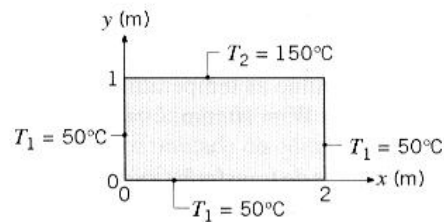


Lista de exercícios – Caps. 4 e 5

TM-114 Transferência de Calor e Massa (Turma B) – 2008/1

1. (Incropera et al., 6 ed., 4.2) Uma placa retangular bidimensional está sujeita às condições de contorno especificadas. Usando os resultados da solução exata para a equação do calor apresentados na Seção 4.2, calcule a temperatura no ponto central (1; 0,5), utilizando os cinco primeiros termos não-nulos da série infinita que deve ser determinada. Avalie o erro decorrente do uso somente dos três primeiros termos da série infinita. Represente graficamente as distribuições de temperaturas $T(x; 0,5)$ e $T(1,0; y)$.



2. (Incropera et al., 6 ed., 4.6) Usando as relações das resistências térmicas desenvolvidas no Capítulo 3, determine expressões para o fator de forma para as seguintes geometrias:

- Parede plana, casca cilíndrica e casca esférica.
- Esfera isotérmica de diâmetro D enterrada em um meio infinito.

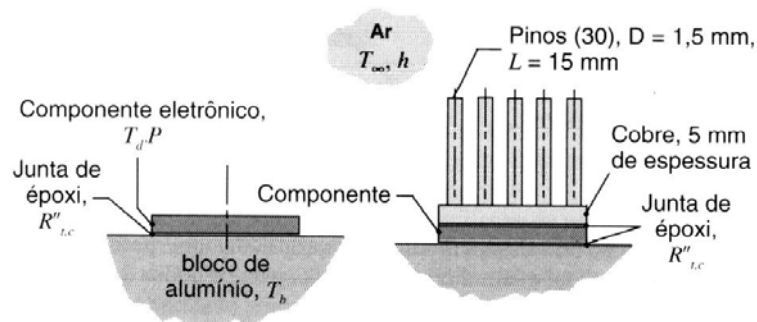
3. (Incropera et al., 6 ed., 4.9) Rejeitos radioativos são temporariamente armazenados em um recipiente esférico, cujo centro encontra-se enterrado a uma distância de 10 m abaixo da superfície da terra. O diâmetro externo do recipiente possui 2 m e 500 W de calor são liberados como resultado do processo de decaimento radioativo. Se a temperatura da superfície do solo é de 20°C, qual é a temperatura da superfície externa do recipiente em condições de regime estacionário? Em um esboço do sistema solo-recipiente desenhado em escala, mostre isotermas e linhas de fluxo térmico representativas no interior do solo.

4. (Incropera et al., 6 ed., 4.25) Um iglu é construído na forma de um hemisfério, com raio interno de 1,8 m e paredes de neve compactada com uma espessura de 0,5 m. No interior do iglu, o coeficiente de transferência de calor nas superfícies é de 6 W/m²K; no lado de fora, sob condições de ventos normais, ele é de 15 W/m²K. A condutividade térmica da neve compactada é de 0,15 W/mK. A temperatura da camada de gelo sobre a qual o iglu se encontra é de -20°C e a sua condutividade térmica é a mesma da neve compactada.



Considerando que os corpos dos ocupantes do iglu forneçam uma fonte contínua de calor de 320 W no interior do iglu, calcule a temperatura do ar no seu interior quando a temperatura do ar externo é de $T_\infty = -40^\circ\text{C}$. Certifique-se de levar em consideração as perdas de calor pelo chão do iglu. Resp: $1,2^\circ\text{C}$.

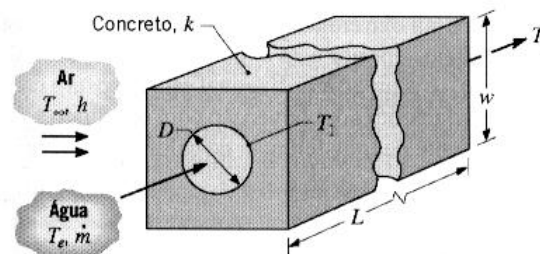
5. (Incropera et al., 6 ed., 4.27) Um componente eletrônico na forma de um disco com 20 mm de diâmetro dissipa 100 W quando montado sobre um grande bloco de uma liga de alumínio (2024), cuja temperatura é mantida a 27°C . A configuração de montagem é tal que há uma resistência de contato $R''_{tc} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ na interface entre o componente eletrônico e o bloco.



a) Calcule a temperatura que o componente atingirá, supondo que toda a potência gerada pelo componente deva ser transferida por condução para o bloco. Resp: 57°C .

b) Com o objetivo de operar o componente com um nível mais elevado de potência, um projetista de circuito propõe fixar um dissipador de potência no topo do componente. As aletas, em forma de pino, e o material da base são fabricados em cobre ($k = 400 \text{ W/mK}$) e estão expostos a uma corrente de ar a 27°C , com um coeficiente por convecção de $1.000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Para a temperatura calculada na parte (a), qual é a nova potência de operação permitível? Resp: 138 W

6. (Incropera et al., 6 ed., 4.29) Água quente é transportada de uma estação de cogeração de potência para usuários comerciais e industriais através de tubos de aço com diâmetro $D = 150 \text{ mm}$. Cada tubo encontra-se no centro de um bloco de concreto ($k = 1,4 \text{ W/mK}$) de seção transversal quadrada ($w = 300 \text{ mm}$). As superfícies externas do concreto estão expostas ao ar ambiente, no qual $T_\infty = 0^\circ\text{C}$ e $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

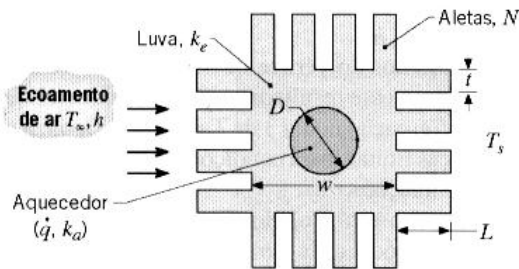


a) Sendo a temperatura de entrada da água escoando através do tubo igual a $T_e = 90^\circ\text{C}$, qual é a perda de calor por unidade de comprimento do tubo na proximidade da entrada? A temperatura do tubo T_1 pode ser considerada igual à temperatura de entrada da água. Resp: 745 W/m .

b) Se a diferença entre as temperaturas de entrada e de saída da água escoando através de um tubo com 100 m de comprimento não puder exceder os 5°C , estime a vazão mássica mínima

permitida. Um valor de $c_p = 4207 \text{ J/kgK}$ pode ser usado para o calor específico da água.
 Resp: $\dot{m} = 3,54 \text{ kg/s}$.

7. (Incropera et al., 6 ed., 4.30) A unidade elementar de um aquecedor de ar é constituída por um longo bastão circular de diâmetro D , que é encapsulado por uma luva aletada. No bastão, energia térmica é gerada por aquecimento resistivo. As N aletas de espessura t e comprimento L são integralmente esculpidas na luva quadrada de largura w . Sob condições de operação em regime estacionário, a taxa de geração de energia térmica corresponde à taxa de transferência de calor para o escoamento de ar sobre a luva.



- a) Sob condições nas quais uma temperatura superficial uniforme T_s é mantida ao redor da circunferência do aquecedor e a temperatura T_∞ e o coeficiente convectivo h do escoamento do ar são conhecidos, obtenha uma expressão para a taxa de transferência de calor, por unidade de comprimento, para o ar. Determine a taxa de transferência de calor para $T_s = 300^\circ\text{C}$, $D = 20 \text{ mm}$, uma luva de alumínio ($k_l = 240 \text{ W/mK}$), $w = 40 \text{ mm}$, $N = 16$, $t = 4 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$, $T_\infty = 50^\circ\text{C}$ e $h = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Resp: $q' = 74.600 \text{ W/m}$
- b) Para a taxa de transferência de calor anterior e um aquecedor de cobre com condutividade térmica $k_a = 400 \text{ W/mK}$, quais são a taxa volumétrica de geração de calor requerida no interior do aquecedor e a sua temperatura no eixo central correspondente? Resp: $2,38 \times 10^8 \text{ W/m}^3$; 315°C .

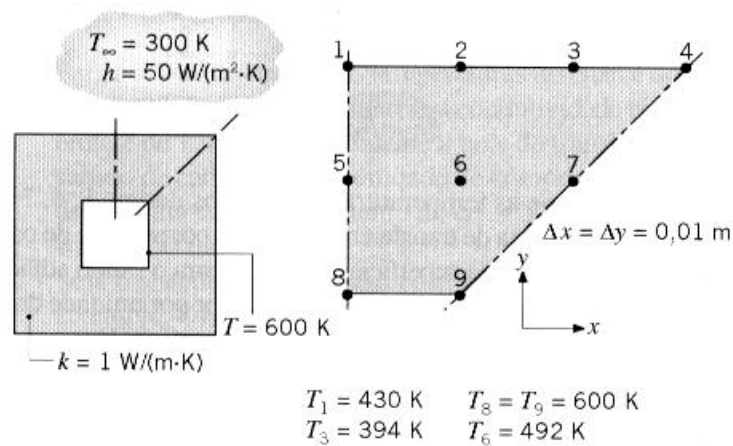
8. (Incropera et al., 6 ed., 4.32) Seja a configuração nodal 2 da Tabela 4.2. Deduza as equações de diferenças finitas, para condições de regime estacionário, nas seguintes situações:

- a) O contorno horizontal do vértice interno está perfeitamente isolado e o contorno vertical sujeito a um processo de convecção (T_∞, h).
- b) Os contornos do vértice interno estão perfeitamente isolados. Como esse resultado se compara com a Eq. 4.41?

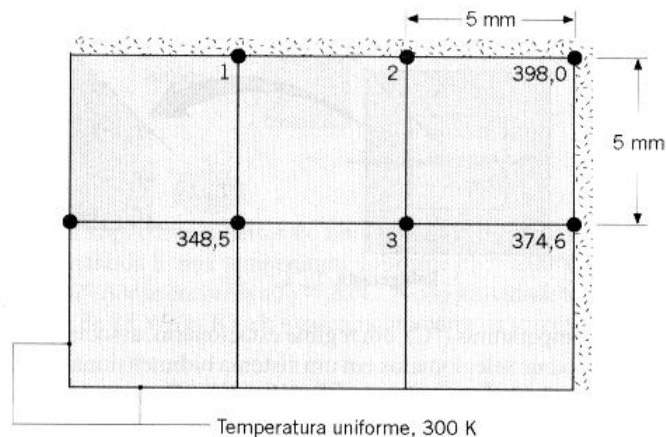
9. (Incropera et al., 6 ed., 4.44) Seja o canal quadrado mostrado na figura, operando sob condições de regime estacionário. A superfície interna do canal está a uma temperatura uniforme de 600 K , enquanto a superfície externa está exposta à troca de calor por convecção com um fluido a 300 K e um coeficiente convectivo de $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Com base em um elemento simétrico do canal, foi construída uma malha bidimensional e identificados os seus nós. As temperaturas nos nós 1, 3, 6, 8 e 9 são fornecidas.

- a) Partindo de volumes de controle apropriadamente definidos, deduza as equações de diferenças finitas para os nós 2, 4 e 7, e determine as temperaturas T_2 , T_4 e T_7 . Resp: $T_2 = 422 \text{ K}$; $T_4 = 363 \text{ K}$; $T_7 = 443 \text{ K}$.

b) Calcule a perda de calor por unidade de comprimento do canal. Resp: $q' = q'_1 + q'_2 + q'_3 + q'_4 = 156 \text{ W/m}$.



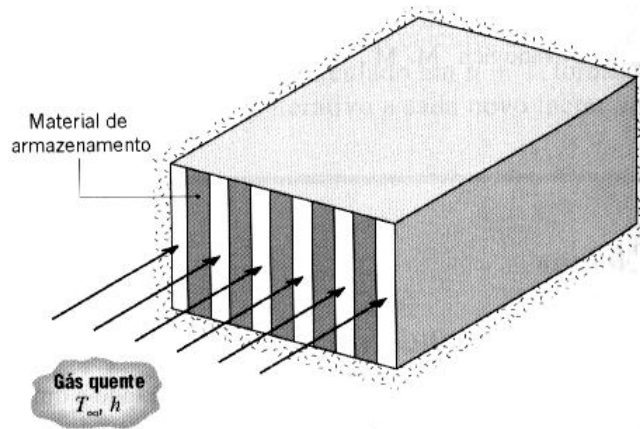
10. (Incropera et al., 6 ed., 4.45) As temperaturas, em regime estacionário, em três pontos nodais de uma longa barra retangular, são fornecidas na figura. A barra experimenta uma taxa de geração volumétrica de calor uniforme igual a $5 \times 10^7 \text{ W/m}^3$ e possui uma condutividade térmica de 20 W/mK . Dois de seus lados são mantidos a uma temperatura constante de 300 K , enquanto os demais se encontram isolados.



a) Determine as temperaturas nos nós 1, 2 e 3. Resp: $T_1 = 362,4 \text{ K}$; $T_2 = 390,2 \text{ K}$; $T_3 = 369 \text{ K}$.
 b) Calcule a taxa de transferência de calor saindo da barra, por unidade de comprimento (W/m), utilizando as temperaturas nodais. Compare esse resultado com o da taxa calculada a partir do conhecimento da taxa de geração volumétrica e das dimensões da barra. Resp: 7500 W/m .

11. (Incropera et al., 6 ed., 5.5) Bolas de aço com 12 mm de diâmetro são temperadas pelo aquecimento a 1150 K seguido pelo resfriamento lento até 400 K em um ambiente com ar a $T_\infty = 325 \text{ K}$ e $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Supondo que as propriedades do aço sejam $k = 40 \text{ W/mK}$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 600 \text{ J/kgK}$, estime o tempo necessário para o processo de resfriamento. Resp: 1122 s .

12. (Incropera et al., 6 ed., 5.11) Uma unidade de armazenamento de energia térmica é formada por um grande canal retangular, que tem as suas superfícies externas isoladas e que apresenta no seu interior camadas do material de armazenamento separadas por canais de escoamento.



Cada camada do material de armazenamento é uma chapa de alumínio com largura $W = 0,05$ m e se encontra a uma temperatura inicial de 25°C . Considere condições nas quais a unidade de armazenamento é carregada pela passagem de gases quentes através dos canais de escoamento, com a temperatura dos gases e o coeficiente convectivo terem valores constantes de $T_\infty = 600^\circ\text{C}$ e $h = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ao longo dos canais. Quanto tempo será necessário para que se atinja 75% do máximo armazenamento de energia possível? Qual é a temperatura do alumínio nesse instante? Resp: 698 s; 456°C .

13. (Incropera et al., 6 ed., 5.21) Antes de ser injetado no interior de uma fornalha, carvão pulverizado é preaquecido com a sua passagem através de um tubo cilíndrico cuja superfície é mantida a $T_{\text{viz}} = 1000^\circ\text{C}$. As partículas de carvão ficam suspensas no escoamento de ar e se movem a uma velocidade de 3 m/s. Aproximando as partículas por esferas com 1 mm de diâmetro e supondo que elas sejam aquecidas por transferência radiante com a superfície do tubo, qual deve ser o comprimento do tubo para que o carvão seja aquecido até 600°C ? A utilização do método da capacitância global é justificável? Resp: 3,54 m.

14. (Incropera et al., 6 ed., 5.24) Em um experimento de processamento de material conduzido a bordo do ônibus espacial, uma esfera de nióbio, com um revestimento com 10mm de diâmetro é removida de um forno a 900°C e resfriada até uma temperatura de 300°C . Embora haja variação das propriedades do nióbio nesse intervalo de temperaturas, valores constantes podem ser supostos com uma aproximação aceitável, sendo $\rho = 8600 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 290 \text{ J/kgK}$ e $k = 63 \text{ W/mK}$.

a) Se o resfriamento for conduzido em uma grande câmara, na qual há vácuo, cujas paredes estejam a 25°C , determine o tempo requerido para atingir a temperatura final, se o revestimento estiver polido e tiver uma emissividade $\varepsilon = 0,1$. Quanto tempo demoraria se o revestimento estivesse oxidado e $\varepsilon = 0,6$? Resp: 1190 s; 199 s.

b) Para reduzir o tempo requerido para o resfriamento, considera-se a imersão da esfera em uma corrente de gás inerte na qual $T_\infty = 25^\circ\text{C}$ e $h = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$. Desprezando a radiação, qual é o tempo requerido para o resfriamento? Resp: 24,1 s.

c) Considerando os efeitos da radiação e da convecção, qual é o tempo requerido para o resfriamento, se $h = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $\varepsilon = 0,6$? Resp: 21 s.

15. (Incropera et al., 6 ed., 5.39) A parede, com 150 mm de espessura, de um forno de chama direta é construída com tijolos de argila refratária ($k = 1,5 \text{ W/mK}$, $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 1000 \text{ J/kgK}$) e está isolada em sua superfície externa. A parede está a uma temperatura inicial uniforme de 20°C , quando os queimadores são acesos e a superfície interna é exposta aos produtos de combustão para os quais $T_\infty = 950^\circ\text{C}$ e $h = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$. Quanto tempo demora para a superfície externa da parede atingir uma temperatura de 750°C ? Resp: 33.800 s.

16. (Incropera et al., 6 ed., 5.42) Durante a operação transiente, o ejetor de um motor de foguete, feito em aço, não deve exceder uma temperatura máxima de operação de 1500 K quando exposto a gases de combustão caracterizados por uma temperatura de 2300 K e um coeficiente de transferência de calor por convecção de $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Para estender o período de duração da operação do motor, propõe-se a aplicação de um revestimento protetor térmico cerâmico ($k = 10 \text{ W/mK}$, $\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) sobre a superfície interna do ejetor. Para um revestimento cerâmico com 10 mm de espessura e inicialmente a uma temperatura de 300 K, obtenha uma estimativa conservativa para a máxima duração de operação do motor permitida. O raio do ejetor é muito maior do que o somatório das espessuras da parede e do revestimento. Resp: 10,9 s.

17. (Incropera et al., 6 ed., 5.49) Um cilindro comprido com 30 mm de diâmetro, inicialmente a uma temperatura uniforme de 1000 K, é subitamente resfriado pela imersão em um grande banho de óleo que se encontra a uma temperatura constante de 350 K. As propriedades do cilindro são $k = 1,7 \text{ W/mK}$, $c_p = 1600 \text{ J/kgK}$ e $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, enquanto o coeficiente convectivo é de $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Calcule o tempo necessário para a superfície do cilindro atingir 500 K. Resp: 145 s.

18. (Incropera et al., 6 ed., 5.53) Como parte de um processo de tratamento térmico, bastões de aço inoxidável 304 com 100 mm de diâmetro são resfriados a partir de uma temperatura inicial de 500°C pela sua suspensão em um banho de óleo a 30°C . Se um coeficiente de transferência de calor por convecção de $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ for mantido pela circulação do óleo, quanto tempo demora para o eixo central dos bastões atingir uma temperatura de 50°C , quando então ele é retirado do banho? Se 10 bastões de comprimento $L = 1 \text{ m}$ forem processados por hora, qual é a taxa nominal na qual energia deve ser retirada do banho (a carga de resfriamento)? Resp: 17 min; 149 kW.

19. (Incropera et al., 6 ed., 5.57) No tratamento térmico para endurecer esferas de rolamento feitas em aço ($c_p = 500 \text{ J/kgK}$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $k = 50 \text{ W/mK}$), é desejável aumentar a temperatura superficial por um curto período de tempo, sem no entanto, provocar um aquecimento significativo no interior da esfera. Esse tipo de aquecimento pode ser obtido por meio de uma rápida imersão da esfera em um banho de sal fundido a uma temperatura $T_\infty = 1300 \text{ K}$ e $h = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Considere que qualquer ponto no interior da esfera cuja temperatura seja superior a 1000 K tenha sido atingido pelo tratamento. Calcule o tempo necessário para tratar o milímetro mais externo de uma esfera com 20 mm de diâmetro, se sua temperatura inicial é de 300 K. Resp: 3,4 s.

20. (Incropera et al., 6 ed., 5.59) Esferas de aço inoxidável (AISI 304) que foram aquecidas uniformemente até 850°C, são endurecidas pelo resfriamento em um banho de óleo mantido a 40°C. O diâmetro de cada esfera é de 20 mm e o coeficiente convectivo associado ao banho de óleo é de 1000 W/m²K.

a) Se o resfriamento deve prosseguir até que a temperatura superficial das esferas atinja 100°C, quanto tempo devem as esferas permanecer imersas no banho de óleo? Qual é a temperatura no centro das esferas no instante da conclusão do período de resfriamento? Resp: 42 s; 114°C.

b) Se 10.000 esferas devem ser resfriadas a cada hora, qual é a taxa na qual energia deve ser removida pelo sistema de resfriamento do banho de óleo de modo a mantê-lo à temperatura de 40°C? Resp: 40 kW.

21. (Incropera et al., 6 ed., 5.69) Uma lâmina espessa de aço ($c_p = 480$ J/kgK, $\rho = 7800$ kg/m³, $k = 50$ W/mK) está inicialmente a 300°C e é resfriada por jatos de água colidindo sobre uma de suas superfícies. A temperatura da água é de 25°C e os jatos mantêm um coeficiente convectivo extremamente alto e aproximadamente uniforme na superfície. Supondo que a superfície seja mantida na temperatura da água ao longo de todo o resfriamento, quanto tempo irá demorar para temperatura atingir 50°C a uma distância de 25 mm da superfície? Resp: 1793 s.

22. (Incropera et al., 6 ed., 5.77) Uma chapa muito espessa, que possui difusividade térmica de $5,6 \times 10^{-6}$ m²/s e condutividade térmica igual a 20 W/mK, está inicialmente a uma temperatura uniforme de 325°C. De repente, a sua superfície é exposta a um refrigerante a 15°C para o qual o coeficiente de transferência de calor por convecção é de 100 W/m²K. Determine as temperaturas na superfície e a uma profundidade de 45 mm passados 3 min da exposição da chapa ao refrigerante. Resp: 276°C; 315°C.

23. (Incropera et al., 6 ed., 5S9) Um longo lingote de aço (aço-carbono não-ligado), com seção transversal quadrada de 0,3 m por 0,3 m e inicialmente a uma temperatura uniforme de 30°C, é colocado no interior de um forno que se encontra à temperatura de 750°C. Se o coeficiente de transferência de calor por convecção para o processo de aquecimento é de 100 W/m²K, quanto tempo o lingote deve permanecer no interior do forno até que a temperatura no seu centro atinja 600°C? Resp: 1,83 h.

24. (Incropera et al., 6 ed., 5S10) Um tijolo refratário com dimensões de 0,06 m x 0,09 m x 0,20 m é removido de um forno a 1600 K e resfriado ao ar a 40°C, com $h = 50$ W/m²K. Qual é a temperatura no centro e nos vértices do tijolo passados 50 min do início do processo de resfriamento? Resp: 434 K; 320 K.

25. (Incropera et al., 6 ed., 5S13) Um longo bastão com 20 mm de diâmetro é fabricado em alumina (óxido de alumínio policristalino) e se encontra inicialmente a uma temperatura uniforme de 850 K. O bastão é subitamente exposto a um fluido a 350 K, com $h = 500$ W/m²K. Estime as temperaturas no eixo central do bastão, em uma das extremidades expostas e a uma distância axial de 6 mm dessa extremidade, 30 s após o início da exposição do bastão ao fluido. Resp: 561 K; 604 K.