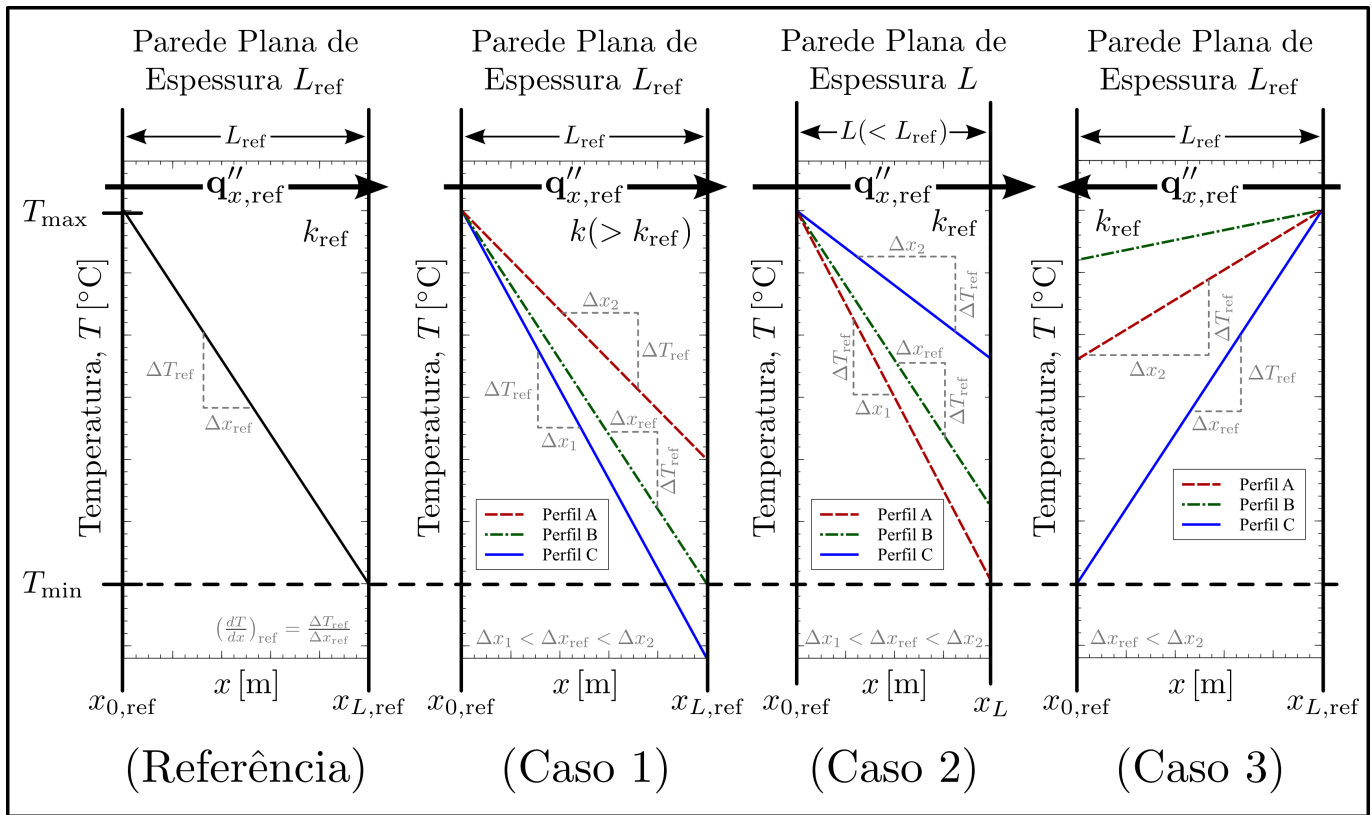


Transmissão de Calor (Capítulo 2)

Lista de Problemas

1. Considere condução de calor unidimensional numa parede plana, em regime estacionário, sem geração interna de energia térmica e com condutibilidade térmica (k) constante. Nestas condições, impondo as temperaturas $T(x = x_{0,\text{ref}}) = T_{\text{max}}$ e $T(x = x_{L,\text{ref}}) = T_{\text{min}} (< T_{\text{max}})$ e considerando $k = k_{\text{ref}}$ obtém-se a distribuição de temperaturas apresentada na figura (“Referência”) e o fluxo de calor correspondente é dado por $\mathbf{q}''_{x,\text{ref}} = q''_{x,\text{ref}} \mathbf{i}$. Considerando $q''_{x,\text{ref}}$ e T_{max} (temperatura máxima



Problema 1

na parede) para os Casos 1–3 (ver figura), indique, justificando:

- (a) qual dos perfis apresentados para o Caso 1 é obtido se $k > k_{\text{ref}}$;
 - (b) qual dos perfis apresentados para o Caso 2 é obtido se $L < L_{\text{ref}} (= x_{L,\text{ref}} - x_{0,\text{ref}})$; e
 - (c) qual dos perfis apresentados para o Caso 3 é obtido se $\mathbf{q}''_x = -\mathbf{q}''_{x,\text{ref}}$.
2. Uma tubagem que transporta vapor de água encontra-se revestida por um material isolante de condutibilidade térmica k . Os raios interior e exterior do isolante são r_i e r_o , respectivamente. Num dado instante de tempo particular, a distribuição de temperatura no isolante tem a seguinte forma:

$$T(r) = C_1 \ln\left(\frac{r}{r_o}\right) + C_2$$

- (a) As condições do problema são estacionárias ou transientes? Justifique.
- (b) Como variam a taxa e o fluxo de calor no isolante em função do raio?
3. Uma superfície plana com uma área de 2 m^2 (A) e temperatura de 350 K (T_s) é arrefecida convectivamente por diferentes fluidos (em diferentes regimes de convecção) mas com uma temperatura constante e igual a 300 K (T_∞). Com base nos dados apresentados na tabela, determine as maiores e menores taxas de transferência de calor que poderão ser obtidas durante o processo de

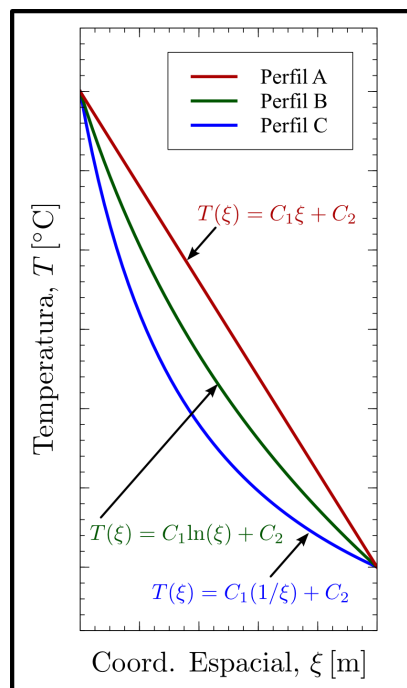
Problema 3

Aplicações	Coefficiente de Convecção (h [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]) – Gama Típica
Convecção Natural	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1000
Convecção Forçada	
Gases	25 – 250
Líquidos	50 – 20000

arrefecimento para:

- (a) convecção natural; e
- (b) convecção forçada.
4. Uma placa plana tem uma superfície isolada e a outra exposta ao sol. A superfície exposta ao sol absorve radiação à taxa de 800 W m^{-2} ($G_{\text{sol}}^{\text{abs}}$) e perde calor por convecção para o ar ambiente e por radiação para as superfícies envolventes. Considere a emissividade da superfície exposta ao sol (ϵ) igual a 0.8 e o coeficiente de convecção do ar ambiente (h) igual a $12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Se a temperatura do ar ambiente (T_∞) e a temperatura das superfícies envolventes (T_{sur}) forem iguais a 40°C e 20°C , respectivamente, determine a temperatura da placa (T_p) em regime estacionário.
5. Considere a placa plana do Problema 4, desprezando agora a absorção de energia solar e considerando que em vez da superfície isolada, a placa tem uma superfície mantida a uma temperatura constante mas desconhecida ($T_{s,2}$). Considere as mesmas trocas de calor por convecção e radiação para o exterior incluindo os mesmos valores para h , T_∞ , ϵ e T_{sur} do Problema 4. Considere que a placa tem 10 cm de espessura (L) e uma condutibilidade térmica (k) igual a $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Sabendo que em regime estacionário e nas condições referidas a temperatura da superfície da placa para o exterior – superfície da placa que no Problema 4 absorvia radiação solar – é de 350 K ($T_{s,1}$), determine a temperatura desconhecida, $T_{s,2}$, na superfície oposta.
6. Considere uma esfera de raio igual a 2 cm (R_0) que está envolvida por um material isolante. A esfera é colocada numa cavidade micro-ondas estando inicialmente a uma temperatura constante e uniforme de 20°C (T_i) quando é submetida a um campo electromagnético que proporciona um aquecimento em volume com uma taxa constante e uniforme de 1 W cm^{-3} (\dot{q}). O material da esfera tem uma densidade (ρ) e calor específico (c) iguais a 6500 kg m^{-3} e $400 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respectivamente. A condutibilidade térmica do material da esfera é elevada o suficiente para desprezar gradientes de temperatura no interior da esfera – assuma a temperatura da esfera uniforme (isotérmica) em todo o seu volume em cada instante de tempo. Determine a temperatura da esfera ao fim de 2 minutos de exposição ao campo electromagnético. Despreze trocas de calor através da superfície externa da esfera ($r = R_0$).

7. Considere uma esfera de raio igual a 5 cm (R_0), que está inicialmente a uma temperatura constante e uniforme de 80°C (T_i) quando é mergulhada num fluido com uma temperatura de 20°C (T_∞) e um coeficiente de convecção, h , igual a $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. O material da esfera tem uma densidade (ρ) e calor específico (c) iguais a 8000 kg m^{-3} e $250 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respectivamente. A condutibilidade térmica do material é elevada o suficiente para desprezar gradientes de temperatura no interior da esfera. Determine o tempo de contacto necessário da esfera com o fluido para que a temperatura da esfera atinja 40°C . Despreze qualquer influência da radiação na temperatura da esfera.
8. Considere condução de calor unidimensional em três geometrias distintas: parede plana; parede cilíndrica; e parede esférica. Na parede plana a condução de calor verifica-se exclusivamente ao longo da espessura (direcção x) e nas paredes cilíndrica e esférica ao longo do raio (r). Considere condução em regime estacionário, sem geração interna de energia térmica e com uma condutibilidade térmica constante.
- (a) Com base na solução geral da correspondente forma simplificada da equação (de difusão) de calor faça corresponder os 3 perfis de temperatura (ao longo da coordenada espacial (ξ) de referência) apresentados na figura com as 3 geometrias referidas. Na figura, a coordenada espacial de referência, ξ , corresponde à coordenada x para a parede plana e r para sistemas radiais (paredes cilíndricas e esféricas).

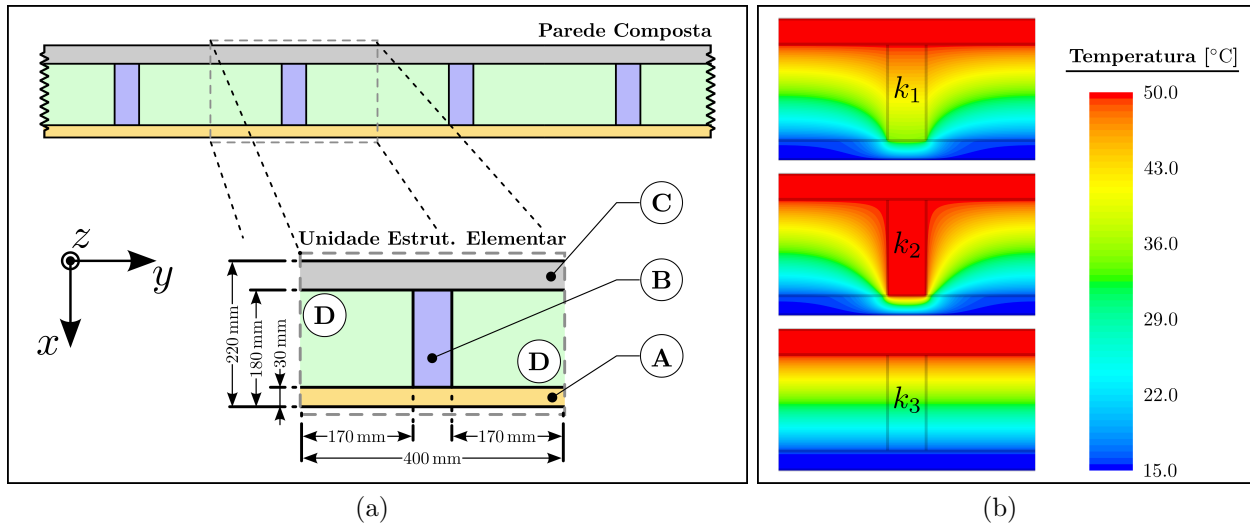


Problema 8

- (b) Para as três geometrias em consideração, indique, justificando, como variam a taxa de transferência de calor (q_ξ) e o fluxo de calor (q''_ξ) ao longo da coordenada espacial (ξ) de referência.
9. Considere condução de calor numa placa rectangular em regime estacionário. A superfície $x = 0$ é aquecida electricamente com um fluxo de calor q''_0 . A superfície $x = a$ é mantida à temperatura T_0 . A superfície $y = b$ é mantida isolada. A superfície $y = 0$ dissipa calor por convecção para um meio à temperatura T_∞ e com um coeficiente de convecção h . A condutibilidade térmica do material é uniforme e não há geração interna de energia. Formule o problema de condução de

calor, estabelecendo a equação que rege a distribuição de temperaturas na placa e as condições de fronteira.

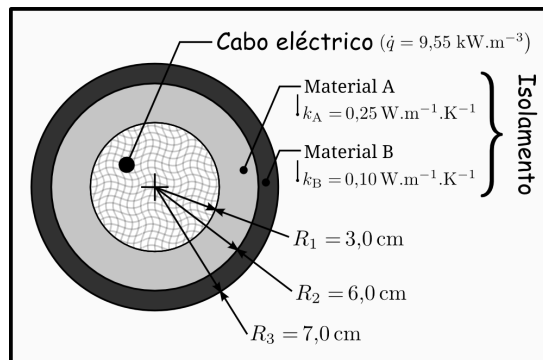
10. Considere uma esfera de raio r_0 e condutibilidade térmica k . A esfera é inicialmente aquecida num forno até atingir uma temperatura uniforme T_1 , sendo no instante $t = 0$ subitamente imersa num banho de óleo à temperatura T_∞ ($< T_1$). Supondo que o coeficiente de convecção é constante, formule o problema que descreve a variação de temperatura na esfera ao longo do tempo, isto é, estabeleça a equação diferencial que permite determinar a variação da temperatura em função do tempo e do raio para $t > 0$ e as condições de fronteira.
11. Em determinadas condições, a temperatura na superfície da pele de um indivíduo é 30°C , sendo inferior à temperatura do corpo, que é de $36,5^\circ\text{C}$. A transição entre estas temperaturas tem lugar numa camada da pele com uma espessura de 1 cm e com uma condutibilidade térmica de $0,42 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. A superfície da pele está em contacto com ar a 20°C mas com um coeficiente de convecção desconhecido.
 - (a) Estime o fluxo de calor que se escapa através da pele, considerando-a um meio condutor em repouso.
 - (b) Determine o coeficiente de convecção do ar sobre a superfície da pele.
12. Durante o Inverno, a superfície de um rio forma uma camada de gelo de espessura desconhecida. A temperatura da água no lago encontra-se a 4°C ($T_{\infty,1}$) e a temperatura do ar ambiente é -30°C ($T_{\infty,2}$). A temperatura na interface entre a água e o gelo é 0°C ($T_{s,1}$). A condutibilidade térmica do gelo é $2,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (k). Os coeficientes de convecção do lado do ar (h_2) e do lado da água (h_1) são $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e $500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, respectivamente. Calcule a temperatura na superfície do gelo em contacto com o ar, $T_{s,2}$, e a espessura da camada de gelo, L .
13. A parede de um forno usado para curar partes de plástico tem uma espessura $L = 0,05 \text{ m}$ e a sua superfície externa encontra-se exposta ao ar e a um ambiente amplo. O ar e o ambiente envolvente estão a 30°C ($T_{\infty,2} = T_{\text{sur}}$). A temperatura da superfície externa do forno é de 400 K ($T_{s,2}$), e o coeficiente de convecção (h) e emissividade (ϵ) são iguais a $20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e $0,8$, respectivamente. Calcule a temperatura da superfície interna da parede do forno ($T_{s,1}$), sabendo que a condutibilidade térmica (k) do material da parede igual a $0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
14. Considere uma parede cujo corte transversal visto de topo é apresentado da figura (a). Esta parede é formada pela união de várias unidades estruturais iguais. A unidade estrutural elementar é composta por 4 materiais diferentes cujas dimensões se encontram na figura (a). Considere as condutibilidades térmicas (k) dos Materiais A, B, C e D iguais a $0,2$, 200 , 160 e $0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respectivamente. Nas superfícies externas dos Materiais A e C a temperatura é constante e igual a 15 e 50°C , respectivamente. Despreze gradientes de temperatura ao longo do eixo z e resistências de contacto entre materiais diferentes.
 - (a) Em que condições as fronteiras laterais da unidade elementar (fronteiras paralelas ao eixo x) podem ser consideradas adiabáticas?
 - (b) Nas condições da alínea anterior e considerando transporte de calor unidimensional (1D), determine a taxa de transferência de calor por unidade de altura da parede em cada unidade estrutural elementar, q'_{unid} , considerando:
 - (a) isotérmicas as superfícies perpendiculares ao eixo x ; e
 - (b) adiabáticas as superfícies paralelas ao eixo x .



Problema 14

- (c) Através do cálculo numérico 2D (bi-dimensional) do problema, verificou-se que q'_{unid} é igual a $22,6 \text{ W m}^{-1}$. Qual é a correspondente resistência térmica efectiva da parede, $R'_{t,\text{eff}}$.
- (d) A figura (b) apresenta a distribuição 2D da temperatura na unidade estrutural elementar para 3 casos variando apenas o valor da condutibilidade térmica do Material B (k_B); k_B foi considerado igual a 0,02, 2 e $200 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. (Note que k_D é igual a $0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Estabeleça a correspondência entre estes valores de condutibilidades térmicas com k_1 , k_2 e k_3 .

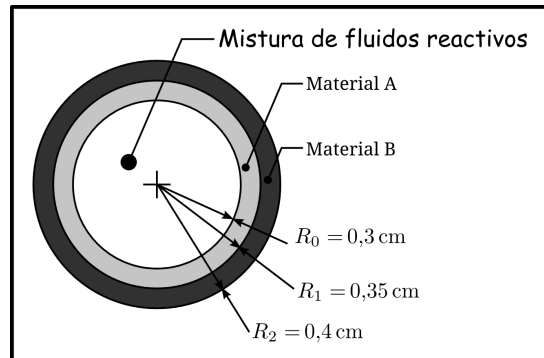
15. [Retirado do Teste de Repescagem 1 de 2014/2015] Considere um cabo eléctrico isolado que se encontra esticado e suspenso no ar e cuja secção transversal é apresentada na figura. O ar envolvente está à temperatura de 15°C e apresenta um coeficiente de convecção igual a $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Em regime estacionário verifica-se no cabo eléctrico uma taxa volumétrica de geração de energia térmica igual a $9,55 \text{ kW m}^{-3}$. As condutibilidades térmicas dos materiais que constituem o isolamento (Material A e Material B) bem como as dimensões relevantes encontram-se apresentadas na figura. Despreze a resistência térmica de contacto entre os Materiais A e B.



Problema 15

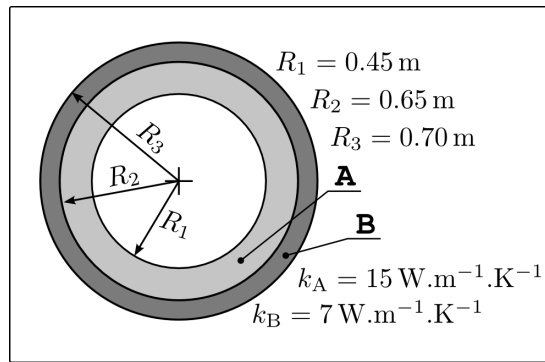
- (a) Determine a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento do cabo eléctrico na superfície intermédia do isolamento ($r = R_2$).

- (b) Determine a resistência térmica total entre a superfície interior e exterior do isolamento do cabo – superfícies $r = R_1$ e $r = R_3$, respectivamente.
- (c) Determine a temperatura máxima no isolamento do cabo.
- (d) Repita a alínea anterior considerando agora que entre os Materiais A e B se observa uma resistência térmica de contacto, $R''_{t,c}$, não desprezável e igual a $0,5 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.
16. Considere um reservatório esférico destinado a conter uma mistura de fluidos em reacção exotérmica. O reservatório é formado, tal como indicado na figura, por duas camadas sendo a condutibilidade térmica da Camada A igual a $19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (k_A) e a condutibilidade térmica da Camada B igual a $0,21 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (k_B). As dimensões do reservatório são $R_0 = 0,3 \text{ m}$, $R_1 = 0,35 \text{ m}$ e $R_2 = 0,4 \text{ m}$. Por razões de resistência dos materiais não convém ultrapassar na Camada A a temperatura de 450°C (T_{max_A}) e na Camada B a temperatura de 400°C (T_{max_B}). O reservatório encontra-se num ambiente a 35°C (T_{ext}) e o coeficiente de convecção na superfície do lado exterior é igual a $8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (h_{ext}). O coeficiente de convecção na superfície interior é igual a $200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (h_{int}) e a mistura dos reagentes é homogénea e encontra-se toda à mesma temperatura. Despreze a resistência térmica de contacto entre as Camadas A e B.



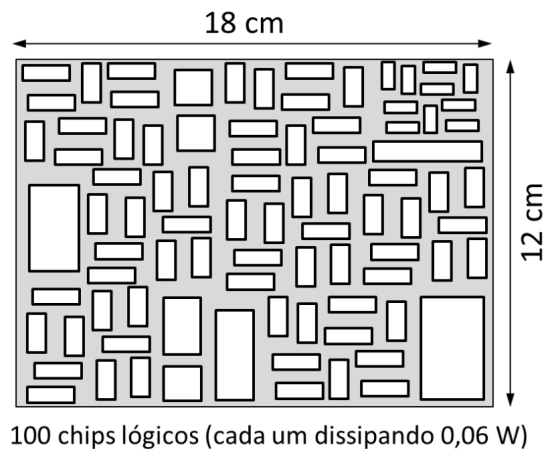
Problema 16

- (a) Calcule a potência máxima que se pode libertar no interior do reactor.
- (b) Nestas circunstâncias, qual é a temperatura no interior do reactor, T_{int} ?
- (c) Se a taxa de libertação de calor aumentar 50% qual terá de ser o novo valor do raio exterior R_2 a usar para garantir um correcto funcionamento do sistema? Suponha que todos os parâmetros mantêm os seus valores.
17. [Retirado do Teste 1 de 2014/2015] A figura apresenta um tanque esférico no interior do qual está a ocorrer uma reacção lenta e endotérmica. A reacção consome em regime estacionário uma taxa de energia uniforme por unidade de volume igual a 3 kW m^{-3} . O tanque é composto pelos Materiais A e B cujas condutibilidades térmicas (k) e dimensões (R_i) se encontram apresentadas na figura. O tanque está envolvido por água a uma temperatura de 15°C (T_∞) e com um coeficiente de convecção (h) igual a $20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.
- (a) Determine a taxa de transferência de calor (q) e o fluxo de calor (q'') na superfície externa do Material B.
- (b) Determine a resistência térmica total ($R_{t,\text{total}}$) entre a superfície interna do Material A e a água envolvente.
- (c) Determine a temperatura máxima no Material A.



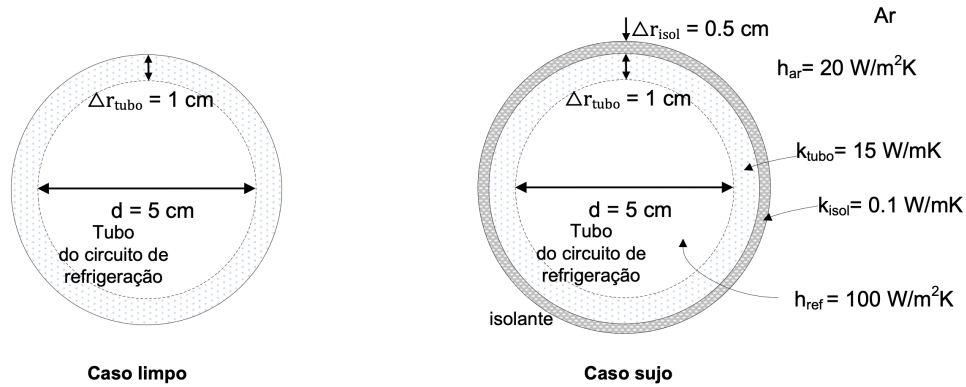
Problema 17

18. [Retirado do Teste de Repescagem 1 de 2018/2019] Uma placa de circuito ($18\text{ cm} \times 12\text{ cm}$) contém na sua superfície 100 chips lógicos (ver figura), cada um dissipando $0,06\text{ W}$ para o fluido circundante a uma temperatura $T_\infty = 40^\circ\text{C}$. Assuma que o espaçamento entre chips é muito pequeno de modo a poder tratar a superfície da placa como homogênea e que a transferência de calor na superfície traseira da placa é desprezável. Se o coeficiente de convecção na superfície da placa for $h = 10\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$, determine o fluxo de calor libertado pela placa, q''_{conv} , e a temperatura da sua superfície, T_s , desprezando o transporte de calor por radiação. Adicionalmente, assumindo a superfície da placa como negra, verifique se a transferência de calor por radiação é desprezável face à convecção (considere a temperatura da envolvente $T_{\text{sur}} = 40^\circ\text{C}$).



Problema 18

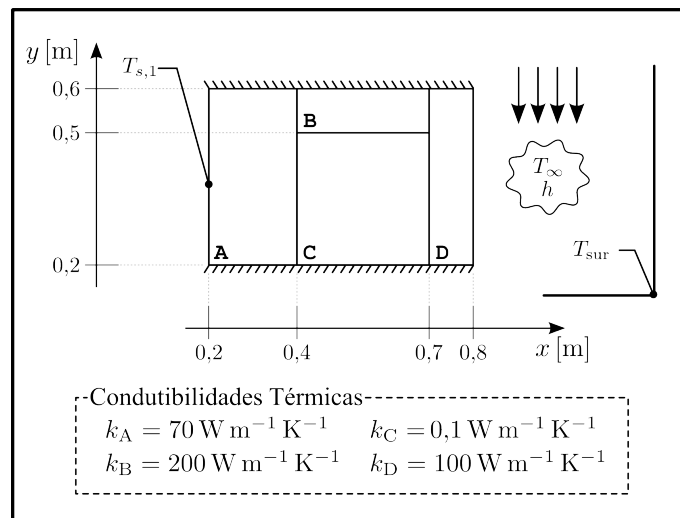
19. [Adaptado do Teste de Repescagem 1 de 2018/2019] Considere duas condições para o mesmo tubo de um circuito de refrigeração existente num sistema de ar condicionado: tubo sem deposição de resíduos na sua superfície exterior (tubo limpo) e tubo com uma camada de resíduos na sua superfície exterior (tubo sujo) – ver figura. Assumindo esta camada de sujidade como um revestimento isolante, pretende estudar-se a sua influência na taxa de transferência de calor, comparando o caso sujo ao limpo, este último sem a camada de sujidade isolante. Para a resolução desta questão, considere os dados numéricos apresentados na figura.
- (a) Para cada um dos dois casos, sujo e limpo, desenhe o sistema de resistências térmicas. Indique na representação a expressão matemática de cada resistência térmica individual.



Problema 19

(b) Quantifique a influência da camada de sujidade isolante, determinando o rácio entre as taxas de transferência de calor do caso sujo sobre o caso limpo.

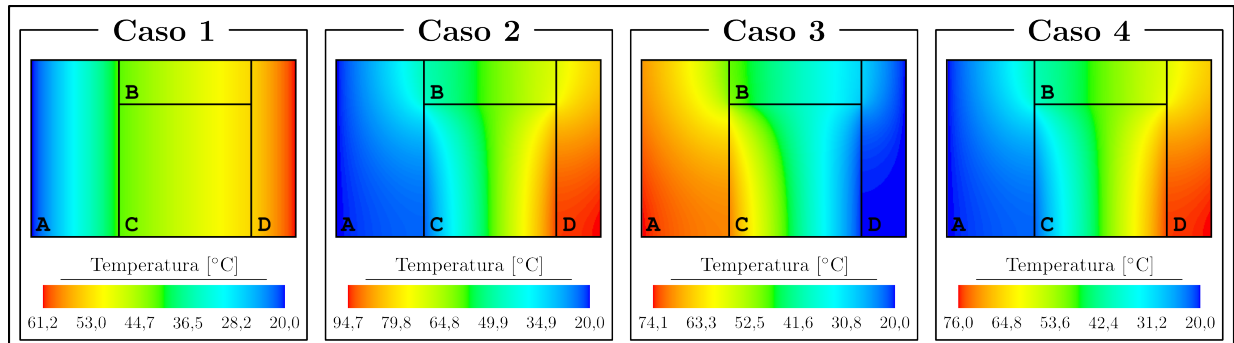
20. [Adaptado do Problema 1 da Avaliação Contínua de 2019/2020] A figura apresenta uma parede plana constituída por 4 materiais. As dimensões da parede bem como as condutibilidades térmicas dos 4 materiais encontram-se definidas na figura. A parede está isolada nas superfícies $y = 0,2\text{ m}$ e $y = 0,6\text{ m}$ e é longa o suficiente na direcção perpendicular ao plano xy (profundidade) para se desprezarem gradientes térmicos segundo esta direcção. Na superfície $x = 0,2\text{ m}$ é imposta uma temperatura constante e igual a 20°C ($T_{s,1}$). A superfície $x = 0,8\text{ m}$ está submetida a trocas de calor por: (1) convecção devido ao contacto directo com um fluido à temperatura constante de 80°C (T_∞) e com um coeficiente de convecção constante, h ; e (2) radiação com as superfícies envolventes (de grandes dimensões) à temperatura $T_{\text{sur}} (= T_\infty)$. Considere como negra a superfície $x = 0,8\text{ m}$. Considere regime estacionário e despreze resistências térmicas de contacto entre os diferentes materiais.



Problema 20

(a) Estabeleça a equação diferencial que governa a distribuição de temperatura na parede, justificando todas as simplificações, bem como as respectivas condições de fronteira.

- (b) Qual dos casos considerados na figura apresenta uma distribuição de temperatura compatível com as condições do problema? Justifique. Note que para cada caso as temperaturas mínima e máxima registadas na parede apresentam-se como limites na respectiva escala de temperatura.



Problema 20 – Alínea (b)

- (c) Para um determinado coeficiente de convecção verifica-se, através da solução numérica bidimensional (2D), a existência de uma superfície à temperatura de 41°C (superfície isotérmica) coincidente com o plano $x = 0,55\text{ m}$. Nestas condições, determine o valor considerado para o coeficiente de convecção com base numa aproximação unidimensional de condução de calor que garanta isotérmicas as superfícies perpendiculares ao eixo x .
- (d) Repita o exercício anterior mas considerando agora a aproximação unidimensional que garante adiabáticas as superfícies paralelas a x .
- (e) Através da solução 2D considerada na alínea anterior verificou-se que a taxa total de transferência de calor por unidade de profundidade da parede (q'_{tot}) para o meio exterior (fluido adjacente e superfícies envolventes) corresponde a $934,9\text{ W m}^{-1}$ e que a temperatura em $x = 0,8\text{ m}$ é aproximada pela Equação (1). Com base nestes valores para o desempenho térmico da parede, determine o valor do coeficiente de convecção. (Este procedimento fornece um valor mais preciso para o coeficiente de convecção do que uma aproximação unidimensional.)

$$T(x = 0,8\text{ m}, 0,2\text{ m} \leq y \leq 0,6\text{ m})[^{\circ}\text{C}] = -29,7y[\text{m}] + 70,5 \quad (1)$$