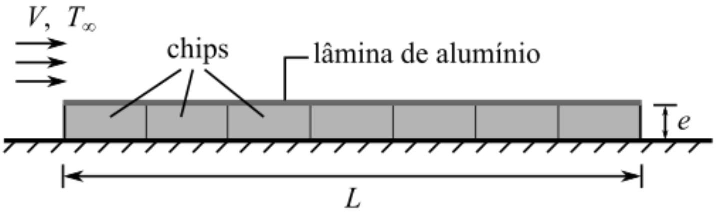
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PME3238 – FENÔMENOS DE TRANSPORTE 3ª PROVA 03/07/2017

Duração: 120 minutos

1ª Questão (4,0 pontos)

A figura mostra uma placa com chips em sequência, de comprimento total L = 200 mm, que deve ser resfriada pelo escoamento de ar na sua superfície superior. Os chips dissipam uniformemente uma potência de 10^5 W/m^3, têm condutividade térmica igual a k_c = 1 W/(m·K), espessura de e = 6 mm e estão montados sobre uma superfície isolada. Sobre a superfície superior dos chips é colocada uma lâmina delgada de alumínio para proteção mecânica, e a montagem gera uma resistência de contato de 10^{-3} m^2·K/W entre os chips e a placa. O ar está a uma temperatura T_∞ = 26 °C, e a temperatura local máxima admissível no interior de um chip é de 80 °C.



(a) Qual é a mínima velocidade que o escoamento de ar deve ter para que o requisito de temperatura máxima local seja atendido? (***3,0 pontos***)

(b) Caso seja utilizado um promotor de turbulência imediatamente antes da placa, qual será a máxima potência por unidade de volume que pode ser dissipada pelos chips, mantidos todos os outros parâmetros? *Sugestão*: admita numa primeira estimativa que a temperatura da lâmina de alumínio seja igual à da condição da letra (a). (***1,0 ponto***)

2ª Questão (3,0 pontos)

Uma esfera de rolamento, com diâmetro D = 10 mm, feita de aço inoxidável (ρ_s = 7900 kg/m^3, c_p = 477 J/(kg·K), ε = 0,8), é submetida a um tratamento térmico. Estando inicialmente a 24 °C, a esfera é suspensa no interior de um forno cujas paredes estão a 700 °C. Sabendo que o ar no interior do forno está a uma temperatura T_∞ = 330 °C, e que a aceleração da gravidade no local vale 9,8 m/s^2, determine:

(a) A taxa de variação de temperatura da esfera no momento em que ela é colocada no forno; (***1,5 ponto***)

(b) A temperatura da esfera após ela permanecer por um longo período dentro do forno. (***1,5 ponto***)

3ª Questão (3,0 pontos)

Você foi aprovado(a) em PME3238 e agora é hora de relaxar. Nada melhor do que fazer um bom uso das suas economias para passar uns dias com o seu "crush" numa praia do Nordeste. Vocês estão na praia e pedem uma cerveja de garrafa (600 ml), que vem estupidamente gelada (a 0 °C), devidamente acomodada num recipiente de isopor, como mostra a figura. Você quer aproveitar a ocasião para impressionar o seu "crush" exibindo seus conhecimentos de transferência de calor no momento em que a cerveja chega à mesa. A garrafa é feita de vidro (k_v = 1,4 W/(m·K)) com espessura de 4 mm e diâmetro externo de 72 mm e o recipiente de isopor (k_i = 0,04 W/(m·K)) tem uma altura de 19 cm e espessura de parede igual a 5 mm. Você usa um aplicativo no seu celular que o transforma numa câmera térmica para medir a temperatura na superfície externa do isopor, que vale 34 °C. Considerando que a temperatura da cerveja seja igual à da superfície interna da garrafa,

(a) Estime a transferência de calor do ambiente para a cerveja no momento em que a garrafa chega à mesa. Considere somente a superfície lateral, desprezando as extremidades. (***1,5 ponto***)

(b) Estranhamente, o seu "crush" resolve ir dar um mergulho bem na hora em que você exibe o seu conhecimento respondendo a letra (a). Para não perder a oportunidade, você diz para ele(a) em quanto tempo no máximo precisa estar de volta, para que a cerveja não fique mais quente do que 6 °C, afinal de contas, ninguém merece cerveja quente. Quanto é este tempo, admitindo que a temperatura na superfície externa do isopor permaneça constante? As propriedades da cerveja podem ser admitidas iguais à da água (ρ = 1000 kg/m^3, c_p = 4184 J/(kg·K)). (***1,5 ponto***)

Convecção forçada – escoamento externo

Geometria	Condições	Correlação
Placa plana	Laminar; local; isotérmica; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 50$	$Nu_x = 0{,}332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
	Laminar; local; fluxo uniforme; T_f; $Pr \ge 0{,}6$	$Nu_x = 0{,}453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
	Laminar; médio; isotérmica; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 50$	$\overline{Nu_L} = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; local; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$Nu_x = 0{,}0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; local; fluxo uniforme; T_f; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$Nu_x = 0{,}0308 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$
	Turbulenta; médio; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$\overline{Nu_L} = 0{,}037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$
	Mista; médio; isotérmica; T_f; $Re_x \le 10^8$; $0{,}6 \le Pr \le 60$	$\overline{Nu_L} = \left(0{,}037 Re_L^{4/5} - 871\right) Pr^{1/3}$
Cilindro	Médio; isotérmico; T_f;$Re_D\, Pr > 0{,}2$	$\overline{Nu_D} = 0{,}3 + \dfrac{0{,}62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1+\left(0{,}4/Pr\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1+\left(\dfrac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$

Convecção natural

Geometria	Correlação	Restrições
Placas verticais	$\overline{Nu_L} = \left\{0{,}825 + \dfrac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	Nenhuma
Placas inclinadas, com a superfície fria para cima ou com a superfície quente para baixo	$\overline{Nu_L} = \left\{0{,}825 + \dfrac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$, $g \to g\cos\theta$	$0 \le \theta \le 60°$
Placas horizontais, com a superfície quente para cima ou a superfície fria para baixo	$\overline{Nu_L} = 0{,}54 Ra_L^{1/4}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^4 \le Ra_L \le 10^7$
	$\overline{Nu_L} = 0{,}15 Ra_L^{1/3}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^7 \le Ra_L \le 10^{11}$
Placas horizontais, com a superfície fria para cima ou com a superfície quente para baixo	$\overline{Nu_L} = 0{,}52 Ra_L^{1/5}$ $\quad (L = A_s/P)$	$10^4 \le Ra_L \le 10^9$ $Pr \ge 0{,}7$
Cilindro horizontal	$\overline{Nu_D} = \left\{0{,}60 + \dfrac{0{,}387 Ra_D^{1/6}}{\left[1+(0{,}559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$	$Ra_D \le 10^{12}$
Esfera	$\overline{Nu_D} = 2 + \dfrac{0{,}589 Ra_D^{1/4}}{\left[1+(0{,}469/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}$	$Ra_D \le 10^{11}$ $Pr \ge 0{,}7$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q'''=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad q''_{\text{cond}} = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \qquad R_{t,\text{cond}} = \frac{L}{kA}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(k\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q'''=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad R_{t,\text{cond}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kL}$$

$$q''_{\text{conv}} = h(T_\infty - T_s) \qquad R_{t,\text{conv}} = \frac{1}{hA} \qquad Nu_L = \frac{hL}{k_f} \qquad Re_L = \frac{VL}{\nu} \qquad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta|T_s - T_\infty|L^3}{\nu\alpha} \qquad \beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p \qquad q = mc_p\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$$

$$E_{cn} = \sigma T^4 \qquad q''_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4) \qquad \sigma = 5{,}67\times10^{-8}\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$$

Método para achar raízes de um polinômio $ax^4 + bx + c = 0$:

$$\Delta_0 = 12ac \qquad \Delta_1 = 27ab^2 \qquad Q = \left(\frac{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 - 4\Delta_0^3}}{2}\right)^{1/3} \qquad S = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{3a}\left(Q + \frac{\Delta_0}{Q}\right)}$$

$$x_{1,2} = -S \pm \frac{1}{2}\sqrt{-4S^2 + \frac{b}{aS}} \qquad x_{3,4} = S \pm \frac{1}{2}\sqrt{-4S^2 - \frac{b}{aS}}$$

Esfera: Volume = $\pi D^3/6$, Área superficial = πD^2

PME3298 – Fenômenos de Transporte
1º semestre / 2017 – Prof. Dr. Bruno Souza Carmo

Gabarito da Prova 3

1ª Questão (4,0 pontos)

(a) É preciso determinar em que ponto de um chip a temperatura máxima ocorrerá, e qual a relação dela com a temperatura local da lâmina de alumínio. No chip ocorre condução com geração uniforme, portanto a distribuição de temperaturas é (x é a direção paralela ao escoameno e y a direção perpendicular à placa):

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}y^2} + \frac{q'''}{k} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y} = -\frac{q'''}{k}y + \mathbb{C}_1 \quad \Rightarrow \quad T(y) = -\frac{q'''}{2k}y^2 + \mathbb{C}_1 y + \mathbb{C}_2 \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Aplicamos agora as condições de contorno:

$$\text{Em } y = 0, \quad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbb{C}_1 = 0 \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$\text{Em } y = e, \quad T = T_{s,c} \quad \Rightarrow \quad \mathbb{C}_2 = T_{s,c} + \frac{q'''e^2}{2k} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$\therefore \quad T(y) = \frac{q'''}{2k}(e^2 - y^2) + T_{s,c}$$

A temperatura máxima acontece para $y = 0$, $T_{\text{máx}} = \dfrac{q'''e^2}{2k} + T_{s,c}$. Portanto, no x de temperatura máxima, a temperatura na superfície do chip vale:

$$T_{s,c} = T_{\text{máx}} - \frac{q'''e^2}{2k} = 80 - \frac{10^5 \times 0.006^2}{2 \times 1} = 78{,}20\,^\circ\mathrm{C} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Devido à resistência térmica de contato, a temperatura da superfície do chip é diferente da temperatura da lâmina de alumínio. Podemos calcular esta última com:

$$q''_y = \frac{T_{s,c} - T_{s,e}}{R''_{t,c}}$$

O fluxo é dado por $q''_y = q'''e$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$. Portanto:

$$T_{s,e} = T_{s,c} - q'''eR''_{t,c} = 78{,}20 - 10^5 \times 0{,}006 \times 10^{-4} = 77{,}6\,^\circ\mathrm{C} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Agora podemos calcular a velocidade do ar necessária. O fluxo térmico na convecção é dado por $q''_y = h(T_{s,e} - T_\infty)$, portanto, sendo q''_y e T_∞ fixos, $T_{s,e}$ será máximo quando h for mínimo. Como a coordenada x de temperatura máxima será aquela onde $T_{s,e}$ for máxima, procuramos x para o qual h é mínimo. Este ponto será no final da placa, ou no ponto de transição da camada limite, caso isso aconteça. $\boxed{\textbf{0,3 pt}}$

Vamos admitir inicialmente que o escoamento seja laminar em toda a placa, hipótese que verificaremos posteriormente. Neste caso, o ponto de h mínimo será o final da placa, $x = L$.

Para camada limite laminar com fluxo térmico uniforme, o número de Nusselt é dado por:

$$Nu_L = 0{,}453 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} = \left(0{,}453 \frac{L^{1/2}}{\nu^{1/2}} Pr^{1/3}\right) V^{1/2} \quad \boxed{\mathbf{0{,}3\ pt}}$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção é:

$$h = \frac{Nu_L k_f}{L} = \left(\frac{0{,}453 Pr^{1/3} k_f}{L^{1/2}\nu^{1/2}}\right) V^{1/2} \quad \boxed{\mathbf{0{,}2\ pt}}$$

As propriedades do ar à temperatura de filme, $T_f = (T_{s,e}+T_\infty)/2 = (77{,}60+26)/2 = 51{,}80\,°\mathrm{C} = 324{,}95\,\mathrm{K}$, são:

$$\nu = 1{,}840 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}, \qquad k_f = 0{,}02815\,\mathrm{W/(m\cdot K)}, \qquad Pr = 0{,}7035 \quad \boxed{\mathbf{0{,}3\ pt}}$$

Substituindo na lei do resfriamento de Newton:

$$q_y'' = \left(\frac{0{,}453 Pr^{1/3} k_f}{L^{1/2}\nu^{1/2}}\right) V^{1/2}(T_{s,e}-T_\infty) \;\Rightarrow\; V = L\nu\left[\frac{q_y''}{0{,}453 Pr^{1/3} k_f (T_{s,e}-T_\infty)}\right]^2 = 3{,}869\,\mathrm{m/s} \quad \boxed{\mathbf{0{,}3\ pt}}$$

Verificando se o escoamento é laminar:

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = 4{,}206 \times 10^4 < 5 \times 10^5 \quad \Rightarrow \quad \text{laminar} \checkmark \quad \boxed{\mathbf{0{,}2\ pt}}$$

(b) Nesta situação, calcularemos qual será o fluxo de calor por convecção e com ele a potência dissipada por unidade de volume. Admitindo inicialmente que a temperatura $T_{s,e}$ seja aquela obtida no item (a), de modo que a temperatura de filme se mantém, e consequentemente as propriedades do ar e o número de Reynolds (já que a velocidade também não muda), podemos calcular o número de Nusselt, que para camada limite turbulenta com fluxo de calor uniforme é dado por:

$$Nu_L = 0{,}0308 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} = 137{,}0 \quad \Rightarrow \quad h = \frac{Nu_L k_f}{L} = 19{,}28\,\mathrm{W/(m^2\cdot K)}0 \quad \boxed{\mathbf{0{,}5\ pt}}$$

Assim, o fluxo térmico é:

$$q_y'' = h(T_{s,e} - T_\infty) = 995\,\mathrm{W/m^2} \quad \Rightarrow \quad q''' = \frac{q_y''}{e} = 1{,}658 \times 10^5\,\mathrm{W/m^3} \quad \boxed{\mathbf{0{,}3\ pt}}$$

Conferindo se a estimativa de $T_{s,e}$ foi adequada:

$$T_{s,e} = T_{s,c} - q_y'' R_{t,c}'' = T_{\text{máx}} - \frac{q''' e^2}{2k} - q_y'' R_{t,c}'' = 76{,}02\,°\mathrm{C}$$

Este valor é próximo o suficiente da estimativa inicial para que não seja necessário fazer outra iteração. $\boxed{\mathbf{0{,}2\ pt}}$

2ª Questão (3,0 pontos)

(a)

$$\dot{E}_{ac} = \dot{E}_e \quad \Rightarrow \quad mc_p \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = q_{\text{rad}} + q_{\text{conv}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{\left[\varepsilon\sigma A_s(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4) + \bar{h}A_s(T_\infty - T_s)\right]}{\rho \forall c_p}$$

$$\forall = \frac{\pi D^4}{6}, \quad A_s = \pi D^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{6\left[\varepsilon\sigma(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4) + \bar{h}(T_\infty - T_s)\right]}{\rho D c_p} \quad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

Temos os valores de todas as variáveis, exceto de $\bar{h}$. Avaliando as propriedades do ar à temperatura de filme, $T_f = (330 + 24)/2 = 177\,°\mathrm{C} = 450\,\mathrm{K}$,

$$\nu = 3{,}239 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}; \qquad k_f = 0{,}03730\,\mathrm{W/(m \cdot K)}; \qquad \alpha = 4{,}72 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}$$

$$Pr = 0{,}6860; \qquad \beta = 1/T_f = 2{,}222 \times 10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)D^3}{\nu\alpha} = 4359 \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0{,}589 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0{,}469/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} = 5{,}679 \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Assim,

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k_f}{D} = 21{,}18\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = 7{,}449\,°\mathrm{C/s} \quad \boxed{\textbf{0,1 pt}}$$

(b) Em regime permanente: $\dfrac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon\sigma(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4) + \bar{h}(T_\infty - T_s) = 0$

$$T_s^4 + \frac{\bar{h}}{\varepsilon\sigma}T_s - \left(T_{\text{viz}}^4 + \frac{\bar{h}}{\varepsilon\sigma}T_\infty\right) = 0 \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}} \tag{1}$$

Precisamos calcular o valor de $\bar{h}$ para esta condição e para isso precisamos da temperatura de filme. Admitiremos, como estimativa inicial, que $T_s = (T_{\text{viz}} + T_\infty)/2 = 788\,\mathrm{K}$, de modo que $T_f = (T_s + T_\infty)/2 = 695{,}5\,\mathrm{K}$. Para poupar o trabalho de interpolação, utilizarei $T_f = 700\,\mathrm{K}$. As propriedades do ar a esta temperatura são:

$$\nu = 6{,}810 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}; \qquad k_f = 0{,}05240\,\mathrm{W/(m \cdot K)}; \qquad \alpha = 9{,}80 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}$$

$$Pr = 0{,}695; \qquad \beta = 1/T_f = 1{,}429 \times 10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Calculamos Ra_D, $\overline{Nu}_D$ e $\bar{h}$ usando as mesmas expressões utilizadas no item (a). Os resultados são:

$$Ra_D = 388{,}1; \qquad \overline{Nu}_D = 4{,}012; \qquad \bar{h} = 21{,}03\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

Substituindo na eq. (1), obtemos

$$T_s^4 + 4{,}635 \times 10^8 T_s - 1{,}1758 \times 10^{12} = 0 \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Empregando o método de solução do formulário, com coeficientes $a = 1$, $b = 4{,}635 \times 10^8$ e $c = -1{,}1758 \times 10^{12}$:

$$\Delta_0 = 12ac = -1{,}411 \times 10^3; \qquad \Delta_1 = 27ab^2 = 5{,}801 \times 10^{18}$$

$$Q = \left(\frac{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 - 4\Delta_0^3}}{2} \right)^{1/3} = 3{,}825 \times 10^6; \qquad S = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{3a}\left(Q + \frac{\Delta_0}{Q}\right)} = 106{,}84$$

$$T_s = -S + \frac{1}{2}\sqrt{-4S^2 + \frac{b}{aS}} = 929{,}1\,\mathrm{K} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Refazendo os cálculos para $T_f = (929{,}1 + 603)/2 = 766\,\mathrm{K}$, temos

$$\nu = 7{,}912 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}; \qquad k_f = 0{,}05567\,\mathrm{W/(m \cdot K)}; \qquad \alpha = 1{,}125 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}$$

$$Pr = 0{,}7042; \qquad \beta = 1/T_f = 1{,}305 \times 10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}}$$

$$Ra_D = 468{,}6; \qquad \overline{Nu}_D = 4{,}113; \qquad \bar{h} = 22{,}90\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

$$a = 1; \qquad b = 5{,}047 \times 10^8; \qquad c = -1{,}201 \times 10^{12}$$

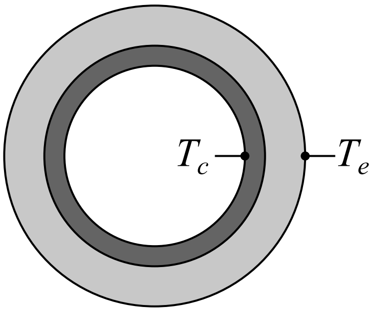
$$\Delta_0 = -1{,}441 \times 10^{13}; \qquad \Delta_1 = 6{,}879 \times 10^{18}; \qquad Q = 3{,}876 \times 10^6; \qquad S = 115{,}13$$

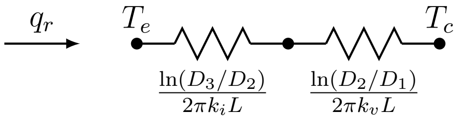
$$T_s = 925{,}5\,\mathrm{K} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Como a variação foi pequena em relação à iteração anterior ($0{,}3\% < 5\%$), tomaremos esta como nossa resposta final.

3ª Questão 3,0 pontos)

(a)





$$D_1 = D_g - 2e_v = 0{,}072 - 2 \times 0{,}004 = 0{,}064\,\mathrm{m}$$
$$D_2 = D_g = 0{,}072\,\mathrm{m} \qquad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$
$$D_3 = D_g + 2e_i = 0{,}072 + 2 \times 0{,}005 = 0{,}082\,\mathrm{m}$$

$$R_{\mathrm{tot}} = \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_i L} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_v L} = 2{,}794\,\mathrm{K/W} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

$$q_r = \frac{T_e - T_c}{\frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_i L} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_v L}} = \frac{34 - 0}{1{,}886} = 12{,}17\,\mathrm{W} \qquad \boxed{\textbf{0,8 pt}}$$

(b) $$\rho \mathcal{V} c_p \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{T_e - T}{R_{\mathrm{tot}}} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}} \qquad \Rightarrow \qquad \int_0^6 \frac{\mathrm{d}T}{T_e - T} = \int_0^{t_f} \frac{\mathrm{d}t}{R_{\mathrm{tot}} \rho \mathcal{V} c_p} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

$$tf = -R_{\mathrm{tot}} \rho \mathcal{V} c_p \ln\left(\frac{T_e - 6}{T_e - 0}\right) = -2{,}794 \times 1000 \times 6 \times 10^{-4} \times 4{,}184 \times \ln\left(\frac{34 - 6}{34 - 0}\right)$$

$$t_f = 1362\,\mathrm{s} = 22{,}7\,\mathrm{min} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$