uma calota esférica de raio de curvatura igual a 60 cm é espelhada em ambas as faces constituindo, assim, dois espelhos, um côncavo e um convexo, que vão operar de acordo com as condições de Gauss. Fixando-se um objeto linear a uma distância p do polo (vértice) dessa calota, nota-se que, quando se utiliza a face convexa, a altura da imagem é a metade daquela obtida quando se utiliza a face côncava. Sabendo que em ambos os casos a imagem é direita, determine p .

37. Dois espelhos são colocados frente a frente. Um é esférico côncavo, de 40 cm de raio de curvatura, e o outro é plano, distante 90 cm do vértice V do espelho esférico e inclinado de 45° em relação ao seu eixo principal, conforme representação a seguir.



Uma fonte luminosa pontual é colocada entre os espelhos, sobre o eixo principal do espelho esférico, a 25 cm do vértice V desse espelho, que vai operar de acordo com as condições de estigmatismo de Gauss.

Considerando-se que os raios luminosos emitidos pela fonte reflitam-se primeiro no espelho esférico e, depois, no espelho plano, responda:

- A que distância do vértice V do espelho esférico se forma a imagem conjugada por esse espelho?
- A que distância do eixo principal do espelho esférico se forma a imagem final da fonte luminosa conjugada pelo espelho plano?

38. Leia o texto a seguir.

O Gran Telescópio Canárias, também conhecido como GTC ou Grantecan, é atualmente o maior telescópio do mundo. Construído sob a direção do Instituto de Astrofísica das Canárias, localiza-se no sítio astronômico chamado Observatorio del Roque de los Muchachos, na ilha de La Palma. Esse telescópio conta com um espelho refletor de 10,4 metros de diâmetro e está instalado a aproximadamente 2300 m de altitude, em um dos melhores locais do mundo para observação astronômica, pelas condições atmosféricas.



GTC – Gran Telescópio Canárias.

Devido à grande altitude do ponto de instalação e às próprias condições climáticas locais, o GTC propicia ótimas possibilidades de observação astronômica em 80% das noites do ano. Além disso, foi criada uma legislação local que limita a iluminação pública, as emissões de rádio e a poluição atmosférica.



Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) e Gran Telescópio de Canárias (GRANTECAN, S.A.).

Fonte de pesquisa: <<http://www.gtc.iac.es/gtc.php>>. Acesso em: 29 jan. 2016.

Suponha que em um determinado dia o GTC tenha sido apontado inadvertidamente para o Sol, recebendo diretamente em seu espelho esférico côncavo primário, paralelamente ao eixo principal, uma intensidade de radiação luminosa $I_0 = 1,0 \text{ kW/m}^2$. Considere que esse espelho tenha diâmetro $D_0 = 10 \text{ m}$ e distância focal $f_0 = 15 \text{ m}$. Admita ainda que o Sol tenha diâmetro de $1,5 \cdot 10^9 \text{ m}$ e que esteja situado a $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ de distância da Terra.

Considerando-se que se forma uma imagem circular do Sol com diâmetro D praticamente no plano focal do espelho e adotando-se $\pi = 3$, determine:

- o valor de D , em centímetros;
- a intensidade de radiação I no local da imagem do Sol, em kW/m^2 ;
- A variação de temperatura ΔT que sofreria um disco circular de alumínio com massa de 600 g e diâmetro exatamente igual a D se fosse colocado no local da imagem do Sol durante 4,0 s. Admita que o calor específico sensível do alumínio seja igual a $1,0 \text{ J/gK}$ e que ocorra absorção total da energia radiante por parte do disco.



DESCUBRA MAIS

- Como são fabricados os espelhos de uso popular?
- A equação de Gauss $\left(\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}\right)$ também é aplicável aos espelhos planos?
- Nos grandes telescópios, os espelhos primários, responsáveis pela captação da imagem inicial de um astro, são côncavos, com diâmetros da ordem de alguns metros. Como se faz para minimizar os efeitos da dilatação térmica sobre esses espelhos, que altera dimensões importantes, como a distância focal?
- Por que nos telescópios são utilizados espelhos parabólicos em vez de espelhos esféricos?



REFRAÇÃO DA LUZ

1. INTRODUÇÃO

O assunto deste capítulo, além de possibilitar o entendimento de muitos fenômenos comuns no nosso dia a dia – como a aparente profundidade menor de uma piscina, as miragens nas rodovias em dias quentes e o arco-íris –, é a base para a fabricação de muitos instrumentos ópticos extremamente úteis, como lunetas, microscópios, câmeras fotográficas, óculos, binóculos e projetores de imagens.

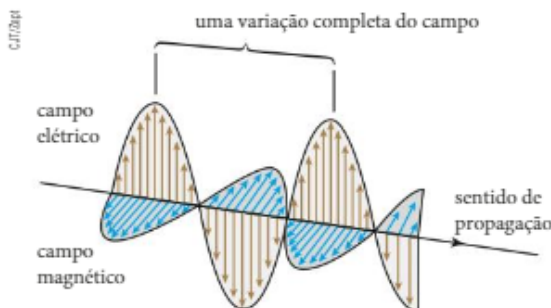


A profundidade desta piscina é maior do que parece nesta fotografia. É a refração da luz que dá a ideia de uma profundidade menor que a real.

Para viabilizar um estudo mais consistente da refração da luz, vamos, inicialmente, rever alguns conceitos.

Frequência, período e comprimento de onda

A figura a seguir representa esquematicamente uma determinada onda eletromagnética.



Tratando-se de uma onda eletromagnética, a luz também consiste na propagação de dois campos variáveis periodicamente: o elétrico (representado na figura por vetores “verticais”) e o magnético (representado na figura por vetores “horizontais”), os quais você conhecerá mais detalhadamente ao estudar **Eletricidade**.

O número de variações completas dos campos por unidade de tempo é a **frequência (f)** da luz considerada. No SI, a unidade de medida de frequência é o **hertz (Hz)**: 1 Hz significa uma variação completa por segundo. Assim, se a frequência de determinada luz é de $5 \cdot 10^{14}$ Hz, entendemos que seus campos executam $5 \cdot 10^{14}$ variações completas por segundo.

O intervalo de tempo para que ocorra uma única variação completa dos campos é o **período (T)** da luz. Vale a relação:

$$f = \frac{1}{T}$$

A distância percorrida pela luz durante 1 período chama-se **comprimento de onda da luz (λ)**. Assim, se o comprimento de onda de determinada luz é de $6 \cdot 10^{-7}$ m, por exemplo, entendemos que ela avança $6 \cdot 10^{-7}$ m enquanto seus campos executam uma variação completa.

A **velocidade (v)** de propagação da luz é dada por:

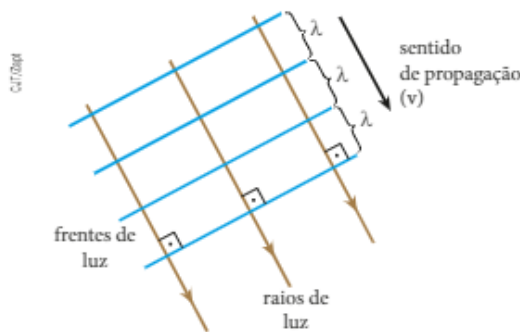
$$v = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{intervalo de tempo}}$$

Se o intervalo de tempo for de 1 período (T), a distância percorrida será igual a 1 comprimento de onda (λ). Assim, temos:

$$v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow v = \lambda \cdot \frac{1}{T} \Rightarrow v = \lambda f$$

Costumamos representar a propagação da luz por frentes de luz separadas de um comprimento de onda.

A figura abaixo mostra frentes planas de determinada luz, que avança no sentido indicado pela seta, com velocidade v . Observe que os raios de luz são perpendiculares às frentes de luz.



Cor e frequência

No intervalo do espectro eletromagnético correspondente à luz visível, cada frequência determina a sensação de uma cor. Assim, quando nossos órgãos visuais são excitados por ondas eletromagnéticas de frequência igual a $4 \cdot 10^{14}$ Hz, por exemplo, percebemos a cor vermelha. Frequências cada vez maiores que esse valor nos fazem perceber o alaranjado, o amarelo, o verde, o azul, o anil e o violeta, além de tonalidades intermediárias.

A luz vermelha corresponde à luz visível de mais baixa frequência (cerca de $4 \cdot 10^{14}$ Hz), enquanto a luz violeta corresponde à luz visível de mais elevada frequência (cerca de $8 \cdot 10^{14}$ Hz).

Quando recebemos mais de uma dessas frequências simultaneamente, temos sensações de cores diferentes de cada uma delas. Se recebermos simultaneamente as luzes verde, vermelha e azul, poderemos ter a sensação da cor branca. A "luz branca" solar, por exemplo, contém todas as cores, desde a vermelha até a violeta.

Não existe **uma** onda eletromagnética cuja frequência cause a sensação do branco. Essa sensação resulta de várias sensações simultâneas de cores diferentes. O preto, por sua vez, corresponde à ausência (total ou quase total) de ondas eletromagnéticas visíveis.

O televisor em cores é um sistema em que a mistura de apenas três cores pode nos causar a sensação de qualquer cor. Na tela desse aparelho, com tubo de imagem, existem substâncias que, quando excitadas por bombardeamento de elétrons, emitem luz vermelha, azul ou verde. Dependendo da intensidade de cada uma das três luzes, podemos ter a sensação das mais diversas cores, até mesmo da branca.

A fotografia a seguir mostra a ampliação de uma pequena região da tela de um televisor ligado.

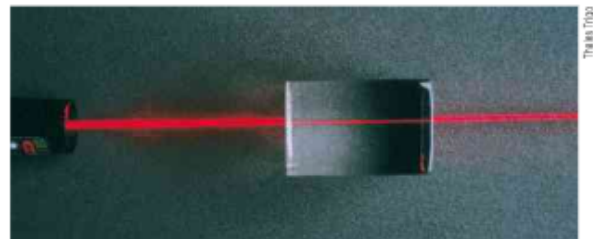


Fotografia mostrando a tela de um televisor de tubo ligado, com ampliação de 4,5 vezes.

Luz monocromática e luz policromática

Uma luz é denominada **monocromática** quando é constituída de ondas eletromagnéticas de uma única frequência, ou seja, de uma única cor. Assim, podemos ter luz monocromática vermelha, azul e violeta, dentre outras.

As fontes de luz em geral não emitem luz monocromática. Podemos, no entanto, obter luz sensivelmente monocromática se fizermos com que a luz das fontes comuns atravesse filtros que só permitam a passagem de luz de determinada cor. Podemos pensar, por exemplo, em uma lâmina vermelha transparente de vidro que só permite a passagem da luz vermelha. As fontes de raio *laser* são exemplos de fontes de luz aproximadamente monocromática.



A luz emitida por uma fonte de raio *laser* é aproximadamente monocromática.

Ao contrário do que se observa com a luz monocromática, uma luz é denominada **policromática** quando é constituída de ondas eletromagnéticas de várias frequências distintas, ou seja, de várias cores. É o caso da luz emitida pelos faróis de um automóvel, pelas lâmpadas que iluminam nossas casas ou pelo Sol.

A "luz branca" solar costuma ser descrita por meio de sete cores componentes: vermelho (de menor frequência), alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta (de maior frequência).

Vale ressaltar, no entanto, que há uma infinidade de cores intermediárias entre elas.

O arco-íris e a coloração observada nas bolhas de água e sabão e nas manchas de óleo derramado nas estradas são algumas evidências de que a luz solar é policromática. Veja a fotografia de um CD tirada à luz do dia. A irisação, isto é, o aparecimento de várias cores, também evidencia que a luz solar é policromática.



Fotografia de CD observado à luz do dia.

2. COR E VELOCIDADE DA LUZ

Para simplificar a linguagem, sempre que nos referirmos ao módulo da velocidade da luz diremos simplesmente **velocidade da luz**.

Quando a luz se propaga no **vácuo**, a velocidade de propagação é exatamente a mesma, qualquer que seja a cor, isto é, qualquer que seja a sua frequência. Assim, a luz amarela, a luz vermelha, a luz violeta, entre outras, propagam-se no vácuo com a mesma velocidade, cujo valor simbolizamos por c :

$$c = 3,00 \cdot 10^5 \text{ km/s} \quad (\text{valor arredondado usual})$$

O que afirmamos estende-se, evidentemente, a todas as outras ondas eletromagnéticas não visíveis, como o infravermelho, o ultravioleta, os raios X, os raios γ etc., que também se propagam no vácuo com velocidade c .

Sendo f a frequência de determinada luz e λ o seu comprimento de onda, temos, no vácuo, $c = \lambda f$.

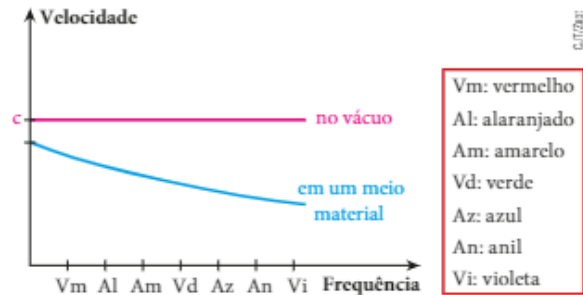
Assim, quanto maior é a frequência, menor é o comprimento de onda, uma vez que c é constante.

Concluimos, então, que, na luz visível, à luz vermelha corresponde o maior comprimento de onda (menor frequência), enquanto à luz violeta corresponde o menor comprimento de onda (maior frequência).

Quando a propagação da luz se dá num **meio material**, os resultados são bem diferentes, em virtude da interação da luz com a matéria. Em primeiro lugar, a velocidade de propagação v de qualquer luz na matéria é menor que c . Em segundo lugar, essa velocidade v é tanto menor quanto maior a frequência. Assim, quando a luz branca solar se propaga na água, por exemplo, todas as cores componentes têm velocidade

menor que c . Além disso, a vermelha é a mais veloz e a violeta é a mais lenta. Evidentemente, o comprimento de onda da luz violeta é, agora, com mais razão ainda, o menor de todos, uma vez que continua válida a expressão $v = \lambda f$.

A seguir, esboçamos graficamente a velocidade de propagação da luz em função da frequência, no vácuo e nos meios materiais, sem escala:



3. ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Índice de refração absoluto

Uma grandeza de destaque no estudo da luz, relacionada à sua velocidade de propagação, é o **índice de refração**.

Considere uma dada radiação monocromática, que se propaga no vácuo com velocidade c e num determinado meio com velocidade v . Por definição, o **índice de refração absoluto** (densidade óptica ou, simplesmente, índice de refração) desse meio para a radiação monocromática considerada é a grandeza adimensional n , definida por:

$$n = \frac{c}{v}$$

Observe que, se o meio considerado for o próprio vácuo, teremos $v = c$ e $n = \frac{c}{c} = 1$. Assim, o índice de refração absoluto do vácuo é igual a 1. Num meio material, porém, temos sempre $v < c$. Conseqüentemente, o índice de refração de um meio material é sempre maior que 1.

É importante notar que o índice de refração absoluto de um meio é inversamente proporcional à velocidade de propagação da luz no meio e nunca é inferior a 1:

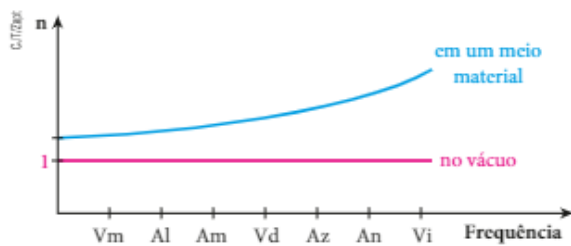
$$\begin{aligned} \text{No vácuo: } n &= 1 \\ \text{Nos meios materiais: } n &> 1 \end{aligned}$$

Com relação a meios materiais, ainda podemos acrescentar que:

- Quanto maior é a densidade de uma **mesma** substância, maior é o seu índice de refração. A pressão e a temperatura influem no índice de refração dos materiais porque influem em suas densidades.
- Embora o índice de refração do ar seja ligeiramente maior que 1 e dependa da frequência da luz, nós o admitiremos sempre igual a 1 nas questões, a menos que o fenômeno estudado exija uma consideração mais real. Isso equivale a adotar para a velocidade da luz no ar o mesmo valor c da velocidade da luz no vácuo.

Influência da frequência da luz no índice de refração

O índice de refração do vácuo é igual a 1, qualquer que seja a luz considerada. O índice de refração de um meio material, por sua vez, depende da frequência da luz considerada. Como a velocidade da luz num meio material diminui com o aumento da frequência (ver representação gráfica na página anterior), concluímos que o índice de refração aumenta quando a frequência aumenta:



O quadro a seguir mostra os valores do índice de refração do vidro "crown leve" para algumas cores:

Cor	n
Vermelho	1,513
Alaranjado	1,514
Amarelo	1,517
Verde	1,519
Azul	1,528
Violeta	1,532

A tabela a seguir mostra os índices de refração absolutos de diversos materiais para a luz amarela emitida pelo sódio, quando, por exemplo, queimamos cloreto de sódio numa chama.

Índice de refração de alguns materiais

Material	n
Ar seco (0 °C; 1 atm)	1,000292
Gás carbônico (0 °C; 1 atm)	1,00045
Gelo (-8 °C)	1,310
Água (20 °C)	1,333
Etanol (20 °C)	1,362
Tetracloro de carbono	1,466
Glicerina	1,470
Monoclorobenzeno	1,527
Vidros	de 1,4 a 1,7
Diamante	2,417
Sulfeto de antimônio	2,7

Fonte: <www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Refracaodaluz_velocidade.php>. Acesso em: 25 abr. 2016.

Índice de refração relativo

Considere dois meios transparentes, **1** e **2**, cujos índices de refração absolutos para uma mesma luz monocromática valem, respectivamente, n_1 e n_2 . O **índice de refração relativo** do meio **2** em relação ao meio **1**, simbolizado por $n_{2,1}$, é definido por:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Como $n_2 = \frac{c}{v_2}$ e $n_1 = \frac{c}{v_1}$, temos:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Resumindo:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Já o índice de refração relativo do meio **1** em relação ao meio **2**, $n_{1,2}$, é dado por: $n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$. Observe que:

- Os índices de refração absolutos de dois meios e as velocidades de propagação da luz nesses meios são **inversamente proporcionais**.
- O índice de refração relativo pode ser maior que 1, menor que 1 ou igual a 1.

4. REFRINGÊNCIA E DIOPTRO

O conceito de refração é importante, sobretudo, para o estudo da refração da luz.

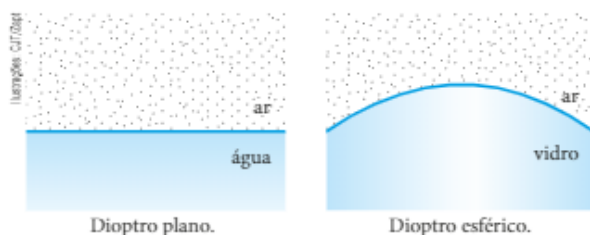
Dizemos que um meio é **mais refringente** que outro quando seu **índice de refração é maior** que o do outro.

Assim, a água ($n \cong 1,3$) é mais refringente que o ar ($n \cong 1$) e menos refringente que o diamante ($n \cong 2,4$).

Em outras palavras, podemos dizer que um meio é mais refringente que outro quando a luz se propaga através dele com velocidade menor que no outro.

Dioptro é um sistema constituído por dois meios transparentes de diferentes refrações, que fazem entre si fronteira regular. Se a fronteira (superfície dióptrica) for plana, teremos o **dioptró plano**; se for esférica, teremos o **dioptró esférico**, e assim por diante.

Os sistemas ar/água e ar/vidro, por exemplo, são dióptros, desde que as fronteiras entre esses meios sejam regulares.



5. REFRAÇÃO

Refração da luz é o fenômeno que consiste no fato de a luz ser transmitida de um meio para outro opticamente diferente.

Nessa passagem de um meio para outro, a velocidade (v) de propagação da luz necessariamente se altera.

A frequência (f) não se altera na refração, fato que é observado não só com ondas luminosas, mas com qualquer tipo de onda.

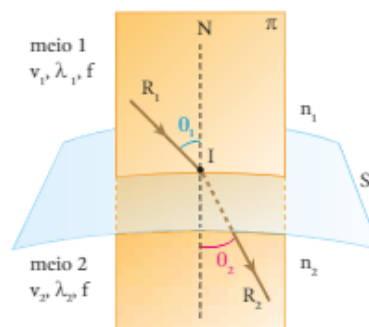
O comprimento de onda se altera proporcionalmente à velocidade, pois $v = \lambda f$.

Como você verá, a alteração da velocidade de propagação provoca, quase sempre, um desvio da luz.

Elementos geométricos

Observe, na figura a seguir, um raio de luz monocromática de frequência f passando do meio **1** para o meio **2**. A superfície **S** é a fronteira entre os dois meios. No meio **1**, a luz apresenta velocidade v_1 e comprimento de onda λ_1 , enquanto no meio **2** a velocidade é v_2 e o comprimento de onda é λ_2 . Os índices de refração absolutos dos meios **1** e **2** são n_1 e n_2 , respectivamente.

A figura também representa todos os elementos geométricos envolvidos no estudo da refração.



Nessa figura: o raio R_1 é o raio incidente; o ponto **I** é o ponto de incidência; a reta **N**, perpendicular à superfície **S** passando por **I**, é a reta normal; o raio R_2 é o raio refratado; o ângulo θ_1 , determinado pelo raio incidente e pela reta normal, é o ângulo de incidência; o ângulo θ_2 , determinado pelo raio refratado e pela reta normal, é o ângulo de refração.

Leis da refração

O fenômeno da refração é regido pelas duas leis seguintes:

1ª Lei da Refração

O raio incidente, o raio refratado e a reta normal traçada pelo ponto de incidência estão contidos no mesmo plano.

Essa lei está ilustrada na figura anterior, na qual R_1 , R_2 e **N** estão contidos no mesmo plano π .

2ª Lei da Refração (Lei de Snell)

Essa lei já foi apresentada e demonstrada no estudo da **Ondulatória**:

A razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é constante para cada dioptró e para cada luz monocromática.

A **Lei de Snell** é expressa por:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (I)$$

Mas: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 f}{\lambda_2 f} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (II)$

E, como vimos: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (III)$

Agrupando as expressões (I), (II) e (III), obtemos uma expressão completa da **Lei de Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

6. ANÁLISE DO DESVIO DO RAIOS INCIDENTE

Da expressão completa da **Lei de Snell**, podemos extrair a seguinte igualdade:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

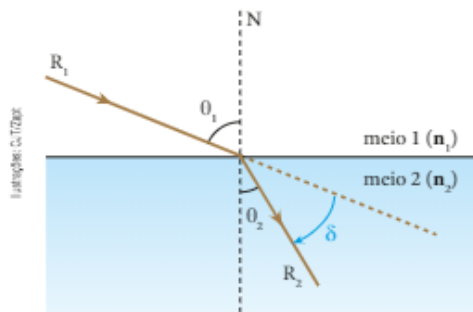
Vamos aplicar essa última expressão em alguns casos, sempre considerando a luz monocromática.

Incidência oblíqua: luz propagando-se do meio menos refringente para o meio mais refringente ($n_2 > n_1$)

Considerando $n_2 > n_1$ na expressão dada por $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, concluímos que $\sin \theta_2 < \sin \theta_1$. Então, como θ_1 e θ_2 são ângulos agudos, temos:

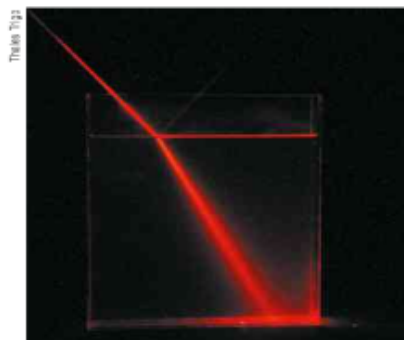
$$\theta_2 < \theta_1$$

A figura a seguir ilustra essa refração:



Podemos, então, concluir que:

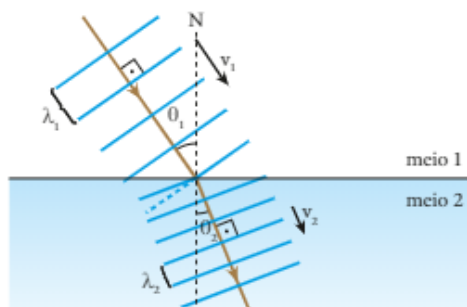
Quando um raio de luz incide obliquamente na fronteira de um dioptra, dirigindo-se do meio menos refringente para o mais refringente, ele se **aproxima da normal** ao refratar-se, experimentando um desvio δ ($\delta = \theta_1 - \theta_2$).



Na fotografia, um pincel cilíndrico de luz proveniente do ar incide obliquamente na fronteira entre o ar e a água. Ao se refratar, ele se aproxima da normal.

Isso pode ser entendido facilmente se lidarmos com as frentes de luz, que são perpendiculares aos raios de luz.

Uma frente de luz plana, por exemplo, quando passa do meio menos refringente para o mais refringente ($n_2 > n_1$), sofre uma redução de velocidade ($v_2 < v_1$). Quando uma parte da frente de luz penetra no meio 2, ela se atrasa em relação à parte que ainda se propaga no meio 1. Por causa disso, ocorre o desvio, como representa a figura:



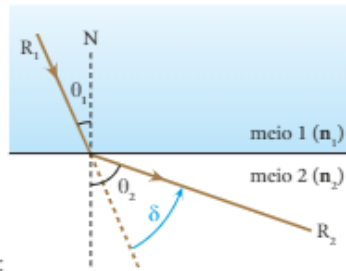
Observe que $v_2 < v_1$ acarreta $\lambda_2 < \lambda_1$.

Incidência oblíqua: luz propagando-se do meio mais refringente para o meio menos refringente ($n_2 < n_1$)

Considerando $n_2 < n_1$ na expressão dada por $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, concluímos que $\sin \theta_2 > \sin \theta_1$. Então, como θ_1 e θ_2 são ângulos agudos, temos:

$$\theta_2 > \theta_1$$

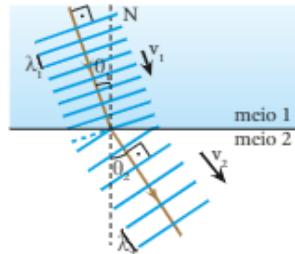
A figura ilustra essa refração (que nem sempre ocorre, como veremos na seção II deste capítulo).



Concluimos que:

Quando um raio de luz incide obliquamente na fronteira de um dioptro e passa do meio mais refringente para o menos refringente, ele **se afasta da normal** ao refratar-se, experimentando um desvio δ ($\delta = \theta_2 - \theta_1$).

Quando uma frente de luz plana, por exemplo, passa do meio mais refringente para o meio menos refringente ($n_2 < n_1$), sua velocidade de propagação aumenta ($v_2 > v_1$). Por causa disso, quando uma parte da frente de luz penetra no meio 2, ela se adianta em relação à parte que ainda se propaga no meio 1.



Observe que $v_2 > v_1$ acarreta $\lambda_2 > \lambda_1$.

Observe, na figura ao lado, como isso ocorre.

As figuras a seguir ilustram o fenômeno por meio das frentes de luz. Observe que não ocorre mudança na direção de propagação da luz, porque as velocidades de todos os pontos da frente de luz alteram-se simultaneamente.

$n_2 > n_1$	$n_2 < n_1$
<p style="text-align: center;">Observe que $n_2 > n_1$ acarreta $v_2 < v_1$ e $\lambda_2 < \lambda_1$.</p>	<p style="text-align: center;">Observe que $n_2 < n_1$ acarreta $v_2 > v_1$ e $\lambda_2 > \lambda_1$.</p>

Incidência normal

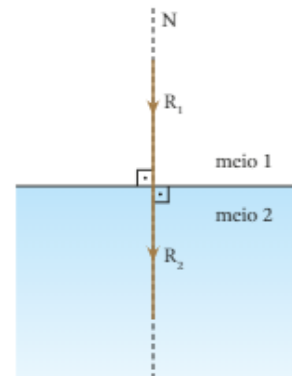
A incidência normal é a situação em que o raio de luz incide perpendicularmente à fronteira do dioptro, isto é, o raio incidente sobrepõe-se à reta normal. Assim, temos $\theta_1 = 0^\circ$ e $\text{sen } \theta_1 = 0$.

Lembrando que $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, temos:

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1 \text{ sen } \theta_1}{n_2} = \frac{n_1 \cdot 0}{n_2} = 0$$

Então: $\theta_2 = 0$

Consequentemente, o raio refratado continua perpendicular à fronteira do dioptro, ou seja, continua sobreposto à reta normal:



Concluimos que:

Quando um raio de luz incide normalmente à fronteira do dioptro, a refração ocorre **sem desvio**.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

Atmospheric seeing

Observando o céu noturno, podemos perceber que as estrelas cintilam, isto é, nós as vemos com um brilho instável.

Em dias ensolarados e quentes, os telhados de casas vistos de longe parecem tremer.

Tudo isso está relacionado com a refração da luz na atmosfera, e o texto a seguir, escrito pelo professor Felipe A. Pinheiro, do laboratório de Magnetismo do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, trata desse assunto.



Methuselah star ou Estrela de envelhecimento, catalogada como HD 140283, é a estrela mais velha da nossa galáxia. Nesta imagem, de março de 2013, a estrela reluz.

Por que quando vemos a luz de longe ela chega a nossos olhos piscando?

Quando observamos fontes de luz a partir de longas distâncias, como estrelas, por exemplo, elas parecem de fato "piscar" ou "tremeluzir". Esse fenômeno, conhecido pelos astrônomos como *atmospheric seeing*, é causado essencialmente por manifestações da turbulência na atmosfera terrestre, como flutuações de temperatura e deslocamentos de correntes de ar.

O primeiro passo para a compreensão do *atmospheric seeing* foi dado em 1665 pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), que sugeriu a existência de "pequenas e móveis regiões da atmosfera que, dotadas de diferentes poderes de refração, agem como lentes". De fato, diferentes regiões da atmosfera têm índices de refração ligeiramente distintos, devido às pequenas variações de temperatura e densidade causadas por correntes de ar turbulentas e pelas massas de ar aquecidas provenientes do solo. Dessa forma, a luz que se propaga através da atmosfera sofre deflexões aleatórias nessas regiões de turbulência, sendo desviada ao longo de seu caminho. Portanto, a luz que chega aos olhos de um observador situado a longas distâncias sofre pequenos desvios aleatórios, resultando em uma imagem que parece "piscar" ou mover-se.

O fenômeno de *seeing* se manifesta de forma mais evidente nas regiões mais próximas da superfície terrestre, até aproximadamente 100 m acima do solo, exatamente onde a atmosfera é mais turbulenta e as correntes de ar, mais intensas. Outros fatores também podem contribuir para o *seeing*, como a concentração de partículas de poeira e a poluição da atmosfera. O *seeing* atmosférico é um problema para os astrônomos, que são obrigados a utilizar vários recursos para minimizar seus efeitos na observação do céu. Uma das provas disso é o fato de a Agência Espacial Norte-americana (Nasa) estimar já ter gasto cerca de US\$ 2 bilhões na luta contra os efeitos nocivos do *seeing*, ou seja, quase a mesma quantia necessária para colocar o telescópio espacial Hubble em órbita!

PINHEIRO, Felipe A. Por que quando vemos a luz de longe ela chega a nossos olhos piscando? *Ciência Hoje*, Rio de Janeiro: SBPC, v. 36, n. 212, jan./fev. 2005, p. 5.

7. REFRAÇÃO E REFLEXÃO

Até aqui, em todas as ilustrações referentes à refração da luz, a reflexão foi omitida e isso vai continuar ocorrendo na maioria das próximas ilustrações deste capítulo.

O motivo dessa omissão é enfatizar a análise de um novo fenômeno: a **refração**.

É importante destacar, entretanto, que a refração nunca ocorre sozinha: pelo menos uma parcela da luz incidente na fronteira de um dióptro certamente sofre reflexão.

Veja a representação de um pincel de luz monocromática proveniente do ar e que incidiu em um bloco sólido transparente:



Identifique os pincéis incidente, refletido e refratado.

8. REFRAÇÃO EM DIOPTRO PLANO

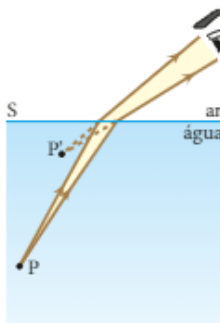
Com relação a um dioptró plano, imagine a seguinte situação: um objeto situado em um dos meios do dioptró e um observador situado no outro meio, contemplando o objeto. O observador sempre "vê o objeto" numa posição diferente da real. Na verdade, o observador não vê o objeto, mas sim uma **imagem** dele conjugada pelo dioptró. É por causa disso que, quando olhamos para uma piscina cheia de água, estando do lado de fora, temos a impressão de que ela é mais rasa e, quando olhamos para um lápis parcialmente mergulhado em água, como na fotografia, temos a impressão de que ele está dobrado.



O lápis parece ter uma dobra na superfície da água.

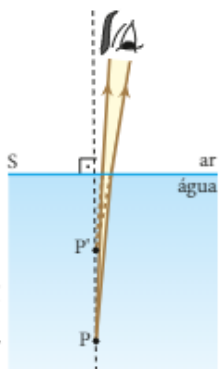
Objeto no meio mais refringente e observador no meio menos refringente

Considere um observador no ar (meio menos refringente) contemplando um objeto **P** imerso na água (meio mais refringente). Obviamente, para o observador ver o objeto, é necessário que a luz proveniente do objeto atinja seus olhos.



Em relação à superfície dióptrica S , o ponto P é um ponto objeto real e o ponto P' é um ponto imagem virtual. O observador enxerga P' , que se comporta como um ponto objeto real em relação a ele.

Note que o observador "enxerga o ponto objeto P " aparentemente elevado em relação à sua verdadeira posição. Assim, quando estamos no ar e "vemos um peixe" dentro da água, o peixe está, na realidade, abaixo da posição em que "é visto".



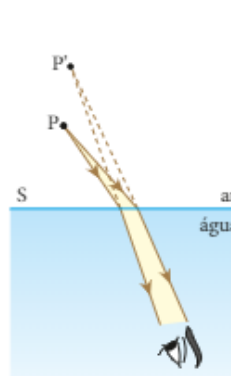
No caso particular em que o observador está sobre a reta perpendicular à superfície dióptrica passando pelo objeto P , ou nas vizinhanças dessa reta, isto é, se os ângulos de incidência e refração são pequenos, a imagem P' é vista aproximadamente sobre essa mesma reta.



Uma moeda no fundo de um copo cheio de água parece estar mais próxima do observador que uma moeda igual no fundo de um copo sem água.

Objeto no meio menos refringente e observador no meio mais refringente

Considere um observador na água (meio mais refringente) contemplando um objeto **P** situado no ar (meio menos refringente).



Em relação à superfície dióptrica S , o ponto P é um ponto objeto real e o ponto P' é um ponto imagem virtual. O observador enxerga P' , que se comporta como um ponto objeto real em relação a ele.

Também nesse caso, P e P' situam-se aproximadamente em uma mesma reta vertical quando o observador está nas vizinhanças dessa reta. Note que, também aqui, o observador "enxerga o objeto P " aparentemente elevado em relação à sua verdadeira posição. Assim, quando estamos dentro da água e "vemos um avião", ele está, na realidade, abaixo da posição em que "é visto".

Ainda com relação à imagem conjugada por um dioptró plano, destacamos que:

- Para um objeto real, o dioptró plano sempre conjuga uma imagem virtual.
- Para diferentes pincéis de luz provenientes de P , o dioptró plano conjuga imagens P' em diferentes posições, tratando-se, portanto, de um sistema astigmático. Por isso, a posição em que um observador vê P' depende da posição desse observador.
- Nos dois casos analisados, observa-se uma elevação aparente do objeto.

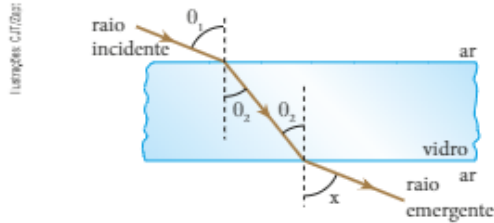
9. LÂMINA DE FACES PARALELAS

Trajeto da luz ao atravessar a lâmina

Considere uma lâmina transparente, de vidro, por exemplo, limitada por duas faces planas e paralelas. A

situação de maior interesse é aquela em que a lâmina é envolvida por um único meio transparente, como, por exemplo, o ar.

A figura abaixo representa uma lâmina de vidro de faces paralelas e a trajetória de um raio de luz monocromática que a atravessa.



Sendo θ_1 o ângulo de incidência na lâmina, vamos determinar o ângulo de emergência x .

Na primeira refração, isto é, na passagem da luz do ar para o vidro, temos, pela **Lei de Snell**:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_{\text{vidro}}}{n_{\text{ar}}} \quad (\text{I})$$

Na segunda refração, isto é, na passagem da luz do vidro para o ar, a **Lei de Snell** nos permite escrever:

$$\frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } x} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{vidro}}} \Rightarrow \frac{\text{sen } x}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_{\text{vidro}}}{n_{\text{ar}}} \quad (\text{II})$$

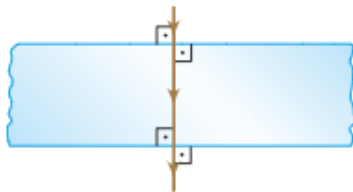
Comparando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\text{sen } x}{\text{sen } \theta_2} \Rightarrow x = \theta_1$$

Portanto, o ângulo de incidência na lâmina é igual ao ângulo de emergência, o que também pode ser concluído a partir da reversibilidade da luz. Isso traz uma importante consequência:

Em uma lâmina de faces paralelas envolvida por um único meio, o raio emergente é **paralelo** ao raio incidente. Assim, o raio emergente não apresenta desvio em relação ao raio incidente, mas apenas um deslocamento lateral.

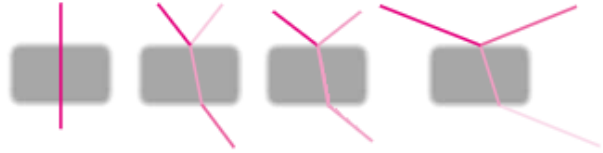
Observe que, no caso particular de incidência normal ($\theta_1 = 0$), o deslocamento lateral deixa de ocorrer:



Refração e reflexão na lâmina

Como sabemos, a ocorrência de refração sempre é acompanhada da ocorrência de reflexão.

Observe as figuras a seguir, que mostram um filete de luz monocromática que incidiu na face superior de uma lâmina de faces paralelas imersa no ar.



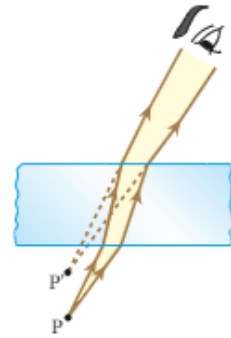
Além do filete que atravessou a lâmina sofrendo duas refrações – uma na face superior e outra na face inferior –, também está representado, nos casos de incidência oblíqua, o filete refletido na face superior (para não poluir desnecessariamente as figuras, o filete refletido na face inferior foi omitido).

Essas figuras ilustram um fato importante que pode ser verificado experimentalmente: à medida que aumenta o ângulo de incidência, aumenta também a quantidade de luz refletida. Como consequência, diminui a quantidade de luz refratada.

Veja ainda que o filete emergente da lâmina é paralelo ao filete nela incidente, ou está alinhado com ele, e que o deslocamento lateral aumenta quando o ângulo de incidência aumenta.

Objeto observado através da lâmina

Quando observamos um objeto através de uma lâmina de faces paralelas, o que vemos, na realidade, é sua imagem virtual conjugada pela lâmina. Essa imagem comporta-se como objeto real em relação aos nossos olhos. A figura ao lado ilustra esse fato, em que devemos notar, também, que a imagem P' está mais próxima da lâmina que o objeto P .

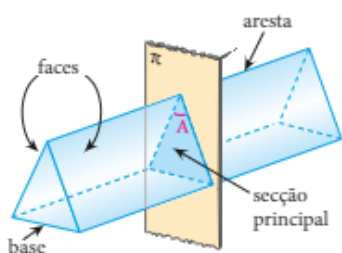


10. PRISMA ÓPTICO

Definição e elementos geométricos

Considere um bloco transparente, de vidro, por exemplo, limitado por duas faces planas e não paralelas. Esse bloco constitui um **prisma óptico**, que geralmente está imerso no ar.

A figura abaixo ilustra um prisma óptico.



Nessa figura, destacam-se os elementos geométricos do prisma:

- **Aresta:** é a intersecção das faces planas que definem o prisma.
- **Ângulo de abertura ou ângulo de refringência:** é o ângulo A entre as faces do prisma.
- **Secção principal:** é uma secção transversal do prisma, determinada pelo plano π perpendicular à aresta.
- **Base:** é a terceira face do prisma, podendo ser plana ou não.

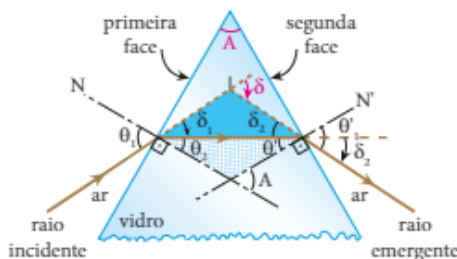
Daqui por diante, os prismas serão sempre representados por uma secção principal e sempre admitiremos que os raios de luz incidentes no prisma estejam contidos no plano de sua secção principal.

NOTA

Observe que o prisma óptico é um sistema óptico que resulta da associação de dois dióptros planos de superfícies diópticas não paralelas.

Refração no prisma óptico

Veremos a seguir o comportamento de um raio de luz monocromática que incide em uma das faces (primeira face) de um prisma óptico imerso no ar, cuja secção principal está representada na figura e cujo índice de refração é conhecido. Suponha que ocorra emergência do raio pela segunda face. Vamos chamar de **emergência simples** esse tipo de emergência.



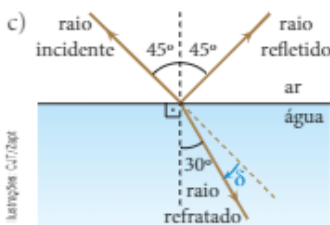
Quanto ao desvio total do raio (δ) observe que $\delta = \delta_1 + \delta_2$ (Teorema do ângulo externo).

QUESTÕES COMENTADAS

- 1** Um raio de luz monocromática propaga-se no ar (meio 1) e atinge a superfície plana da água (meio 2) sob ângulo de incidência θ_1 igual a 45° . Admitindo que o índice de refração da água vale $\sqrt{2}$ para aquela luz, determine:
- o ângulo de refração;
 - o desvio experimentado pelo raio ao se refratar;
 - uma figura em que estejam representados o raio incidente, o raio refletido e o raio refratado.

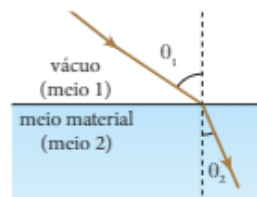
RESOLUÇÃO

- a) Pela **Lei de Snell**, temos: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
 Sendo $n_1 = 1, n_2 = \sqrt{2}$, $\sin \theta_1 = \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$, temos:
 $1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{1}{2}$
 Então: $\theta_2 = 30^\circ$
- b) O desvio experimentado pelo raio ao se refratar é:
 $\delta = \theta_1 - \theta_2 \Rightarrow \delta = 45^\circ - 30^\circ \Rightarrow \delta = 15^\circ$



Respostas: a) 30° ; b) 15° ; c) Ver figura na resolução.

- 2** Um raio de luz de frequência igual a $6,0 \cdot 10^{14}$ Hz passa do vácuo para um meio material transparente, como ilustra a figura: Sabendo que $\sin \theta_1 = 0,80$, $\sin \theta_2 = 0,60$ e que a velocidade da luz no vácuo é $v_1 = 300\,000$ km/s, determine:



- a velocidade da luz no meio material (v_2);
- o índice de refração absoluto do meio material (n_2);
- o comprimento de onda dessa luz no vácuo (λ_1) e no meio material (λ_2).

RESOLUÇÃO

a) Pela **Lei de Snell**, temos:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{0,80}{0,60} = \frac{300\,000}{v_2}$$

Logo: $v_2 = 2,25 \cdot 10^5 \text{ km/s}$

b) Temos:

$$n_2 = \frac{c}{v_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{300\,000}{225\,000} \Rightarrow n_2 = 1,33$$

c) Como $v = \lambda f$, temos, no vácuo (meio 1):

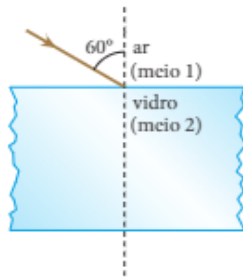
$$v_1 = \lambda_1 f \Rightarrow 300\,000 = \lambda_1 \cdot 6,0 \cdot 10^{14} \Rightarrow \lambda_1 = 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ km} \Rightarrow \lambda_1 = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Lembrando que a frequência não se altera na refração, temos, no meio material (meio 2):

$$v_2 = \lambda_2 f \Rightarrow 225\,000 = \lambda_2 \cdot 6,0 \cdot 10^{14} \Rightarrow \lambda_2 = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ km} \Rightarrow \lambda_2 = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Respostas: a) $2,25 \cdot 10^5 \text{ km/s}$; b) 1,33;
c) $5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, e $3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

3 Sobre uma lâmina de vidro de 4,0 cm de espessura e índice de refração $\sqrt{3}$, mergulhada no ar, incide um raio de luz monocromática, como ilustra a figura:



- Calcule o deslocamento lateral do raio emergente em relação ao raio incidente.
- Se o ângulo de incidência, em vez de ser igual a 60° , tender a 90° , a quanto tenderá o citado deslocamento lateral?

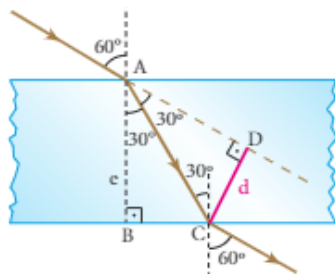
RESOLUÇÃO

a) Pela **Lei de Snell**, calculamos o primeiro ângulo de refração: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

Sendo $n_1 = 1$, $\sin \theta_1 = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$ e $n_2 = \sqrt{3}$, temos:

$$1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \theta_2 = 30^\circ$$

Na figura a seguir está representada a trajetória do raio até ele emergir da lâmina (d é o deslocamento lateral solicitado e e é a espessura da lâmina).



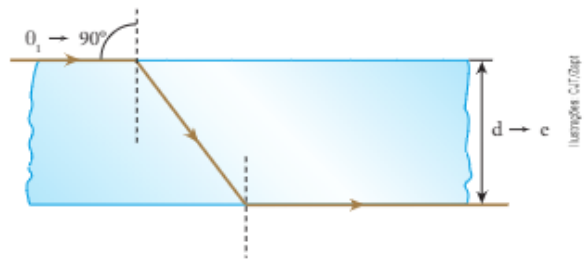
No triângulo ABC, temos $e = 4,0 \text{ cm}$ e podemos escrever:

$$\cos 30^\circ = \frac{e}{AC} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{4,0}{AC} \Rightarrow AC = \frac{8,0}{\sqrt{3}} \text{ cm}$$

No triângulo ADC, temos:

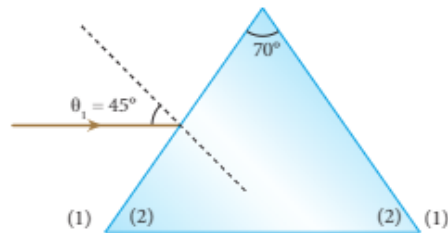
$$\sin 30^\circ = \frac{d}{AC} \Rightarrow \frac{1}{2} = \frac{d}{\frac{8,0}{\sqrt{3}}} \Rightarrow d \cong 2,3 \text{ cm}$$

b) Se o ângulo de incidência (θ_1) tender a 90° , o deslocamento lateral d tenderá ao valor e da espessura da lâmina, ou seja, tenderá ao valor máximo de 4,0 cm.



Respostas: a) Aproximadamente 2,3 cm; b) O deslocamento lateral tenderá ao valor máximo de 4,0 cm.

4 Um prisma de abertura $A = 70^\circ$ e índice de refração $\sqrt{2}$, imerso no ar, recebe um estreito pincel cilíndrico de luz monocromática sob ângulo de incidência θ_1 igual a 45° , como representa a figura:



Dados: $\sin 40^\circ = 0,64$; $\sin 64^\circ = 0,90$.

Determine:

- o desvio do pincel na primeira refração.
- o desvio do pincel na segunda refração.
- o desvio total.

RESOLUÇÃO

a) Aplicando a **Lei de Snell** na primeira refração, temos:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

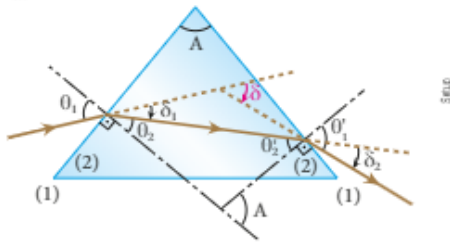
Sendo $n_1 = 1$, $\sin \theta_1 = \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ e $n_2 = \sqrt{2}$, vamos calcular θ_2 :

$$1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \cdot \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \theta_2 = 30^\circ$$

O desvio na primeira refração é δ_1 , dado por:

$$\delta_1 = \theta_1 - \theta_2 = 45^\circ - 30^\circ \Rightarrow \delta_1 = 15^\circ$$

- b) Veja a trajetória de um raio do pincel até emergir do prisma:



Vamos calcular θ'_2 lembrando que $A = 70^\circ$ e $\theta_2 = 30^\circ$:

$$A = \theta_2 + \theta'_2 \Rightarrow 70^\circ = 30^\circ + \theta'_2 \Rightarrow \theta'_2 = 40^\circ$$

Aplicando a **Lei de Snell** na segunda refração, temos:

$$n_2 \sin \theta'_2 = n_1 \sin \theta_1 \Rightarrow \sqrt{2} \cdot 0,64 = 1 \cdot \sin \theta_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin \theta_1 = 0,90 \Rightarrow \theta_1 = 64^\circ$$

O desvio na segunda refração é δ_2 , dado por:

$$\delta_2 = \theta_1 - \theta'_2 = 64^\circ - 40^\circ \Rightarrow \delta_2 = 24^\circ$$

- c) O desvio total é δ , dado por:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 15^\circ + 24^\circ \Rightarrow \delta = 39^\circ$$

Respostas: a) 15° ; b) 24° ; c) 39°



QUESTÕES PROPOSTAS



FAÇA NO CADERNO.

5. O índice de refração constitui um eficiente critério para a identificação de uma pedra preciosa e, conseqüentemente, para a apuração de sua autenticidade. O índice de refração pode ser determinado por aparelhos denominados refratômetros, mas também é possível determiná-lo pelo método de imersão, além de outros, que consiste em mergulhar e observar a pedra num líquido de índice de refração conhecido. Para isso são fabricados líquidos de índices de refração que variam de 1,5 até valores superiores a 2,0.

As turmalinas, principalmente a variedade denominada rubelita, em geral possuem muitas fraturas internas, que são preenchidas com gás e provocam notáveis reflexões com a incidência da luz.

- Para determinar o índice de refração por imersão, procura-se o líquido no qual "desaparece". O que se pode concluir sobre o índice de refração da pedra?
- Por que ocorrem intensas reflexões nas fraturas das turmalinas?

6. Para a luz amarela emitida pelo sódio, os índices de refração de certo vidro e do diamante são iguais a 1,5 e 2,4, respectivamente. Sendo a velocidade da luz no ar de 300 000 km/s, calcule, para a luz amarela citada:

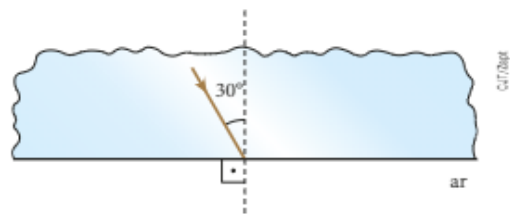
- sua velocidade no vidro;
- sua velocidade no diamante;
- o índice de refração do diamante em relação ao vidro.

7. Determinada luz monocromática percorre um segmento de reta de comprimento 30 cm no interior de um bloco maciço de um cristal durante $2,0 \cdot 10^{-9}$ s. Sabendo que a velocidade da luz no vácuo é igual a $3,0 \cdot 10^8$ m/s, calcule o índice de refração desse cristal.

8. Na figura a seguir, um pincel cilíndrico de luz monocromática propaga-se em um bloco sólido transparente e incide na fronteira plana entre o bloco e o ar, sob ângulo de incidência igual a 30° .

Sabendo que o índice de refração do bloco para a radiação considerada vale $\sqrt{3}$, determine:

- o ângulo de refração;
- o desvio experimentado pela luz ao se refratar;
- a representação esquemática dos raios incidente, refletido e refratado.



9. Julgue falsa ou verdadeira cada uma das afirmações a seguir.

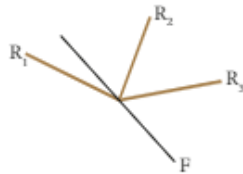
- Numa noite enluarada, os animais que habitam o interior de um lago de águas calmas podem enxergar a Lua. Uma pessoa, à beira do lago, quando olha para a superfície da água, também pode ver a Lua. Podemos então concluir que a luz proveniente da Lua, ao incidir na água, não somente se refrata, mas também se reflete parcialmente.
- Refração da luz é o desvio da luz ao atravessar a fronteira entre dois meios transparentes.
- Refração da luz é a passagem da luz de um meio transparente para outro, ocorrendo sempre uma alteração de sua velocidade de propagação.
- Na refração da luz, o raio refratado pode não apresentar desvio em relação ao raio incidente.
- A cor da luz (frequência) não se altera na refração.
- Quando um raio incidente oblíquo passa do meio menos refringente para o mais refringente, ele se aproxima da normal.
- Quando um raio incidente oblíquo passa do meio mais refringente para o menos refringente, ele se afasta da normal.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações verdadeiras.

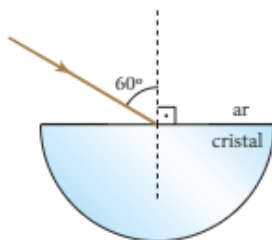
10. Um feixe cilíndrico de luz incide perpendicularmente na superfície plana de separação de dois meios transparentes e homogêneos opticamente diferentes. Pode-se afirmar que:
- o feixe refrata-se, desviando-se fortemente.
 - o feixe não sofre refração.
 - o feixe não sofre reflexão.
 - ocorre reflexão, com a consequente alteração do módulo da velocidade de propagação.
 - ocorre refração, com a consequente alteração do módulo da velocidade de propagação.

11. Quando um raio de luz passa de um meio mais refringente para outro menos refringente:
- afasta-se da normal.
 - aproxima-se da normal.
 - a frequência da luz aumenta.
 - não ocorre desvio.
 - a velocidade de propagação da luz aumenta.

12. Um raio de luz monocromática incide na fronteira F entre dois meios transparentes, dando origem a um raio refletido e a um raio refratado, como representa a figura ao lado. Dos raios de luz R_1 , R_2 e R_3 , identifique o incidente, o refletido e o refratado.

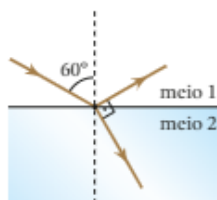


13. Um raio de luz monocromática incide no centro da face circular de uma peça hemisférica de cristal transparente. A figura representa a seção da peça determinada pelo plano de incidência do raio:



Sendo $\sqrt{3}$ o índice de refração do cristal para a referida radiação, determine a trajetória do raio refratado até emergir para o ar, indicando os ângulos envolvidos.

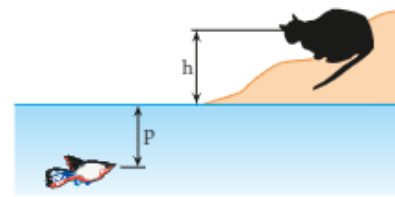
14. A figura seguinte representa um pincel cilíndrico de luz monocromática que, propagando-se num meio 1, incide na fronteira separadora deste com um meio 2. Uma parcela da luz incidente é refletida, retornando ao meio 1, enquanto a outra é refratada, passando para o meio 2.



Sabendo que os pincéis refletido e refratado são perpendiculares entre si, obtenha:

- os ângulos de reflexão e de refração;
- o índice de refração do meio 2 em relação ao meio 1.

15. Na figura a seguir, em relação à superfície da água:



- o peixe vê o gato a uma altura maior ou menor que h ?
- o gato vê o peixe a uma profundidade maior ou menor que p ?

16. Um filete de luz monocromática FI propagando-se no ar, incide na face superior de uma lâmina de quartzo, de faces paralelas, totalmente envolvida pelo ar.

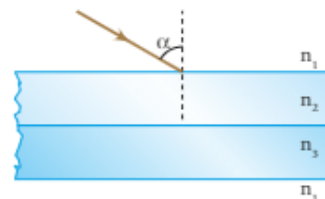


Ilustração: Luis Perreira R. Tuelto

Com isso, um filete de luz FE emerge da lâmina por sua face inferior, passando para o ar. É **incorreto** afirmar que:

- se a incidência for oblíqua, FE será paralelo a FI , mas estará deslocado lateralmente em relação a FI .
- se a incidência for normal, FE estará alinhado com FI , sem apresentar deslocamento lateral.
- o deslocamento lateral de FE em relação a FI jamais será maior que a espessura da lâmina.
- para um determinado ângulo de incidência oblíqua, o deslocamento lateral de FE em relação a FI será tanto maior quanto maior for a espessura da lâmina.
- o deslocamento lateral de FE em relação a FI , para um mesmo ângulo de incidência oblíqua e para uma mesma espessura da lâmina, diminuiria se o material de que ela é feita fosse mais refringente que o quartzo.

17. No arranjo representado na figura, temos duas lâminas de faces paralelas transparentes e sobrepostas. Os materiais de que são feitas as lâminas têm índices de refração n_2 e n_3 , enquanto o meio que envolve o sistema tem índice de refração n_1 , tal que $n_3 > n_2 > n_1$.



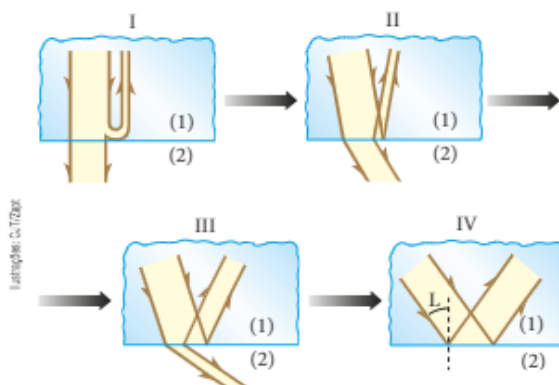
Um raio luminoso monocromático incide na lâmina superior com um ângulo α . Determine:

- o ângulo de emergência da luz na lâmina inferior ao abandonar o conjunto de lâminas;
- se esse ângulo de emergência depende dos materiais das lâminas, respeitadas as condições do enunciado.

11. ÂNGULO-LIMITE E REFLEXÃO TOTAL

Quando a luz incide na fronteira de um dióptro, ocorrem em geral tanto a refração quanto a reflexão. Para dado dióptro e determinado pincel de luz incidente, a quantidade de luz refletida é tanto maior quanto maior o ângulo de incidência.

Considere determinado pincel cilíndrico de luz monocromática dirigindo-se de um meio mais refringente para outro menos refringente, do vidro (meio 1) para o ar (meio 2), por exemplo, como representam as figuras abaixo. Observe que, conforme aumenta o ângulo de incidência, aumenta a quantidade de luz refletida e diminui a quantidade de luz refratada.



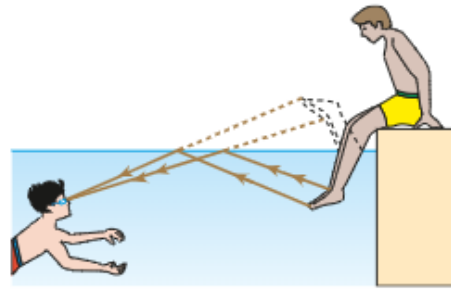
Na figura I, o ângulo de incidência é igual a zero. Nesse caso, a quantidade de luz refratada é bem maior que a refletida (a reflexão é parcial).

Na figura II, o ângulo de incidência aumentou, o que provocou aumento da quantidade de luz refletida e redução da refratada (a reflexão continua parcial).

Na figura III, o ângulo de incidência aumentou mais ainda, o que acarretou um novo aumento da quantidade de luz refletida em detrimento da refratada (a reflexão ainda é parcial).

Observe que, enquanto o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração aumenta, mas a quantidade de luz refratada é cada vez menor.

Quando o ângulo de incidência tende a um valor L , denominado **ângulo-limite**, o ângulo de refração tende a 90° , mas a quantidade de luz refratada tende a zero. Atingido esse ângulo-limite, não mais ocorre refração e a luz incidente é totalmente refletida. Esse fenômeno é denominado **reflexão total** e está ilustrado na figura IV. Para ângulos de incidência maiores que o ângulo-limite, continua ocorrendo, evidentemente, a reflexão total.

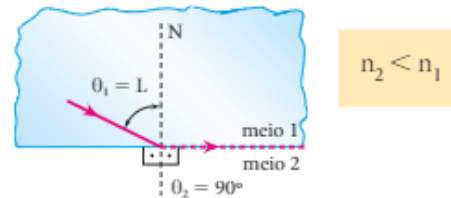


Um nadador, imerso em água e adequadamente posicionado, olha para uma pessoa sentada à beira da piscina. Devido à reflexão total, a visão do tronco da pessoa fica prejudicada.

O nadador, por visão direta, vê as pernas da pessoa submersa e, por reflexão total, vê a imagem dessas pernas como se a superfície da água fosse um espelho plano.

Cálculo do ângulo-limite

O ângulo-limite (L) é calculado pela **Lei de Snell**, admitindo-se o ângulo de refração igual a 90° (emergência rasante).



Temos, então: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

Fazendo $\theta_1 = L$ e $\theta_2 = 90^\circ$, obtemos:
 $n_1 \sin L = n_2 \sin 90^\circ$

$$\sin L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$$

Observe que o seno do ângulo-limite na fronteira de um dióptro é obtido dividindo-se o menor índice de refração pelo maior. Nesse cálculo, o engano é inconcebível, pois, se dividirmos o índice maior pelo menor, obteremos $\sin L$ maior que 1, o que é absurdo.

É preciso fazer alguns comentários a respeito do raio emergente rasante tracejado na figura anterior.

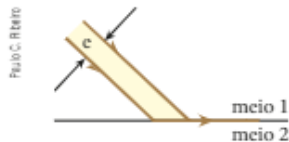
Na realidade, esse raio não existe e seu uso só é válido para efeito do cálculo do ângulo-limite L .

Sua inexistência pode ser comprovada experimentalmente, mas também pode ser evidenciada pelas seguintes considerações teóricas:

- Se o raio emergente rasante existisse, ele teria de obedecer à reversibilidade da luz, isto é, "incidindo" rasante à fronteira entre os meios 1 e 2 (veja a figura anterior e imagine os raios com sentidos invertidos), passaria "misteriosamente" para o

meio 1, adentrando esse meio em um ponto privilegiado, como se o raio tivesse memória. Obviamente, esse ponto não existe. "Incidir rasante" é, na realidade, não incidir!

- A emergência rasante da luz causaria o colapso do pincel de luz.



Qualquer pincel incidente tem, evidentemente, uma espessura e , diferente de zero. Se houvesse pincel refratado rasante, sua espessura seria nula (colapso do pincel).

Reiteramos: quando o ângulo de incidência se iguala ao valor-limite L , ocorre reflexão total e nenhuma refração. É correto afirmar, porém, que, quando o ângulo de incidência **tende** ao valor-limite L , o ângulo de refração **tende** a 90° .

Embora o raio rasante, incidente ou emergente, não exista, frequentemente ele aparece em questões propostas em livros didáticos e em avaliações de Física. Nessas situações, se tivermos de resolver tais questões, não nos restará outra alternativa que não seja fazer de conta que o raio rasante existe.

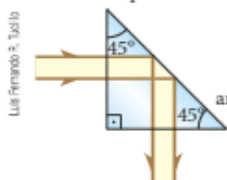
Reflexão total

A reflexão total só pode ocorrer se forem satisfeitas as seguintes condições:

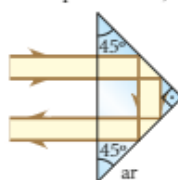
- A luz deve dirigir-se do meio **mais refringente** para o meio **menos refringente**.
- O ângulo de incidência deve ser **igual ou superior** ao ângulo-limite do dióptro.

Prismas de reflexão total

Uma das principais utilidades do prisma óptico é o seu emprego como sistema de reflexão total. Nessa operação, o prisma pode substituir com vantagens os espelhos planos, pois pode ter um poder refletor bem maior que o dos espelhos e, além disso, está livre da deterioração que ocorre na película de prata dos espelhos, por oxidação.



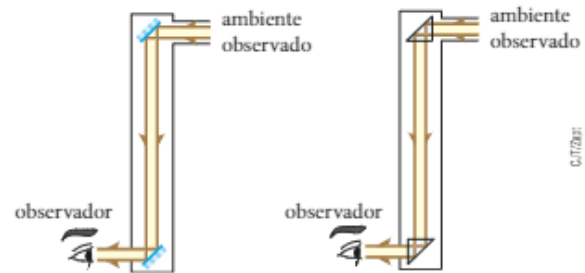
Representação de prisma causando desvio de 90° num pincel de luz, por reflexão total ($n_{\text{prisma}} \cong \sqrt{2}$).



Representação de prisma causando desvio de 180° num pincel de luz, por dupla reflexão total ($n_{\text{prisma}} \cong \sqrt{2}$).

Algumas aplicações dos prismas de reflexão total

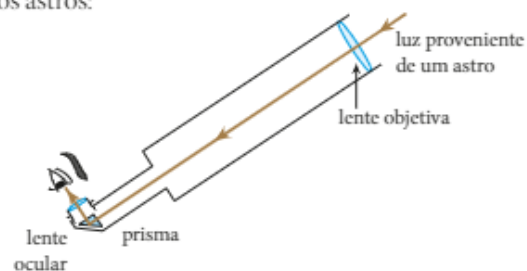
O **periscópio** é um instrumento de uso mais comum em submarinos, que permite visões panorâmicas do ambiente externo ao veículo. Embora os periscópios dos submarinos sejam muito mais sofisticados, vamos esquematizar os periscópios simples, que podem ser montados com dois espelhos planos (como os periscópios usados nas trincheiras durante a Primeira Guerra Mundial) ou com dois prismas de reflexão total:



Representação de periscópios simples: à esquerda, com espelhos planos fixados em um tubo; à direita, com prismas de reflexão total fixados em um tubo.

Em ambos os casos, as imagens do ambiente observado não são enantiomorfas porque são produzidas por **duas reflexões**.

Nas **lunetas**, os prismas de reflexão total também são úteis, pois tornam mais cômodas as observações dos astros:



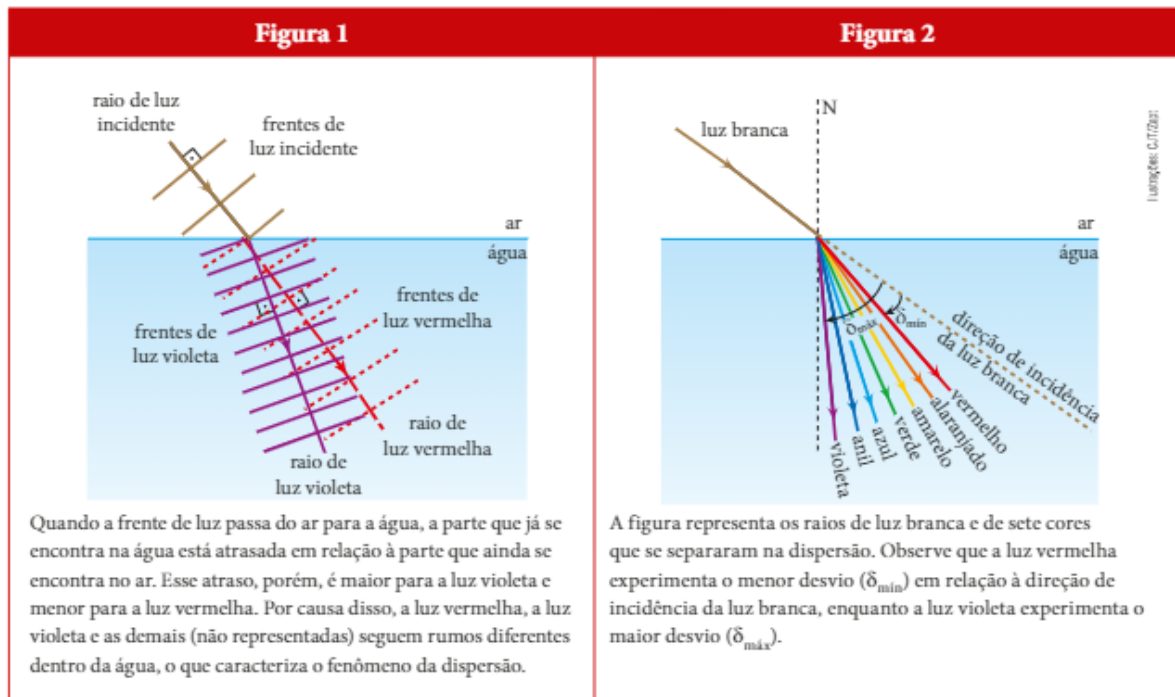
12. DISPERSÃO DA LUZ

Estudaremos agora um fenômeno facilmente observável com uma luz policromática: a dispersão.

Dispersão de uma luz policromática é a sua decomposição nas diversas luzes monocromáticas que a constituem.

A dispersão é possível porque diferentes luzes monocromáticas, isto é, luzes de diferentes frequências, propagam-se na matéria com diferentes velocidades, ou seja, percebem na matéria diferentes índices de refração.

Veja, na figura 1 a seguir, a representação esquemática de frentes planas de luz branca solar propagando-se no ar e incidindo obliquamente na fronteira entre o ar e a água. Todas as luzes monocromáticas componentes perdem velocidade quando passam do ar para a água. Essa perda de velocidade é mais acentuada, porém, para a luz violeta e menos acentuada para a vermelha. Por isso, as diversas cores se separam (figura 2).

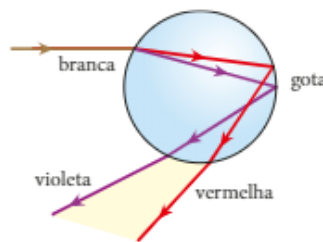


É importante notar que:

Na dispersão da luz, a luz monocromática de maior frequência **sempre** sofre o maior desvio.

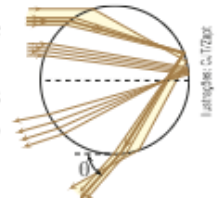
Arco-íris (primário)

O **arco-íris** é um exuberante fenômeno natural decorrente da dispersão da luz solar em gotas de chuva. Basicamente, o que ocorre é o seguinte: a luz branca penetra na gota, decompondo-se em diversas cores, que, em seguida, sofrem reflexão (parcial) nas paredes da gota, como mostra a figura:

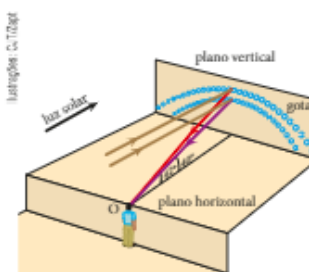


Pode-se demonstrar que, se um raio de determinada cor fizer o trajeto indicado na figura anterior, de modo que seu desvio total seja máximo, todos os raios de mesma cor, vizinhos dele, emergirão da gota muito juntos, reforçando o feixe emergente em determinada direção. A figura a seguir mostra dois feixes de luz monocromática atingindo uma gota.

Observe que os raios do feixe superior emergem da gota muito juntos. Nesse feixe, o raio em traço mais grosso é o que sofre desvio máximo para a cor considerada.



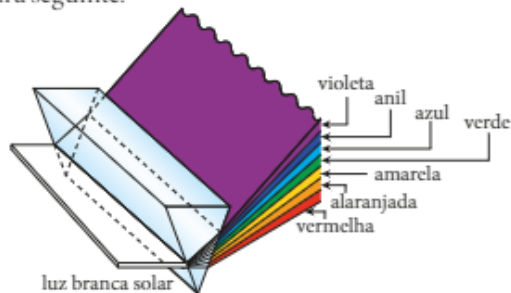
Para a luz vermelha, esse reforço da luz refletida ocorre quando o ângulo θ indicado na figura anterior vale aproximadamente 42° ; e para a luz violeta, ocorre quando θ é próximo de 40° .



Na figura, um observador O contempla um arco-íris. Note que o observador está de costas para o Sol quando se coloca de frente para o arco-íris. As gotas que são vistas por O sob ângulo de 42° enviam para O luz vermelha reforçada; já aquelas que são vistas por O sob ângulo de 40° enviam para O luz violeta reforçada.

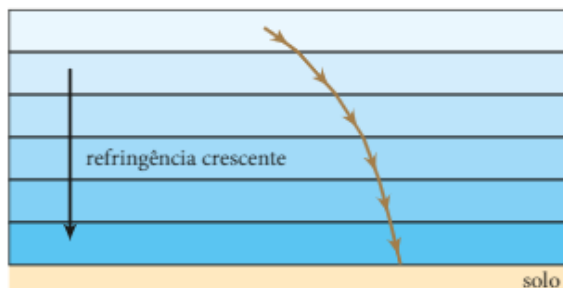
Prisma e dispersão da luz

O prisma óptico é também bastante eficiente na decomposição da luz, o que está esquematizado na figura seguinte:



13. REFRAÇÃO NA ATMOSFERA

Segundo o **Princípio da Propagação Retilínea da Luz**, a luz propaga-se em linha reta nos meios transparentes e homogêneos. A atmosfera, porém, não é um meio homogêneo, pois apresenta uma densidade tanto menor quanto maior a altitude. Além disso, as predominâncias gasosas variam com a altitude. Consequentemente, quanto maior a altitude, menor é o índice de refração do ar. Então, a trajetória de um raio de luz na atmosfera é, em geral, curvilínea.



A atmosfera pode ser representada por meio de um modelo constituído de várias camadas gasosas de refração tanto maior quanto menor a altitude. Um raio de luz originário do vácuo segue trajetória semelhante à da figura anterior quando incide obliquamente na atmosfera.

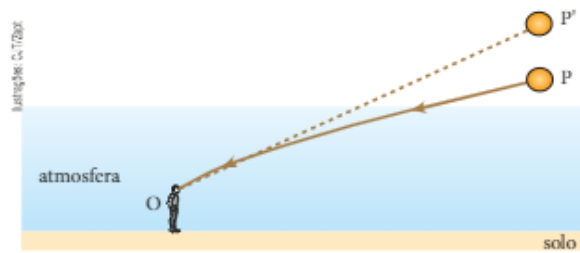
Vamos analisar agora algumas consequências interessantes da refração da luz na atmosfera.

Posição aparente dos astros

Veja, na figura seguinte, um astro representado na posição P , sendo contemplado por um observador O , situado no solo terrestre.

A luz proveniente do astro situado em P desvia-se ao atravessar a atmosfera. Por isso, quando essa luz atinge o observador, ele tem a impressão de que o

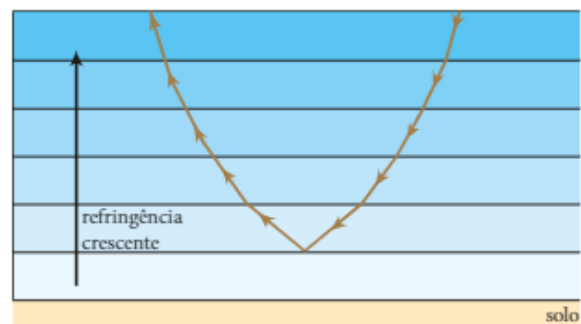
astro está na posição P' , que é uma posição **aparente**. Concluímos, então, que, em geral, vemos os astros com uma aparente elevação em relação à sua posição real, semelhantemente ao que ocorre no dióptro plano.



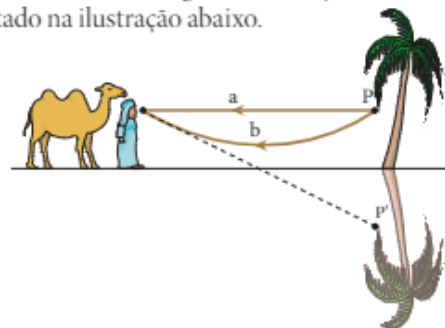
Miragens

A temperatura junto ao solo pode determinar a ocorrência do curioso fenômeno da miragem.

Quando a temperatura do solo se torna muito elevada, o ar aquecido junto ao solo fica menos denso e, conseqüentemente, menos refringente que o ar que se encontra um pouco mais acima. Por causa disso, um raio de luz que desce obliquamente de encontro ao solo pode sofrer reflexão total antes de atingi-lo, como se vê no modelo a seguir.



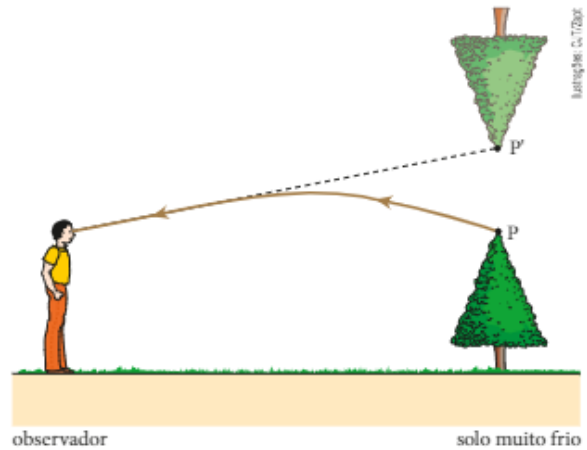
Esse fenômeno pode ocorrer tanto em temperaturas altas, como em desertos ou no asfalto em dias quentes, quanto em temperaturas baixas, especialmente nas regiões polares. A miragem que ocorre sob temperaturas altas é chamada de inferior, devido ao fato de formar a imagem sob o objeto, como é representado na ilustração abaixo.



O observador recebe do objeto **P** tanto luz direta (**a**) como luz que o atinge após a reflexão total (**b**). Consequentemente, o observador enxerga tanto o objeto (**P**) como a sua imagem especular (**P'**), que ele tem a impressão de estar sendo produzida por um lago.

Pelo mesmo motivo, temos a impressão de que as estradas asfaltadas estão molhadas em dias quentes e ensolarados, quando observadas de posições convenientes.

Também pode ocorrer que a temperatura do solo fique tão baixa que o ar junto dele se torne mais frio e, portanto, mais denso e mais refringente que o ar situado um pouco acima. Nesse caso, os raios de luz que partem do objeto e sobem obliquamente passam de camadas de ar mais refringentes para camadas menos refringentes, até a ocorrência da reflexão total. O observador vê a imagem do objeto "pairando" no ar. É a chamada miragem superior.

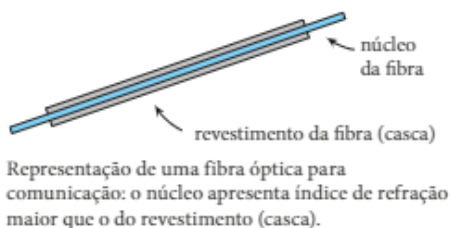


A rigor, não é necessário que ocorra a reflexão **total** da luz para que se observe uma miragem. Basta que o ângulo de incidência aumente o suficiente para que a reflexão seja bastante acentuada.

AMPLIANDO O OLHAR

Fibras ópticas

Uma importantíssima aplicação da reflexão total dá-se nas fibras ópticas, largamente usadas na tecnologia moderna. Nas comunicações, sua importância destaca-se pela grande capacidade de transporte simultâneo de uma enorme quantidade de informações, por cabos muito finos (cada fibra tem diâmetro entre 0,1 mm e 0,2 mm). Essa é uma das vantagens das fibras sobre os fios metálicos.



Representação de uma fibra óptica para comunicação: o núcleo apresenta índice de refração maior que o do revestimento (casca).

Nas comunicações, uma única fibra óptica pode transportar tanta informação quanto um grosso feixe de fios elétricos.

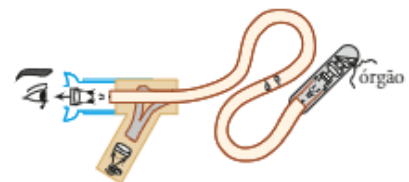
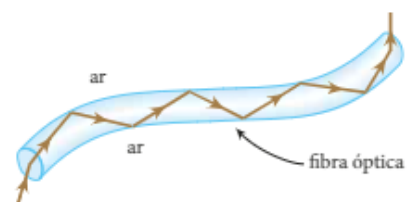


Além disso, a atenuação (redução da intensidade) dos sinais eletromagnéticos que se propagam em uma fibra óptica é baixa em comparação com o que acontece com os sinais elétricos transmitidos por fios metálicos. Assim, as fibras levam outra grande vantagem sobre os fios, principalmente nas transmissões a longas distâncias.

Outra vantagem das fibras é a imunidade às interferências eletromagnéticas, por serem feitas de materiais dielétricos, como vidros de óxido de silício e óxido de germânio, plásticos e outros materiais.

Na Medicina, são bastante usadas em equipamentos para observação de órgãos internos.

A figura ao lado ilustra o princípio de funcionamento das fibras ópticas. Um raio de luz penetra por uma das extremidades de uma fibra óptica e emerge pela outra extremidade, após sofrer diversas **reflexões totais**.



Feixes de fibras ópticas podem ser usados na observação de órgãos internos, sem necessidade de cirurgia.

EM BUSCA DE EXPLICAÇÕES

Ilusão de óptica

Ao olhar para a cartola representada na figura ao lado, ficamos com a certeza de que sua altura é maior que sua largura. Entretanto, medindo esses dois comprimentos com uma régua, constatamos que eles são iguais! Como se explica isso?

Pelo que se sabe, não existe explicação. Se surgir alguma, não será dada pela Física, mas sim pela Neurofisiologia, já que se trata de um equívoco de nosso cérebro na decodificação dos sinais captados por seus sensores visuais. A isso se dá o nome de ilusão, no caso, ilusão de óptica.

O Sol, a Lua e constelações, quando observados no horizonte, também nos dão a certeza de que estão maiores do que quando são vistos mais elevados no céu, mas também se trata de uma ilusão não explicada até hoje: as medições comprovam que isso não é real.

Já se tentou explicar esse problema como sendo consequência da refração da luz ao adentrar a atmosfera terrestre. Foi uma tentativa frustrada, já que não se trata de um fato, e sim de uma ilusão.

Para saber mais a respeito dessa ilusão, leia o texto a seguir, escrito pelo astrônomo Willã de Souza Cruz, da Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro.



Por que em algumas noites a Lua aparece no céu grande e colorida e depois fica pequena e branca?

Essa pergunta pode ser dividida em duas. Os motivos de a Lua estar "colorida" ou branca no céu e de parecer maior ou menor são diferentes. Mas, realmente, a Lua, logo após nascer ou um pouco antes de se pôr, aparece no céu grande e avermelhada e quando está mais alta, menor e esbranquiçada.

Vamos responder primeiro o porquê de ela ter uma coloração avermelhada. Quando observamos um astro no horizonte – não apenas a Lua –, a luz que nos chega dele atravessa uma massa de ar da atmosfera bem maior do que quando ele está alto no céu, sendo, por isso, mais absorvida. Essa absorção é menos intensa para a cor vermelha, deixando a Lua ou qualquer outro astro com essa coloração. Esse efeito é acentuado pela poluição, pois mais partículas de poeira e gás estão no ar, aumentando a absorção. Conforme a Lua se eleva, a absorção é menor, e, com isso, a vemos mais branca.

Agora vamos para a segunda parte desta pergunta. A ideia de que a Lua é maior quando está próxima do horizonte é bastante antiga. Chineses e gregos já mencionavam esse fato mais de três séculos antes de Cristo. E não é só a Lua: qualquer objeto extenso no céu e perto do horizonte, como uma constelação, também parece maior. Apesar de muitos perceberem esse efeito, a Lua não fica maior no horizonte! O que acontece é uma ilusão de óptica! Qualquer um pode comprovar isso fotografando a Lua quando ela está no horizonte e quando ela está alta, e comparando os tamanhos. Na verdade, no horizonte ela fica menor, pois está mais afastada, porém nada que conseguíssemos perceber a olho nu. O que é mais incrível é que, no meio científico, ainda não há um consenso sobre o que causa essa ilusão.

Uma explicação bem-aceita fala da questão da referência. Ao observarmos a Lua no horizonte, geralmente a comparamos com objetos familiares, como casas, árvores, montanhas, o que dá a impressão de ela ser maior do que quando a observamos bem alta e sozinha no céu. O problema dessa explicação é que a ilusão permanece mesmo quando vemos a Lua no horizonte sem nenhuma referência, como no oceano, o que prova que ela não está completa. Outras hipóteses consideram a ilusão uma questão fisiológica e tentam explicar por que nosso cérebro se comporta desse jeito. Quais os motivos dessa percepção enganosa? O mistério persistirá até compreendermos melhor como o nosso cérebro funciona e como se desenvolve a nossa percepção óptica.

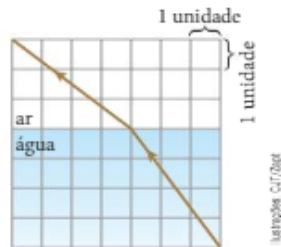
CRUZ, Willã de Souza. *Ciência Hoje*, v. 38, n. 225, abr. 2006.

- Junto com um colega, faça o que se pede a seguir. Em seguida, compartilhe com os demais colegas e o professor os resultados obtidos.
 - a) Fotografe a lua cheia (ou quase cheia) quando ela está bem alta e quando está no horizonte. Com uma régua, meça os diâmetros das imagens registradas nas duas situações e compare os resultados.
 - b) Levando em consideração apenas o fator distância, um mesmo observador situado na superfície da Terra, se tivesse sensibilidade visual suficiente, veria a Lua com tamanho maior quando ela está bem alta ou quando está no horizonte? Faça um desenho para justificar sua resposta.

QUESTÕES COMENTADAS

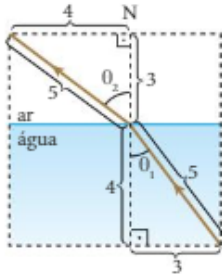


18 O esquema abaixo representa a refração da luz da água para o ar. Com base nas informações contidas no esquema, determine o seno do ângulo-limite do dioptra água-ar para a luz em questão.



RESOLUÇÃO

Contando as divisões do quadriculado, obtemos:



Usando a **Lei de Snell**:

$$n_{\text{água}} \sin \theta_1 = n_{\text{ar}} \sin \theta_2$$

$$n_{\text{água}} \cdot \frac{3}{5} = n_{\text{ar}} \cdot \frac{4}{5}$$

$$\frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} = \frac{3}{4}$$

O seno do ângulo-limite é dado por: $\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$

Então, como n_{ar} é menor que $n_{\text{água}}$:

$$\sin L = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} = \frac{3}{4} \Rightarrow \sin L = 0,75$$

Resposta: 0,75

19 Um raio de luz monocromática propaga-se em um vidro de índice de refração igual a $\sqrt{2}$ e incide na fronteira plana entre o vidro e o ar sob ângulo de incidência igual a 60° . Descreva o fenômeno que ocorre com o raio nessa fronteira.

RESOLUÇÃO

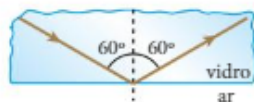
Observe que o raio incidente dirige-se do meio mais refringente (vidro) para o menos refringente (ar). Por isso, é possível que ocorra reflexão total.

Calculando o ângulo-limite na fronteira:

$$\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{vidro}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow L = 45^\circ$$

Como o ângulo de incidência (60°) é maior que o ângulo-limite (45°), concluímos que:

O raio de luz sofre reflexão total na fronteira.



A ocorrência da reflexão total pode também ser constatada pela **Lei de Snell**. Confira:

A aplicação da **Lei de Snell** pressupõe a ocorrência do fenômeno da refração. Quando ela nos leva a um absurdo, devemos entender que o fenômeno que se supõe ocorrer (refração) na realidade não ocorre. A luz sofre reflexão total.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow \sqrt{2} \sin 60^\circ = 1 \sin \theta_2 \Rightarrow$$

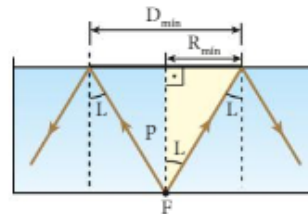
$$\Rightarrow \sin \theta_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{\sqrt{6}}{2} > 1, \text{ o que é um absurdo.}$$

Resposta: ver resolução

20 No fundo de um tanque de profundidade p igual a 2,0 m há uma fonte de luz F , considerada pontual. O tanque é, então, preenchido com um líquido de índice de refração absoluto $\sqrt{2}$, em cuja superfície é posto a flutuar um disco opaco, circular e de centro pertencente à vertical que passa por F . Calcule o mínimo diâmetro que o disco deve ter para que observadores situados no ar não consigam ver a fonte F . As paredes do tanque são opacas.

RESOLUÇÃO

Os raios emitidos por F , e que incidem na fronteira líquido-ar sob ângulos de incidência maiores que o ângulo-limite L ou iguais a ele sofrem reflexão total e, portanto, não emergem para o ar. Assim, apenas um cone de luz proveniente de F é capaz de emergir para o ar. Entretanto, esse cone não emergirá se a superfície do líquido for coberta por um material opaco. A figura mostra o disco de diâmetro mínimo (D_{min}) capaz de fazer isso:



Calculando o ângulo-limite L :

$$\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{líquido}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow L = 45^\circ$$

No triângulo retângulo destacado, temos:

$$\text{tg } L = \frac{R_{\text{min}}}{p} \Rightarrow \text{tg } 45^\circ = \frac{R_{\text{min}}}{2,0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 = \frac{R_{\text{min}}}{2,0} \Rightarrow R_{\text{min}} = 2,0 \text{ m}$$

Portanto: $D_{\text{min}} = 4,0 \text{ m}$

Resposta: 4,0 m



QUESTÕES PROPOSTAS



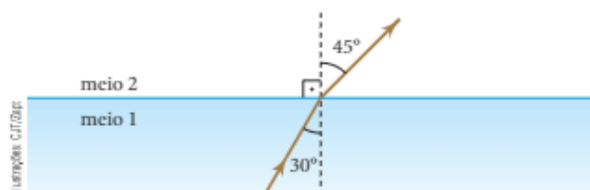
FAÇA NO CADERNO.

21. Quando um feixe de luz, propagando-se no vidro, atinge a fronteira do vidro com o ar, podemos assegurar que ocorre refração? E reflexão?

22. Quando um raio de luz dirige-se de um meio A (índice de refração n_A) para um meio B (índice de refração n_B), podemos afirmar que:

- se $n_A > n_B$, o raio certamente sofre reflexão total.
- se $n_A < n_B$, o raio pode sofrer reflexão total.
- se $n_A < n_B$, o raio certamente sofre refração e reflexão parcial.
- se $n_A > n_B$, o raio certamente sofre refração e reflexão parcial.
- se $n_A = n_B$, o raio aproxima-se da normal.

23. Um raio de luz monocromática atravessa a fronteira entre os meios 1 e 2, como representa a figura a seguir:



Determine o que ocorreria se o ângulo de incidência, em vez de 30° , fosse igual a 45° .

24. Considere dois blocos, um de vidro e outro de diamante, de mesmo formato e igualmente lapidados, imersos no ar. Sabe-se que o índice de refração do diamante é maior que o do vidro. Sendo igualmente iluminados:

- o diamante brilha mais, porque o ângulo-limite na fronteira diamante-ar é menor que na fronteira vidro-ar, o que favorece a reflexão da luz internamente no diamante.
- o diamante brilha mais, porque o ângulo-limite na fronteira diamante-ar é maior que na fronteira vidro-ar.
- o diamante brilha mais, porque a luz se propaga em seu interior com velocidade maior que no interior do vidro.
- o vidro brilha mais, porque ele é mais refringente que o diamante.
- o vidro e o diamante brilham igualmente.

25. Determinada luz monocromática apresenta velocidade de $2,3 \cdot 10^8$ m/s na água e $2,0 \cdot 10^8$ m/s em certo tipo de vidro. O que ocorre quando um raio dessa luz, propagando-se no vidro, incide na fronteira do vidro com a água sob ângulo de incidência de 70° ?

26. Um raio de luz monocromática atravessa a fronteira plana entre dois meios A e B, de A para B, com ângulo de incidência igual a 30° e ângulo de refração igual a 60° .

Determine:

- o comportamento de um raio de luz de mesma frequência, que se dirige de A para B com ângulo de incidência de 60° ;
- o comportamento de um raio de luz de mesma frequência, que forma no meio B um ângulo de 30° com a normal e dirige-se de B para A.

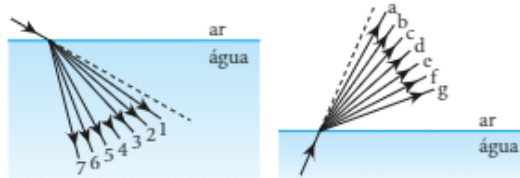
27. Tem-se um bloco de vidro transparente em forma de paralelepípedo reto imerso no ar. Sua seção transversal ABCD está representada na figura. Um raio de luz monocromática pertencente ao plano definido por ABCD incide em I_1 , refratando-se para o interior do bloco e incidindo em I_2 .



Sabendo que o índice de refração do vidro em relação ao ar vale $\sqrt{2}$:

- calcule o ângulo-limite para o dióptro vidro-ar;
- verifique o que ocorre com a luz logo após a incidência em I_2 .

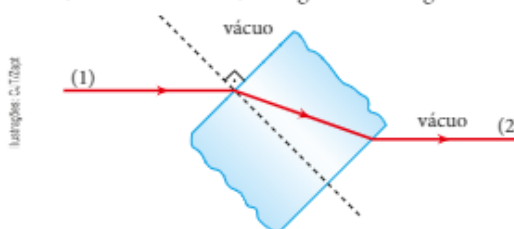
28. As figuras a seguir mostram um pincel cilíndrico de luz branca solar passando do ar para a água e da água para o ar, decompondo-se nas sete cores básicas.



Identifique:

- os raios de luz vermelha;
- os raios de luz violeta;
- os raios de luz verde.

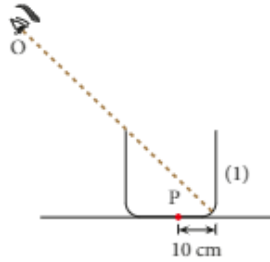
29. Na figura, temos uma lâmina de faces paralelas de quartzo fundido. O índice de refração do quartzo fundido é igual a 1,470 para a luz violeta e 1,455 para a luz vermelha. O raio 1, de luz monocromática vermelha proveniente do vácuo, incide na lâmina, emergindo dela segundo o raio 2:



Se o raio **I** fosse de luz monocromática violeta, o raio emergente da lâmina:

- estaria acima do raio **2** e continuaria paralelo ao raio **1**.
- estaria abaixo do raio **2** e continuaria paralelo ao raio **1**.
- seria coincidente com o raio **2**.
- não seria paralelo ao raio **1**.
- talvez não existisse.

30. A figura representa um recipiente cúbico de paredes opacas, vazio, de 40 cm de aresta. Na posição em que se encontra, o observador **O** não vê o fundo do recipiente, mas vê completamente a parede **(1)**. Calcule a espessura mínima da lâmina de água que se deve despejar no recipiente para que o observador passe a ver a partícula **P**. Adote o índice de refração da água em relação ao ar igual a $\frac{4}{3}$.



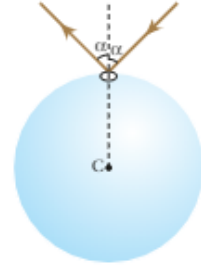
31. Na figura está representada uma esfera maciça de cristal, de centro **C**, raio $R = 10\sqrt{3}$ cm e índice de refração $n = \sqrt{2}$.

Mediante vaporização de alumínio, a superfície externa dessa esfera foi revestida com uma película desse metal. A face refletora especular da película ficou, então, voltada para o interior da esfera.

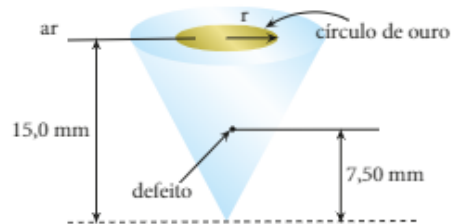
Apenas uma pequena região circular ficou sem revestimento. Fez-se incidir nessa região um estreito feixe cilíndrico de luz monocromática, que penetrou na esfera e, após sofrer

duas reflexões em suas paredes, emergiu pelo mesmo local da penetração, simetricamente em relação ao feixe incidente (ver figura). Sabendo-se que a esfera está no ar (índice de refração igual a 1,0) e que a velocidade de propagação da luz nesse meio é aproximadamente igual a $3,0 \cdot 10^8$ m/s, pede-se:

- fazer um esboço da trajetória da luz no interior da esfera, indicando os valores dos ângulos relevantes à compreensão do esquema.
- determinar o ângulo α que viabiliza a situação proposta.
- calcular, nas condições apresentadas, quanto tempo um pulso luminoso permanece "confinado" no interior da esfera.



32. (UFPE) Uma pedra preciosa cônica, de 15,0 mm de altura e índice de refração igual a 1,25, possui um pequeno ponto defeituoso sobre o eixo do cone a 7,50 mm de sua base. Para esconder esse ponto de quem olha de cima, um ourives deposita um pequeno círculo de ouro na superfície. A pedra preciosa está incrustada em uma joia de forma que sua área lateral não está visível. Qual deve ser o menor raio r , em mm, do círculo de ouro depositado pelo ourives?



DESCUBRA MAIS

- A luz se propaga no vácuo a cerca de 300 000 km/s. Ao adentrar um meio material como o vidro, por exemplo, sua velocidade de propagação se reduz consideravelmente. Mas, ao emergir desse meio e retornar ao vácuo, a velocidade cresce, voltando ao valor anterior (cerca de 300 000 km/s). Por que ocorre esse crescimento da velocidade?
- É possível uma partícula mover-se em determinado meio com velocidade superior à da luz nesse meio?
- Pesquise sobre o **Princípio de Fermat** e verifique, sem acompanhar os cálculos, que ele é outra alternativa para a demonstração da **Lei de Snell**.
- O arco-íris abordado neste capítulo é o arco-íris **primário**. É possível, entretanto, observar outro arco-íris: o arco-íris **secundário**. Busque informações a respeito dele.



LENTEs ESfÉRICAS

1. UM COMPONENTE ESSENCIAL

Não se sabe ao certo quando surgiram as primeiras lentes. Há relatos de que no século VIII a.C. utilizavam-se determinados cristais polidos capazes de produzir imagens ampliadas de objetos. A partir do século XIII, porém, iniciou-se na Itália a fabricação regular de lentes, destinadas principalmente à correção visual. Teria sido o florentino Salvino D'Armato, em 1285, o primeiro fornecedor do que hoje chamamos de óculos.

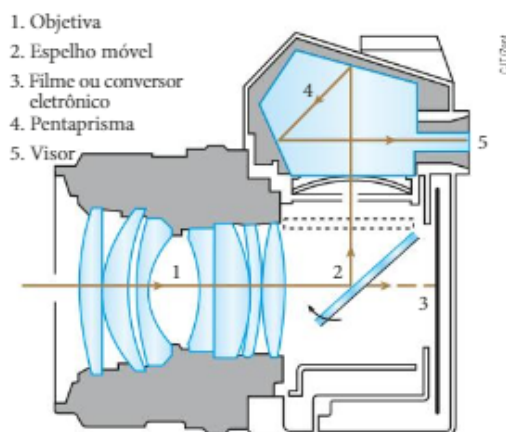
As lentes são um componente óptico de vital importância, participando individual ou coletivamente de quase todos os instrumentos ópticos. Fazendo uma comparação, poderíamos dizer que as lentes estão para a Óptica assim como os *chips* eletrônicos estão para os computadores. Em microscópios, lunetas, telescópios, câmeras fotográficas e outros utensílios, as lentes se fazem presentes, sempre exercendo funções essenciais. O que muda de um caso para o outro é o tipo da lente utilizada, o que é caracterizado pelo material de que ela é feita, suas dimensões e seu "grau" (vergência).



Nesta fotografia, você observa um amontoado de lentes de diversos materiais, formatos e "graus". Dependendo da maneira como elas forem arranjadas, podem ser construídos instrumentos ópticos de grande importância, como microscópios, lunetas, telescópios e câmeras em geral.

As câmeras fotográficas constituem-se de diversos sistemas ópticos associados convenientemente. Nelas, podemos encontrar lentes, espelhos, prismas etc. em número que varia com o grau de sofisticação.

Entretanto as lentes exercem papel primordial, pois compõem a objetiva, que é o "olho" da câmera, responsável pela projeção da imagem sobre o filme fotográfico ou o conversor eletrônico.



Esquema ilustrativo de uma câmera fotográfica. Durante o enquadramento, a luz é desviada pelo espelho (2) em direção ao pentaprisma (4). No ato do disparo, o espelho (2) é deslocado e a luz incide diretamente sobre o filme fotográfico ou conversor eletrônico (3).

2. LENTEs ESfÉRICAS: COMPORTAMENTO ÓPTICO E ESTUDO GRÁFICO

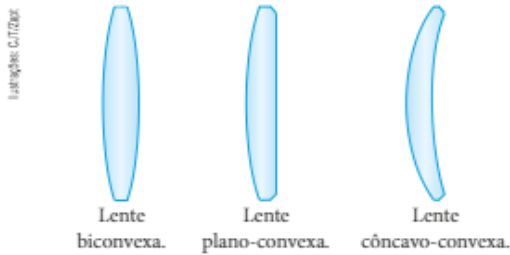
Chama-se **lente esférica** a associação de dois diopros: um necessariamente esférico e o outro plano ou esférico.

As lentes são corpos transparentes, geralmente fabricados em vidro, cristal ou acrílico. Ao serem atravessadas pela luz, fazem com que ela sofra duas refrações.

As lentes esféricas classificam-se em duas grandes categorias, dependendo da espessura da região periférica comparada à espessura da região central: **lentes de bordas finas** e **lentes de bordas grossas**.

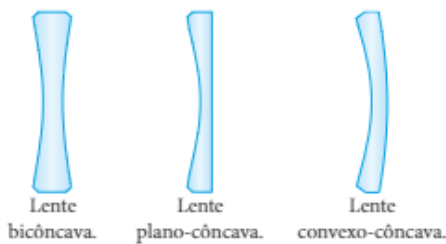
Lentes de bordas finas

Nesta categoria, figuram três tipos de lente:

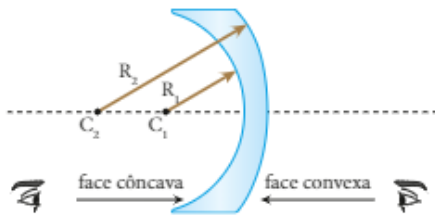


Lentes de bordas grossas

Nesta categoria, também figuram três tipos de lente:

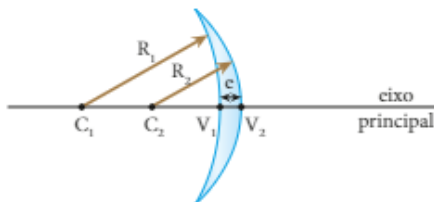


Repare que na nomenclatura das lentes esféricas uma face é denominada convexa, plana ou côncava em relação a um observador **externo** à lente. Além disso, menciona-se, em primeiro lugar, o nome da face de **maior raio de curvatura**.



Nesse exemplo, como $R_2 > R_1$, o nome da lente é **convexo-côncava**.

Observe, a seguir, a representação de uma lente esférica com seus principais elementos geométricos.



- C_1 e C_2 são os centros de curvatura das faces da lente.
- R_1 e R_2 são os raios de curvatura das faces da lente.

- A reta $\overleftrightarrow{C_1C_2}$ é o eixo principal (ou eixo óptico) da lente. Esse eixo é normal às faces da lente.
- O segmento $\overline{V_1V_2}$ determina a espessura (e) da lente.

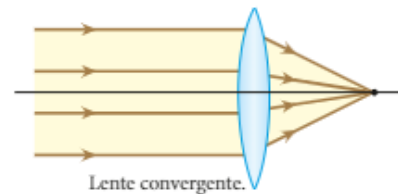
Em nossos estudos, exceto quando houver recomendação contrária, consideraremos as lentes esféricas com espessura desprezível em comparação aos raios de curvatura. As lentes que satisfazem essa condição são denominadas **lentes delgadas**. Admitiremos, ainda, que os raios incidentes são pouco inclinados e pouco afastados em relação ao eixo principal (raios paraxiais).

Além disso, estudaremos apenas as situações em que as duas faces da lente estão em contato com o mesmo meio. No caso mais comum, o meio que circunda a lente é o ar.

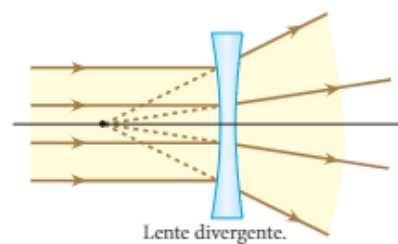
Comportamento óptico das lentes esféricas

As lentes esféricas podem apresentar dois comportamentos ópticos opostos: comportamento **convergente** e comportamento **divergente**.

No primeiro caso, raios de luz que incidem na lente paralelamente entre si se refratam com direções que convergem para um mesmo ponto:



No segundo caso, raios de luz que incidem na lente paralelamente entre si se refratam com direções que divergem de um mesmo ponto:



Qualquer lente esférica pode ser convergente ou divergente, dependendo de seu índice de refração em relação ao do meio externo.

Os esquemas a seguir indicam o trajeto de raios de luz que atravessam lentes esféricas. Nos dois primeiros casos as lentes apresentam comportamento convergente e nos dois últimos, comportamento divergente.

Comportamento convergente

Lente plano-convexa

Lente plano-côncava

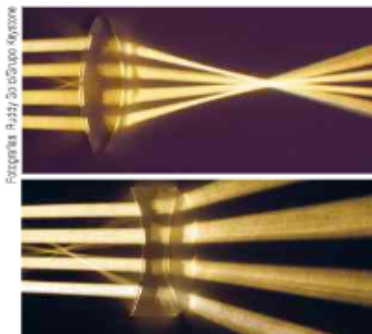
Nesses dois casos, as lentes têm comportamento convergente. Para a lente plano-convexa, tem-se $n_2 > n_1$ (a lente é mais refringente que o meio externo); para a lente plano-côncava, $n_2 < n_1$ (a lente é menos refringente que o meio externo).

Comportamento divergente

Lente plano-côncava

Lente plano-convexa

Nesses dois casos, as lentes têm comportamento divergente. Para a lente plano-côncava, tem-se $n_2 > n_1$ (a lente é mais refringente que o meio externo); para a lente plano-convexa, $n_2 < n_1$ (a lente é menos refringente que o meio externo).



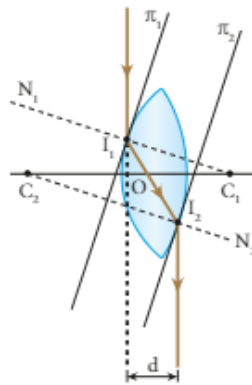
Nestas fotografias, as lentes são de material mais refringente que o meio que as envolve. Note que a lente de cima – biconvexa – é convergente, enquanto a lente de baixo – biconcava – é divergente.

Conclusão:

Se a lente é mais refringente que o meio externo, temos o caso mais comum:
bordas finas – convergentes;
bordas grossas – divergentes.
 Se a lente é menos refringente que o meio externo, temos o caso menos comum:
bordas finas – divergentes;
bordas grossas – convergentes.

Centro óptico

Considere a lente esférica da figura seguinte, na qual estão destacados os centros de curvatura das faces (C_1 e C_2), o eixo principal ($\overline{C_1C_2}$) e dois planos π_1 e π_2 tangentes às faces da lente e paralelos entre si. Um raio luminoso monocromático adentra a lente pelo ponto I_1 e dela emerge pelo ponto I_2 .



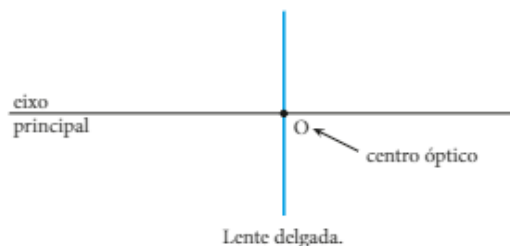
Em razão do paralelismo dos planos π_1 e π_2 , a lente comporta-se como uma lâmina de faces paralelas em relação ao raio luminoso em questão. Por isso, pode-se concluir que, na travessia da lente, o raio luminoso não sofre desvio angular, experimentando apenas um deslocamento lateral d .

O ponto O , obtido pela interseção do raio luminoso com o eixo principal, é o **centro óptico** da lente. Esse ponto não depende do índice de refração da lente em relação ao meio externo, e sua posição é invariável para um mesmo tipo de luz (frequência).

Com base no que foi exposto, pode-se enunciar que:

O **centro óptico** de uma lente esférica é o ponto do eixo principal por onde passa um raio luminoso que não sofre desvio angular.

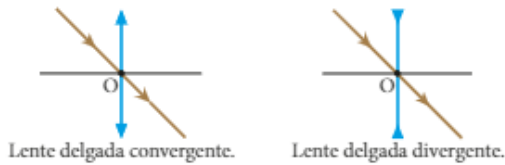
É importante destacar que, nas lentes delgadas (espessura desprezível em comparação com os raios de curvatura das faces), o centro óptico é definido pela interseção da lente com seu eixo principal.



Pelo fato de a espessura de uma lente delgada ser desprezível, depreende-se que um raio luminoso que a atravessa, passando por seu centro óptico, sofre deslocamento lateral desprezível.

Assim, podemos afirmar que:

Um raio luminoso que passa pelo centro óptico de uma lente esférica delgada não sofre desvio angular nem deslocamento lateral considerável.

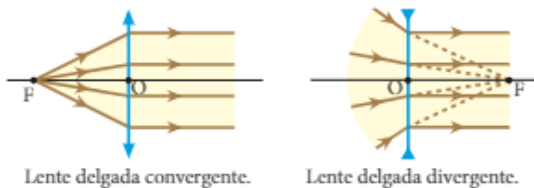


Focos e pontos antiprincipais

Focos

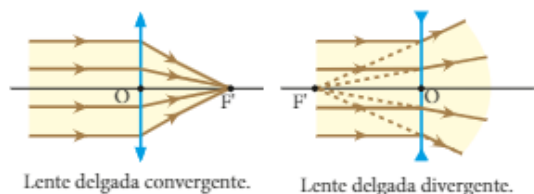
Considere as lentes esféricas delgadas representadas a seguir, das quais emergem raios luminosos paralelos entre si e aos respectivos eixos principais. Admita que esses raios sejam pouco afastados em relação ao eixo principal das lentes.

A experiência mostra que, nessas condições, os raios luminosos incidentes se apresentam, necessariamente, alinhados com um mesmo ponto do eixo principal, denominado **foco principal objeto (F)**.

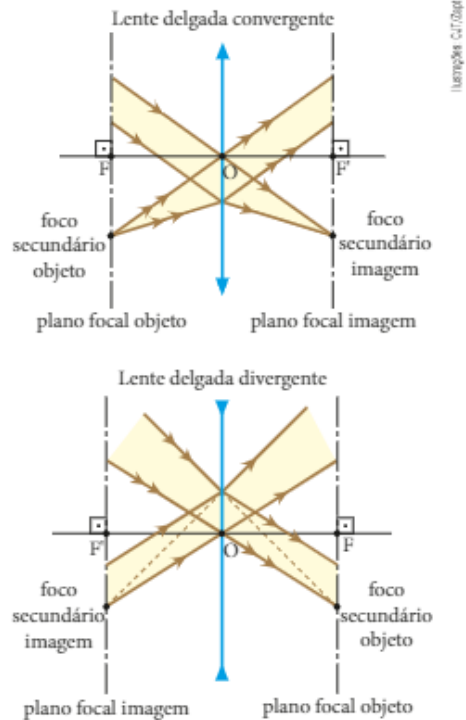


Considere, agora, as lentes esféricas delgadas representadas a seguir, nas quais incidem raios luminosos paralelos entre si e aos respectivos eixos principais. Admita, também, que esses raios sejam pouco afastados em relação ao eixo principal das lentes.

A experiência mostra que, nessas condições, os raios luminosos emergentes se apresentam, necessariamente, alinhados com um mesmo ponto do eixo principal, denominado **foco principal imagem (F')**. Esse fato decorre do caso anterior, tendo-se em conta a reversibilidade no trajeto dos raios de luz.



Além dos focos principais, pode-se verificar que as lentes esféricas delgadas possuem infinitos focos secundários. Esses focos situam-se aproximadamente no mesmo plano frontal que contém os focos principais. A esses planos dá-se o nome de **planos focais**.



É importante observar que os focos de uma lente convergente são **reais**, enquanto os de uma lente divergente são **virtuais**. A explicação para esse fato é simples: nas lentes convergentes os focos são determinados efetivamente pelos raios de luz, enquanto nas lentes divergentes eles são determinados pelos prolongamentos dos raios.

Observe a fotografia a seguir.

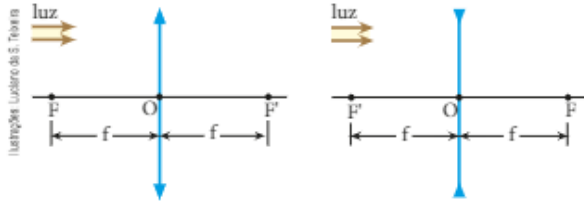


Os raios do Sol são praticamente paralelos, o que produz uma imagem do astro em um foco da lupa – lente convergente de aumento, geralmente biconvexa. Esse foco, que é um elemento real em que há alta concentração de energia, sendo mantido por algum tempo sobre gravetos e folhas secas, provoca neles a combustão, gerando fogo.

Distância focal

Considere as lentes delgadas indicadas no esquema abaixo, envolvidas pelo mesmo meio. Conforme foi descrito, cada lente tem dois focos principais: o foco objeto (F) e o foco imagem (F').

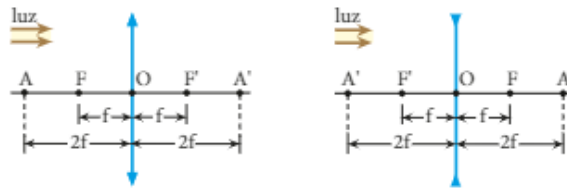
Como o meio envolvente é o mesmo, para cada lente o segmento FO tem a mesma medida que o segmento F'O. Desconsiderados sinais algébricos, os comprimentos de FO ou de F'O são denominados **distância focal (f)**, que é uma característica fundamental das lentes.



Pontos antiprincipais

Os pontos do eixo principal de uma lente cuja distância em relação ao centro óptico vale $2f$ são chamados de **pontos antiprincipais**:

- ponto A é o ponto antiprincipal objeto;
- ponto A' é o ponto antiprincipal imagem.

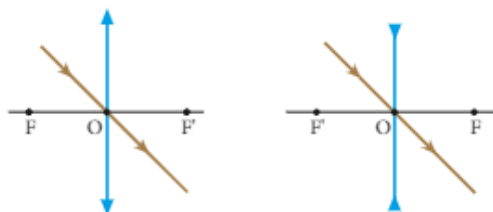


Raios luminosos particulares

Como nos espelhos esféricos, também no estudo das lentes esféricas alguns raios luminosos que obedecem a determinadas condições e propriedades devem estar sempre à mão, já que facilitam a obtenção gráfica das imagens.

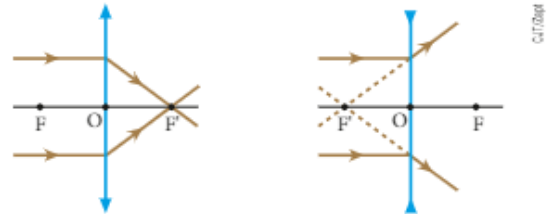
1º raio particular

Todo raio luminoso que incide no centro óptico se refrata diretamente, sem sofrer desvio.



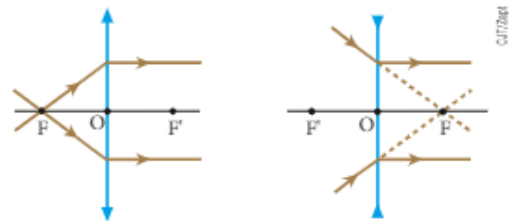
2º raio particular

Todo raio luminoso que incide paralelamente ao eixo principal se refrata alinhado com o foco principal imagem (F').



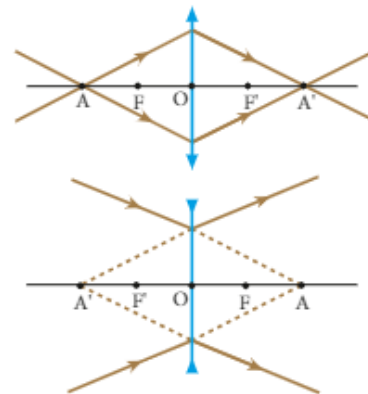
Levando em conta a reversibilidade no trajeto dos raios de luz, podemos enunciar também que:

Todo raio luminoso que incide alinhado com o foco principal objeto (F) se refrata paralelamente ao eixo principal.



3º raio particular

Todo raio luminoso que incide alinhado com o ponto antiprincipal objeto (A) se refrata alinhado com o ponto antiprincipal imagem (A').

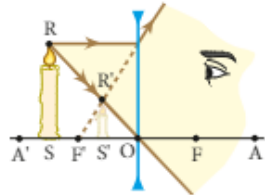


O comportamento desse raio pode ser verificado experimentalmente e também pela **Equação de Gauss**, que será apresentada neste capítulo.

Construção gráfica das imagens em lentes esféricas

Lente divergente e objeto real

Neste caso, qualquer que seja a posição do objeto em relação à lente, obtêm-se as mesmas características para a imagem, que se forma sempre entre o centro óptico (O) e o foco principal imagem (F').



Características da imagem: virtual, direita e menor.

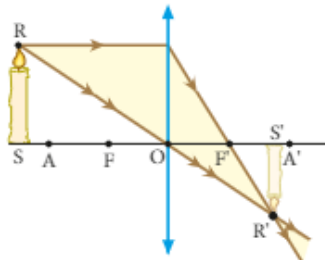


Esta fotografia mostra a imagem virtual, direita e menor produzida por uma lente divergente para um objeto real (rosto da mulher).

Lente convergente e objeto real

Neste caso, a imagem assume características diferentes, dependendo da posição do objeto em relação à lente.

1. Objeto além do ponto antiprincipal objeto

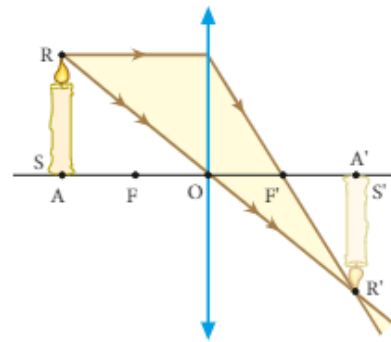


Características da imagem: real, invertida e menor.



Nesta fotografia, observa-se a imagem real, invertida e menor conjugada por uma lente convergente ao rosto do homem, que está posicionado além do ponto antiprincipal objeto da lente.

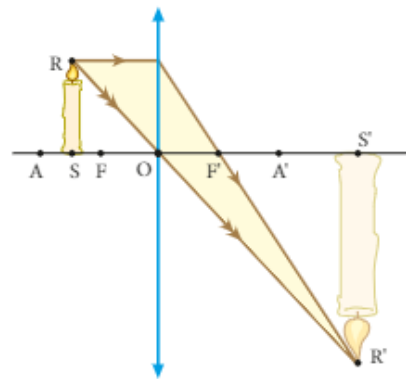
2. Objeto no ponto antiprincipal objeto



Características da imagem: real, invertida e do mesmo tamanho que o objeto.

Observe que a imagem se localiza no ponto antiprincipal imagem.

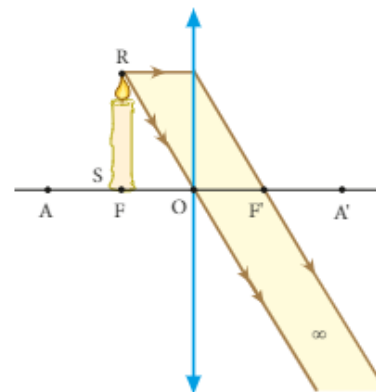
3. Objeto entre o ponto antiprincipal objeto e o foco principal objeto



Características da imagem: real, invertida e maior.

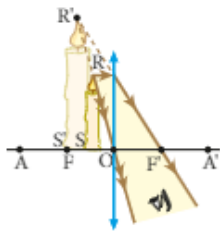
Note que as imagens reais obtidas a partir de objetos também reais são sempre invertidas.

4. Objeto no foco principal objeto



Características da imagem: como os raios luminosos emergentes do sistema são paralelos, a imagem "forma-se no infinito", sendo, portanto, imprópria.

5. Objeto entre o foco principal objeto e o centro óptico



Características da imagem: virtual, direita e maior.

Este é o único caso em que, para um objeto real, a lente convergente conjuga imagem virtual.



Esta fotografia mostra a imagem virtual, direita e maior produzida por uma lente convergente para um objeto real (olho da garota).



Lentes de água

Por vezes, plantas têm suas folhas recobertas por gotas de chuva ou de orvalho, como numa celebração aos ciclos da natureza...

Um olhar mais atento através dessas porções líquidas, porém, pode revelar detalhes sutis de uma folha, como se cada pequena gota fosse um microscópio rudimentar.

Nesse caso, cada gotícula – transparente – funciona como uma lente convergente (não esférica e não gaussiana) que opera como uma espécie de lupa. A região da folha sob a porção líquida fica situada entre o plano focal e o sistema óptico e este produz uma imagem virtual, direita e ampliada da área que serve de suporte à gota.

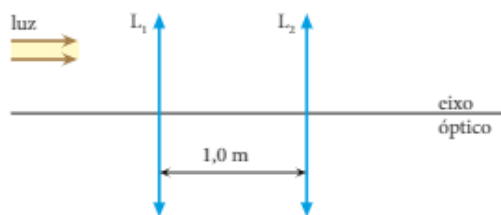


Gotas de água na superfície de uma folha.

QUESTÕES COMENTADAS



1 Duas lentes convergentes L_1 e L_2 são associadas coaxialmente, conforme mostra o esquema a seguir:

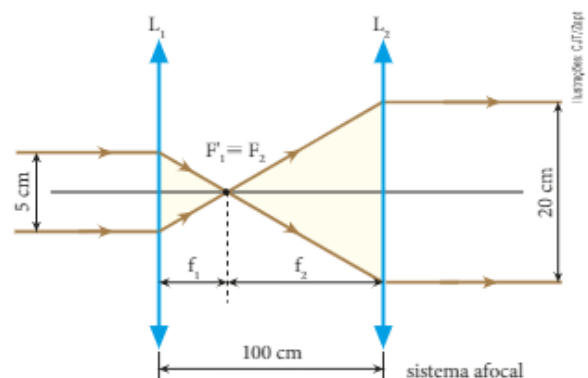


Fazendo-se incidir sobre L_1 um pincel cilíndrico de luz monocromática de 5 cm de diâmetro e de eixo coincidente com o eixo óptico do sistema, observa-se que de L_2 emerge um pincel luminoso também cilíndrico e de eixo coincidente com o eixo óptico do sistema, porém com 20 cm de diâmetro. Determine:

- a) o trajeto dos raios luminosos, ao atravessarem o sistema.
- b) as distâncias focais de L_1 e de L_2 .

RESOLUÇÃO

a) Para que o pincel luminoso emergente de L_2 seja cilíndrico e de eixo coincidente com o eixo óptico do sistema, o foco principal imagem de L_1 deve coincidir com o foco principal objeto de L_2 , conforme representa a figura:



b) Os triângulos destacados são semelhantes. Logo:

$$\frac{f_1}{5} = \frac{f_2}{20} \Rightarrow f_2 = 4f_1 \quad (I)$$

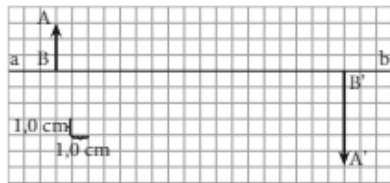
$$\text{Mas: } f_1 + f_2 = 100 \quad (II)$$

Substituindo (I) em (II), temos:

$$f_1 + 4f_1 = 100 \Rightarrow f_1 = 20 \text{ cm} \quad \text{e} \quad f_2 = 80 \text{ cm}$$

Respostas: a) Ver figura na resolução; b) 20 cm e 80 cm

2 No esquema seguinte, ab é o eixo principal de uma lente esférica delgada, AB é um objeto real e A'B' é a imagem de AB conjugada pela lente:

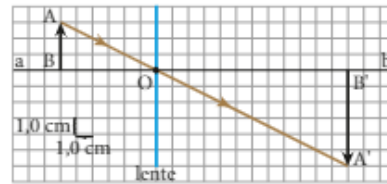


- Posicione o centro óptico da lente sobre o eixo ab, calculando sua distância em relação a AB e em relação a A'B'.
- Classifique a lente como convergente ou divergente.
- Determine o valor absoluto de sua abscissa focal.

RESOLUÇÃO

a) **I. Posicionamento do centro óptico (O)**

Um raio luminoso que incide na lente a partir do ponto A, alinhado com o ponto A', intersecta o eixo ab na posição correspondente ao centro óptico:



II. Determinação das distâncias

Sejam:

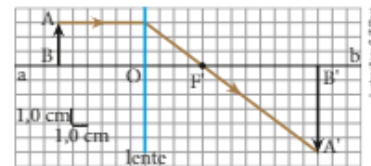
p = distância da lente a AB

p' = distância da lente a A'B'

Observando a figura, temos:

$$p = 6,0 \text{ cm} \quad \text{e} \quad p' = 12 \text{ cm}$$

- Um raio luminoso que incide na lente paralelamente ao eixo ab, a partir do ponto A, deve refratar-se alinhado com o ponto A'. Esse raio determina o comportamento da lente (convergente ou divergente) e intersecta o eixo ab no foco principal imagem (F')



A lente é convergente.

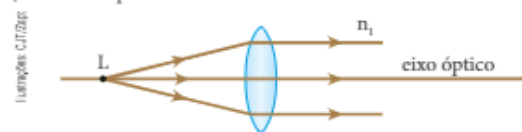
- A distância focal (f) da lente corresponde ao comprimento F'O.

Da figura, obtemos: $f = 4,0 \text{ cm}$

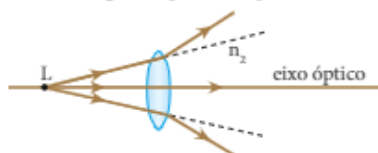
Respostas: a) Ver figura na resolução; b) lente convergente; c) 4,0 cm

QUESTÕES PROPOSTAS FAÇA NO CADERNO.

3. (Ufla-MG) Coloca-se uma pequena lâmpada L no foco principal de uma lente biconvexa de índice de refração n_L imersa em um líquido de índice de refração n_1 . Essa situação está esquematizada abaixo.



Mantendo-se a posição da lâmpada em relação à lente e imergindo-se o conjunto em um outro líquido de índice de refração n_2 , obteve-se o seguinte percurso para os raios luminosos:



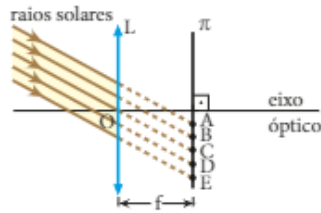
É correto afirmar que:

- $n_2 > n_1 > n_L$
- $n_2 = n_1 > n_L$
- $n_L > n_2 > n_1$
- $n_2 > n_L > n_1$
- $n_L = n_1 > n_2$

4. Um escoteiro, contrariando a orientação do chefe que recomendava o uso de gravetos rolantes para produzir fogo no momento da confecção do almoço do pelotão, utilizou uma lente esférica de distância focal f que "concentrou os raios solares" sobre um monte de folhas secas situado a uma distância d da lente.

- Diga que tipo de lente o escoteiro utilizou (convergente ou divergente).
- Faça, em seu caderno, um esquema representando os raios solares, a lente e o monte de folhas secas.
- Determine o valor de d em função de f para que o processo tenha eficiência máxima, isto é, o fogo seja produzido no menor intervalo de tempo possível.

5. Para acender um palito de fósforo com os raios solares (considerados paralelos), você vai utilizar uma lente convergente L de centro óptico O e distância focal f . Para tanto, a cabeça do palito será colocada em um dos cinco pontos, A , B , C , D ou E , indicados na figura ao lado.

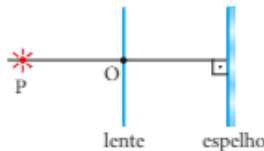


O plano π é perpendicular ao eixo óptico da lente e os pontos citados pertencem à interseção desse plano com o plano do papel. O efeito desejado será produzido no mínimo intervalo de tempo se a cabeça do palito for colocada no ponto:

- a) A b) B c) C d) D e) E

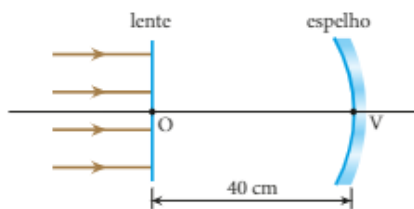
6. O arranjo experimental da figura é composto de uma lente esférica de vidro e um espelho plano. A montagem é feita no interior de uma sala de aula pelo professor de Óptica, que dispõe o espelho perpendicularmente ao eixo principal da lente.

De um ponto P , situado sobre o eixo principal e distante 30 cm do centro óptico da lente, provém luz que se refrata através da lente, incide no espelho, reflete-se e volta a atravessar a lente, convergindo novamente para o ponto P , independentemente da distância entre a lente e o espelho.



- a) Classifique a lente como convergente ou divergente;
b) Obtenha o valor absoluto de sua distância focal.

7. A figura representa uma lente esférica simétrica de vidro, imersa no ar, diante da qual está a superfície refletora de um espelho esférico côncavo, cujo raio de curvatura vale 60 cm. O vértice do espelho dista 40 cm do centro óptico da lente.

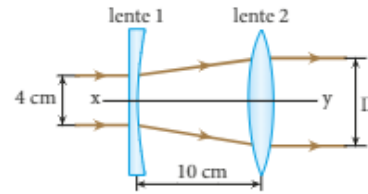


Raios luminosos paralelos entre si e ao eixo óptico comum à lente e ao espelho incidem no sistema. Sabendo que os raios emergentes do sistema sobrepõem-se aos incidentes:

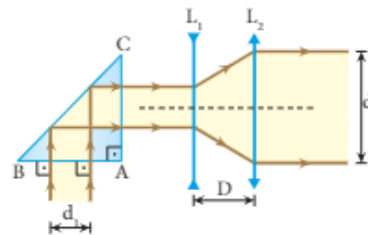
- a) classifique a lente como biconvexa ou biconcava;
b) obtenha o valor absoluto de sua distância focal.

8. A figura a seguir mostra duas lentes esféricas delgadas, 1 e 2, de vidro, com distâncias focais de módulos iguais a 5 cm e 15 cm, respectivamente, com um mesmo eixo principal xy . Dois raios de luz incidem sobre a lente 1, paralelos ao eixo principal, separados por 4 cm. Depois de atravessa-

rem essa lente, incidem sobre a outra, onde voltam a ficar paralelos ao eixo principal, agora separados por uma distância D . Determine D em centímetros.



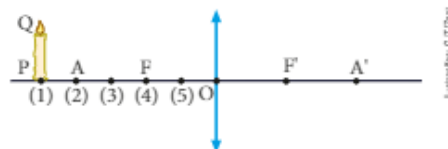
9. Um instrumento óptico utiliza, entre outros componentes, um prisma de cristal ABC de seção em forma de triângulo retângulo isósceles, uma lente divergente L_1 de distância focal igual a 5,0 cm (em módulo) e uma lente convergente L_2 de distância focal igual a 15,0 cm (em módulo). O prisma recebe em sua base AB um feixe de luz monocromática constituído de raios paralelos, perpendiculares a AB , de largura d_1 igual a 2,0 cm, que sofre reflexão total na interface BC . Esses raios emergem do prisma pela face CA , refratam-se em L_1 e depois em L_2 , conforme ilustra a figura, produzindo à direita de L_2 um feixe de raios paralelos de largura d_2 . Trata-se, portanto, de um sistema focal.



Admitindo-se que L_1 e L_2 sejam lentes delgadas, em operação de acordo com as condições de estigmatismo de Gauss, e que o índice absoluto de refração do ar que envolve os três componentes seja igual a 1,0, pede-se determinar:

- a) a distância D , indicada no esquema, que separa L_1 de L_2 ;
b) o valor de d_2 ;
c) o índice absoluto de refração do prisma, n , para que ele satisfaça as condições citadas no enunciado.

10. Na figura, está esquematizada uma lente convergente de pontos antiprincipais A e A' , focos principais F e F' e centro óptico O . PQ é um objeto luminoso que será deslocado ao longo do eixo óptico da lente, passando pelas posições 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.



Para cada posição do objeto, obtenha graficamente, em seu caderno, a correspondente imagem, fornecendo suas características.

11. Sherlock Holmes é um personagem de ficção da literatura britânica, ambientado entre o final do século XIX e o início do século XX. Criado pelo escritor *Sir Arthur Doyle*, Holmes ainda hoje é um dos mais atraentes personagens dos romances policiais. Carismático e astuto, fez do método científico e da lógica dedutiva suas melhores armas. Sua habilidade para desvendar crimes aparentemente insolúveis, até mesmo para a Scotland Yard, transformou seu nome em sinônimo de detetive. Na imagem a seguir, Holmes é caracterizado em companhia de seu fiel escudeiro e admirador, o Dr. Watson, observando indícios de um crime. Ele utiliza nessa cena sua inseparável lupa, que produz imagens substancialmente ampliadas dos objetos.

Considerando-se uma lupa em operação de acordo com as condições de Gauss, faça o que se pede:

- Diga se essa lente – a lupa – é convergente ou divergente e cite em que local, sobre o eixo óptico, deve ser posicionado um pequeno objeto para que sua imagem seja direta e ampliada.
- Faça um esquema utilizando raios de luz que determinem a imagem de um objeto linear posicionado perpendicularmente sobre o eixo óptico da lente.



3. ESTUDO MATEMÁTICO DAS LENTES ESFÉRICAS

Conforme foi visto no Capítulo 10, o referencial gaussiano tem por função dar estrutura ao estudo analítico das imagens, atribuindo às abscissas e às ordenadas dos objetos e consequentes imagens, sinais algébricos adequados.

Em relação às lentes esféricas, o referencial de Gauss é composto de três eixos, todos com origem coincidente com o centro óptico, conforme se pode observar no esquema:



- Eixo Op (abscissas dos objetos): direção do eixo principal e orientação em sentido oposto ao da luz incidente.
- Eixo Op' (abscissas das imagens): direção do eixo principal e orientação no mesmo sentido da luz incidente.
- Eixo Oy (ordenadas dos objetos e das imagens): direção perpendicular ao eixo principal e orientação para cima.

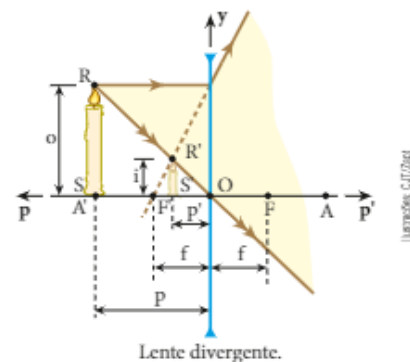
Do referencial gaussiano para as lentes esféricas, depreende-se que:

Objetos e imagens **reais**: abscissa **positiva**.
 Objetos e imagens **virtuais**: abscissa **negativa**.
 Imagem **direita**: objeto e imagem com ordenadas de **mesmo sinal**.
 Imagem **invertida**: objeto e imagem com ordenadas de **sinais contrários**.

Convém observar que nas lentes convergentes, pelo fato de os focos serem reais, as abscissas focais são **positivas**, enquanto nas lentes divergentes, pelo fato de os focos serem virtuais, as abscissas focais são **negativas**.

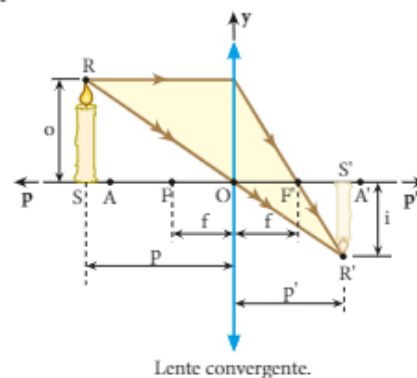
Veja, a seguir, dois exemplos que destacam os sinais algébricos das abscissas e ordenadas envolvidas.

Exemplo 1:



Nesse caso: $p > 0, p' < 0, f < 0, o > 0, i > 0$.

Exemplo 2:



Nesse caso: $p > 0, p' > 0, f > 0, o > 0, i < 0$.

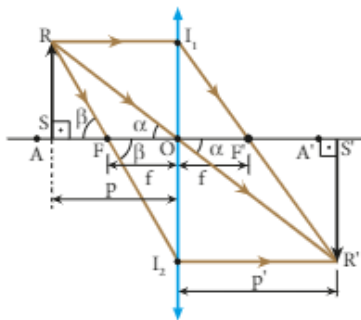
Função dos pontos conjugados (Equação de Gauss)

No caso das lentes esféricas, as abscissas f , p e p' relacionam-se matematicamente segundo a mesma função deduzida para os espelhos esféricos.

Trata-se da **função dos pontos conjugados**, também conhecida como **Equação de Gauss**:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Com o objetivo de apresentar uma dedução simples dessa importante expressão, considere a lente da figura a seguir, em que está traçada, para o objeto real SR, a correspondente imagem S'R'.



Os triângulos RSO e R'S'O são semelhantes. Então:

$$\frac{RS}{R'S'} = \frac{OS}{OS'}$$

Mas $OS = p$ e $OS' = p'$. Assim: $\frac{RS}{R'S'} = \frac{p}{p'}$ (I)

Os triângulos RSF e I₂OF também são semelhantes. Então:

$$\frac{RS}{I_2O} = \frac{FS}{OF}$$

Mas $I_2O = R'S'$, $FS = p - f$ e $OF = f$. Assim:

$$\frac{RS}{R'S'} = \frac{p - f}{f} \quad (\text{II})$$

Comparando as expressões (I) e (II), obtemos:

$$\frac{p}{p'} = \frac{p - f}{f} \Rightarrow fp = pp' - fp' \Rightarrow pp' = fp' + fp$$

Dividindo todos os termos da última expressão por $fp p'$, tem-se:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (\text{função dos pontos conjugados})$$

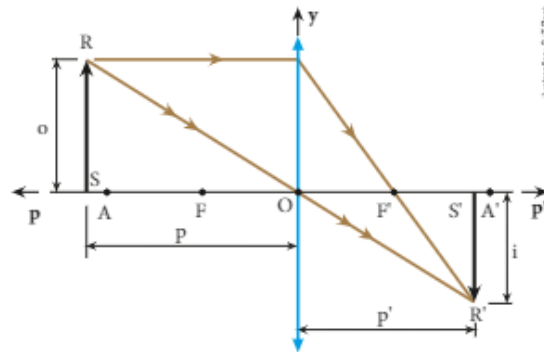
Convém destacar que nas aplicações dessa expressão devem ser levados em conta os sinais algébricos de f , p e p' , dados pelo referencial gaussiano.

Aumento linear transversal

Conforme vimos no Capítulo 10, também para as lentes esféricas define-se **aumento linear transversal** como a grandeza adimensional dada pela relação entre a ordenada da imagem (i) e a ordenada do objeto (o), ambas expressas em relação ao referencial gaussiano.

$$\Lambda = \frac{i}{o}$$

Considere a lente a seguir, que conjuga, para o objeto real SR, a imagem real S'R'.



Os triângulos RSO e R'S'O são semelhantes. Então:

$$\frac{R'S'}{RS} = \frac{OS'}{OS}$$

Mas $R'S' = |i|$, $RS = |o|$, $OS' = |p'|$ e $OS = |p|$. Assim:

$$\frac{|i|}{|o|} = \frac{|p'|}{|p|}$$

Perceba que, no caso da situação proposta (*vide* referencial gaussiano), $i < 0$, $o > 0$, $p > 0$ (objeto real) e $p' > 0$ (imagem real).

Levando em conta os sinais algébricos de i , o , p e p' , podemos escrever que:

$$\Lambda = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

Nesse momento, é importante recapitular duas situações importantes referentes ao aumento linear transversal:

1ª situação: Aumento positivo

Se $A > 0$, devemos ter:

- i e o com o mesmo sinal: a imagem é direita;
- p e p' com sinais opostos: o objeto e a imagem têm naturezas opostas (se um é real, o outro é virtual).

2ª situação: Aumento negativo

Se $A < 0$, devemos ter:

- i e o com sinais opostos: a imagem é invertida;
- p e p' com o mesmo sinal: o objeto e a imagem têm a mesma natureza (ambos são reais ou ambos são virtuais).

É importante notar também que:

Se $|A| > 1$: a imagem é **maior** que o objeto.

Se $|A| < 1$: a imagem é **menor** que o objeto.

É possível expressar o aumento linear transversal (A) de uma lente esférica em função da abscissa focal (f) e da abscissa do objeto (p). Para isso, basta utilizar a expressão deduzida no Capítulo 10:

$$A = \frac{f}{f - p}$$

FAÇA VOCÊ MESMO**Duas posições e duas projeções**

Vamos verificar nesta atividade que, com um objeto luminoso e um anteparo, ambos fixos, percorrendo-se o segmento que conecta esses dois elementos com uma lente convergente, é possível obter-se projetadas no anteparo duas imagens invertidas do objeto, uma maior e outra menor. Isso acontece para duas posições distintas da lente, respectivamente, uma mais próxima do objeto e outra mais afastada dele.

Material necessário

- 1 lupa (lente convergente, geralmente biconvexa);
- 1 lanterna a pilha e algum objeto para servir de apoio para ela (uma caixa qualquer sobre uma mesa, por exemplo);
- 1 folha de papel-manteiga;
- 1 folha de papel *contact*, de preferência preta;
- 1 rolo de fita adesiva. Recomendamos fita isolante preta, do tipo utilizado em isolamento de circuitos elétricos;
- 1 estilete e/ou 1 tesoura para cortar o papel-manteiga, o papel *contact* e a fita isolante;
- 1 trena centimetrada.

ATENÇÃO!

Este experimento envolve o uso de objeto cortante. Cuide para não se ferir.

Procedimento

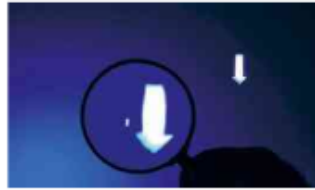
- Recorte no papel-manteiga e no papel *contact* círculos capazes de cobrir completamente o bocal da lanterna. O círculo recortado sobre o papel-manteiga deverá ser menor que o recortado sobre o papel *contact*. Vale comentar que a finalidade do papel-manteiga é difundir de maneira mais homogênea a luz proveniente da lâmpada da lanterna.
- Tomando o devido cuidado para não se machucar, utilize o estilete para recortar no papel *contact* a ser colado diretamente sobre o papel-manteiga algo longilíneo terminado de forma diferente daquela que foi definida para o lado

oposto do corte. Sugerimos uma seta, por exemplo. Instale o papel *contact* no bocal da lanterna. Utilize um pedaço de fita isolante para melhor fixação. Veja a fotografia a seguir.



Foto: Fernando Favre/Arquivo

- III. Para estimar a distância focal da lente, disponha a lupa paralelamente ao solo sob uma lâmpada acesa, relativamente potente e de pequenas dimensões. Faça com que a lente fique suficientemente distante da lâmpada para que os raios luminosos incidentes sobre ela possam ser considerados praticamente paralelos. Esses raios, depois de refratados, se concentrarão em uma região de área mínima, que poderá ser observada projetada sobre o solo. Utilizando a trena, meça a distância entre a lupa e essa região. O comprimento determinado é a distância focal aproximada da lente, que representaremos por f .
- IV. Em seguida, em um ambiente escurecido, apoie a lanterna de modo que sua distância d a uma parede do recinto (preferencialmente de cor clara) seja maior que $4f$. Meça com a trena o valor de d .
- V. Com a lupa próxima do bocal da lanterna, observe o que aparece como projeção na parede. Você notará apenas uma figura indefinida, completamente desfocada. Comece então a deslocar a lupa no sentido lanterna-parede. Você verá que a figura projetada irá se definindo até ficar devidamente focalizada, apresentando uma imagem invertida da seta "objeto", porém, maior que esta. Utilize a trena para medir a distância p_1 entre o bocal da lanterna e a lupa. Veja as fotos a seguir.



Na fotografia da direita, você pode observar, além da imagem projetada na parede ao fundo, invertida e maior que a seta "objeto", duas outras imagens do mesmo objeto produzidas por reflexão da luz nas faces esféricas da lente.

- VI. Continuando a deslocar a lupa ao longo do segmento lanterna-parede, no sentido lanterna-parede, você perceberá que a figura projetada na parede voltará a ficar fora de foco até adquirir novamente contornos definidos, isto é, perfeita focalização. Neste caso, a imagem também será invertida em relação à seta "objeto", porém, menor que ela. Meça também a distância p_2 entre o bocal da lanterna e a lupa. Veja o resultado óptico na fotografia abaixo.



Você pode constatar, portanto, que com $d > 4f$, ao longo do segmento lanterna-parede, existem duas posições para a lupa, distantes respectivamente p_1 e p_2 do bocal da lanterna, em que ocorrem projeções nítidas do objeto luminoso na superfície definida como anteparo.

Logo, ao longo do referido segmento podem ser notadas *duas posições e duas projeções*.

Analisando o experimento

1. Demonstre matematicamente por que o sucesso do experimento como descrito exige que $d > 4f$.
2. Determine em função de d e f as expressões matemáticas de p_1 e p_2 . Substitua nessas expressões as medidas que você obteve para d e f e calcule os valores numéricos esperados de p_1 e p_2 . Compare os valores calculados com as respectivas medidas experimentais.

4. VERGÊNCIA ("GRAU") DE UMA LENTE

É comum as pessoas avaliarem lentes como "fortes" ou "fracas". Uma lente será tanto mais "forte" quanto maior for seu "poder" de alterar a trajetória da luz.

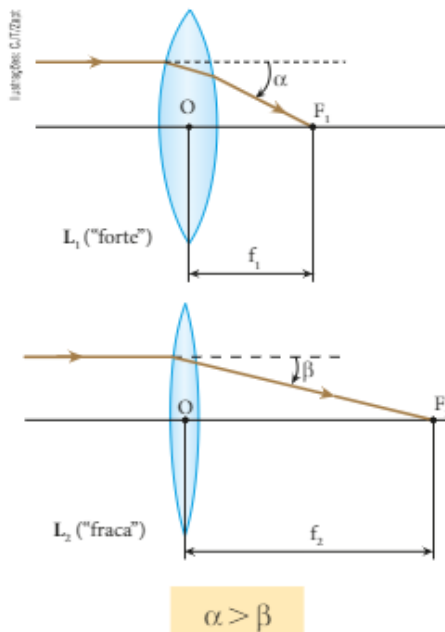
Entretanto, essa é uma concepção simplista, já que

existe uma grandeza física que quantifica a capacidade que as lentes têm de desviar os raios luminosos.

Trata-se da **vergência** (V), que é definida como o inverso da abscissa focal (f).

$$V = \frac{1}{f}$$

Os dois esquemas a seguir representam duas lentes convergentes, L_1 e L_2 , de abscissas focais f_1 e f_2 , provocando, em raios de luz paralelos aos seus eixos principais, desvios angulares respectivamente iguais a α e β .



Observe que L_1 desvia mais a luz que L_2 . Nesse caso, temos $f_1 < f_2$, o que implica $V_1 > V_2$.

A vergência é uma **grandeza algébrica** que tem o mesmo sinal da abscissa focal.

Nas lentes **convergentes** (focos reais): $f > 0$ e $V > 0$.
 Nas lentes **divergentes** (focos virtuais): $f < 0$ e $V < 0$.

A unidade de vergência é o inverso da unidade de comprimento. No SI, com a abscissa focal expressa em metros, temos:

$$\text{unid}(V) = \frac{1}{\text{m}} = \text{m}^{-1} = \text{dioptria (di)}$$

Na linguagem popular, é comum ouvirmos a vergência expressa em "graus". Geralmente, 1 "grau" equivale a 1 dioptria.

Equação dos Fabricantes de Lentes

Atribuída ao astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742), a **Equação dos Fabricantes de Lentes** permite calcular a abscissa focal (ou a vergência) de uma lente, sendo conhecidos seu índice de refração em relação ao meio externo e os raios de curvatura de suas faces.

Representando por $n_{L,m}$ o índice de refração da lente em relação ao meio externo ($n_{L,m} = \frac{n_L}{n_m}$) e por R_1 e R_2 os raios de curvatura de suas faces, pode-se demonstrar que a abscissa focal f fica determinada por:

$$\frac{1}{f} = (n_{L,m} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

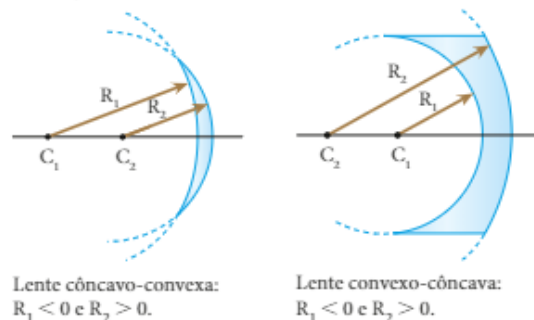
Lembrando que $V = \frac{1}{f}$, temos:

$$V = (n_{L,m} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Para que as abscissas focais (ou vergências) calculadas pela Equação dos Fabricantes de Lentes estejam de acordo com o referencial gaussiano, devemos adotar a seguinte convenção de sinais:

- **Faces convexas:** raios de curvatura positivos ($R > 0$);
- **Faces côncavas:** raios de curvatura negativos ($R < 0$).

Nas duas figuras a seguir, exemplificamos a convenção:



Para lentes esféricas biconvexas ou bicôncavas **simétricas** – com faces de raios de curvatura iguais a R –, a **Equação dos Fabricantes de Lentes** fica expressa por:

$$V = (n_{L,m} - 1) \frac{2}{R}$$

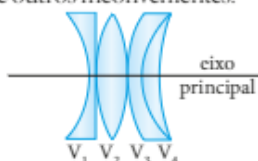
Se uma das faces da lente for plana, o raio de curvatura R_1 dessa face tenderá ao infinito, fazendo o quociente $\frac{1}{R_1}$ tender a 0. Para esse caso, a **Equação dos Fabricantes de Lentes** reduz-se a:

$$V = (n_{L,m} - 1) \frac{1}{R_2}$$

5. ASSOCIAÇÃO DE LENTES - TEOREMA DAS VERGÊNCIAS

Nos equipamentos ópticos modernos com maior grau de sofisticação, são comuns as associações de lentes. Em geral, uma lente esférica, por si só, apresenta problemas como o das aberrações cromáticas, que consiste no fato de a lente ter distâncias focais diferentes para as diferentes cores. Ao incidir paralelamente ao eixo principal, um pincel elementar de luz branca refrata-se sofrendo dispersão, e cada cor experimenta um desvio diferente. Associando as lentes adequadamente, consegue-se uma minimização considerável desse e de outros inconvenientes.

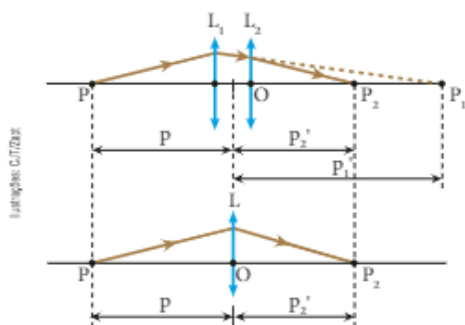
Um sistema de lentes associadas como o que está representado no esquema ao lado é uma **associação por justaposição**.



Nesse caso, as lentes apresentam eixo principal comum e estão dispostas lado a lado, praticamente encostadas uma na outra.

Considere a figura a seguir, em que estão representadas duas lentes convergentes delgadas, L_1 e L_2 , associadas por justaposição. Seja O o centro óptico comum às lentes (de espessura desprezível e encostadas uma na outra) e P um ponto luminoso situado sobre o eixo do sistema. A lente L_1 conjuga a P a imagem real P_1 , que se comporta como objeto virtual em relação a L_2 . Finalmente, L_2 conjuga a P_1 a imagem real P_2 , que constitui a imagem final que a associação fornece a P .

É possível imaginar uma lente L que, colocada na mesma posição de L_1 e L_2 , conjugue a P uma imagem com as mesmas características de P_2 . Dizemos, então, que essa lente única que substitui a associação é a **lente equivalente**.



Calculemos a abscissa focal (e a vergência) da lente equivalente em função das abscissas focais (e das vergências) das lentes componentes da associação. Para isso, vamos adotar em nossas considerações a seguinte simbologia:

f_1 e V_1 são, respectivamente, a abscissa focal e a vergência da lente L_1 ;

f_2 e V_2 são, respectivamente, a abscissa focal e a vergência da lente L_2 ;

f e V são, respectivamente, a abscissa focal e a vergência da lente equivalente.

Aplicando a função dos pontos conjugados à lente L_1 , tem-se:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} \quad (\text{I})$$

Aplicando a função dos pontos conjugados à lente L_2 , tem-se:

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \quad (\text{II})$$

Somando as equações (I) e (II), segue que:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p_2} \quad (\text{III})$$

Aplicando a função dos pontos conjugados à lente equivalente L , chega-se a:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p_2} \quad (\text{IV})$$

Comparando (III) e (IV), obtém-se:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Em termos de vergências ($V = \frac{1}{f}$), é também correto que:

$$V = V_1 + V_2$$

A conclusão a que chegamos é conhecida por **Teorema das Vergências**, sendo extensiva ao cálculo da vergência equivalente da associação de duas ou mais lentes justapostas. As lentes envolvidas podem ser convergentes ou divergentes, e, nos cálculos, deve-se observar os sinais algébricos de suas abscissas focais (e vergências).

Para n lentes que constituem uma **associação delgada** (espessura desprezível) por justaposição, podemos escrever:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_n}$$

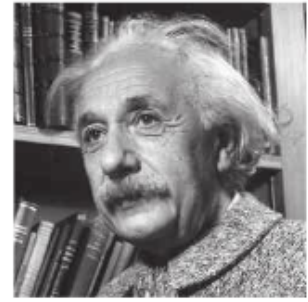
ou ainda, $V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$

Teoria da Relatividade Geral

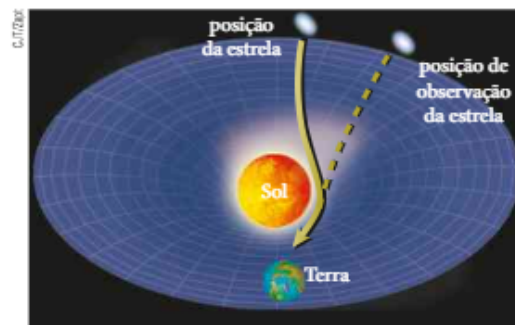
Em 1916, Einstein publicou sua Teoria da Relatividade Geral. Entre outros temas, ele tratou das deformações que uma grande massa provoca no chamado espaço-tempo. É como se uma superfície horizontal de borracha, presa pelas bordas, recebesse um corpo pesado em sua região central. Isso provocaria uma vala análoga à deformação no espaço-tempo proposta pelo cientista. Uma pequena esfera que passasse com baixa velocidade perto dessa vala seria “atraída” para a parte mais funda dela, como se a vala fosse uma espécie de sorvedouro. Esse foi o fundamento da explicação de Einstein para a gravitação dos planetas em torno do Sol ou a da Lua em torno da Terra.

As deformações no espaço-tempo também encurvam as trajetórias da luz, o que justifica as imagens produzidas pelas lentes gravitacionais descritas mais adiante neste box.

Em 1919, Einstein recebeu notícias que comprovavam aspectos de sua teoria. Nessa ocasião, os astrônomos britânicos Andrew Crommelin e Charles Davidson, da equipe de Arthur Eddington, estiveram no Brasil, em Sobral, Ceará, para observar um eclipse total do Sol. Eles verificaram no momento do fenômeno, com o céu obscurecido pela presença da Lua diante do disco solar, o aparecimento de estrelas do grupo das Híades, que deveriam estar escondidas atrás do Sol. O que foi visto, na verdade, foram imagens virtuais dessas estrelas produzidas pela lente-gravitacional-Sol, que deforma o espaço-tempo ao seu redor.



Albert Einstein.



Representação ilustrativa da deformação no espaço-tempo provocada pela presença do Sol e o consequente desvio da luz proveniente de uma estrela. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

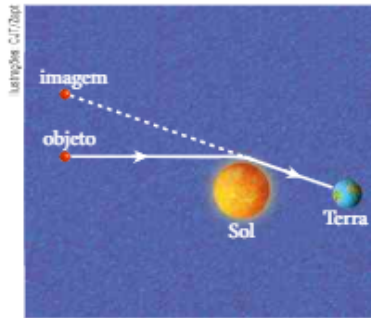
Os quasares e as lentes gravitacionais

Em 1963, o astrônomo holandês Maarten Schmidt localizou uma “estrela” que foi chamada 3C 273. Quando analisou seu espectro, ficou intrigado. As conclusões não faziam sentido, desdoando de tudo o que se conhecia até então.

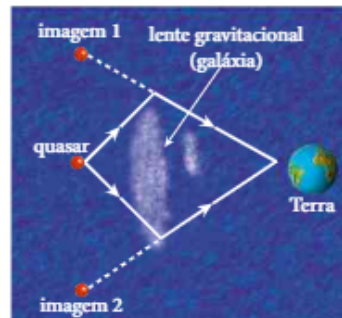
Depois de algum tempo de dúvidas e inquietação, Schmidt concluiu, pela análise do *red shift* da 3C 273 – deslocamento das frequências visíveis para o vermelho devido ao efeito Doppler –, que aquele corpo celeste devia estar muito mais longe da Terra que a maioria das galáxias e que se afastava de nosso planeta com grande velocidade, o que ia ao encontro das Teorias do Universo em Expansão. A 3C 273 foi chamada **quasar** – *quasi-stellar astronomical radiSOURCE*, que significa “fonte de rádio astronômica quase estelar”.

Os quasares são corpos que, embora tenham tamanho equivalente ao do Sistema Solar, brilham mais que 1 trilhão de sóis. Sua distância à Terra excede 2 bilhões de anos-luz e sua detecção em nosso planeta é feita principalmente por meio das ondas de rádio e raios X que emitem.

Albert Einstein demonstrou que a presença de um corpo de grande massa pode desviar ondas eletromagnéticas, em especial a luz. Quando as radiações emanadas de um astro passam nas proximidades do Sol, por exemplo, elas se encurvam, como está ilustrado a seguir na figura à esquerda, fazendo com que se obtenham imagens virtuais do astro em posições aparentes diferentes daquela em que ele realmente está.



A luz do astro sofre um desvio devido à presença do Sol. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.



Representação de duas imagens de um mesmo quasar conjugadas por uma lente gravitacional (galáxia). Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

A influência de grandes massas sobre ondas eletromagnéticas pode ser comprovada quando um quasar, “escondido” atrás de uma galáxia, tem suas radiações captadas por sistemas de detecção (radiotelescópios) localizados na Terra. Luz, ondas de rádio e raios X emitidos por ele são desviados intensamente pela deformação do espaço-tempo em torno da galáxia, proporcionando aos astrônomos imagens duplas ou múltiplas daquele corpo celeste (veja figura acima à direita).

É importante notar que essas imagens não provêm de dois ou mais quasares distintos; trata-se do mesmo astro, já que qualquer alteração verificada em uma delas também é constatada simultaneamente nas demais.

A galáxia funciona como uma **lente gravitacional** que, desviando a energia radiante como se fosse uma imensa lente óptica, permite a visualização de imagens dos astros de onde essa energia provém. Isso nos leva a acreditar que, realmente, as radiações desses corpos celestes não se propagam em linha reta, sendo desviadas pela presença de grandes concentrações de massa.

QUESTÕES COMENTADAS



12 Uma lente esférica produz uma imagem real de um objeto situado a 30 cm da lente. Sabendo que o objeto se encontra a 50 cm de sua imagem, pede-se:

- classificar a lente em convergente ou divergente;
- calcular a distância focal da lente;
- representar por meio de um esquema a situação proposta.

RESOLUÇÃO

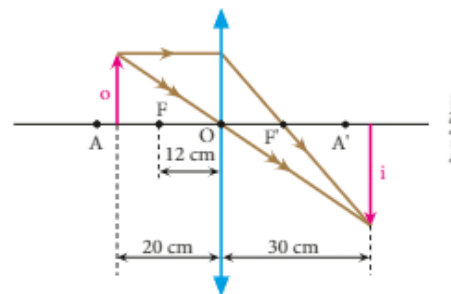
- Se a um objeto real é conjugada uma imagem real, a lente é **convergente**.
- Temos $p' = 30$ cm e $p + p' = 50$ cm. Assim: $p = 20$ cm. Aplicando a função dos pontos conjugados, calculemos f :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{3+2}{60} \Rightarrow f = \frac{60}{5}$$

Logo: $f = 12$ cm

- No caso, o objeto situa-se entre o ponto antiprincipal e o foco principal.



- Respostas:** a) Lente convergente; b) 12 cm;
c) Ver figura na resolução.

13 Pretende-se projetar em um anteparo a imagem nítida de um objeto real, ampliada 4 vezes. Para isso, utiliza-se uma lente esférica cuja abscissa focal tem módulo 20 cm. Determine:

- o tipo de lente que deve ser utilizado (convergente ou divergente).
- a distância do objeto à lente.
- a distância do anteparo à lente.

RESOLUÇÃO

a) Se a imagem será projetada em um anteparo, sua natureza é **real**. Assim, como o objeto e a imagem são reais, temos $p > 0$ e $p' > 0$ e, conseqüentemente, $f > 0$, indicando que a lente é **convergente**.

b) Com $p > 0$ e $p' > 0$, obtém-se aumento linear transversal negativo (imagem invertida).

Sabemos que $A = -4$; como $A = \frac{f}{f - p}$, temos:

$$-4 = \frac{20}{20 - p} \Rightarrow -20 + p = 5 \Rightarrow p = 25$$

c) Observando que a imagem está no anteparo, temos:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow -4 = -\frac{p'}{25} \Rightarrow p' = 100 \text{ cm}$$

Respostas: a) Convergente; b) 25 cm; c) 100 cm

14 Considere uma lente plano-convexa de vidro imersa no ar, em que o raio de curvatura da face convexa vale 25 cm. Se o índice de refração do vidro vale 1,5, calcule a distância focal e a vergência da lente.

RESOLUÇÃO

Trata-se de uma aplicação direta da **Equação dos Fabricantes de Lentes**:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_l}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

No caso, $n_l = 1,5$, $n_m = 1,0$ e $R_1 = +25$ cm (na face convexa, $R > 0$). O raio de curvatura R_2 tende ao infinito, já que a face correspondente a ele é plana. Por isso, o termo $\frac{1}{R_2}$ tende a zero, conduzindo-nos a:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1,5}{1,0} - 1 \right) \left(\frac{1}{25} + 0 \right)$$

$$\frac{1}{f} = 0,50 \cdot \frac{1}{25} \Rightarrow f = 50 \text{ cm} = 0,50 \text{ m}$$

A vergência é dada pelo inverso da distância focal.

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{0,50} \text{ (di)} \Rightarrow V = 2,0 \text{ di}$$

A lente é convergente, já que $f > 0$ e $V > 0$.

Resposta: 0,50 m e 2,0 di

15 São justapostas três lentes delgadas A, B e C com vergências $V_A = +4$ di, $V_B = -3$ di e $V_C = +1$ di.

a) Qual é a vergência e qual a distância focal do sistema resultante?

b) O comportamento óptico do sistema resultante é convergente ou divergente?

RESOLUÇÃO

a) A vergência equivalente a uma associação delgada de lentes justapostas é calculada por:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$\text{No caso: } V = V_A + V_B + V_C$$

Substituindo os valores de V_A , V_B e V_C , segue que:

$$V = +4 \text{ di} - 3 \text{ di} + 1 \text{ di} \Rightarrow V = +2 \text{ di}$$

Sendo $V = \frac{1}{f}$, calculamos f , que é a distância focal equivalente à associação:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{1}{V} = \frac{1}{+2 \text{ di}} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Logo: } f = 0,5 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

b) Como a vergência do sistema resultante é positiva ($V = +2$ di), ele tem comportamento **convergente**.

Respostas: a) +2 di e 50 cm;

b) Comportamento convergente.

**QUESTÕES PROPOSTAS**

FAÇA NO CADERNO.

16. As lentes esféricas constituem um componente fundamental, já que comparecem com papel preponderante em quase todos os instrumentos ópticos. Câmeras fotográficas, filmadoras, microscópios e lunetas, por exemplo, utilizam uma ou mais lentes.

Na fotografia ao lado, um homem posiciona uma lente de aumento (lupa) a 12,0 cm de seu olho e esta produz uma imagem ampliada com quatro vezes as dimensões lineares do olho do homem. Considerando-se válidas as condições de Gauss, pede-se:

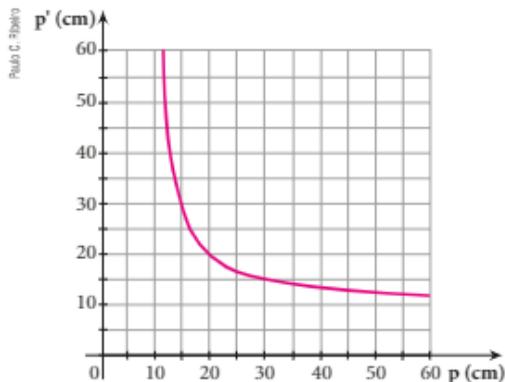
a) calcular a distância focal da lente;

b) determinar o comprimento da imagem quando a lente referida é utilizada para projetar em uma parede distante 80,0 cm do centro óptico a imagem de uma lâmpada cilíndrica — em forma de bastão —, com 10,0 cm de altura, colocada perpendicularmente ao eixo óptico.



Gery Images

17. Parte do gráfico da abscissa-imagem, p' , em função da abscissa-objeto, p , medidas ao longo do eixo óptico de uma lente esférica que obedece às condições de Gauss, está mostrada abaixo.

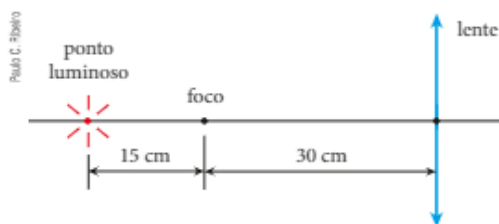


- Determine o comportamento óptico da lente (convergente ou divergente), bem como sua distância focal.
- Admitindo que a abscissa-objeto seja igual a 5,0 cm, calcule a correspondente abscissa-imagem e também o aumento linear transversal.

18. Um objeto luminoso é colocado a uma distância d_0 de uma lente convergente de distância focal f_0 , sendo sua imagem projetada em um anteparo situado a uma distância L da lente. O objeto é então aproximado, ficando posicionado a uma distância $\frac{d_0}{2}$ da lente, o que faz com que a imagem se apresente desfocada no anteparo. Desejando-se focalizar a imagem, substitui-se a primeira lente por uma outra, também convergente, mas de distância focal f_1 . Sabendo que a segunda lente é instalada na mesma posição da primeira, determine:

- o valor de L ;
- o valor de f_1 .

19. A figura representa um ponto luminoso sobre o eixo óptico de uma lente convergente que obedece às condições de Gauss:



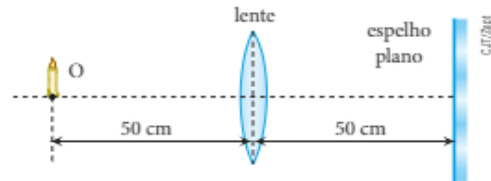
- A que distância da lente está posicionada a imagem do ponto luminoso?
- Deslocando-se o ponto luminoso 3,0 cm numa direção perpendicular ao eixo óptico da lente, qual o deslocamento sofrido pela imagem?

20. Em uma aula de laboratório de Óptica, deseja-se determinar a distância focal de uma lente convergente. Utilizando uma vela, cuja chama tem altura de 5 cm, o professor propõe um procedimento experimental. A vela é colocada inicialmente a certa distância da lente, sendo a imagem de sua chama projetada em um anteparo, invertida e com 15 cm de altura. Em seguida, sem mover a lente, desloca-se a vela 1,5 cm, distanciando-a ainda mais da lente. Move-se então o anteparo até obter-se uma nova imagem projetada, que é invertida e tem altura de 10 cm nessa situação. Com base nesses dados, determine a distância focal dessa lente.

21. Um pequeno bastão luminoso é disposto paralelamente a uma parede, a 338 cm de distância. Entre o bastão e a parede é instalada uma lente esférica convergente, de distância focal igual a 24 cm, de modo que projete na parede uma imagem nítida e ampliada do bastão. Supondo válidas as condições de Gauss, determine:

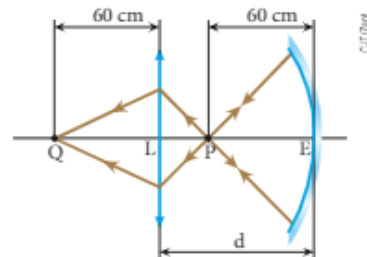
- a distância entre a lente e a parede;
- quantas vezes a imagem projetada é maior que o bastão.

22. Utilizando um banco óptico, um estudante monta no laboratório o arranjo representado a seguir, em que a abscissa focal da lente vale +30 cm:



A que distância do espelho forma-se a imagem final de O conjugada pelo sistema?

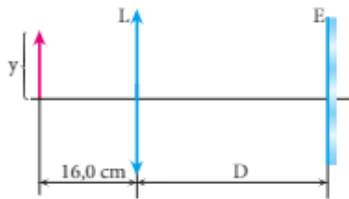
23. Um espelho esférico côncavo E , de distância focal f_E , e uma lente delgada convergente L , de distância focal $f_L = 12$ cm, estão dispostos coaxialmente, com seus eixos ópticos coincidentes, conforme representa a figura. Admita que o espelho e a lente estejam sendo utilizados dentro das condições de Gauss. A distância entre o vértice do espelho e o centro óptico da lente é igual a d . Uma fonte pontual de grande potência, capaz de emitir luz exclusivamente para a direita, é colocada no ponto P . Os raios luminosos provenientes da fonte seguem, então, as trajetórias indicadas, acendendo um palito de fósforo cuja extremidade se encontra no ponto Q .



Considerando as medidas indicadas no esquema, aponte a alternativa em que aparecem os valores corretos de f_E e d :

- a) $f_E = 60$ cm; $d = 120$ cm. d) $f_E = 30$ cm; $d = 75$ cm.
 b) $f_E = 60$ cm; $d = 75$ cm. e) $f_E = 60$ cm; $d = 72$ cm.
 c) $f_E = 30$ cm; $d = 120$ cm.

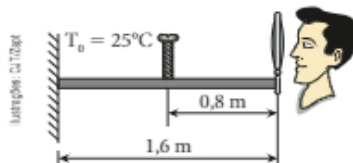
24. Na figura, está representado um objeto luminoso de altura y e posicionado a $16,0$ cm de uma lente convergente L , cuja distância focal é de $8,0$ cm. A lente está a uma distância D de um espelho esférico gaussiano E de raio de curvatura $36,0$ cm e eixo principal coincidente com o eixo óptico da lente.



Para que a imagem produzida pelo espelho tenha altura igual a $2y$ e orientação invertida em relação ao objeto, o tipo de espelho esférico utilizado e o valor de D são, respectivamente:

- a) côncavo e $D = 16,0$ cm. d) convexo e $D = 16,0$ cm.
 b) côncavo e $D = 25,0$ cm. e) convexo e $D = 25,0$ cm.
 c) côncavo e $D = 43,0$ cm.

25. Uma vigota metálica feita de uma liga de ferro-carbono tem coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e comprimento de $1,6$ m a 25°C . Um operador fixa essa vigota horizontalmente e coloca em seu ponto médio um grande parafuso que é observado através de uma lupa instalada na extremidade direita do sistema, conforme indica o esquema. Nesse caso, ele constata que a lupa fornece uma imagem direita do parafuso aumentada três vezes em relação às suas dimensões originais.



Em seguida, o operador leva apenas a vigota a um forno e, depois de retirá-la muito quente mas ainda sólida e com o mesmo formato original, utilizando a mesma lupa e o mesmo parafuso, faz de novo a montagem idêntica à inicial, porém nota que nesse caso a imagem do parafuso é observada direita e aumentada quatro vezes em relação às dimensões reais do objeto. Admitindo-se válidas para a lupa as condições de estigmatismo de Gauss, pede-se determinar:

- a) a distância focal f da lente;
 b) o comprimento L da vigota no momento em que é retirada do forno;
 c) sua temperatura T nesse instante.

26. Uma lente esférica de vidro, envolvida pelo ar, tem raios de curvatura iguais. Sabendo que o índice de refração do vidro em relação ao ar vale $\frac{3}{2}$ e que a convergência da lente é de $+5$ di:

- a) calcule o raio de curvatura comum às faces da lente;
 b) classifique a lente como biconvexa ou bicôncava.

27. Um estudante possui uma lente côncavo-convexa de vidro ($n_v = \frac{3}{2}$), cujas faces têm raios de curvatura 10 cm e $5,0$ cm. Sabendo que a lente é utilizada no ar ($n_{ar} = 1$) e posteriormente na água ($n_a = \frac{4}{3}$), responda:

- a) Do ar para a água os planos focais se aproximam ou se afastam do centro óptico?
 b) Qual é a variação da distância focal da lente?

28. Admita que um naufrago tenha conseguido chegar a uma ilha deserta levando consigo apenas um conjunto de duas lentes justapostas, uma delas com vergência $V_1 = +3,0$ di e a outra com vergência $V_2 = -1,0$ di. Para acender uma fogueteira concentrando raios solares, ele utilizará o Sol do meio-dia, dispondo as lentes paralelamente ao solo, onde fez um amontoado de gravetos e folhas secas. Para obter fogo no menor intervalo de tempo possível, o naufrago deverá colocar as lentes a uma distância dos gravetos e folhas secas igual a:

- a) $2,0$ m b) $1,5$ m c) $0,50$ m d) $0,25$ m



DESCUBRA MAIS

- 1 Existe um "defeito" inerente às lentes denominado **aberração cromática**. Em que consiste esse problema?
- 2 Em alguns faróis marítimos, holofotes e retroprojetores, são utilizadas as chamadas lentes de Fresnel. Esses sistemas ópticos, implementados pelo físico francês Augustin Fresnel (1788-1827), exercem funções semelhantes às das lentes convencionais, porém possuem espessura e peso bem menores. Como funcionam as lentes de Fresnel?

INTERSABERES

De 76 em 76 anos?

Edmond **Halley** foi o primeiro astrônomo a conjecturar que os cometas são corpos celestes dotados de órbitas regulares e movimentos periódicos. Fundamentado nas teorias de seu compatriota e contemporâneo Isaac Newton, constatou que certo astro, observado em 1531, 1607 e 1682, tratava-se de um mesmo corpo celeste, o qual deveria cruzar o Sistema Solar também em 1758, o que realmente se verificou. Esse astro, com período próximo de 76 anos, foi denominado *cometa de Halley* em sua homenagem.



Retrato de **sir Edmond Halley**. Óleo sobre tela, pintado por Thomas Murray, por volta de 1687.



O cometa de Halley aparece nesta fotografia de 12 de março de 1986. Naquele ano o astro passou pela última vez nas proximidades da Terra. Sua próxima aparição deverá ocorrer em 2062.

A vida chegou de cometa?

Entre os planetas e luas de nossa região no Universo existem milhares de asteroides e cometas que têm sido sistematicamente catalogados, com suas órbitas devidamente calculadas. Ao mesmo tempo, milhões desses corpos celestes permanecem desconhecidos e indetectáveis.

Os cometas

São pequenas “porções de gelo sujo”, de formato irregular, constituídos por uma mistura de rocha, gelo, gases congelados e poeira. Todos esses ingredientes são restos, em grande parte, oriundos dos primórdios do Sistema Solar. Alguns trazem em seu núcleo, sob uma crosta escura, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, amônia, metanol, cianeto de hidrogênio, formaldeído, etanol e etano. Podem ocorrer também hidrocarbonetos de cadeia longa e aminoácidos.

Os cometas viajam em órbitas elípticas de grande excentricidade (periódicos) ou em trajetórias parabólicas (não periódicos), três vezes mais rápido que os asteroides e só são visíveis quando estão próximos do Sol. Ao passarem nas vizinhanças da estrela, na região do periélio de suas órbitas, os cometas exibem um *coma* (ou cauda), disposto sempre em oposição à posição do Sol, constituído de partículas gasosas ionizadas, além de poeira, provenientes de radiações e ventos solares que interagem com o material volátil do núcleo.

Suas dimensões variam de algumas centenas de metros até dezenas de quilômetros. O cometa de Halley, por exemplo, tem cerca de 16 km de comprimento em seu maior eixo. Acredita-se que a metade dos asteroides localizados atualmente no entorno da Terra sejam cometas que extinguiram o material volátil outrora abundante em seu núcleo.

É interessante destacar que a palavra “cometa” tem origem grega: *kome*, em grego, quer dizer “cabeleira”. Aristóteles definiu esses corpos celestes como *kometes*, que significaria “estrelas com cabeleiras”.

Meteoros

Cerca de duas vezes por semana, um meteoro do tamanho de uma grande abóbora se precipita sobre a Terra e explode com energia comparável à de uma bomba atômica. Felizmente, nossa atmosfera faz com que esses corpos vindos do espaço se vaporizem a distâncias de algumas dezenas de quilômetros do solo. Se um pedaço de meteoro “sobreviver” e conseguir chegar à superfície do planeta, então será chamado de meteorito. Milhões de meteoritos atacam a Terra todos os dias – a maioria deles, porém, tem apenas o tamanho de um grão de areia.

No entanto, de vez em quando, algum objeto maior entra em contato com esse escudo de proteção natural terrestre – às vezes com efeitos catastróficos. Alguns cientistas acreditam que uma dessas bolas de fogo ocasionou a extinção dos dinossauros ao colidir com a Terra em Chicxulub, na província de Yucatán, no México, há 65 milhões de anos. Ao que se estima, esse meteoro teria entre 8 e 10 km de diâmetro.

Os asteroides

A maioria dos asteroides se comporta de forma ordenada, ficando em órbita ao redor do Sol em um cinturão de asteroides localizado entre Marte e Júpiter. Devido a perturbações gravitacionais ocasionadas pela posição relativa dos planetas e suas luas, alguns escapam da órbita e acabam sendo uma ameaça de colisão.

Os asteroides são formados por rocha e metal e seus tamanhos podem variar: desde pequenas pedras até algo em torno de 900 km em seu maior eixo.

É consensual entre os astrônomos a noção de que os asteroides sejam restos do processo de formação do Sistema Solar, há 4,6 bilhões de anos.

Cometas e meteoritos, no entanto, em suas muitas colisões com a Terra, podem ter trazido a água aqui existente, além dos elementos precursores da vida ou mesmo os primeiros seres vivos do planeta. Essa é a opinião de um significativo segmento da comunidade científica.

Colisões entre meteoritos e a Terra

Em 30 de junho de 1908, um meteoro adentrou os céus de Tunguska, na Sibéria, no norte da Rússia, desintegrando-se completamente devido à fricção com a atmosfera. Isso provocou uma onda de choque muito potente, equivalente a cerca de 1 000 bombas atômicas como a que destruiu Hiroshima, no Japão, pondo fim à Segunda Guerra Mundial.

A violência do impacto sônico contra o solo foi tamanha que dizimou cerca de 80 milhões de árvores em uma região de mais de 2 000 km². As consequências só não foram piores porque Tunguska era uma área desabitada, coberta apenas por densa vegetação.

Compreensão, pesquisa e debate

1. Pesquise sobre as teorias que atribuem a aparição de água e vida na Terra às colisões de cometas e meteoros contra a superfície do planeta.
2. Uma teoria bastante aceita pelos cientistas é a de que os dinossauros teriam sido extintos por uma colossal colisão de um meteoro contra a superfície terrestre. Junto com um colega, pesquise sobre os fatores, decorrentes desse impacto que teriam levado esses animais jurássicos à extinção. Se necessário, peça orientação ao professor de Biologia.
3. Um meteoro, ao ser desintegrado devido à fricção com a atmosfera, provoca uma intensa onda de choque, de natureza mecânica, que se propaga à velocidade do som. Admitindo-se o ar isotrópico, qual é o formato dessa onda? Por que ela tem tão grande poder de destruição?



INSTRUMENTOS ÓPTICOS E ÓPTICA DA VISÃO

1. INTRODUÇÃO

Os conceitos, as leis e os sistemas ópticos estudados até aqui constituem a base teórica para a implementação de **instrumentos ópticos**, que sempre desempenharam ao longo da história, desde suas primeiras concepções, papel preponderante na saga do conhecimento humano. Isso pode ser notado em diversos setores, como em Fotografia, em Biologia e em Astronomia.

Hoje vivemos uma era em que a captação de imagens se transformou em algo corriqueiro, quase banal. Utilizando câmeras digitais, muitas vezes embutidas em telefones celulares e outros dispositivos eletrônicos, podemos obter fotografias em grande número, passíveis de visualização imediata e publicação instantânea em mídias como a internet. Na fabricação de câmeras de todo tipo são utilizadas, além de outros saberes, noções de **Óptica**.

Em 1667, o cientista inglês Robert **Hooke** publicou um livro intitulado *Micrographia*, em que apresentou os resultados de suas observações utilizando um incipiente microscópio capaz de ampliar apenas algumas dezenas de vezes as dimensões de certos objetos. Nessa obra, Hooke descreve a similaridade entre as minúsculas partículas de um pedaço de cortiça e as celas ocupadas por monges nos claustros de mosteiros. E para denominar essas estruturas do tecido vegetal ele lançou mão do termo **célula**, derivado da expressão latina *cella* (espaço vazio). Essa denominação foi utilizada mais tarde para designar a unidade construtiva da matéria viva. Em 1838, os cientistas alemães **Schleiden** e **Schwann** formularam uma teoria celular propondo que os seres vivos em geral — animais e vegetais — são constituídos de células. Em 1855, o patologista alemão Rudolf Ludwig Karl **Virchow** propôs que toda célula se origina de outra célula preexistente. Uma desuascitação, feita em latim, tornou-se célebre: "*Omnis cellula ex cellula*", que significa "Toda célula se origina de outra célula". Hoje sabemos, entre outras coisas, que as reações metabólicas próprias de nosso organismo ocorrem nas células.

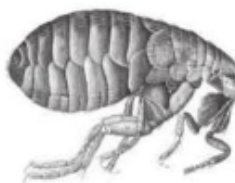
A Citologia, importante ramo da Biologia, teve a partir do século XIX um rápido desenvolvimento. Esse avanço foi capitaneado pelo microscópio, um dos mais importantes instrumentos ópticos, que também passou por significativa evolução. Além de se prestar ao estudo da célula e de microrganismos, o microscópio é uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de vacinas e medicamentos que permitem erradicar doenças, laborando, assim, em prol da saúde dos seres humanos.

Microscópio composto utilizado por Hooke em suas pesquisas.



Science and Society / P. Evans/Oxford & Co. para Museum, London

Fig. Robert-Hook (1665-1702) / MICRORGANISMOS



Desenho de uma pulga como foi observada por Hooke em seu equipamento. Essa ilustração foi feita pelo próprio Hooke e publicada em sua obra *Micrographia*.

O físico e naturalista inglês Joseph Jackson **Lister** (1786-1859) realizou significativas melhorias no microscópio óptico, dotando o instrumento de aumentos ainda maiores.



Joseph Jackson Lister. Fotografia de Emery Walker, Museu de Ciências, Londres.

A Astronomia que antecedeu ao século XVII, muito ligada à Astrologia e a concepções não científicas, utilizava astrolábios, quadrantes, sextantes e esferas armilares. Um instrumento revolucionário descoberto na Holanda serviu de ferramenta para que o italiano **Galileu Galilei** (1564-1642) elaborasse um novo mapa celeste e desse forte apoio à Teoria Heliocêntrica, do polonês Nicolau **Copérnico** (1473-1543). Galileu construiu versões mais sofisticadas da luneta original, que lhe permitiram observar detalhadamente as manchas solares, as crateras lunares, os anéis de Saturno e os satélites de Júpiter.



Lunetas projetadas e utilizadas por Galileu no século XVII. Museu Galileu, Florença, Itália.

Os telescópios atuais são uma evolução das primeiras lunetas, e esses dispositivos constituem janelas reveladoras através das quais contemplamos o Universo em busca de respostas a perguntas primordiais, como: De onde viemos? Para onde vamos?

Os instrumentos ópticos costumam ser classificados em dois grupos: **instrumentos de projeção** e **instrumentos de observação**.

Grupo I: instrumentos de projeção

Caracterizam-se por formar imagem final real, que é projetada em uma tela difusora (tela cinematográfica) ou em um anteparo fotossensível (filme fotográfico ou conversor eletrônico). Pertencem a esse grupo as câmeras fotográficas, as filmadoras e os projetores em geral.

Grupo II: instrumentos de observação

Distinguem-se por formar imagem final virtual, que serve de objeto real para um observador, cujo bulbo do olho se associa ao instrumento. Fazem parte desse grupo a lupa, o microscópio composto, as lunetas e os telescópios.

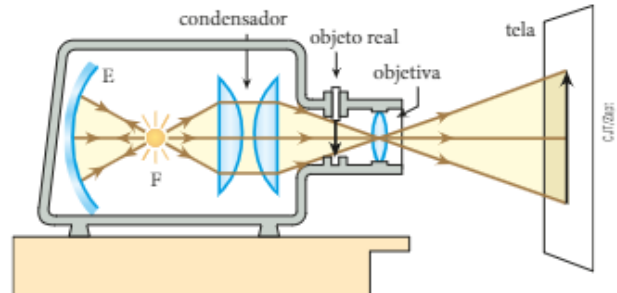
As próximas seções fazem uma breve apresentação dos principais instrumentos ópticos, sem, no entanto, entrar em pormenores funcionais ou técnicos.

2. INSTRUMENTOS ÓPTICOS

Trata-se de um dispositivo que fornece, de um objeto real – arquivo eletrônico, diapositivo (*slide*) ou filme –, uma imagem real projetada em uma tela. A imagem final é invertida (na vertical e na horizontal) e ampliada e

pode comportar-se como objeto real para vários espectadores ao mesmo tempo. É importante salientar que, para melhor visualização da imagem projetada, o equipamento deve operar no interior de um ambiente escurecido.

O esquema abaixo representa, em corte, um projetor simplificado.

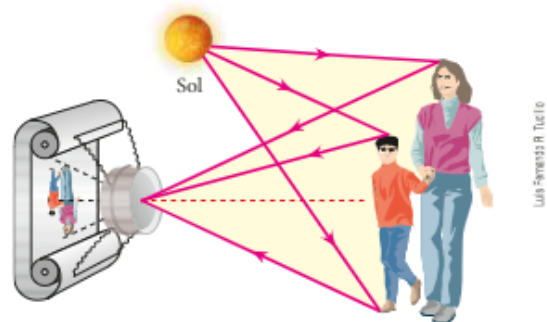


Observe que a “objetiva” do projetor é um sistema **convergente** de lentes. O espelho côncavo E, em cujo centro de curvatura se posiciona a fonte de luz F, tem por função minimizar as perdas de energia luminosa.

Câmara fotográfica

É um dispositivo destinado à fixação de imagens. Em linhas gerais, ocorre o seguinte: a objetiva da câmera (sistema **convergente** formado por uma ou mais lentes) projeta a imagem real e invertida do motivo da fotografia sobre um anteparo fotossensível em que, devido a fenômenos fotoquímicos ou fotoeletrônicos, ela fica gravada.

Convém destacar que o filme fotográfico (ou conversor eletrônico) é colocado no interior de uma câmara escura; a quantidade de luz que aí penetra é graduada por um mecanismo denominado **diafragma**. Outro importante componente das câmeras é o **obturador**, que regula o intervalo de tempo durante o qual o filme (ou conversor eletrônico) fica exposto à luz.



Nas fotografias mais comuns, o objeto a ser fotografado é iluminado pela luz solar e esta é captada pela câmera por reflexão. A imagem projetada sobre o filme (ou conversor eletrônico) é invertida, e a inversão ocorre tanto na vertical como na horizontal. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Uma tecnologia já consagrada é a das câmeras digitais. Nesses dispositivos, as imagens são captadas opticamente, porém, em vez de serem gravadas em filmes fotográficos ou em fitas magnéticas, são digitalizadas e armazenadas em cartões de memória ou *chips* eletrônicos. Com isso, é possível obter imagens com alta definição, que podem ser visualizadas imediatamente no próprio equipamento ou na tela de um computador. A ágil e perfeita transmissão dessas imagens pela internet facilita a comunicação entre pessoas e também as atividades profissionais, como a medicina e o jornalismo.



Modelo de câmera digital juntamente com o *chip* onde são armazenados os dados.

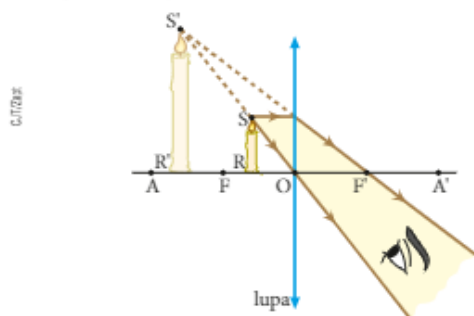
Lupa ou microscópio simples

Esse dispositivo nada mais é do que um sistema **convergente**, de distância focal da ordem de centímetros.

Precursora dos instrumentos ópticos de grande ampliação, a lupa é utilizada como lente de aumento em diversas atividades, como a confecção de joias, o conserto de relógios, a filatelia, o estudo de insetos, a criminalística, entre outras.

Como veremos adiante, a lupa também pode ser a lente ocular de equipamentos mais sofisticados.

De um objeto real situado entre o foco principal objeto e o centro óptico, a lupa fornece uma imagem virtual, direita e ampliada. Convém destacar que, para o olho do observador, a imagem fornecida pela lupa comporta-se como objeto real. Veja, na figura, o traçado da imagem do objeto RS.



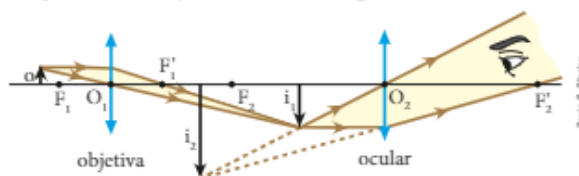
Os aumentos fornecidos pelas lupas raramente excedem a 10 vezes. Lupas que proporcionam aumentos da ordem de uma dezena de vezes têm distância focal pequena, o que torna seu diâmetro também pequeno, comprometendo o brilho da imagem e sua boa visualização.

Microscópio composto

É um instrumento de aumento constituído basicamente de dois sistemas **convergentes** de lentes associados coaxialmente: o primeiro é a **objetiva** (distância focal da ordem de milímetros), que responde pela captação da primeira imagem do objeto; o segundo é a **ocular**, que, operando como lupa, forma a imagem final, a qual se comporta como objeto para o olho do observador.

O objeto a ser analisado posiciona-se um pouco além do foco objeto da objetiva, que conjuga a ele uma imagem real, invertida e ampliada. Essa imagem, formada entre o foco objeto e o centro óptico da ocular, comporta-se como objeto para a ocular, que conjuga a ele uma imagem final virtual, direita e ampliada.

Observe, na figura a seguir, um esquema da formação da imagem em um microscópio composto. Tomando por base o objeto inicial, a imagem final é invertida.



Em relação à objetiva, o aumento linear transversal é dado por: $A_{ob} = \frac{i_1}{o}$

Em relação à ocular, o aumento linear transversal é calculado por: $A_{oc} = \frac{i_2}{i_1}$

Para o microscópio composto, temos: $A = \frac{i_2}{o}$

Multiplicando o numerador e o denominador da última expressão por i_1 , temos:

$$A = \frac{i_2}{o} \cdot \frac{i_1}{i_1} \Rightarrow A = \frac{i_1}{o} \cdot \frac{i_2}{i_1}$$

Portanto: $A = A_{ob} \cdot A_{oc}$

A ampliação total fornecida por um microscópio composto é dada pelo **produto** dos aumentos da objetiva e da ocular.

É importante notar que nos microscópios compostos o aumento linear transversal nunca excede a algumas centenas de vezes, ficando em média na faixa de 300 vezes. Em condições excepcionais, conseguem-se ampliações até pouco acima de mil vezes. Nesses casos, porém, intervêm de forma decisiva a difração da luz dentro do instrumento, o que inibe qualquer tentativa de obtenção de ampliações ainda maiores.

Os microscópios ópticos ou compostos são largamente utilizados em laboratórios de biologia e de análises clínicas. Essa grande aceitação deve-se ao fato de esses instrumentos serem compatíveis com pequenos objetos, células, tecidos e microrganismos normalmente examinados.

Fotografia de um microscópio composto equipado com objetivas cambiáveis e duas oculares.



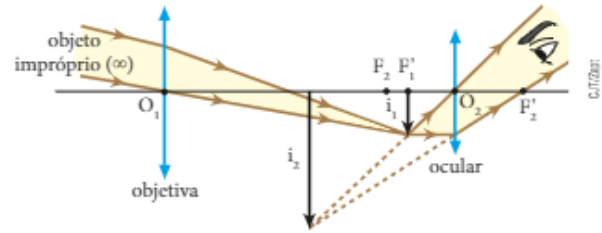
Em alguns casos, entretanto, como no estudo da estrutura de materiais, há a necessidade de aumentos de dezenas de milhares de vezes. Recorre-se, então, ao microscópio eletrônico, que opera com feixes de elétrons no lugar de feixes de luz. Nesses equipamentos, as partículas são defletidas por campos elétricos e magnéticos, proporcionando aumentos da ordem de 100 mil vezes. O que o pesquisador observa não é uma imagem óptica, disponível em uma ocular, mas uma figura gravada em filme fotográfico ou exibida no monitor de um computador.

Lunetas

São instrumentos formados basicamente por dois sistemas **convergentes** de lentes, associados coaxialmente: o primeiro é a **objetiva** (distância focal da ordem de decímetros ou metros), que capta a primeira imagem do objeto; o segundo é a **ocular**, que, operando como lupa, conjuga a imagem final, a qual se comporta como objeto para o olho do observador.

Há duas categorias de lunetas: as **astronômicas**, utilizadas na observação de objetos longínquos, como os corpos celestes, e as **terrestres**, empregadas para visar objetos não muito afastados. As lunetas terrestres são muito úteis, por exemplo, na navegação.

No caso da luneta astronômica, a luz emanada de um corpo muito afastado (teoricamente, "no infinito") incide na objetiva, que forma uma imagem real e invertida. Em razão da grande distância entre o objeto e a objetiva, a imagem conjugada por essa lente forma-se em seu plano focal imagem. Tal imagem, posicionada entre o foco objeto e o centro óptico da ocular, comporta-se como objeto para a ocular, que faz corresponder a ele uma imagem final virtual, direita e aumentada. Essa imagem final, porém, é invertida em relação ao objeto inicial. O esquema a seguir ilustra o exposto.



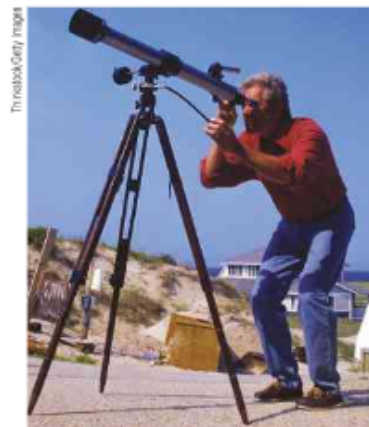
As lunetas não fornecem aumentos lineares dos corpos observados; só possibilitam sua visualização em ângulos visuais ampliados, o que dá aos usuários melhores condições de observação. Por isso elas são denominadas **instrumentos de aproximação**.

Seja θ_0 o ângulo visual segundo o qual um corpo distante é observado a olho nu e θ o ângulo visual segundo o qual esse mesmo corpo é observado da mesma posição por meio de uma luneta. Por definição, o **aumento visual** ou **aumento angular** para essa luneta é a grandeza adimensional **G**, dada por: $G = \frac{\text{tg } \theta}{\text{tg } \theta_0}$

Sendo f_{ob} a distância focal da objetiva e f_{oc} a distância focal da ocular, pode-se demonstrar que o aumento angular de uma luneta focalizada para obter a imagem de um objeto impróprio ("situado no infinito") fica determinado por:

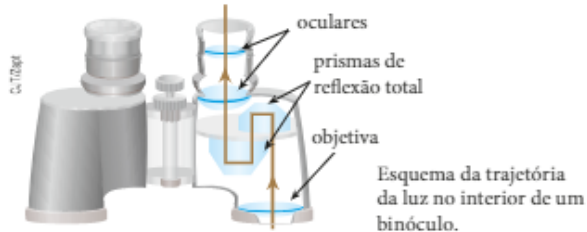
$$G = \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

As lunetas astronômicas podem ser utilizadas como lunetas terrestres, mas, na prática, há alguns inconvenientes. Elas geralmente possuem dimensões avantajadas e, por causa da alta qualidade de seus componentes, têm custo elevado. Além disso, conforme vimos aqui, as imagens finais são invertidas em relação aos objetos iniciais, o que, tratando-se de seu emprego como luneta terrestre, seria um transtorno.



Luneta sobre tripé com o observador próximo à ocular.

Os binóculos são instrumentos de aproximação constituídos pela junção de duas lunetas terrestres. Há quem os utilize em *shows*, eventos esportivos e até em peças de teatro. Também são empregados por policiais rodoviários para observar o trânsito nas estradas.



A construção das lunetas terrestres, embora seja parecida com a das lunetas astronômicas, conta com

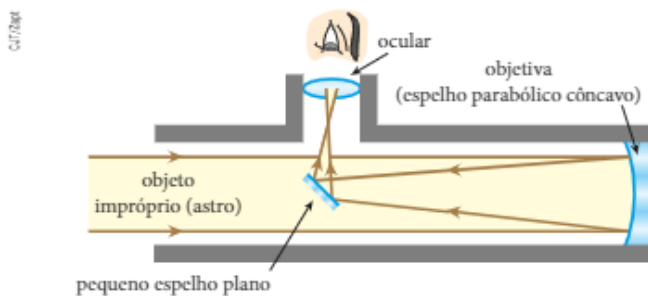
muitas simplificações. As lunetas terrestres são menores, custam menos e dispõem de um sistema de ajuste da imagem final, formado por uma ou mais lentes, que é denominado **veículo**. A correção da imagem final também pode ser feita por meio de prismas de reflexão total, como ocorre nos binóculos, que nada mais são que duas pequenas lunetas terrestres associadas.

Nos grandes observatórios de Astronomia, para eliminar os inconvenientes das aberrações de esfericidade e cromáticas, próprias das lentes, são utilizados, na função de objetiva, espelhos parabólicos côncavos.

Desse modo, os instrumentos de observação que geram a primeira imagem do astro por reflexão, e não por refração da luz, deixam de ser chamados de lunetas e passam a ser denominados **telescópios**.

... e Newton foi além!

O precursor dos telescópios modernos foi construído pelo inglês Isaac Newton (1642-1727) no século XVII. Ele aprimorou a luneta de Galileu, utilizando como objetiva um espelho parabólico côncavo em substituição à tradicional lente convergente.



Telescópio newtoniano de reflexão (1671). Sociedade Real, Londres, Inglaterra.

Saindo da atmosfera – do Hale ao Hubble

Muito se sabe hoje sobre a Lua, sobre os planetas, a nossa galáxia, outras galáxias, enfim, sobre o Universo. Seria possível dissociar esse conhecimento dos instrumentos ópticos de observação astronômica?

O advento dos telescópios descortinou aos olhos do ser humano um panorama quase sem limites, muito mais amplo que o disponível a olho nu.

Há muitos telescópios ópticos instalados em várias partes do mundo, como o Large Binocular Telescope (EUA), no Arizona, o Grande Telescópio das Canárias (GTC), nas Ilhas Canárias, o Keck 1 e o Keck 2, no Havaí, os Very Large Telescopes (VLT), no Chile, entre outros, em geral em locais de clima seco, com discreta presença de nuvens, que dificultam a observação. Há outros, ainda maiores, em construção. Pelo porte e por razões históricas, porém, um dos mais importantes é o do Monte Palomar, na Califórnia (EUA). Idealizado pelo astrônomo estadunidense George Ellery Hale (1868-1938),



Fotografia do interior da cúpula giratória em que está instalado o telescópio Hale, em Monte Palomar.

esse gigante, conhecido como o telescópio **Hale**, foi inaugurado em 3 de junho de 1948 e está instalado no interior de uma cúpula de 40 m de altura, a 1 830 m de altitude. Os ajustes de posição, tanto da cúpula como do telescópio, são feitos por sofisticados mecanismos acionados por cinco motores. Sua objetiva é um enorme espelho parabólico côncavo de vidro revestido por uma película de alumínio polido, com 5 m de diâmetro e massa em torno de 20 toneladas.

O Hale trouxe à Astronomia um grande número de dados que deram sustentação a várias teorias, como a dos buracos negros e a do Universo em expansão.

Os telescópios terrestres, entretanto, contam com um grande inconveniente: a barreira constituída pela atmosfera, que bloqueia diversas radiações provenientes do cosmo, impedindo-as de chegar aos observatórios. Devemos lembrar também que a presença da atmosfera faz com que os astros sejam observados em posições diferentes de sua posição real. Além disso, a cintilação provocada pela movimentação das camadas de ar dificulta a visualização, sobretudo das estrelas mais distantes.

No dia 26 de abril de 1990, foi posto em órbita pela nave **Discovery** o mais caro e sofisticado supertelescópio de todos os tempos: o **Hubble**, que tem esse nome em homenagem ao astrônomo estadunidense Edwin Powell Hubble (1889-1953).

O equipamento levou 20 anos para ser montado. Foi projetado para permanecer pelo menos dez anos no espaço, operando com uma eficiência superior à de qualquer telescópio terrestre, especialmente por estar livre das distorções e interferências impostas pela atmosfera.

O telescópio espacial Hubble, com uma massa próxima de 11 toneladas, tem 13,3 m de comprimento. Seu corpo principal apresenta 4,26 m de diâmetro. Quando os painéis solares estão armados, o conjunto atinge uma largura de 12 m. O sistema óptico compreende um espelho côncavo primário de 2,4 m de diâmetro e um espelho convexo secundário de 30 cm de diâmetro. Os raios luminosos provenientes dos corpos celestes, uma vez refletidos na superfície do espelho primário, são dirigidos ao espelho secundário, que, por sua vez, os envia a sistemas eletrônicos que convertem a luz captada em informações digitais.

O Hubble tem uma capacidade fantástica de distinguir detalhes. Ele pode detectar um botão de camisa a 1 200 km de distância ou mostrar se deu cara ou coroa em uma moeda lançada a 10 000 km.

Os sinais transmitidos por esse aparelho, recebidos dos pontos mais remotos do espaço, já deram aos cientistas mais informações que todos os telescópios terrestres juntos. Hoje se tem uma ideia mais clara da idade do Universo. Isso é muito importante, pois, em Astronomia, ver corpos mais distantes significa receber informações de épocas mais remotas. Ao observar um astro a 10 bilhões de anos-luz, por exemplo, o telescópio vê como ele era há 10 bilhões de anos, pois esse foi o tempo gasto pela luz, a partir desse corpo, para atingir o instrumento.

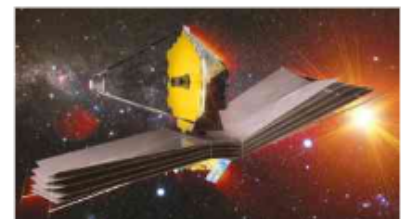
Assim, as imagens do Hubble estão mostrando o Universo em sua juventude, muito antes de a própria Terra existir.

O Hubble, que já passou por três grandes sessões de manutenção em pleno espaço, deverá deixar de operar em um futuro próximo, já que muitos de seus equipamentos ficarão obsoletos ou extinguirão sua vida útil. O novo supertelescópio substituto, o **Webb**, em homenagem a James Webb, coordenador da Agência Espacial Norte-americana (Nasa) por ocasião do projeto Apollo, que levou o homem à Lua, está em fase final de construção e poderá ser colocado em operação até 2020. Trata-se de um equipamento muito mais sofisticado que o Hubble, dotado de um espelho primário de 6,5 m de diâmetro, constituído por células refletivas de berílio com formato hexagonal. O Webb tem um custo estimado em US\$ 8,8 bilhões e sua órbita estará além da órbita lunar. Por meio desse telescópio, será possível obter imagens de alta definição das primeiras galáxias, que contarão mais detalhadamente a origem e a evolução do Universo.



THESSCO/DAK Images

As pessoas que têm uma boa visão podem enxergar sem o auxílio de instrumentos ópticos apenas 6 mil estrelas, aproximadamente. Com o telescópio espacial Hubble (acima), esse número é indeterminado, o que permitiu a elaboração de um novo e muito mais amplo mapa celeste.



ESA, STS/NASA/ESA/ESA

Concepção artística do telescópio espacial Webb. O projeto é de responsabilidade da Nasa em parceria com as agências espaciais canadense e europeia. O equipamento será altamente sensível às radiações na faixa do infravermelho, que revelarão detalhes dos primórdios do Universo, em eras próximas ao *big-bang*.

QUESTÕES COMENTADAS



- 1** A objetiva de uma câmera fotográfica tem distância focal de 100 mm e é montada num mecanismo tipo folie, que permite seu avanço e retrocesso. A câmera é utilizada para tirar duas fotos: uma aérea e outra de um objeto distante 300 cm da objetiva.
- Qual o deslocamento da objetiva de uma foto para a outra?
 - Da foto aérea para a outra, a objetiva afasta-se ou aproxima-se do filme?

RESOLUÇÃO

- a) Na obtenção da foto aérea, o motivo da foto comporta-se como objeto impróprio. Assim, sua imagem forma-se no plano focal da objetiva: $p'_1 \cong f$. Logo: $p'_1 = 100$ mm

Para a outra foto, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{100} = \frac{1}{300} + \frac{1}{p'_2}$$

Logo: $p'_2 = 150$ mm

Seja d o deslocamento pedido. Então, é correto que:

$$d = p'_2 - p'_1 \Rightarrow d = 150 \text{ mm} - 100 \text{ mm} \Rightarrow d = 50 \text{ mm}$$

- b) Como $p'_2 > p'_1$, pode-se concluir que, da foto aérea para a outra, a objetiva afasta-se do filme.

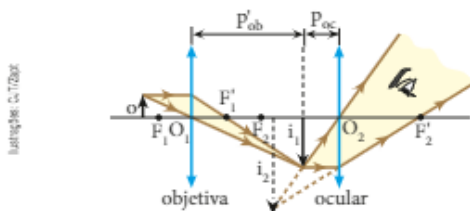
Respostas: a) 50 mm; b) A objetiva afasta-se do filme.

- 2** Um microscópio composto é constituído de dois sistemas convergentes de lentes, associados coaxialmente: um é a objetiva, com distância focal de 4 mm, e o outro é a ocular, com distância focal de 6 cm. De um objeto distante 5 mm da objetiva, o microscópio fornece uma imagem virtual, afastada 78 cm da ocular. Determine:

- o aumento produzido pela objetiva;
- o aumento produzido pela ocular;
- a ampliação produzida pelo microscópio;
- a distância da objetiva à ocular.

RESOLUÇÃO

O esquema seguinte representa a situação proposta.



- a) Para a objetiva: $\frac{1}{f_{ob}} = \frac{1}{p_{ob}} + \frac{1}{p'_{ob}}$

Com $f_{ob} = 4$ mm e $p_{ob} = 5$ mm, calculamos p'_{ob} :

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{5} + \frac{1}{p'_{ob}} \Rightarrow p'_{ob} = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$$

$$\text{Logo: } A_{ob} = -\frac{p'_{ob}}{p_{ob}} = -\frac{20 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \Rightarrow A_{ob} = -4$$

- b) Para a ocular: $\frac{1}{f_{oc}} = \frac{1}{p_{oc}} + \frac{1}{p'_{oc}}$

Com $f_{oc} = 6$ cm e $p'_{oc} = -78$ cm, calculamos p_{oc} :

$$\frac{1}{6} = \frac{1}{p_{oc}} - \frac{1}{78} \Rightarrow p_{oc} \cong 5,6 \text{ cm}$$

Logo, o aumento produzido pela ocular é calculado por:

$$A_{oc} = -\frac{p'_{oc}}{p_{oc}} = -\frac{(-78 \text{ cm})}{5,6 \text{ cm}} \Rightarrow A_{oc} \cong 14$$

- c) Para o microscópio, a ampliação fica determinada por:

$$|A| = |A_{ob}| \cdot |A_{oc}| \Rightarrow |A| = 4 \cdot 14 \Rightarrow |A| = 56$$

- d) A distância da objetiva à ocular d é tal que: $d = p'_{ob} + p_{oc}$

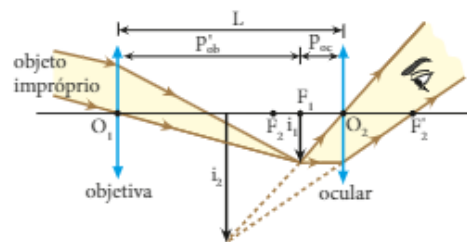
$$d = 2 \text{ cm} + 5,6 \text{ cm} \Rightarrow d = 7,6 \text{ cm}$$

Respostas: a) -4; b) Aproximadamente 14; c) 56; d) 7,6 cm

- 3** Uma luneta é constituída de uma objetiva e uma ocular, associadas coaxialmente e acopladas a um tubo, cujo interior é fosco. Com o uso do referido instrumento, focaliza-se um corpo celeste, e a imagem final visada pelo observador forma-se a 60 cm da ocular. Sabendo que a objetiva e a ocular têm distâncias focais de 80 cm e 20 cm, respectivamente, calcule o comprimento da luneta (distância entre a objetiva e a ocular).

RESOLUÇÃO

O esquema seguinte representa a situação proposta.



Comprimento da luneta (L): $L = p'_{ob} + p_{oc}$. O corpo celeste, estando muito afastado da luneta, comporta-se como objeto impróprio para a objetiva, que conjuga a ele uma imagem em seu plano focal. Assim: $p'_{ob} \cong f_{ob} = 80$ cm

A imagem produzida pela objetiva faz o papel de objeto real para a ocular, que dá a imagem final virtual visada pelo observador.

Em relação à ocular, tem-se:

$$\frac{1}{f_{oc}} = \frac{1}{p_{oc}} + \frac{1}{p'_{oc}} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{p_{oc}} - \frac{1}{60} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{p_{oc}} = \frac{1}{20} + \frac{1}{60} \Rightarrow p_{oc} = 15 \text{ cm}$$

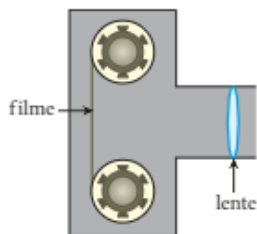
Com $p'_{ob} \cong 80$ cm e $p_{oc} = 15$ cm, determinamos o comprimento da luneta:

$$L = p'_{ob} + p_{oc} = 80 \text{ cm} + 15 \text{ cm} \Rightarrow L = 95 \text{ cm}$$

Resposta: 95 cm

QUESTÕES PROPOSTAS FAÇA NO CADERNO.

4. Para se obter uma fotografia nítida, é necessário que a imagem produzida pela objetiva da câmera se forme exatamente sobre o filme fotográfico ou sensor eletrônico digital. Considere uma câmera fotográfica rudimentar, como a esquematizada ao lado, que utiliza como objetiva uma lente convergente de distância focal $f = 50$ mm. A distância entre essa lente e o filme fotográfico é fixa, valendo $p' = 52$ mm.



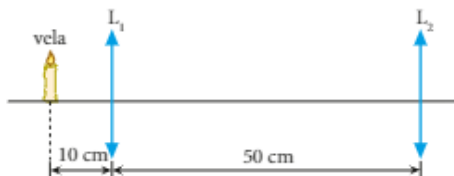
Com base nessas informações, responda:

- A que distância da objetiva deve se posicionar um objeto para que seja obtida uma fotografia perfeitamente nítida dele?
- Sabendo-se que a altura máxima da imagem não pode exceder 36,0 mm, qual deve ser a altura do objeto para que ele seja fotografado em toda a sua extensão?

5. Um projetor rudimentar fornece, para um fotograma quadrado de 5,0 cm de lado, uma imagem também quadrada, porém com 50 cm de lado. Sabendo que a objetiva do projetor é constituída pela justaposição de duas lentes com vergências de $-1,0$ di e $+6,0$ di, calcule:

- a distância do fotograma ao centro óptico da objetiva.
- a distância da tela ao centro óptico da objetiva.

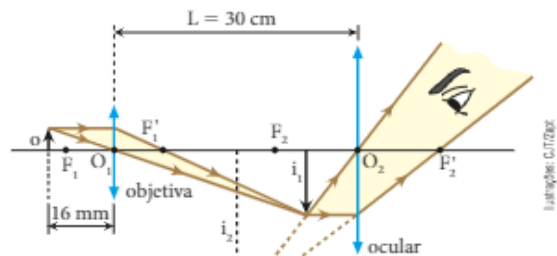
6. Duas lentes convergentes, L_1 e L_2 , de distâncias focais respectivamente iguais a 8 cm e 5 cm, são montadas como indicado.



Recebendo raios luminosos oriundos de uma vela situada a 10 cm da lente L_1 e impondo-se a condição de que esses raios devem atravessar sequencialmente ambas as lentes, calcule:

- a distância, contada a partir de L_1 , em que se situa a imagem da vela, formada pela primeira lente (L_1);
- a distância, contada a partir de L_1 , em que se situa a imagem da vela, formada pela segunda lente (L_2).

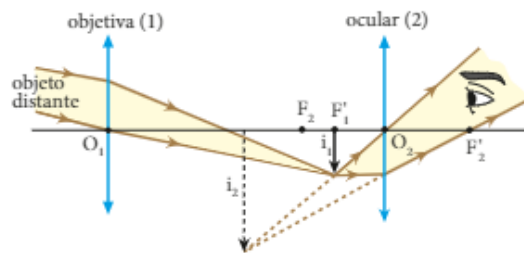
7. A figura a seguir representa esquematicamente um microscópio óptico constituído por dois sistemas convergentes de lentes, dispostos coaxialmente: um é a objetiva, com distância focal de 15 mm, e o outro é a ocular, com distância focal de 9,0 cm.



Sabendo que para o objeto o o microscópio fornece a imagem final i_2 , calcule o módulo do aumento linear transversal produzido pelo instrumento.

8. Um certo instrumento óptico consta de duas lentes com distâncias focais iguais em módulo. Uma das lentes é convergente e a outra é divergente. As lentes são montadas sobre um eixo comum, a uma determinada distância d uma da outra. Sabe-se que se trocarmos a ordem das lentes, mantendo a mesma distância entre elas, a imagem real da Lua, projetada pelo sistema, se desloca 20 cm. Qual é a distância focal de cada uma das lentes?

9. A invenção da luneta trouxe um novo alento à Astronomia, que adicionou aos velhos astrolábios, quadrantes, sextantes e esferas armilares um instrumento sem precedentes, o qual permitiu a elaboração de um novo mapa celeste. O italiano Galileu Galilei aprimorou a luneta recém-criada na Holanda e chegou a conclusões definitivas a respeito do Sol, da Lua e de alguns planetas conhecidos em sua época. Resumidamente, uma luneta astronômica constitui-se de dois sistemas convergentes de lentes: a objetiva e a ocular. É um instrumento de ampliação que permite a visualização de astros com ângulos visuais maiores que aqueles que seriam verificados a olho nu. Na figura a seguir estão traçados os raios de luz que produzem a imagem final (I_2) contemplada por um observador.



Considerando que as distâncias focais da objetiva e da ocular valem respectivamente 60 cm e 30 cm e que a distância entre essas duas lentes é de 80 cm, calcule a distância entre a imagem final que o instrumento conjuga a um astro remoto e a lente objetiva.

3. ÓPTICA DA VISÃO

Com os olhos podemos manter íntima interação com o mundo que nos cerca. enxergamos animais, vegetais, objetos animados e inanimados, enfim, qualquer coisa que nos envie luz. Por meio da visão, recebemos dos corpos informações referentes a formas, cores, distâncias, movimentos etc.

O olho, em essência, é um receptor de luz que consegue converter energia luminosa em impulsos elétricos, que, no cérebro, são interpretados no centro da visão.

Pretendemos fazer, aqui, um primeiro estudo da óptica da visão. Apresentaremos resumidamente o funcionamento básico do olho normal e comentaremos os principais defeitos visuais, bem como os respectivos modos de correção.

O bulbo do olho humano

No esquema a seguir vemos um corte transversal do bulbo do olho humano, no qual são destacados os por menores relevantes à óptica da visão.

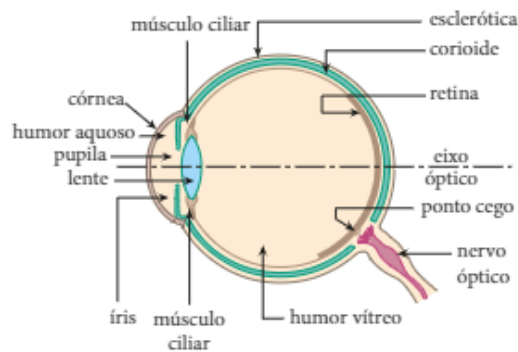
O bulbo do olho tem a forma aproximada de uma esfera de 22 mm de diâmetro, que possui, em sua parte anterior, uma região mais abaulada, denominada **córnea**.

Com exceção da região da córnea, o bulbo do olho é revestido por uma parede opaca composta de três camadas principais: a externa, chamada **esclerótica**, com uma constituição couraçca esbranquiçada, que serve para dar estabilidade mecânica ao olho; a intermediária, chamada **corioide**, altamente vascularizada, cuja função é fazer a irrigação sanguínea do bulbo do olho; e a interna, chamada **retina**, composta das células sensoriais da visão, que se comunicam com o cérebro por meio de um cordão nervoso denominado **nervo óptico**. A retina reveste apenas parte da região posterior do bulbo do olho, denominada **fundo do olho**.

Adentrando-se o bulbo do olho a partir da córnea, passa-se por um líquido transparente, o **humor aquoso**. Logo após fica a **pupila**, um orifício circular de diâmetro variável, cuja função é graduar a quantidade de luz que penetra no olho.

A variação do diâmetro da pupila é feita por um conjunto de músculos que exercem sobre ela esforços radiais. Esses músculos, que respondem pela coloração característica do olho, constituem a **íris**. Depois da pupila, há a **lente**, que é flexível, deformável pela ação dos **músculos ciliares**. Em razão da maior ou menor compressão desses músculos, a lente tem sua vergência alterada, adequando o sistema ocular à visão de objetos a diferentes distâncias.

Depois da lente, fica a **câmara interna** do bulbo do olho, preenchida por uma substância transparente e gelatinosa chamada **humor vítreo**.



Representação esquemática em corte e em cores fantasia do bulbo do olho humano.

O sistema óptico do bulbo do olho conjuga a um determinado objeto uma imagem **real** e **invertida**, projetada no fundo do olho (retina). As informações luminosas que lá incidem são transformadas em sinais elétricos, que escoam pelo nervo óptico até o centro da visão (situado no cérebro). A decodificação dos sinais luminosos em sinais elétricos é feita pelas células sensoriais ou receptoras da visão: são os **cones** e **bastonetes**, que promovem a percepção das cores e do preto e do branco, respectivamente.

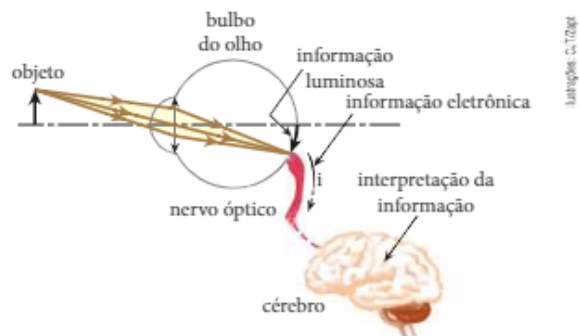


Ilustração esquemática com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Convém destacar que o sistema óptico constituído pelo bulbo do olho é **convergente**. Também é importante ressaltar que, embora a imagem retiniana seja invertida, o cérebro tem a faculdade de interpretá-la corretamente.

Adaptação visual

Em ambientes muito claros (comparáveis à luz diurna), verifica-se que a pupila apresenta um diâmetro que varia de 1,5 mm a 2,0 mm. Já em ambientes pouco claros (comparáveis à luz noturna), a pupila apresenta um diâmetro que varia de 8,0 mm a 10,0 mm.

Isso nos permite concluir que a pupila gradua o fluxo luminoso que adentra o bulbo do olho, protegendo a retina contra eventuais ofuscamentos. Aumentando a intensidade luminosa incidente no bulbo do olho, ocorre contração da pupila e diminuição da sensibilidade da retina. O fenômeno oposto acontece na redução da intensidade luminosa incidente. Essa propriedade que o bulbo do olho tem de se adequar à luminosidade ambiente se chama **adaptação visual**.



Fotografia de olho adaptado para um ambiente relativamente claro.



Fotografia de olho adaptado para um ambiente relativamente escuro.

Acomodação visual

Para que as imagens conjugadas pelo sistema óptico do bulbo do olho sejam nítidas, elas devem formar-se sobre a retina, cuja distância em relação à lente é constante – em média, igual a 15,0 mm. Assim, a distância da imagem projetada no fundo do olho em relação à lente é invariável, o que acarreta a constância da abscissa p' . Já os objetos visados por um observador estão a diferentes distâncias de seu olho, o que implica a variação da abscissa p .

Considerando a função dos pontos conjugados:

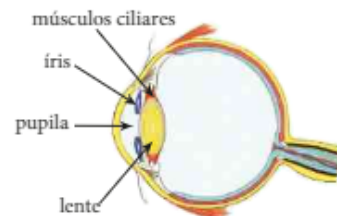
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

você pode observar que a constância de p' e a variação de p provocam a variação de f , que é a distância focal da lente.

Assim, depreende-se que a lente (que opera de modo praticamente elástico) tem distância focal variável, de acordo com as variações da distância do objeto ao olho. A variação da distância focal da lente é feita pelos músculos ciliares, por meio da maior ou da menor compressão destes sobre ela. Esse processo de ajuste da distância focal do sistema óptico do bulbo do olho à visão nítida de objetos diferentemente afastados é denominado **acomodação visual**.

A acomodação visual possibilita ao bulbo do olho a conjugação de imagens nítidas para objetos situados dentro de certo intervalo da reta visual, que é denominado **intervalo de acomodação** e se estende desde o ponto remoto até o ponto próximo.

- **Ponto remoto (PR):** É o ponto objeto para o qual a vista conjuga imagem nítida sem nenhum esforço de acomodação. Nesse caso, os músculos ciliares mostram-se relaxados e a lente assume **máxima distância focal**.
- **Ponto próximo (PP):** É o ponto objeto para o qual a vista conjuga imagem nítida com máximo esforço de acomodação. Nesse caso, os músculos ciliares mostram-se contraídos e a lente assume **mínima distância focal**. A distância do ponto próximo ao olho é denominada **distância mínima de visão distinta**.



Nesta representação esquemática do olho humano, com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia, aparecem em destaque os sistemas responsáveis pela **adaptação visual** (íris e pupila) e pela **acomodação visual** (músculos ciliares e lente).

Destaquemos que, para o olho normal (ou emetropia), o ponto remoto se localiza no “infinito”, enquanto o ponto próximo se situa, aproximadamente, a 25,0 cm do olho – um valor que tende a aumentar com a idade.

Defeitos visuais e sua correção

Os principais defeitos da visão são: a **miopia**, a **hipermetropia**, a **presbiopia**, o **astigmatismo** e o **estrabismo**.

Miopia

Este defeito consiste em um **alongamento** do bulbo do olho na direção anteroposterior.

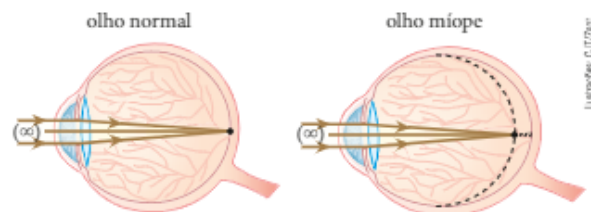
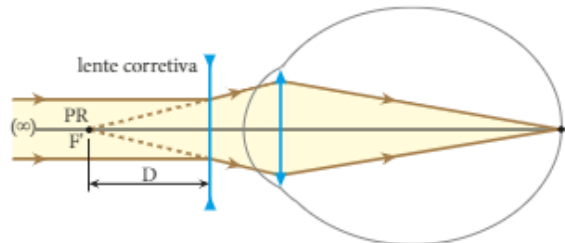


Ilustração do olho humano em corte e em cores fantasia.

O ponto remoto do olho míope é real, isto é, um olho míope não acomoda a visão para objetos impró-

prios, como ocorre no olho normal. Ao visar um objeto no “infinito”, o olho míope conjuga uma imagem real, situada antes da retina, que é vista desfocada (embaçada). Entretanto, a miopia favorece a visão de objetos próximos, pois o ponto próximo, para o olho míope, é mais próximo do olho que para o olho normal.

A correção é feita mediante o uso de **lentes divergentes**, que diminuem a vergência do sistema ocular.



Esquema de correção da miopia.

As lentes corretivas devem proporcionar ao olho míope a visão de objetos impróprios. Por isso, a um objeto “situado no infinito”, elas devem conjugar uma imagem virtual, posicionada no ponto remoto do olho.

Conclui-se, daí, que uma lente de correção deve ter distância focal de módulo igual à distância do ponto remoto ao olho, ou seja, $|f| = D$.

Em termos de vergência, tem-se: $|V| = \frac{1}{D}$

É importante observar que:

- as lentes divergentes corretivas da miopia são “negativas”, isto é: $f < 0$ e $V < 0$;
- no dimensionamento da distância focal (e da vergência) apresentado, foi desprezada a distância entre a lente corretiva e a lente ocular.

Hipermetropia

Este defeito consiste em um **encurtamento** do bulbo do olho na direção anteroposterior.

O olho hipermetrope, embora acomode a visão para objetos impróprios, o faz com algum esforço. Em condições de músculos ciliares relaxados, a um objeto no “infinito” ele conjuga uma imagem real, situada depois da retina. Com a intervenção dos músculos, porém, ocorre a acomodação e a visão de objetos longínquos torna-se perfeita. Na hipermetropia, o problema não reside na observação de objetos muito afastados, mas na visão de objetos próximos. O ponto próximo do olho hipermetrope situa-se mais distante do olho que o ponto próximo do olho normal.

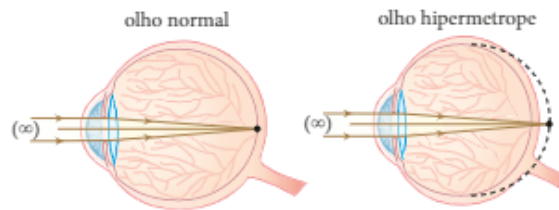
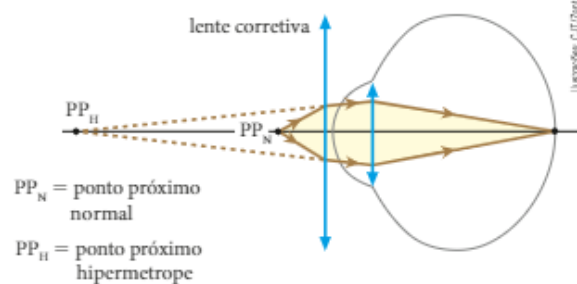


Ilustração do olho humano em corte e em cores fantasia.

A correção é feita com o uso de **lentes convergentes**, que aumentam a vergência do sistema ocular.



Esquema de correção da hipermetropia.

As lentes corretivas devem conjugar a um objeto real situado no ponto próximo normal (PP_N , a 25,0 cm do olho, em média) uma imagem virtual, localizada no ponto próximo hipermetrope (PP_H). Essa imagem comporta-se como objeto real para o sistema óptico do bulbo do olho.

Sendo d_N a distância mínima de visão distinta do olho normal e d_H a distância mínima de visão distinta do olho hipermetrope, a distância focal (e a vergência) da lente de correção fica determinada aplicando-se à situação do esquema anterior a **função dos pontos conjugados** (Equação de Gauss):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_N} - \frac{1}{d_H} \quad \text{ou} \quad V = \frac{1}{d_N} - \frac{1}{d_H}$$

É importante observar que:

- as lentes convergentes corretivas da hipermetropia são “positivas”, isto é, $f > 0$ e $V > 0$;
- no dimensionamento da distância focal (e da vergência) apresentado acima, foi desprezada a distância entre a lente corretiva e a lente ocular;
- na aplicação da Equação de Gauss, consideramos $p' < 0$, porque a imagem conjugada pela lente corretiva é virtual.

Presbiopia (ou vista cansada)

A presbiopia é um defeito que consiste no **enrijecimento dos músculos ciliares ou da própria lente natural do olho**, o que ocorre com o evoluir da idade.

A presbiopia é uma ametropia (defeito visual) comum às pessoas com idade superior a 40 anos, que, com a limitação de sua capacidade de acomodação visual, têm dificuldades em “ver de longe” e principalmente “de perto”.

No que diz respeito à visualização de objetos próximos, um portador de presbiopia apresenta dificuldades visuais semelhantes às de um portador de hipermetropia. Por isso, para a visão “de perto”, a correção também é feita com lentes convergentes, a exemplo do que ocorre na hipermetropia. Essas lentes colocam as imagens de objetos situados no ponto próximo normal no ponto próximo do olho defeituoso e, com isso, a lei-

tura de um texto, por exemplo, pode ser feita à distância de 25,0 cm, aproximadamente.

A correção da presbiopia é feita mediante o uso de **lentes bifocais** (ou multifocais), que têm uma região destinada à visão de objetos longínquos e outra destinada à visão de objetos próximos.



Ilustração de óculos com lentes bifocais.

Ilustração: C/ITZAR

AMPLIANDO O OLHAR

Um indivíduo eclético

Benjamin Franklin (1706-1790), notável figura dos Estados Unidos, atuou em diversas frentes: foi jornalista, editor, filantropo, abolicionista, político, meteorologista, cientista, inventor e hábil enxadrista.

No campo da ciência, Franklin se destacou por seus estudos em eletricidade estática que culminaram na proposição do para-raios. Tratou também dos processos de eletrização, especialmente da eletrização por atrito, de onde derivaram os rudimentos do **Princípio da Conservação da Carga Elétrica**, já que se estabelecia que a carga elétrica adquirida por um dos corpos atritados era de mesmo valor absoluto, mas de sinal contrário, à manifestada pelo outro corpo.

A Benjamin Franklin também é atribuída a invenção das lentes bifocais, em 1784, apropriadas à visão de perto e de longe. Em geral, a região inferior dessas lentes se presta à visão de objetos próximos, enquanto a região superior é apropriada à visão de objetos distantes.

Com o avanço das tecnologias para a fabricação de lentes corretivas da visão, porém, as lentes bifocais são agora fundidas em peça única, não mais apresentando a nítida separação que havia entre as regiões para visão de perto e de longe.



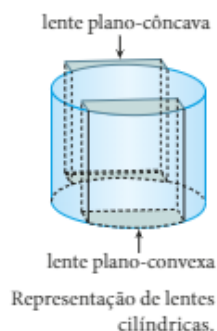
Réplica dos óculos bifocais de Franklin.

COLLEGE OF OPTOMETRISTS

Astigmatismo

Esse defeito consiste em imperfeições na simetria de revolução do sistema óptico ocular em torno de seu eixo óptico. Em geral, o astigmatismo deve-se a irregularidades na curvatura da córnea, eventualmente abrangendo também as paredes da lente natural do olho.

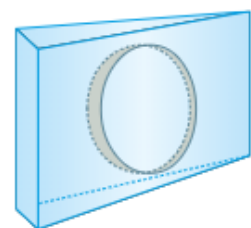
A correção é feita mediante o uso de **lentes cilíndricas**, que têm o objetivo de compensar a assimetria do sistema óptico ocular.



Estrabismo

O estrabismo é um defeito que consiste na incapacidade de dirigir simultaneamente as retas visuais dos dois olhos para o ponto visado.

A correção pode ser feita com o uso de lentes prismáticas, exercícios da musculatura de sustentação do bulbo do olho ou, em casos mais graves, cirurgia.



Representação de uma lente prismática.

Os velhos "fundos de garrafa"

No passado, quem tinha "altos graus" de miopia era obrigado a usar óculos com lentes divergentes muito grossas, que, por terem a região periférica mais espessa que a região central, se assemelhavam a verdadeiros fundos de garrafa. Contudo, a tecnologia de fabricação de lentes evoluiu de maneira notável e elas não são mais fabricadas a partir de vidro ou cristal, materiais que, entre outros inconvenientes, são muito pesados. Utilizam-se atualmente o acrílico e o policarbonato, materiais mais leves e maleáveis, que possibilitam a produção de óculos mais confortáveis e discretos.

Os atuais métodos de fabricação também possibilitam a produção de lentes **multifocais** (cada região da lente tem uma vergência específica) para portadores de miopia com astigmatismo, hipermetropia com astigmatismo ou presbiopia.

Os principais defeitos da visão, como a miopia, a hipermetropia e o astigmatismo, também podem ser corrigidos com **lentes de contato**. Elas são circulares, feitas com material flexível e transparente e usadas diretamente sobre a córnea. Por ficarem em contato com o bulbo do olho, as lentes de contato eliminam alguns inconvenientes dos óculos, como a alteração de fisionomia, o desconforto inerente a eles, bem como a limitação do campo de visão corrigida.

Para a correção da miopia, as lentes de contato têm as bordas mais espessas que a região central; são chamadas lentes **minus** ou côncavas. Para a correção da hipermetropia, elas têm a região central mais espessa que as bordas; são denominadas lentes **plus** ou convexas. Finalmente, para a correção do astigmatismo, essas lentes têm espessura variável de modo a compensarem a falta de simetria esférica da córnea; são chamadas de lentes **tóricas**.

As lentes de contato podem ser usadas também para fins estéticos, permitindo a modificação artificial da coloração da íris do usuário.

Em qualquer caso, no entanto, essas lentes requerem o uso sistemático de soros fisiológicos, lubrificantes que, somados aos fluidos lacrimais produzidos naturalmente pelo olho, servem para atenuar a fricção entre a lente e a córnea.

A maioria dos defeitos visuais pode ter correção definitiva por meio de cirurgias a *laser*. Essas intervenções consistem em moldar a córnea adequadamente para eliminar as deformidades do bulbo do olho, ou seja, o **olho longo**, no caso da miopia, e o **olho curto**, no caso da hipermetropia, devem assumir o formato normal.



Modelo de óculos do tipo "fundo de garrafa".

com Maria Figueiredo - Faculdade de Medicina



Como surgiram os primeiros óculos?

Os primeiros óculos de que se tem notícia foram inventados justamente para os presbíopes, que já não conseguiam enxergar de perto. Na Grécia antiga, filósofos usavam vidros de faces arredondadas para ler melhor. No século XIII, cristaleiros italianos criaram os primeiros óculos, que originaram uma sequência surpreendente de modelos, os quais costumam variar em função de valores e costumes determinantes da moda de cada época. Nesse afresco, de 1532, tem-se a primeira representação de alguém usando óculos.

Pintura de Marinus C. van Reymerswaele, do fim do século XVI. Kunsthistorisches Museum, Gemaeldegalerie, Viena, Áustria.



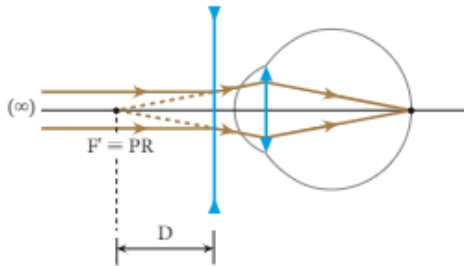
É em um afresco de um artista anônimo

QUESTÕES COMENTADAS



10 Considere um olho míope. Se seu ponto remoto está a 50 cm de distância, qual é o tipo da lente corretiva a ser utilizada (convergente ou divergente) e qual é sua vergência? (Considere desprezível a distância entre a lente e o olho.)

RESOLUÇÃO



Para um objeto impróprio, a lente corretiva deve fornecer uma imagem virtual situada no ponto remoto do olho míope. Essa imagem funciona como objeto real para o olho. A lente corretiva deve ser divergente e o módulo da sua vergência deve igualar-se ao inverso da distância máxima de visão distinta do olho míope:

$$|V| = \frac{1}{D}$$

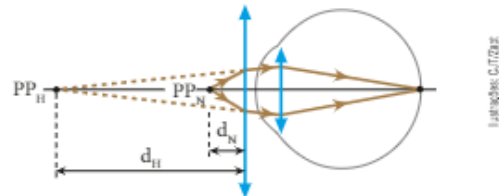
$$|V| = \frac{1}{50 \text{ cm}} = \frac{1}{0,50 \text{ m}} \Rightarrow |V| = 2,0 \text{ di}$$

A lente corretiva deve ser divergente e sua vergência deve valer $-2,0 \text{ di}$.

Resposta: A lente corretiva deve ser divergente e sua vergência deve valer $-2,0 \text{ di}$.

11 Em um olho hipermetrope, o ponto próximo situa-se a 50 cm de distância. Sabendo que no olho emetrope a distância mínima de visão distinta vale 25 cm, determine a vergência da lente corretiva para a hipermetropia considerada (despreze a distância da lente corretiva ao olho).

RESOLUÇÃO



Para um objeto situado no ponto próximo emetrope (normal), a lente corretiva deve produzir uma imagem virtual, posicionada no ponto próximo hipermetrope. Essa imagem desempenha para o olho o papel de objeto real.

A lente corretiva deve ser convergente e sua vergência é calculada conforme segue: $V = \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$

Temos: $|p| = d_N = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$

$|p'| = d_H = 50 \text{ cm} = 0,50 \text{ m}$.

Lembrando que a imagem é virtual ($p' < 0$), temos:

$$V = \frac{1}{0,25} - \frac{1}{0,50} \Rightarrow V = +2,0 \text{ di}$$

Portanto,

A lente corretiva deve ser convergente e sua vergência deve valer $+2,0 \text{ di}$.

Resposta: A lente corretiva deve ser convergente e sua vergência deve valer $+2,0 \text{ di}$.



QUESTÕES PROPOSTAS



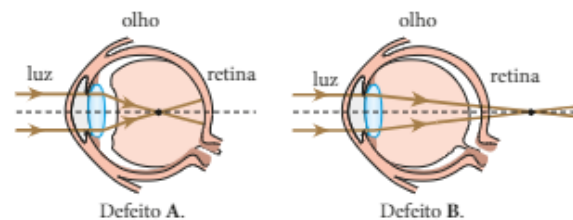
FAÇA NO CADERNO.

12. Para um olho emetrope (ou normal), o ponto remoto é impróprio (localizado no "infinito"), enquanto o ponto próximo se situa a 25 cm do olho. Admitindo que a distância da lente natural do olho à retina seja de 15 mm, determine:

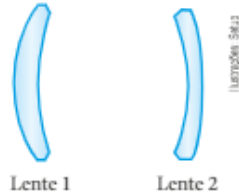
- as distâncias focais dessa lente quando acomodada para o ponto remoto e para o ponto próximo;
- a variação da convergência da lente quando um objeto é deslocado do ponto remoto para o ponto próximo.

13. Ana Carolina é uma jovem que ainda cursa o Ensino Médio, mas já com nitida vocação para Medicina. Nas consultas em que comparece, ela sempre pergunta ao mé-

dico detalhes a respeito de doenças e seus respectivos tratamentos. Ao fazer um exame de vista, a garota questionou sobre os principais defeitos visuais e o médico, gentilmente, apresentou os esquemas ilustrados a seguir, em que estão esboçados os dois problemas mais comuns.



Em seguida, ele comentou as maneiras de correção dos defeitos citados, exibindo duas lentes (de perfil) como as esquematizadas abaixo.



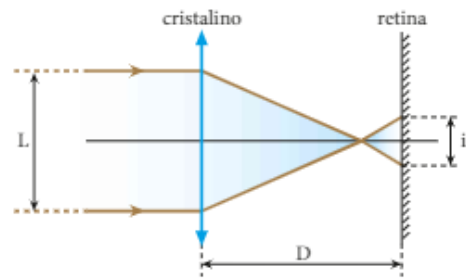
Com base nessas ilustrações, responda:

- Qual é o nome de cada defeito (A e B) e qual é a lente (1 ou 2) mais adequada à correção de cada um?
- Após um minucioso exame, o médico constatou que os olhos de Ana Carolina apresentavam o defeito A, sendo a distância máxima de visão distinta da jovem igual a 50 cm. Quantas dioptrias foram prescritas pelo profissional para as lentes corretivas do defeito visual da jovem?

14. A miopia é mesmo um defeito visual inconveniente!

Ao olhar as estrelas em noite de céu sem nuvens, um portador desse defeito geralmente observa os astros desfocados ou não pontuais. Isso ocorre porque olho míope é ovalado, isto é, alongado na direção anteroposterior. Com isso, a imagem de uma estrela se forma antes da retina e o que se projeta neste anteparo é um halo luminoso, o que determina a visão embaçada do corpo celeste.

Considere o esquema a seguir, em que está representado, fora de escala, o olho de um míope que mira determinada estrela, recebendo dela um feixe luminoso de largura $L = 3,0$ mm, paralelo ao eixo óptico do cristalino (lente natural do olho, de comportamento convergente, que, com boa aproximação, obedece às condições de Gauss).



Admitindo-se que na situação proposta o cristalino do indivíduo apresente vergência $V = 50,0$ di e que a imagem da estrela projetada em sua retina tenha dimensão $i = 0,36$ mm, faça o que se pede.

- Determinar a distância D , indicada na figura, entre o cristalino e a retina.
- Calcular a vergência V_c da lente corretiva dessa miopia sabendo-se que a distância máxima de visão distinta nesse caso é de 80 cm. Informe se essa lente tem comportamento convergente ou divergente.
- Determinar a distância d entre a imagem e a lente corretiva dimensionada no item anterior para o caso de um objeto distante 120 cm da lente.

15. Um homem idoso que "sofre de vista cansada" (presbiopia) tem os pontos próximo e remoto distantes de seus olhos 1,0 m e 2,0 m respectivamente. Sabe-se que a distância mínima de visão distinta normal é de 25 cm e que o homem possui dois óculos: A (para ver de longe) e B (para ver de perto).

- Qual é a vergência das lentes dos óculos A?
- Qual é a vergência das lentes dos óculos B?



DESCUBRA MAIS

- Galileu construiu vários modelos de lunetas que lhe propiciaram descobertas astronômicas sem precedentes no século XVII. Em um deles, talvez o mais famoso, o cientista utilizou uma lente divergente como ocular. Que vantagem esse tipo de ocular trazia sobre uma ocular convergente? Esquematize a formação da imagem nessa famosa luneta de Galileu.
- Suponha que um indivíduo com alto grau de miopia mergulhe em um grande aquário cheio de peixes usando seus óculos. Ele poderá visualizar nitidamente os peixes através de suas lentes de correção?
- Além de miopia, hipermetropia, presbiopia e astigmatismo, há outros defeitos da visão, como o daltonismo. O que é daltonismo?
- As lentes fotocromáticas de grande aceitação entre os usuários de óculos, caracterizam-se pela capacidade de mudar de cor, apresentando-se claras em ambientes escuros e escuras em ambientes claros. Como funcionam essas lentes?

INTERSABERES

Estamos sós no Universo?

É bem verdade que as forças cósmicas conspiraram a favor da Terra para que ela se tornasse esse imenso berçário de possibilidades como a conhecemos hoje. Veja só o relato a seguir:

[...] foi a sorte grande. Caso o ritmo de expansão depois do *big bang* fosse uma fração de milésimo de segundo mais lento, nosso planeta, a Terra, teria se cozinhado nas vizinhanças do Sol e hoje seria apenas uma pedra tórrida circulando o astro. Uma fração de segundo a mais e nossa casa não seria nossa casa, pois a Terra poderia estar muito além de Netuno, o mais longínquo e gelado dos planetas, sem possibilidade de vida. Que forças calibraram o ritmo de expansão do *big bang* para que a Terra se acomodasse justamente na terceira órbita desse Sol generoso e estável? Ninguém sabe ao certo. [...]

CORRÊA, Rafael. No início era... Revista *Veja*, ed. 2066, ano 41, n. 25, p. 79.

Depois de períodos inóspitos, em que o planeta era ou muito quente ou muito frio, assolado por tempestades elétricas ou com uma atmosfera venenosa e irrespirável, a vida vicejou. Surgiram os primeiros seres monocelulares, capazes de fazer cópias idênticas de si mesmos e de se reproduzir. Depois vieram os vegetais pequenos, os de grande porte e os animais de toda sorte... O mais importante dos seres vivos, o *Homo sapiens*, dotado de inteligência para gerir seu próprio destino e de toda a humanidade, povoou os diversos confins de seu *habitat*, agregando-se em comunidades, cidades, nações.

Mas, ao contemplarmos o firmamento, uma pergunta reverbera diuturnamente em nossos ouvidos: Estamos sós no Universo?

As novas tecnologias proporcionam condições para a detecção de exoplanetas – planetas que gravitam ao redor de estrelas-mães situadas nas paragens mais remotas do Universo.

Instalado na cratera de um vulcão extinto na floresta tropical de Porto Rico, encontra-se o maior radiotelescópio do mundo. Essa estrutura grandiosa vasculha incessantemente o céu em busca de sinais eletromagnéticos que, de alguma forma, sinalizem rumo à presença de vida em outras “Terras” a vagar por aí. Afinal, se o Universo é tão grande, seríamos os únicos?

Leia a seguir uma reportagem a respeito do tema.

Em busca dos ETs

O telescópio Kepler mal entrou em operação e já demonstrou seus notáveis dotes para procurar astros situados fora do Sistema Solar que possam abrigar vida



Olho cósmico

[O espelho primário] do Kepler durante sua construção: [...] precisão 100 vezes maior que a dos telescópios instalados na superfície da Terra.



A busca e a observação de planetas fora do sistema solar constituem hoje uma das frentes da cosmologia que mais despertam entusiasmo nos astrônomos. Espera-se, assim, encontrar planetas que apresentem características semelhantes às da Terra – e que, portanto, em teoria possam abrigar formas de vida. A mais espetacular ferramenta já desenvolvida para a prospecção de exoplanetas, como são chamados os planetas que gravitam em torno de outros sóis, é o telescópio Kepler, lançado ao espaço em março [de 2009] pelos Estados Unidos e que entrou em operação há três meses. Seus equipamentos de detecção de luz são 100 vezes mais precisos que os dos maiores telescópios instalados em terra. Nos próximos três anos e meio, o Kepler terá como missão inspecionar 100 000 estrelas para detectar corpos em suas órbitas, tarefa que os cientistas já apelidaram, com uma ponta de humor, de o primeiro censo planetário.

Nos primeiros dez dias em operação, o Kepler já deu mostras de sua capacidade de perscrutar o cosmo. Ele visualizou, à distância de 1 000 anos-luz, ou seja, 9,46 quatrilhões de quilômetros, o HAT-P-7b, um planeta que já fora detectado pelos astrônomos, mas sobre o qual nada se sabia. Embora o planeta não seja semelhante à Terra e, portanto, esteja fora do escopo da missão do Kepler, impressiona a riqueza de informações que o telescópio obteve sobre ele a uma distância tão grande. O HAT-P-7b é gasoso, tem dezesseis vezes o tamanho da Terra, possui uma atmosfera, sua órbita dura 2,2 dias terrestres e sua temperatura média ultrapassa 2 300 graus.

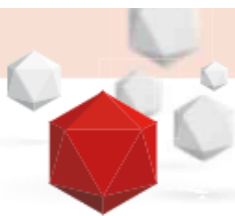
Os astrônomos já supunham a existência de exoplanetas desde o século XIX, mas só há quinze anos obteve-se a tecnologia necessária para detectá-los. Hoje já se sabe da existência de 350 deles, quase todos enormes bolas de gases venenosos submetidas a forças gravitacionais colossais. A melhor surpresa nessa busca por irmãos cósmicos da Terra se deu [...] com a descoberta, na constelação de Libra, do planeta Gl 581c. O astro apresenta temperaturas na superfície que variam entre zero e 40 graus, tem gravidade compatível com o organismo dos seres humanos e é grande a possibilidade de que abrigue água em estado líquido. Por enquanto, porém, é inútil imaginar uma viagem ao Gl 581c. A nave espacial mais rápida já construída, a sonda New Horizons, levaria 400 000 anos para chegar ao planeta. No caso do HAT-P-7b, recém-estudado pelo Kepler, a duração da viagem se mediria em dezenas de milhões de anos.

Para os leigos em cosmologia, a impossibilidade de o homem chegar aos exoplanetas pode soar frustrante. Para os astrônomos, é apenas um detalhe. A análise desses astros, mesmo a grandes distâncias, é capaz de dar enormes contribuições ao estudo do Universo e de suas origens. Por isso se festeja tanto a demonstração de potência do Kepler ao analisar o HAT-P-7b. A observação de exoplanetas feita da Terra usa o método chamado velocidade radial, que se baseia na oscilação das estrelas em função do campo gravitacional dos planetas em sua órbita. Na técnica usada pelo Kepler, conhecida como trânsito celeste, os instrumentos detectam variações de luminosidade de uma estrela que podem indicar a existência de um planeta em sua órbita. O telescópio não vê o planeta, apenas a diminuição na luz do astro quando este passa na sua frente, algo como um minúsculo eclipse. Um planeta do tamanho da Terra bloqueia apenas 0,01% da luz de uma estrela do tamanho do Sol. “Isso é o mesmo que juntar 10 000 lâmpadas de 100 watts e notar que uma delas foi apagada. O Kepler tem a maior capacidade de detalhamento já vista nesse tipo de missão”, disse [...] a astrônoma Natalie Batalha, da NASA. Também não é pouca coisa medir a temperatura de um planeta a uma distância 23 bilhões de vezes superior à que separa a Terra da Lua. A existência de vida em outros planetas é um dos mistérios que instigam a mente humana desde sempre. Descobrir a existência de planetas com condições de abrigar vida como a conhecemos é o primeiro passo para responder a essa questão ancestral.

MORAES, Renata. Em busca dos ETs. Revista Veja, ed. 2126, ano 42, n. 33, p. 114-115.

Compreensão, pesquisa e debate

1. Você acredita na existência de vida em outros planetas? Argumente.
2. Que evidências científicas corroboram a possibilidade de vida em outros locais do Universo? Pesquise.
3. A presença de vida em outros planetas implicaria necessariamente a existência de vida inteligente nesses locais?
4. A Terra será eternamente um planeta com condições propícias à presença de vida? Pesquise.



RESPOSTAS DAS QUESTÕES PROPOSTAS

UNIDADE 1

TERMOLOGIA

Capítulo 1

Temperatura

9. 112,46 °F; 6,8 °F 13. 96 cmHg
10. -10 °C 14. 25 °C
11. 20 °C 15. 25 °C
12. -40 °C 16. -273 °C; -459 °F

Capítulo 2

O calor e sua propagação

6. O metal possui condutibilidade térmica maior que a do vidro e da porcelana. Esse fato provoca transferência mais rápida de calor do líquido para o gelo.
7. Cobre. 9. 80 °C
8. $6,0 \cdot 10^4$ cal/s 10. d
14. Ar-condicionado (em Natal), próximo do teto; aquecedor (em Estocolmo), próximo do chão.
15. 37 16. c

17. a) O fluxo de calor através de uma "parede" é dado pela Lei de Fourier:

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{k A \Delta \theta}{L}$$

Quando a diferença de temperatura entre os meios que a referida "parede" separa é nula ($\Delta\theta = 0$ °C), não há fluxo de calor. Assim, apesar de a água da garrafa estar a 100 °C (temperatura de ebulição), ela não recebe mais calor, não podendo, então, entrar em ebulição.

- b) O sal aumenta a temperatura de ebulição da água do caldeirão.
c) Com sal, a água do caldeirão ferve a mais de 100 °C. Assim, haverá uma diferença de temperatura entre a água do caldeirão e a da garrafa (que está a 100 °C). Esse fluxo de calor que se estabelece provoca a ebulição da água da garrafa.

Capítulo 3

Calor sensível e calor latente

6. A amostra B.
7. A capacidade térmica da água é maior que a da ferradura.
8. d
9. 115 kcal
10. a) $5,0 \cdot 10^3$ g
b) $1,5 \cdot 10^4$ degraus
11. 162 W

12. 800 cal/s
13. 0,25 cal/g °C
14. 55 °C
15. a) $2,25 \cdot 10^5$ cal
b) $18,8 \cdot 10^5$ J
16. 30 °C
17. 40 °C
18. 20 cal/°C
19. 75 °C
27. $2,6 \cdot 10^4$ cal
28. 12 kcal
29. 50 °C
30. 10 500 cal
31. $8,0 \cdot 10^4$ cal
32. 24 °C
33. a) 0 °C
b) 100 g
34. d
35. Somente água a 0 °C.
36. Sim; 125 g
37. 5,0 °C
38. 0 °C
39. -9,0 °C
40. 18
41. 0,125 kg
42. c
43. c
44. 155 g (valor aproximado).
45. 69 W
46. c
49. b
50. b
51. e
52. d
53. 14
54. d
55. c

Capítulo 4

Gases perfeitos

5. b 15. $1,0 \cdot 10^{-2}$ kg
6. b 16. b
7. 218,4 °C 17. b
8. 150 mmHg 21. -153 °C e 27 °C
9. 427 °C 22. 177 °C
10. $2,7 \cdot 10^4$ N 23. 25 m³
11. 9,0 atm 24. n = 2,0 mol
T = 293 K
12. 20,5 l. 25. 27 °C
13. 8,2 atm 26. 600 mmHg
14. 27 °C

Capítulo 5

Termodinâmica

6. c 13. a) 400 cal
b) -400 cal
c) zero
7. d 14. a) 50 cal
b) -50 cal
c) zero
8. 8 kcal
9. 250 J e zero
10. d
11. 37
12. 3,0 J 15. c
16. 1 800 J

17. a) 1 200 J
b) zero
c) 1 200 J
18. a) 2 200 J; realizado.
b) 6 300 J; aumentou.
19. $2,5 \cdot 10^3$ J
20. 10 W
21. a) 8 J b) C, A
22. a) zero
b) 450 cal
23. 7,5 g
24. 8,0 °C
25. 2,0 °C
28. 17
29. c
30. e
31. 55%
32. 227 °C
33. 47 °C
34. 14 kW

Capítulo 6

Dilatação térmica dos sólidos e dos líquidos

10. e 24. $1,0 \cdot 10^3$ cm³
11. 4,4 mm 25. $5,0 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹
12. 200,2 cm 26. 1 000 °C
13. $1,7 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹ 27. 1 007,2 cm³
14. 770 °C 31. No período da manhã.
15. $1,6 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹ 32. 110 l.
16. Cerca de 8,4 mm. 33. b
17. b 34. a) $9,0 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹
(valor aproximado).
18. $20 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹ b) 518 cm³
c) 18,2 cm³
19. Se a obtenção dilatar mais, o dente pode quebrar. Se dilatar menos, podem ocorrer infiltrações. 35. a) $1,32 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹
e $1,08 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹
b) 13,2 cm³ e 10,8 cm³
36. $527 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹
20. 101,6 cm² 37. 143 °C
21. e 38. 120 °C
22. 430 °C 39. $5 \cdot 10^{-4}$ °C⁻¹
23. 0,54 cm

UNIDADE 2

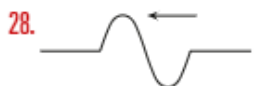
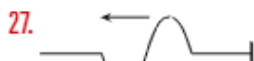
ONDULATÓRIA

Capítulo 7

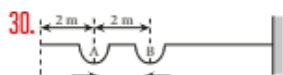
Ondas

6. a 11. d
7. e 12. d
8. e 13. 4 cm e 2 cm
9. c 14. 10 m/s
10. d 15. 12 cm

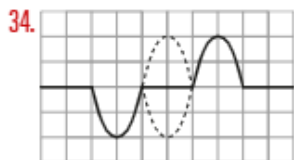
16. 100 MHz
17. b
18. a) 6,0 km/s
b) 400 m
c) 15 Hz
19. a) 3,0 km
b) 1,0 cm
c) 150 kHz e 2,2 mm



29. 2,0 m/s

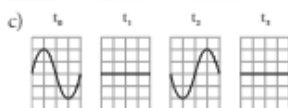
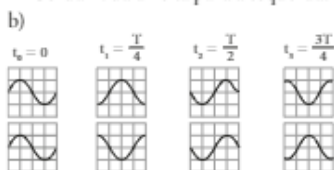


31. a) 4 mV
b) 0,6 s e 100 batimentos/min
c) 0,12 m



35. 2 cm

36. a) Corda A: da esquerda para a direita;
Corda B: da direita para a esquerda.



37. c
38. d
39. 10 Hz
40. 480 m/s

Capítulo 8

Acústica

3. λ' é maior que λ e f' é igual a f .
4. a) 100 Hz
b) 3,4 m
5. a) 6 Hz
b) 203 Hz ou 197 Hz
9. 27,5 Hz e 3 520 Hz, respectivamente.
6. Ressonância.
7. 17 m e 17 mm, respectivamente.
8. d

12. a) 25 Hz
b) 75 Hz
13. 30 cm; 60 cm; 90 cm
14. 120 cm; 60 cm; 40 cm
15. 120 m/s e $2,88 \cdot 10^3$ N
16. Timbre.
19. a) 500 Hz
b) 2000 Hz
20. 3,4 kHz
21. a) 338 m/s
b) 99 cm e 165 cm
23. b
24. I
25. a) 6,60 kHz
b) 314 Hz

UNIDADE 3

ÓPTICA GEOMÉTRICA

Capítulo 9

Fundamentos da óptica geométrica

4. Aproximadamente $9,5 \cdot 10^{15}$ m.
5. 8 min 20 s
6. A distância das estrelas à Terra é muito grande, de modo que a luz emitida por esses corpos celestes leva muito tempo para atingir nosso planeta.
7. a) Princípio da independência dos raios de luz e Princípio da propagação retilínea da luz.
b) As partículas de fumaça difundem a luz dos pincéis de laser.
8. a) d_{\min} : 78 milhões de quilômetros.
 d_{\max} : 378 milhões de quilômetros.
b) 17 min
9. $\ell = 20$ m
10. $d > 5,0$ m
11. Anaxágoras encontrou 7261,9 km. O valor atual admitido para a distância da Terra ao Sol é de aproximadamente 150 000 000 km.
12. 2,0 cm
13. a) Lua nova
b) 4 min
14. a) Princípio da Propagação Retilínea da Luz.
b) Aproximadamente $2,99 \cdot 10^5$ km/s.
16. a) 1 – verde; 2 – preta; 3 – preta; 4 – verde;
b) 1 – preta; 2 – preta; 3 – preta; 4 – vermelha.
17. a) Aproximadamente $5,8 \cdot 10^{14}$ Hz.
b) Para comprimentos de onda entre 500 nm e 600 nm (cores verde e amarelo), aproximadamente, nota-se mínima intensidade de absorção da luz. Logo, o vaso I, iluminado com luz solar, manifestará um crescimento maior da respectiva planta, já que a luz do Sol é policromática. Assim, a planta absorve mais os comprimentos de onda diferentes do verde e do amarelo. As radiações absorvidas for-

necem a energia que desencadeia o processo de fotossíntese, inerente ao crescimento da planta.

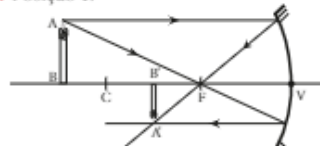
- c) Porque a luz verde é minimamente absorvida, sendo predominantemente difundida. A luz verde atinge os olhos do observador, produzindo a visão dessa cor.

Capítulo 10

Reflexão da luz

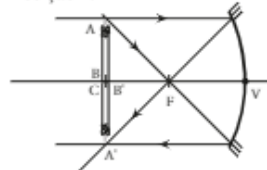
5.
6. 9 h
7. $H = 12$ m
8. 1,0 m
9. a) Virtuais.
b) 45°, nos espelhos planos, a imagem é simétrica ao objeto em relação à superfície refletora.
c) 30°
10. a) 90 cm
b) 85 cm
11. a) 80 cm
b) 15 cm
12. a) 6,0 m; virtual.
b) Aproximadamente 27 ns.
13. Ele não poderá ver os pontos D e E; também não verá a imagem de seu olho.
14. a) 6,0 s
b) 6,0 s
15. $2\sqrt{3}$ m
16. d
17. 45°
20. b

21. Posição 1:



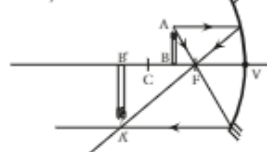
A imagem é real, invertida e menor que o objeto.

Posição 2:



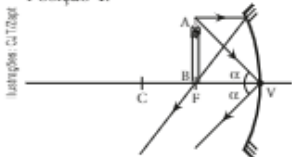
A imagem é real, invertida e do mesmo tamanho do objeto.

Posição 3:



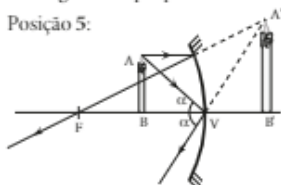
A imagem é real, invertida e maior que o objeto.

Posição 4:



A imagem é imprópria.

Posição 5:



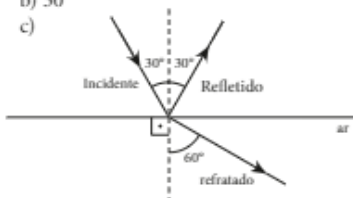
A imagem é virtual, direita e maior que o objeto.

- 22. a
- 23. c
- 24. $L = 2,0 \text{ m}$
- 28. a) Real e invertida.
b) 60 cm
c) 12 cm
- 29. a) Côncavo.
b) 96 cm
- 30. 10,0 cm
- 31. a) 20 cm
b) 10 cm
- 32. 2,0 cm/s
- 33. c
- 34. 45 cm ou 75 cm
- 35. a) $\frac{R(d-R)}{2d-R}$
b) $\frac{LR}{2d-R}$
- 36. $p = 10 \text{ cm}$
- 37. a) 100 cm
b) 10 cm
- 38. a) 15 cm
b) 500 K ou 500 °C

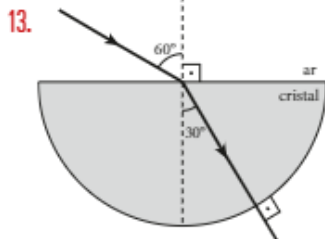
Capítulo 11
Refração da luz

- 5. a) É igual ou aproximadamente igual ao do líquido.
b) Principalmente porque muitos raios de luz, dirigindo-se do cristal para o gás da fratura, sofrem reflexão total na fronteira cristal-gás.

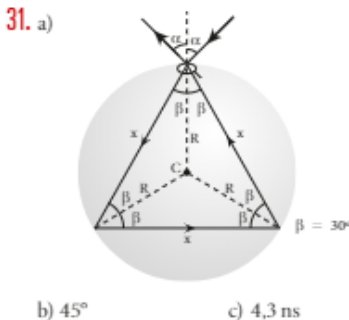
- 6. a) 200 000 km/s
b) 125 000 km/s
c) 1,6
- 7. 2,0
- 8. a) 60°
b) 30°
c)



- 9. 125
- 10. c
- 11. e
- 12. R_1 : raio refratado;
 R_2 : raio refletido;
 R_3 : raio incidente.

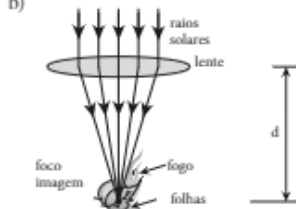


- 13.
- 14. a) Ângulo de reflexão: 60°,
ângulo de refração: 30°.
b) $\sqrt{3}$
- 15. a) Maior;
b) menor.
- 16. e
- 17. a) α
b) Não depende.
- 21. Refração não;
reflexão sim.
- 22. c
- 23. Reflexão total.
- 24. a
- 25. Reflexão total.
- 26. a) Sofre reflexão total na fronteira entre A e B.
b) Sofre refração com ângulo de refração $\text{arc sen } \frac{\sqrt{3}}{6}$, além de reflexão parcial na fronteira entre B e A.
- 27. a) 45°
b) Reflexão total.
- 28. a) 1 e a
b) 7 e g
c) 4 e d
- 29. b
- 30. Aproximadamente 27 cm.
- 31. a)



Capítulo 12
Lentes esféricas

- 3. d
- 4. a) Convergente.
b)



c) $d = f$

- 5. c
- 6. a) Convergente.
b) 30 cm
- 7. a) Bicôncava.
b) 20 cm
- 8. 12 cm
- 9. a) 10,0 cm
b) 6,0 cm
c) $n > \sqrt{2}$
- 10. Posição 1: real, invertida e menor.
Posição 2: real, invertida e igual.
Posição 3: real, invertida e maior.
Posição 4: imprópria.
Posição 5: virtual, direita e maior.
- 11. a) Convergente; objeto entre o foco principal e o centro óptico.
b)
- 12. a) 16,0 cm
b) 40,0 cm
- 13. a) Convergente; 10 cm.
b) -10 cm; 2
- 14. a) $L = \frac{f_0 d_0}{f_0 - d_0}$
b) $f_1 = \frac{f_0 d_0}{d_0 + f_0}$
- 15. a) 90 cm
b) 6,0 cm
- 16. 9 cm
- 17. a) 312 cm
b) 12 vezes
- 18. 1,0 m
- 19. d
- 20. b
- 21. a) 1,3 m
b) 90 cm
- 22. a) 22 cm
b) 2,2 m
- 23. a) 40 cm
b) 60 cm
- 24. a) 15 mm; aproximadamente 14 mm.
b) 4,0 di
- 25. a) 1,2 m
b) 1,8 m
c) 650 °C
- 26. a) $R = 20 \text{ cm}$
b) Biconvexa.
- 27. a) Afastam-se.
b) 60 cm
- 28. c

Capítulo 13
Instrumentos ópticos e óptica da visão

- 4. a) 1,3 m
b) 90 cm
- 5. a) 22 cm
b) 2,2 m
- 6. a) 40 cm
b) 60 cm
- 7. 45 vezes
- 8. 19 cm e -10 cm
- 9. 20 cm
- 10. a) 15 mm; aproximadamente 14 mm.
b) 4,0 di
- 11. a) Defeito A: miopia - lente 2; defeito B: hipermetropia - lente 1.
b) -2,0 di
- 12. a) 2,24 cm
b) Divergente.
c) 48 cm
- 13. a) -0,50 di
b) +3,0 di



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, M. S.; FINN, E. J. *Física*. São Paulo: Blucher, 2014. v. 1 e 2.
- _____. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Blucher, 2014.
- _____. *Fundamentos cuánticos y estadísticos*. Cidade do México: Addison Wesley, 1999.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral. Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica, Brasília: MEC/SEB/DICEI, 2013.
- BRAZ JR., Dulcídio. *Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio*. Campinas: Companhia da Escola, 2002.
- CANIATO, Rodolpho. *O céu*. Campinas: Átomo, 2011.
- CHAVES, Alaor. *Física básica*. Rio de Janeiro: LTC/LAB, 2007.
- CUTNELL, John D.; JOHNSON, Kenneth W. *Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 1, 2 e 3.
- EINSTEIN, Albert. *Como vejo o mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2015.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1994.
- FLEMING, Phyllis J. *Physics*. Reading (MA): Addison Wesley, 1978.
- GAMOW, George. *Gravidade*. São Paulo: Edart, 1973.
- GARCIA, Eduardo A. C. *Biofísica*. São Paulo: Sarvier, 2015.
- GIANCOLI, Douglas C. *Física, principios con aplicaciones*. Cidade do México: Prentice Hall Hispanoamericana, 2007.
- GROUEFF, S.; CARTEIR, J. P. *O enigma do cosmo*. Rio de Janeiro: Primor, 1978.
- GUAYDIER, Pierre. *História da Física*. São Paulo: Martins Fontes, 1983.
- GUIMBAL, Roger. *Le problème de la Physique*. Paris: Bordas, 1972.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos da física*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HAYT, W. H. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HECHT, E. *Óptica*. Lisboa: Fund. Calouste Gulbekian, 2002.
- HESSEB, Boris. *Las raíces socioeconómicas de la Mecánica de Newton*. Havana: Academia, 1985.
- KOESTLER, Arthur. *Os sonâmbulos*. São Paulo: Ibrasa, 1971.
- KÓSEL, S. *Problemas de Física*. Moscou: Mir, 1986.
- LANDAU, L.; KITAIGORODSKI, A. *Física para todos*. Moscou: Mir, 1967.
- LANDAU, L.; RUMER, Y. *Aprenda a Teoria da Relatividade brincando*. São Paulo: Hemus, 1970.
- LUCIE, Pierre. *Física básica*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- MATVEEV, A. N. *Electricidad y magnetismo*. Moscou: Mir, 1988.
- NUSSBAUM, Allen. *Comportamento eletrônico e magnético dos materiais*. São Paulo: Blucher, 1971.
- NUSSENZVEIG, Herch Moysés. *Curso de Física básica*. São Paulo: Blucher, 2013.
- OKUNO, E.; CALDAS, L. L.; CHOW, C. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1986.
- OREAR, Jay. *Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1991.
- OSADA, Jun'ichi. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Blucher/USP, 1972.
- PAIS, Abraham. *A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PERELMAN, Y. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1987.
- PURCELL, E. M. *Curso de Física de Berkeley: eletricidade e magnetismo*. São Paulo: Blucher, 1981. v. 2.
- RONAN, Colin A. *História ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*. São Paulo: Jorge Zahar, 1991.
- ROZEMBERG, I. M. *O sistema internacional de unidades (SI)*. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, 2006.
- SAVELYEV, I. V. *Physics: a general course*. Moscou: Mir, 1980. v. 1 e 2.
- SERWAY, Raymond; JEWETT JR., John W. *Principios de Física*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- THE Visual Dictionary of Physics*. Toronto: Stoddart, 1995.
- TIPLER, Paul A. *Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. v. 1 e 2.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica clássica*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1995.
- WALKER, Jearl. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 2001.
- WESTFALL, Richard S. *A vida de Isaac Newton*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1993.
- WHITE, Harvey E. *Física Moderna*. Barcelona: Montaner y Simón, 1979. v. 1 e 2.
- WILSON, Jerry. *Física*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996.
- WOLF, Jonathan S. *Physics*. Nova York: Barron's Educational Series, 1996.
- YOUNG, Hugh D. *Sears and Zemansky's University Physics*. Reading (MA): Addison Wesley, 2008.