FENÔMENOS DE TRANSPORTE II

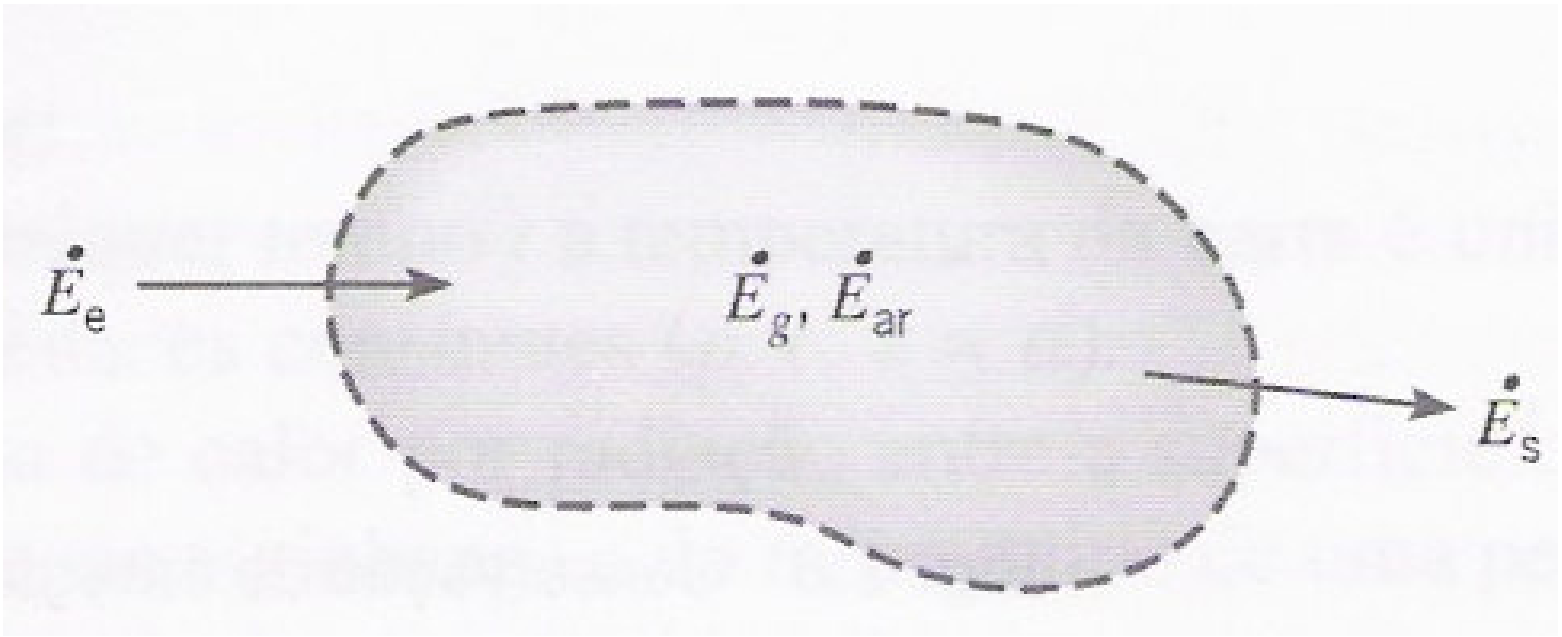
TRANSFERÊNCIA DE CALOR DEQ0303

Introdução (parte 3)

Professor Osvaldo Chiavone Filho

Conservação de energia para um volume de controle

Aplicação em um determinado instante

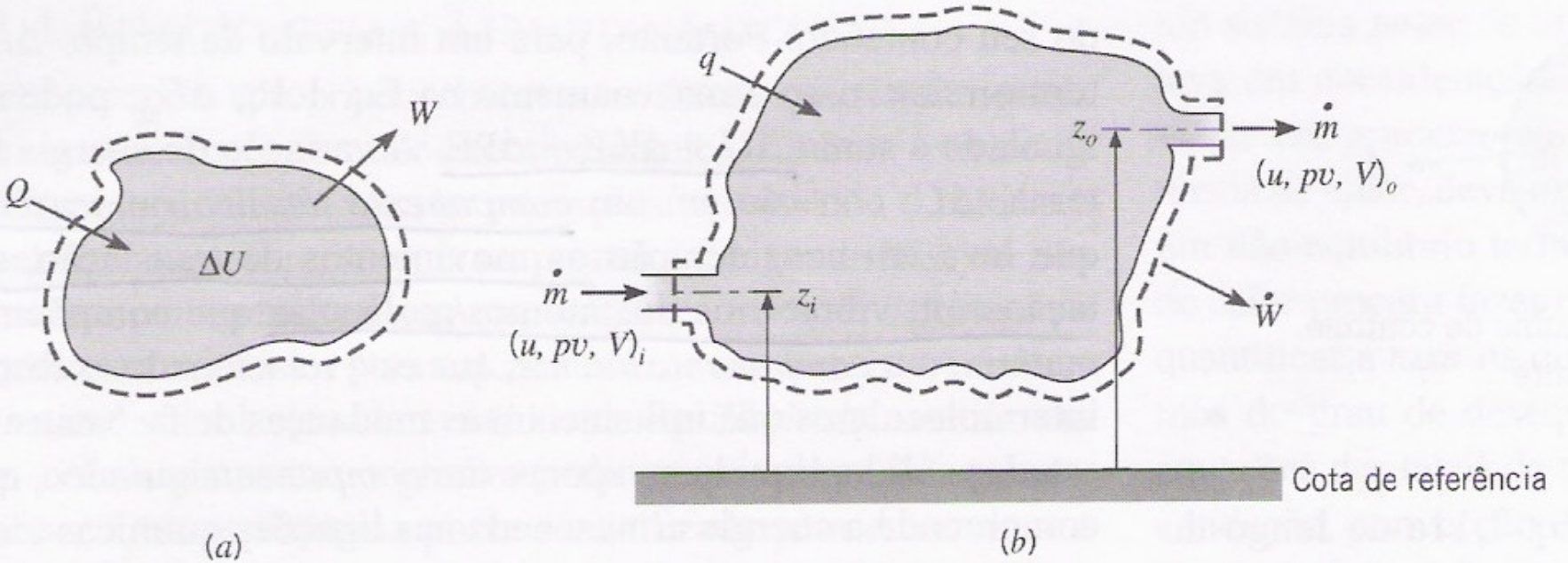


$$E_e + E_g - E_s = \Delta E_{ar}$$

Conservação de energia

(a) Sistema fechado durante um intervalo de tempo

(b) Sistema aberto em regime estacionário em 1 dado instante

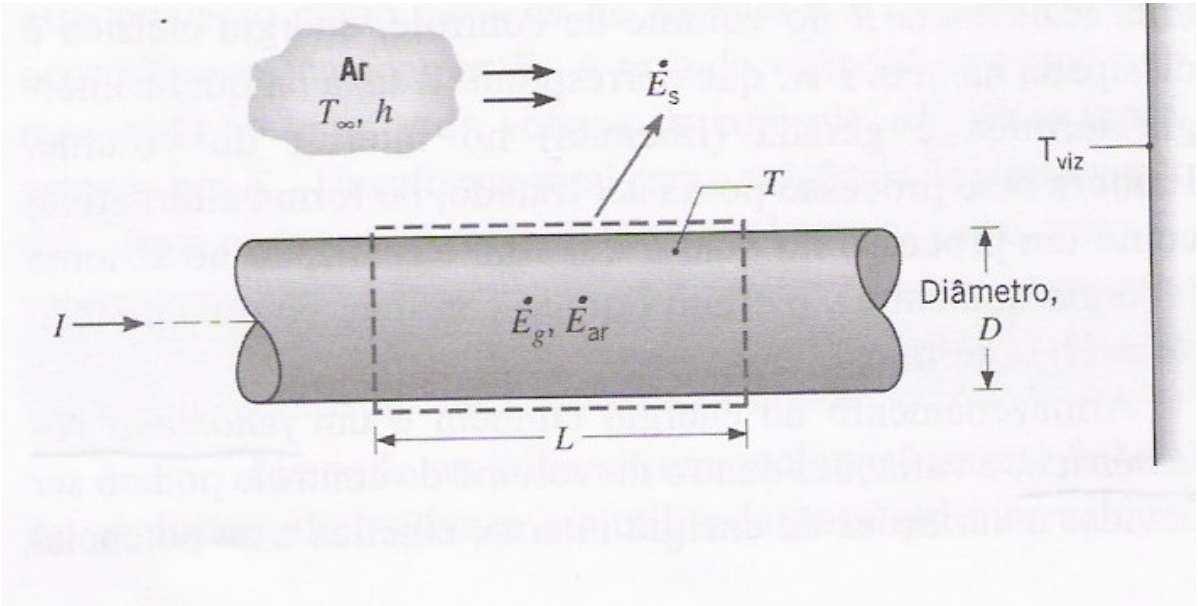


$$Q - W = \Delta U$$

$$q - \dot{W} = \frac{dU}{dt}$$

$$\dot{m}\left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)_i - \dot{m}\left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)_o + q - \dot{W} = 0$$

Exemplo 1.3



Hipóteses:

1. Em qualquer tempo t a temperatura da barra é uniforme.
2. Propriedades constantes (ρ, c, $\varepsilon = \alpha$).
3. A troca de calor por radiação entre a superfície externa da barra e sua vizinhança é do mesmo tipo de uma pequena superfície envolta por uma grande.

Análise: A primeira lei da termodinâmica pode ser freqüentemente utilizada para determinar uma temperatura desconhecida. Nesse caso, termos relevantes incluem a transferência de calor por convecção e radiação a partir da superfície, geração de energia devido ao aquecimento elétrico resistivo do condutor e à variação de energia térmica armazenada. Uma vez que desejamos determinar a taxa de variação da temperatura, a primeira lei deve ser aplicada para um dado instante de tempo. Assim sendo, aplicando-se a Eq. 1.11a a um volume de controle de comprimento L que envolve a barra, temos

$$\dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_{ar}$$

onde a geração de energia é devida ao aquecimento elétrico resistivo,

$$\dot{E}_g = I^2 R'_e L$$

O aquecimento ocorre uniformemente no interior do volume de controle e também poderia ser expresso em termos de uma taxa volumétrica de geração de calor $\dot{q}$ (W/m^3). A taxa de geração em todo o volume de controle é então $\dot{E}_g = \dot{q}V$, onde $\dot{q} = I^2 R'_e/(\pi D^2/4)$. A energia que sai é devida à convecção e à radiação a partir da superfície, Eqs. 1.3a e 1.7, respectivamente,

$$\dot{E}_s = h(\pi DL)(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{viz}^4)$$

e a variação da energia armazenada se deve à variação da temperatura,

$$\dot{E}_{ar} = \frac{dU_t}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho VcT)$$

O termo $\dot{E}_{ar}$ está associado à taxa de variação da energia interna térmica da barra, onde ρ e c são a densidade e o calor específico, respectivamente, do material da barra, e V é o volume da barra, $V = (\pi D^2/4)L$. Substituindo as equações para a taxa no balanço de energia, segue que

$$I^2 R'_e L - h(\pi DL)(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{viz}^4) = \rho c\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)L\frac{dT}{dt}$$

Logo

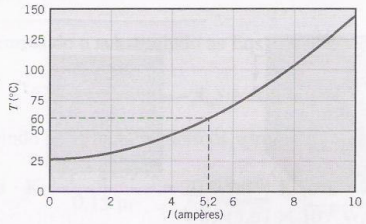
$$\frac{dT}{dT} = \frac{I^2 R'_e - \pi Dh(T - T_\infty) - \pi D\varepsilon\sigma(T^4 - T_{viz}^4)}{\rho c(\pi D^2/4)} \quad \triangleleft$$

Comentários:

1. A equação acima pode ser resolvida para fornecer o comportamento dinâmico da barra através de integração numérica. Uma condição de regime estacionário seria, finalmente, alcançada na qual $dT/dt = 0$. A temperatura da barra, nessa condição, pode ser determinada pela equação algébrica

$$\pi Dh(T - T_\infty) + \pi D\varepsilon\sigma(T^4 - T_{viz}^4) = I^2 R'_e$$

2. Para condições fixas do ambiente (h, I_∞, T_{viz}), tal como numa barra de geometria (D) e propriedades (ε, R'_e) fixas, a temperatura do regime estacionário depende da taxa de geração de energia térmica e, portanto, do valor da corrente elétrica. Considere um fio de cobre sem isolamento (D = 1 mm; ε = 0,8; R'_e = 0,4 Ω/m) no interior de um ambiente suficientemente grande (T_{viz} = 300 K) através do qual o ar resfriado circula (h = 100 W/m$^2 \cdot$ K, T_∞ = 300 K). Substituindo esses valores na equação anterior, e calculando a temperatura da barra para correntes operando na faixa $0 \leq I \leq 10$ A, os seguintes resultados foram obtidos:



3. Se uma temperatura máxima de operação T = 60°C for estabelecida por razões de segurança, a corrente não deve exceder 5,2 A. A essa temperatura, a transferência de calor por radiação (0,6 W/m) é muito menor do que a por convecção (10,4 W/m). Assim sendo, se for desejável operar com uma corrente elétrica maior, mantendo-se a temperatura da barra dentro do limite de segurança, o coeficiente de convecção deverá ser aumentado através do aumento da velocidade de circulação do ar. Para h = 250 W/m$^2 \cdot$ K, o valor máximo permitido para a corrente aumentaria para 8,1 A.
4. O software *Interactive Heat Transfer* (IHT), que acompanha este livro, é especialmente útil na resolução de equações, como a equação de balanço de energia do Comentário 1, e na criação de gráficos, como no Comentário 2. Para utilizar o *IHT* para esse propósito, digite o balanço de energia no *Espaço de trabalho* no seguinte formato:

```
pi*D*h*(T - Tinf) + pi*D*eps*sigma*
. (T^4 - Tviz^4) = I^2*Re'
```

A seguir, digite nos parâmetros conhecidos de entrada, marque em *Solve* e encontre T. Para determinar T para correntes de operação na faixa $0 \leq I \leq 10$ A, use *Explore* para varrer a variável I. Você pode obter a curva $I \times T$ utilizando *Graph*, com o qual você terá um gráfico com aparência profissional.

EXEMPLO 1.4

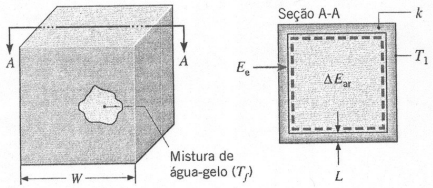
Uma massa de gelo M na temperatura de fusão (T_f = 0°C) encontra-se no interior de uma cavidade cúbica de aresta W. A parede da cavidade possui espessura L e condutividade térmica k. Se a temperatura T_1, da superfície externa da parede, é maior do que T_f ($T_1 > T_f$), obtenha uma expressão para o tempo necessário para que a fusão do gelo seja completa.

SOLUÇÃO

Dados: Massa e temperatura do gelo. Dimensões, condutividade térmica e temperatura da superfície externa da parede que contém o gelo.

Achar: Expressão para o tempo necessário para fundir o gelo completamente.

Esquema:



Hipóteses:

1. A superfície interna da parede se encontra à temperatura T_f durante todo o processo.
2. Propriedades constantes.
3. Condução unidimensional, em regime estacionário, através de cada parede.
4. A área de condução de calor de uma parede é aproximadamente $W^2 (L \ll W)$.

Análise: Uma vez que desejamos determinar o tempo t_f, a primeira lei deve ser aplicada durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_f$. Logo, aplicando a Eq. 1.11b a um volume de controle que englobe a mistura água-gelo, segue que

$$E_e = \Delta E_{ar} = \Delta U_{lat}$$

onde o aumento na energia armazenada no interior do volume de controle é devido, exclusivamente, à variação da energia latente associada à conversão do estado sólido para o líquido. Por condução, o calor é transferido ao gelo, através das paredes do recipiente, e, uma vez que a diferença de temperatura através da parede é considerada constante e igual a $(T_1 - T_f)$ durante todo o processo de fusão, a taxa de condução de calor é uma constante

$$q_{cond} = k(6W^2)\frac{T_1 - T_f}{L}$$

e a quantidade de energia que entra é

$$E_e = \left[k(6W^2)\frac{T_1 - T_f}{L}\right] t_f$$

A quantidade de energia necessária para efetuar tal mudança de fase por unidade de massa do sólido é denominada *calor latente de fusão* h_s. Logo, o aumento de energia armazenada é

$$\Delta E_{ar} = Mh_s$$

Substituindo na expressão da primeira lei, temos

$$t_f = \frac{Mh_s L}{6W^2 k(T_1 - T_f)} \quad \triangleleft$$

Comentários:

1. Iriam surgir várias complicações se o gelo estivesse inicialmente sub-resfriado. O termo referente à energia armazenada deveria incluir a variação na energia sensível (interna térmica) necessária para elevar a temperatura do gelo sub-resfriado à temperatura de fusão. Durante esse processo, gradientes de temperatura se desenvolveriam no gelo.
2. Considere uma cavidade de aresta W = 200 mm, espessura da parede L = 10 mm e condutividade térmica k = 0,05 W/m · K. A massa de gelo na cavidade é

$$M = \rho_s(W - 2L)^3 = 920 \text{ kg/m}^3 (0{,}200 - 0{,}020)^3 \text{ m}^3 = 5{,}37 \text{ kg}$$

   Se a temperatura da superfície externa for T_1 = 20°C, o tempo necessário para a fusão do gelo é

$$t_f = \frac{5{,}37 \text{ kg} \times 334.000 \text{ J/kg} \times 0{,}01 \text{ m}}{6(0{,}200 \text{ m})^2 \times 0{,}05 \text{ W/m} \cdot \text{K} (20 - 0)^\circ\text{C}} = 74.730 \text{ s} = 20{,}8 \text{ h}$$

   A densidade e o calor latente de fusão do gelo são ρ_s = 920 kg/m³ e h_s = 334 kJ/kg, respectivamente.
3. Observe que unidades de K e °C cancelam uma à outra na expressão para t_f. Esse cancelamento ocorre freqüentemente na análise de transferência de calor e é devido a ambas as unidades aparecerem na forma de *diferença de temperatura*.

1.3.2 O BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIES

Freqüentemente vamos encontrar situações de aplicação de conservação de energia em uma superfície de um meio. Nesse caso especial, a superfície de controle não inclui a massa ou o volume, e aparece conforme mostrado na Fig. 1.9. Conseqüentemente, os termos de geração e armazenamento da expressão da conservação, Eq. 1.11a, não são mais relevantes, tornando-se necessário apenas lidar com o fenômeno de superfície. Nesse caso, a exigência da conservação se torna

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0 \qquad (1.12)$$

Embora possa estar ocorrendo geração de energia no meio, o processo não afetaria o balanço de energia na superfície de controle. Além disso, a exigência da conservação de energia é

EXEMPLO 1.5

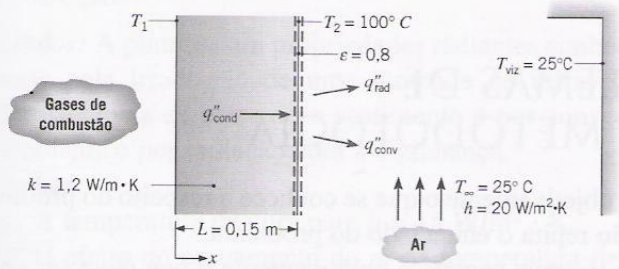
Os gases quentes da combustão de uma fornalha são separados do ar ambiente e de sua vizinhança, que estão a 25°C, por uma parede de tijolos de espessura 0,15 m. O tijolo tem condutividade térmica de 1,2 W/m · K e emissividade superficial de 0,8. Em condições de regime estacionário, a temperatura da superfície externa vale 100°C. A transferência de calor por convecção livre para o ar adjacente à superfície é caracterizada pelo coeficiente de convecção $h = 20\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$. Qual a temperatura da superfície interna do tijolo?

SOLUÇÃO

Dados: Temperatura da superfície externa da parede da fornalha, com espessura, condutividade térmica e emissividade conhecidas. Condições ambientes.

Achar: Temperatura da superfície interna da parede.

Esquema:



Hipóteses:

1. Condições de regime estacionário.
2. Transferência de calor por condução unidimensional através da parede.
3. Troca de calor por radiação entre a superfície externa e a vizinhança da parede, do tipo entre uma pequena superfície envolta por uma grande.

Análise: A temperatura da superfície interna pode ser obtida pelo balanço de energia da superfície externa. Da Eq. 1.12,

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0$$

segue-se que, com base em uma unidade de área,

$$q'_{cond} - q'_{conv} - q''_{rad} = 0$$

ou, rearrumando e substituindo as Eqs. 1.2, 1.3a e 1.7,

$$k\frac{T_1 - T_2}{L} = h(T_2 - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_2^4 - T_{viz}^4)$$

Substituindo os valores numéricos apropriados, encontramos

$$1{,}2\ \text{W/m} \cdot \text{K}\ \frac{(T_1 - 373)\ \text{K}}{0{,}15\ \text{m}} = 20\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}\ (373 - 298)\ \text{K} + 0{,}8(5{,}67 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(373^4 - 298^4)\ \text{K}^4$$

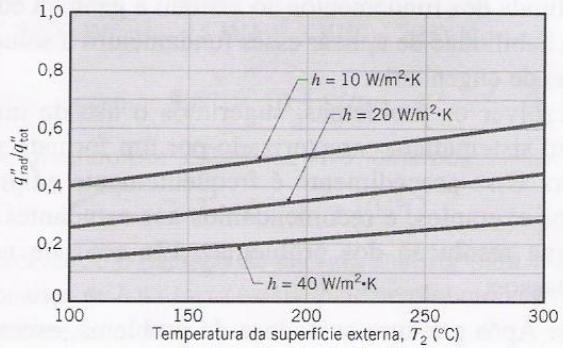
$$= 1500\ \text{W/m}^2 + 520\ \text{W/m}^2 = 2020\ \text{W/m}^2$$

Resolvendo para T_1,

$$T_1 = 373\ \text{K} + \frac{0{,}15\ \text{m}}{1{,}2\ \text{W/m} \cdot \text{K}}(2020\ \text{W/m}^2) = 625\ \text{K} = 352°C$$ ◁

Comentários:

1. Quando utilizamos balanço de energia envolvendo troca por radiação e outros modos de transferência de calor, é bom nos acostumarmos a expressar todas as temperaturas em kelvin. Essa prática se tornará *necessária* quando trabalharmos com temperaturas desconhecidas que aparecem no termo da radiação e/ou em mais termos.
2. A contribuição relativa do fluxo de calor por radiação, q''_{rad}, ao fluxo total de calor, $q''_{tot} = q''_{conv} + q''_{rad}$, na superfície externa depende fortemente da temperatura da superfície, bem como de sua emissividade ε e do coeficiente de convecção h. A dependência de q''_{rad}/q''_{tot} em T_2 é ilustrada no gráfico a seguir para $\varepsilon = 0{,}8$ e três valores de h variando de 10 a 40 W/m² · K.



EXEMPLO 1.6

O revestimento de uma placa é curado através de sua exposição a uma lâmpada de infravermelho de 2000 W/m^2. Ele absorve 80% da irradiação e tem emissividade de 0,50. A placa também está exposta a uma corrente de ar e a uma grande vizinhança, cujas temperaturas são 20°C e 30°C, respectivamente.

1. Se o coeficiente de convecção entre a placa e o ar ambiente é 15 W/m^2 · K, qual a temperatura de cura da placa?
2. As características finais do revestimento, incluindo seu desgaste e durabilidade, são reconhecidamente dependentes da temperatura na qual a cura ocorre. Um sistema de circulação do ar é capaz de controlar a velocidade do mesmo e, assim, o coeficiente de convecção sobre a superfície curada, mas o engenheiro de processos precisa saber como a temperatura depende do coeficiente de convecção. Forneça a informação desejada calculando e plotando a temperatura da superfície em função de h para $2 \leq h \leq 200$ W/m^2 · K. Qual o valor de h que fornecerá uma temperatura de cura de 50°C?

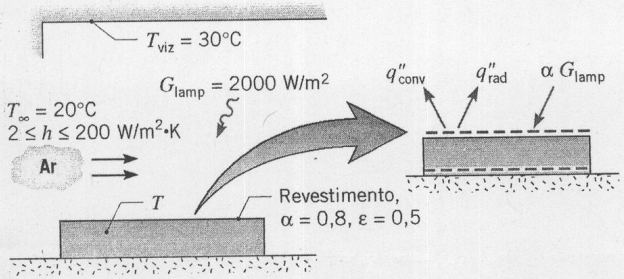
SOLUÇÃO

Dados: A pintura com propriedades radiantes conhecidas é curada pela irradiação de uma lâmpada de infravermelho. A transferência de calor do revestimento é por convecção ao ar ambiente e por radiação com a vizinhança.

Achar:

1. A temperatura de cura para $h = 15$ W/m^2 · K.
2. O efeito do escoamento do ar na temperatura de cura para $2 \leq h \leq 200$ W/m^2 · K. O valor de h para o qual a temperatura de cura é 50°C.

Esquema:



Hipóteses:

1. Condições de regime estacionário.
2. A perda de calor da parte posterior da placa é desprezível.
3. A placa é um pequeno objeto em uma grande vizinhança, e o revestimento tem absorvidade de $\alpha_{viz} = \varepsilon = 0{,}5$ em relação à irradiação para a vizinhança.

Análise:

1. Uma vez que o processo apresenta condições de regime estacionário e não há transferência de calor na parte posterior da placa, a placa deve ser isotérmica ($T_s = T$). Assim sendo, a temperatura procurada pode ser determinada ou posicionando-se uma superfície de controle sobre a superfície exposta da placa e aplicando-se a Eq. 1.12 ou colocando-se a superfície de controle ao redor de toda a placa e aplicando-se a Eq. 1.11a. Adotando a segunda abordagem e reconhecendo que não existe geração de energia interna ($\dot{E}_g = 0$), reduzimos a Eq. 1.11a a

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0$$

em que $\dot{E}_{ar} = 0$ para condições de regime estacionário. Sendo a energia que entra resultante da absorção da irradiação da lâmpada pelo revestimento e a energia que sai resultante da convecção e da radiação transferida para a vizinhança, segue que

$$(\alpha G)_{lamp} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

Substituindo as Eqs. 1.3a e 1.7, obtemos

$$(\alpha G)_{lamp} - h(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_{viz}^4) = 0$$

Substituindo os valores numéricos

$$0{,}8 \times 2000 \text{ W/m}^2 - 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}(T - 293) \text{ K}$$

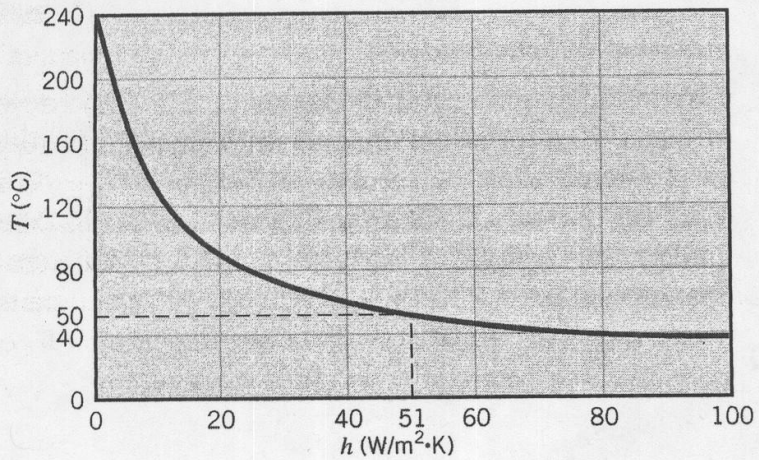
$$- 0{,}5 \times 5{,}67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \, (T^4 - 303^4) \text{ K}^4 = 0$$

e resolvendo por tentativa e erro, obtemos

$$T = 377 \text{ K} = 104°\text{C}$$ ◁

2. Resolvendo o balanço de energia anterior para valores selecionados de h na faixa estabelecida e plotando os resultados, obtemos

Ex. 1.6 continuação



Se a temperatura de cura desejada for 50°C, a corrente de ar deve fornecer um coeficiente de convecção de

$$h(T = 50°C) = 51{,}0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$ ◁

Comentários:

1. A temperatura do revestimento (placa) pode ser reduzida pela diminuição dos valores de T_∞ e T_{viz}, ou pelo aumento da velocidade do ar e, conseqüentemente, do coeficiente de convecção.

2. As contribuições relativas da convecção e da radiação à transferência de calor da placa variam bastante com h. Para $h = 2$ W/m$^2 \cdot$ K, $T = 204°C$ e a radiação é dominante ($q''_{rad} \approx 1232$ W/m^2, $q''_{conv} \approx 368$ W/m^2). Por outro lado, para $h = 200$ W/m$^2 \cdot$ K, $T = 28°C$ e a convecção é dominante ($q''_{conv} \approx 1606$ W/m^2, $q''_{rad} \approx -6$ W/m^2). De fato, para essa condição, a temperatura da placa é ligeiramente menor do que a da vizinhança, e conseqüentemente a transferência de calor por radiação é *para* a placa.

3. Esse exemplo é um entre os 15 já resolvidos no *IHT*, que pode ser acessado na barra de ferramentas em *Examples*. Conforme você for iniciando cada capítulo, verifique os exemplos correspondentes. Cada modelo inclui *Exercícios* (*Exercises*) que testam seu entendimento dos conceitos de transferência de calor.

RESUMO DOS PROCESSOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

TABELA 1.5 Resumo dos processos de transferência de calor

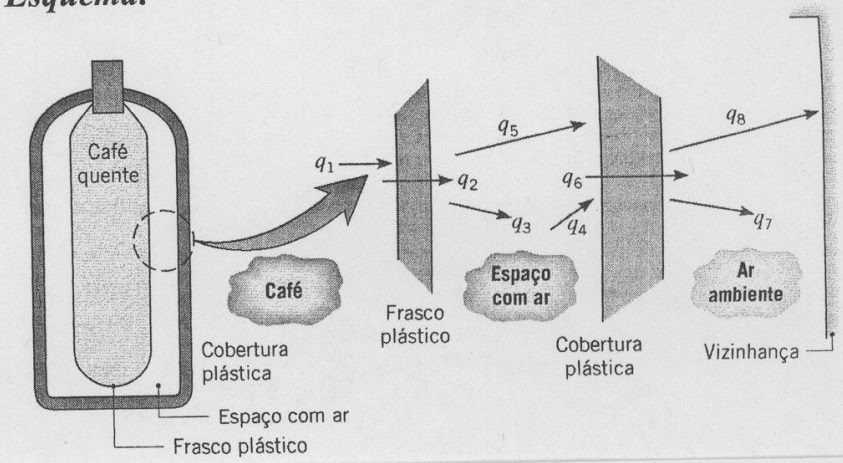
MODO	MECANISMO	EQUAÇÃO DA TAXA	NÚMERO DA EQUAÇÃO	PROPRIEDADE OU COEFICIENTE DE TRANSPORTE
Condução	Difusão de energia devido ao movimento molecular aleatório	$q''_x\,(\mathrm{W/m^2}) = -k\,\dfrac{dT}{dx}$	(1.1)	$k\,(\mathrm{W/m\cdot K})$
Convecção	Difusão de energia devido ao movimento aleatório molecular e ao transporte de energia devido ao movimento global do fluido (advecção)	$q''\,(\mathrm{W/m^2}) = h(T_s - T_\infty)$	(1.3a)	$h\,(\mathrm{W/m^2\cdot K})$
Radiação	Energia transferida por ondas eletromagnéticas	$q''\,(\mathrm{W/m^2}) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$ ou $q\,(\mathrm{W}) = h_r A(T_s - T_{viz})$	(1.7) (1.8)	ε $h_r\,(\mathrm{W/m^2\cdot K})$

Identificação dos processos de transferência de calor: garrafa térmica com café quente

EXEMPLO 1.7

Um recipiente fechado, completamente cheio com café quente, está em uma sala cujo ar e as paredes encontram-se a uma temperatura fixa. Identifique todos os processos de transferência de calor que contribuem para o resfriamento do café. Comente as características que contribuiriam para aprimorar o projeto do recipiente.

Esquema:



SOLUÇÃO

Dados: Café quente separado da vizinhança, mais fria, por um frasco plástico, um espaço contendo ar e um invólucro plástico.

Achar: Os processos relevantes de transferência de calor.

As trajetórias para a transferência de energia a partir do café são as seguintes:

- q_1: convecção livre do café para o frasco
- q_2: condução através do frasco
- q_3: convecção livre do frasco para o ar
- q_4: convecção livre do ar para o invólucro plástico
- q_5: troca por radiação entre a superfície externa do frasco e a superfície interna do invólucro plástico
- q_6: condução através do invólucro plástico
- q_7: convecção livre do invólucro plástico para o ar ambiente
- q_8: troca por radiação entre a superfície externa do invólucro plástico e a vizinhança

Comentários: Melhorias no projeto estão associadas (1) ao uso de superfícies aluminizadas (baixa emissividade) para o frasco e o invólucro a fim de reduzir a radiação e (2) retirar o ar ou completar o espaço com um material que diminua os efeitos da convecção livre.