

FRENTE: FÍSICA IV

PROFESSOR(A): KEN AIKAWA

ASSUNTO: PROCESSOS DE TROCAS DE CALOR

EAD – ITA/IME

AULAS 11 E 12



Resumo Teórico

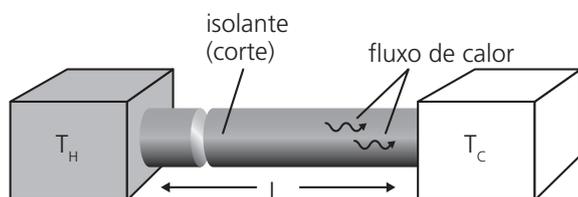
Mecanismos de trocas de calor

Condução

Ao mexer um café com uma colher de metal, após um tempo, a extremidade da colher, que não está em contato com o líquido quente, começa a aumentar sua temperatura. Esse exemplo é bem família no nosso dia a dia. É por isso que, geralmente, utilizamos instrumentos de papelão ou plástico para mexer aquele cafezinho da tarde.

O calor é transferido por condução através do material até atingir a extremidade mais fria. Em nível atômico, verificamos que os átomos de uma região quente possuem em média uma energia cinética maior (agitação térmica) do que a energia cinética dos átomos de uma região vizinha próxima. Essa energia é fornecida em parte mediante colisões com os átomos vizinhos. Esses vizinhos colidem com outros vizinhos, e assim por diante, ao longo do material.¹ Os próprios átomos não se deslocam de uma região para outra do material, mas a energia cinética é transferida de uma região para outra.

Quando uma quantidade de calor dQ é transferida através da barra em um tempo dt , a taxa de transferência de calor é dada por dQ/dt . Chamamos essa grandeza de taxa de transferência de calor ou corrente de calor e a designamos como ϕ . Ou seja, $\phi = dQ/dt$.



A experiência mostra que a taxa de transferência de calor é proporcional à área A da seção reta da barra e a diferença de temperatura $(T_H - T_C)$ é inversamente proporcional ao comprimento da barra L . Com isso, devemos expressar essa igualdade com o auxílio de uma constante de proporcionalidade k denominada condutividade térmica do material. Temos:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = \frac{KA(T_H - T_C)}{L}$$

1. Entenda que não acontece realmente uma colisão, mas sim uma interação coulombiana, e assim a energia é transferida.

As unidades de taxa de transferência de calor são as unidades de energia por tempo, ou potência; a unidade S.I. para a taxa de transferência de calor é o watt ($1W = 1 J/s$).

A tabela abaixo mostra o valor da condutividade térmica em algumas substâncias

CONDUTIVIDADES TÉRMICAS

Substâncias	$k(W/m \cdot K)$
Metais	
Alumínio	205,0
Latão	109,0
Cobre	385,0
Chumbo	34,7
Mercúrio	8,3
Prata	406,0
Aço	50,2

Analogia com a Eletrodinâmica

Observe que podemos escrever a potência térmica da condução da seguinte maneira

$$\Delta T = \left(\frac{L}{KA} \right) \cdot \phi \rightarrow \Delta T = R_t \cdot \phi$$

Onde R_t , corresponde a resistência térmica do material.

Note que a expressão destacada é muito semelhante à Segunda Lei de Ohm:

$$U = R \cdot i$$

Onde U corresponde à diferença de potencial nos terminais de um resistor, R à resistência elétrica e i à corrente elétrica (fluxo de cargas).

Observe a relação entre os termos:

$$\begin{aligned} i &\leftrightarrow \phi \\ U &\leftrightarrow \Delta T \\ R &\leftrightarrow R_t = \left(\frac{L}{KA} \right) \end{aligned}$$

Tal simetria revela-se muito útil na resolução de diversos problemas de condução térmica.

Convecção

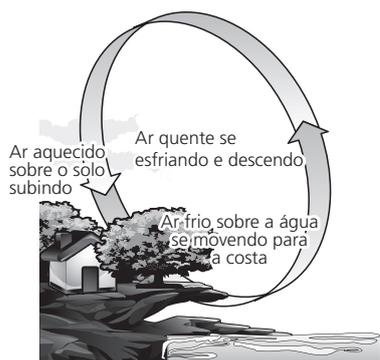
A convecção é a transferência de calor ocorrida pelo movimento da massa de uma região do fluido para outra região. Observe que nessa transferência de calor, a matéria deve se mover (diferente da condução).

Quando o fluido é forçado pela ação de um ventilador ou de uma bomba, o processo denomina-se **convecção forçada**; quando o escoamento é produzido pela existência de uma diferença de densidade provocada por uma expansão térmica, tal como a ascensão do ar quente, o processo denomina-se **convecção natural** ou **convecção livre**.

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

A transferência de calor por convecção é um processo muito complexo e não existe nenhuma equação simples para descrevê-lo.

A convecção natural na atmosfera desempenha um papel dominante na determinação do tempo ao longo do dia (figura a), e a convecção nos oceanos é um importante mecanismo de transferência de calor no globo terrestre. Em uma escala menor, os pilotos de planadores e as águias utilizam as correntes de ar ascendentes oriundas do aquecimento da terra. Algumas vezes estas correntes são tão intensas que dão origem a uma tempestade (figura b). O mecanismo mais importante para a transferência de calor no corpo humano (utilizado para manter a temperatura do corpo constante em diferentes ambientes) é a convecção forçada do sangue, na qual o coração desempenha o papel de uma bomba.



(a)



(b)

A água possui um calor específico mais elevado do que o do solo. O calor do Sol produz um efeito relativamente menor sobre a água do mar do que sobre o solo; portanto, durante o dia o solo se aquece mais rapidamente do que o mar e se resfria mais rapidamente durante a noite. Nas vizinhanças de uma praia a diferença de temperatura entre o solo e o mar dá origem a uma brisa que sopra do mar para a costa durante o dia e da costa para o mar durante a noite.

A seguir assinalamos alguns fatos experimentais:

- A taxa de transferência de calor por convecção é diretamente proporcional à área da superfície. Por essa razão se usa uma área superficial grande em radiadores e nas aletas de refrigeração.
- A viscosidade do fluido retarda o movimento da convecção natural nas vizinhanças de superfícies estacionárias, dando origem a uma película ao longo da superfície. A convecção forçada produz uma diminuição da espessura dessa película, fazendo aumentar a taxa de transferência de calor. Isso explica o efeito do “fator do vento frio”, que faz você sentir mais frio durante um vento frio do que quando o ar está em repouso com a mesma temperatura do ar do vento.

Radiação

A transferência de calor pela radiação ocorre em virtude da existência de ondas eletromagnéticas, tal como a luz visível, a radiação infravermelha e a radiação ultravioleta. Todo mundo já sentiu o calor da radiação solar e o intenso calor proveniente de uma churrasqueira ou das brasas do carvão de uma fogueira. A maior parte do calor proveniente desses corpos quentes atinge você por radiação, e não por convecção do ar. Você sentiria o mesmo efeito até supondo que existisse vácuo entre você e a fonte de calor. É por isso que a energia emanada pelo sol consegue chegar até nosso planeta.

A taxa de radiação de energia de uma superfície é proporcional à área A (assim como na condução). A taxa aumenta muito rapidamente com a temperatura dependendo da quarta potência da temperatura absoluta (Kelvin). Essa taxa também depende da natureza da superfície; essa dependência é descrita por uma grandeza e denominada emissividade. Essa grandeza é um número sem dimensões compreendido entre 0 e 1, que representa a razão entre a taxa de radiação de uma superfície particular e a taxa de radiação de uma superfície de um corpo ideal com a mesma área e a mesma temperatura. A emissividade também depende ligeiramente da temperatura. Logo, a taxa de radiação $\phi = dQ/dt$ de uma superfície de área A , com uma temperatura T e emissividade e , pode ser expressa pela relação

$$\phi = \sigma e A T^4,$$

onde σ é uma constante física fundamental denominada constante de Stefan-Boltzmann. Essa relação denomina-se Lei de Stefan-Boltzmann, em homenagem aos seus descobridores, que viveram no final do século XIX. O valor numérico de σ , com melhor precisão atualmente conhecido, é dado por

$$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

A emissividade (e) de uma superfície escura é geralmente maior do que a de uma superfície clara. A emissividade de uma superfície lisa de cobre é igual a, aproximadamente, 0,3, porém, o valor de e para uma superfície negra pode ser quase igual a um.

A potência líquida, P_{liq} , emitida pelo corpo é dada por

$$P_{liq} = \sigma e A (T^4 - T'^4),$$

onde T' é a temperatura do ambiente. Assim, o corpo absorve radiação e emite radiação.

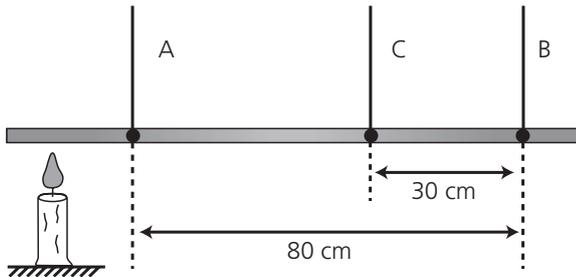
A experiência mostra que se um corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente, sua potência líquida é zero. Assim, podemos perceber que a temperatura deve ser igual, assim como o seu expoente. É por isso que podemos dizer que as equações de emissão e absorção são iguais.

Voltaremos o assunto no volume de física moderna. Trataremos alguns detalhes a mais da radiação do corpo negro.



Exercícios

01. 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

02. 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. Em uma garrafa térmica, é mantido vácuo entre as paredes duplas de vidro para evitar que o calor saia ou entre por (...).

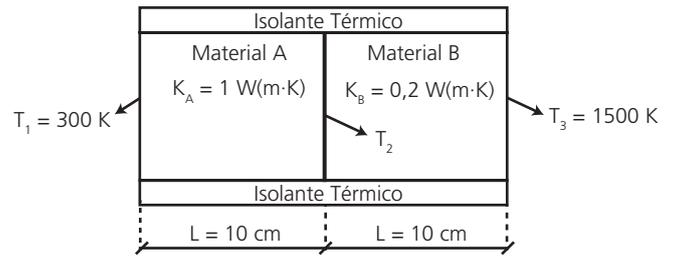
Na ordem, os processos de transmissão de calor que você usou para preencher as lacunas são

- 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.

03. O vidro espelhado e o vácuo existente entre as paredes de uma garrafa térmica ajudam a conservar a temperatura da substância colocada no seu interior.

- Isso ocorre porque
- (01) a radiação térmica não se propaga no vácuo.
 - (02) o vidro é um bom isolante térmico.
 - (04) as paredes espelhadas minimizam a perda de energia por condução.
 - (08) o vácuo entre as paredes evita que haja propagação de calor por condução e por convecção.
 - (16) a radiação térmica sofre reflexão total na interface da substância com o vidro espelhado.
 - (32) fechando bem a garrafa, não haverá trocas de calor com o meio externo por meio da convecção.

04. (IME)



A figura composta por dois materiais sólidos diferentes A e B apresenta um processo de condução de calor, cujas temperaturas não variam com o tempo. É correto afirmar que a temperatura T_2 da interface desses materiais, em kelvins, é:

Observações:

- T_1 : Temperatura da interface do material A com o meio externo.
- T_3 : Temperatura da interface do material B com o meio externo.
- K_A : Coeficiente de condutividade térmica do material A.
- K_B : Coeficiente de condutividade térmica do material B.

- A) 400
- B) 500
- C) 600
- D) 700
- E) 800

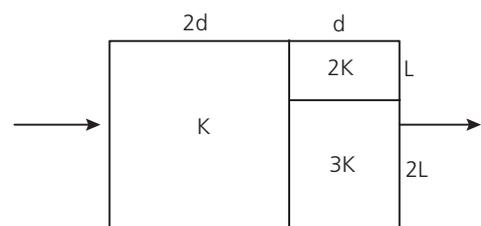
05. Considere dois reservatórios térmicos: um frio, com uma mistura de água e gelo em equilíbrio térmico a $T_c = 0\text{ °C}$ e outro quente, com água fervente a $T_H = 100\text{ °C}$. Esses reservatórios térmicos são termicamente isolados, a não ser por uma barra de determinado material que promove a condução de calor do reservatório quente para o frio.

Em um experimento, a barra utilizada para essa conexão foi de cobre, levando um tempo de 20 min para que o gelo derretesse completamente.

Em um segundo experimento, utilizou-se uma barra de aço para derreter a mesma quantidade de gelo que antes, sendo necessário 60 min.

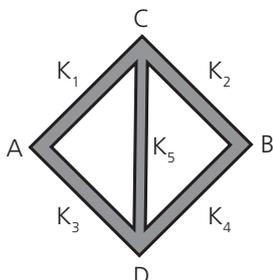
Quanto tempo será necessário para derreter essa mesma quantidade de gelo se as barras forem usadas em série? E em paralelo?

06. Uma peça, de seção transversal constante, é composta por três metais arranjados, conforme a figura, onde estão indicadas as condutibilidades de cada parte, bem como suas respectivas dimensões. Para o calor fluir no sentido indicado pelas setas, a condutibilidade equivalente da peça é dada por:



- A) 24K/19
- B) 12K/13
- C) 10K/11
- D) 2K/3
- E) 13K/11

07. Cinco barras de mesmas dimensões são organizadas como mostrado na figura abaixo. Sabendo que as condutividades das barras valem K_1, K_2, K_3, K_4 e K_5 , determine qual relação deve ser satisfeita de tal forma que, sobre a barra central, não passe energia. Sabe-se que entre os pontos A e B, temos temperaturas fixas T_A e $T_B < T_A$.

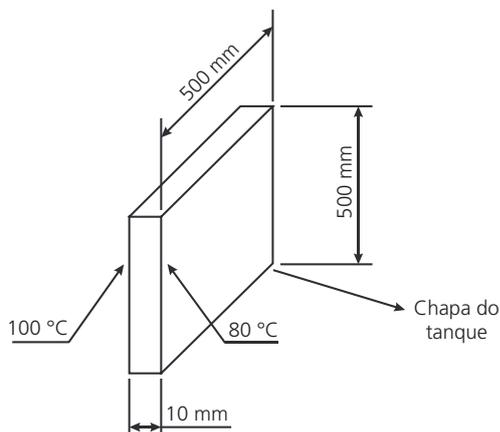


- A) $K_1 = K_2$ e $K_2 = K_3$ B) K_1K_4 e K_3K_2
 C) K_1K_2 e K_3K_4 D) $\frac{K_1}{K_4} = \frac{K_2}{K_3}$
 E) N.D.A

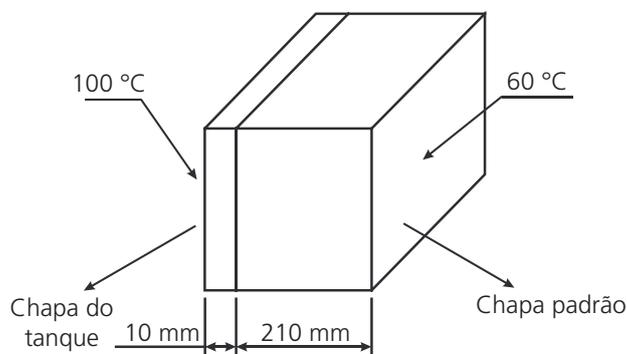
08. (IME/2015) Uma fábrica produz um tipo de resíduo industrial na fase líquida que, devido à sua toxicidade, deve ser armazenado em um tanque especial monitorado à distância, para posterior tratamento e descarte. Durante uma inspeção diária, o controlador desta operação verifica que o medidor de capacidade do tanque se encontra inoperante, mas uma estimativa confiável indica que 1/3 do volume do tanque se encontra preenchido pelo resíduo. O tempo estimado para que o novo medidor esteja totalmente operacional é de três dias e neste intervalo de tempo a empresa produzirá, no máximo, oito litros por dia de resíduo.

Durante o processo de tratamento do resíduo, constata-se que, com o volume já previamente armazenado no tanque, são necessários dois minutos para que uma determinada quantidade de calor eleve a temperatura do líquido em 60°C . Adicionalmente, com um corpo feito do mesmo material do tanque de armazenamento, são realizadas duas experiências relatadas abaixo:

Experiência 1: Confecciona-se uma chapa de espessura 10 mm cuja área de seção reta é um quadrado de lado 500 mm. Com a mesma taxa de energia térmica utilizada no aquecimento do resíduo, nota-se que a face esquerda da chapa atinge a temperatura de 100°C enquanto que a face direita alcança 80°C .



Experiência 2: A chapa da experiência anterior é posta em contato com uma chapa padrão de mesma área de seção reta e espessura 210 mm. Nota-se que, submetendo este conjunto a 50% da taxa de calor empregada no tratamento do resíduo, a temperatura da face livre da chapa padrão é 60°C enquanto que a face livre da chapa da experiência atinge 100°C .



Com base nestes dados, determine se o tanque pode acumular a produção do resíduo nos próximos três dias sem risco de transbordar. Justifique sua conclusão através de uma análise termodinâmica da situação descrita e levando em conta os dados abaixo:

Dados:

- calor específico do resíduo: $5000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$;
- massa específica do resíduo: 1200 kg/m^3 ;
- condutividade térmica da chapa padrão: $420 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$.

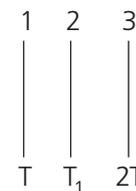
09. O proprietário de uma casa está interessado em estimar a perda de calor (em kcal/s) por meio da camada de um material isolante em função da espessura da camada.

Supondo que as temperaturas das duas superfícies da camada permanecem fixas, qual o gráfico que representa melhor a transferência do calor em função da espessura do material isolante?

- A) B)
 C) D)

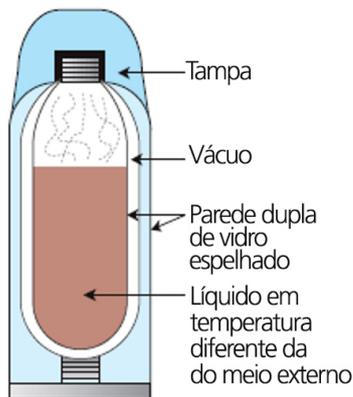
E) NRA

10. Uma casa tem três paredes idênticas, cada uma delas podendo ser tratada como um corpo negro. A distância entre cada par de planos é muito menor que as dimensões das paredes. Considere que os sistemas estão no vácuo. Determine a temperatura de equilíbrio T_1 no regime estacionário da parede interna se a parede da esquerda está a uma temperatura $T(K)$ e a da direita tem temperatura $2T(K)$.



11. (IJSO) A radiação solar chega até a atmosfera terrestre a uma taxa de $1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, sendo que 36% da radiação é refletida de volta para o espaço e outros 18% é absorvido pela atmosfera. A potência de radiação de um corpo é dada por σT^4 , onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura na escala absoluta. Qual a máxima temperatura que um corpo negro na superfície da Terra pode atingir? ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
- A) 120 °C
 B) 63,9 °C
 C) 50,7 °C
 D) 31,4 °C

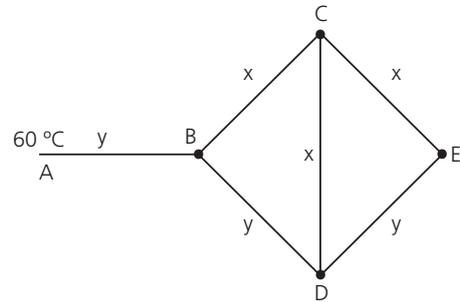
12. Ao contrário do que se pensa, a garrafa térmica não foi criada originalmente para manter o café quente. Esse recipiente foi inventado pelo físico e químico britânico James Dewar (1842-1923) para conservar substâncias biológicas em bom estado, mantendo-as a temperaturas estáveis. Usando a observação do físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), que descobriu ser o vácuo um bom isolante térmico, Dewar criou uma garrafa de paredes duplas de vidro que, ao ser lacrada, mantida vácuo entre elas. Para retardar ainda mais a alteração de temperatura no interior da garrafa, ele espelhou as paredes, tanto nas faces externas como nas faces internas. Dewar nunca patenteou sua invenção, que considerava um presente à Ciência. Coube ao alemão Reinhold Burger, um fabricante de vidros, diminuir o seu tamanho, lançando-a no mercado em 1903.



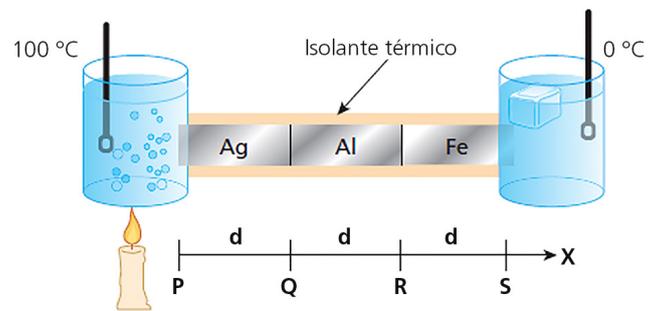
A respeito do texto anterior, indique a alternativa correta.

- A) Na garrafa térmica, o vácuo existente entre as paredes duplas de vidro tem a finalidade de evitar trocas de calor por **convecção**.
- B) As paredes espelhadas devem evitar que as ondas de calor saiam ou entrem por **condução**.
- C) Apesar de o texto não se referir ao fato de que a garrafa deve permanecer bem fechada, isso deve ocorrer para evitar perdas de calor por **convecção**.
- D) O vácuo existente no interior das paredes duplas de vidro vai evitar perdas de calor por **radiação**.
- E) As paredes espelhadas não tem função nas trocas de calor; foram apenas uma tentativa de tornar o produto mais agradável às pessoas que pretendessem comprá-lo.
13. Sabendo-se que a intensidade de energia solar que atinge a Terra vale S . Estime a temperatura do Sol, considerando-o como corpo negro em função do raio do sol R_s , distância da Terra para o Sol d , da constante de Stefan-Boltzmann σ e de S .
14. Três hastes de material x e três hastes de material y estão conectadas, conforme figura a seguir. Todas as hastes têm os mesmos comprimentos e as mesmas áreas de seção transversal.

O ponto A é mantido a uma temperatura de 60 °C e a junção E a uma temperatura de 10 °C. O coeficiente da condutividade térmica de x é o dobro do de y . Determine as temperaturas nas junções B, C e D.

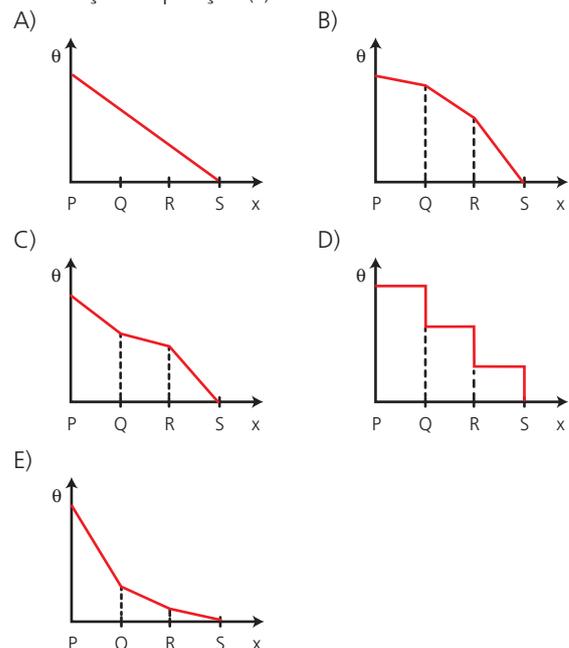


15. Três barras, de prata, alumínio e ferro, geometricamente iguais, estão soldadas e envolvidas por um isolante térmico, permitindo um fluxo de calor entre os recipientes mantidos sob temperatura constante.



Sabe-se que as barras metálicas foram colocadas, da esquerda para a direita, na ordem decrescente das condutividades térmicas, isto é, a prata é melhor condutora de calor do que o alumínio, que por sua vez é melhor condutor do que o ferro.

O diagrama que melhor representa a variação da temperatura (θ) em função da posição (x) é:



Gabarito

Aulas 11 e 12

1	2	3	4	5
D	E	*	B	*
6	7	8	9	10
A	B	*	C	*
11	12	13	14	15
C	C	*	*	B

*03: 50

05: 80 min e 15 min

08: O tanque pode transbordar, pois $V_{\text{máx}} = 34 \text{ L}$.

10: $\sqrt[4]{\frac{17}{2}}T$

13: $T = \left[\frac{d^2 S}{R_s^2 \sigma} \right]^{\frac{1}{2}}$

14: $T_b = 30 \text{ °C}$ e $T_c = T_d = 20 \text{ °C}$.