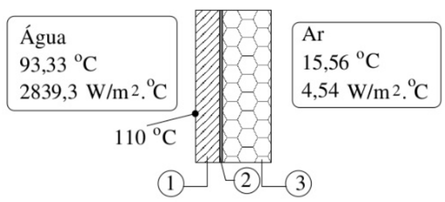
Lista de exercícios resolvidos 09 – Condução Sem Geração de Calor

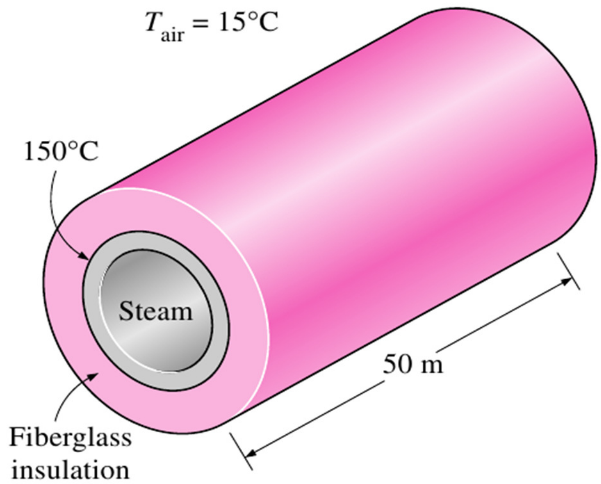
1- Alguns estudantes universitários alugaram um alojamento antigo no qual as janelas são construídas de um painel simples. Um dos estudantes cursa engenharia e, como todo bom engenheiro, deseja conservar energia e também economizar alguns reais de combustível utilizado no aquecimento. Assim sendo, ele propôs que a perda de calor seja reduzida cobrindo as janelas com um isolamento de poliestireno [k_{is} = 0,027 W/(m.K)] durante a noite. Para estimar a economia de energia, considere a aplicação de painéis de isolamento com 25 mm de espessura em janelas de vidro com 6 mm de espessura [k_j = 1,4 W/(m.K)]. A resistência de contato entre o vidro e o isolamento é estimada em $R''_{t,c}$= 0,002 m².K/W, enquanto o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície externa da janela vale h_e = 20 W/(m².K). Com o isolamento, o coeficiente de transferência de calor por convecção na parede interna é h_i = 2 W/(m².K); sem isolamento é h_i = 5 W/(m².K).
(a) Qual o percentual de redução da perda de calor associada ao uso do isolamento?
(b) Se a área superficial total das janelas do alojamento é A_s = 12 m², quais são as perdas de calor associadas às janelas isoladas e não-isoladas para temperaturas do ar interno e externo $T_{\infty,i}$= 20 ºC e $T_{\infty,e}$= – 12 ºC?
(c) Se o alojamento é aquecido por um forno a gás operando com eficiência de $\eta_f = 0{,}80$e o preço do gás é C_g = R$ 0,30 por MJ, qual é a economia diária associada à cobertura das janelas por 12 horas?

2- Um elemento de aquecimento fino é colocado entre uma placa plana de aço inoxidável AISI 304 [$k_{aço}$ = 14,9 W/(m.K)] de 3,175 mm de espessura e uma placa plana de baquelite [k_{baq} = 1,4 W/(m.K)] de 6,35 mm de espessura. A superfície de baquelite está em contato com ar a 15,56 °C enquanto a superfície de aço inoxidável está em contato com água a 93,33 °C. Os coeficientes de transferência de calor por convecção são 4,54 W/(m².K) do lado do ar e 2839,3 W/(m².K) do lado da água. Determine o fluxo de calor energia que precisa ser fornecido ao elemento de aquecimento para manter a temperatura da superfície de aço inoxidável em contato com a água a 110 °C. Que fração de energia passa através da placa de aço inoxidável? Despreze a espessura do elemento de aquecimento.



Materiais: 1 – Aço inoxidável AISI 304 de 3,175 mm de espessura
2 – Elemento aquecedor de espessura desprezível
3 – Baquelite de 6,35 mm de espessura

3- Um tubo de vapor de 50 m de comprimento cujo diâmetro externo é de 10 cm passa por um espaço aberto a 15 ºC. A temperatura média da superfície externa do tubo é de 150 ºC. Se o coeficiente de transferência de calor por convecção sobre a superfície externa do tubo é de 20 W/(m².K), determinar:



(a) A taxa de perda de calor a partir do tubo de vapor;
(b) O custo anual desta perda de energia se o vapor é gerado em um forno a gás natural com uma eficiência de 75% e o preço do gás natural é de R$ 1,50/therm (1 therm = 105500 kJ);
(c) A espessura de isolante de fibra de vidro [k_{is} = 0,035 W/(m.K)] necessária a fim de poupar 90% do calor perdido. Assumir que a temperatura da superfície externa do tubo e o coeficiente de transferência de calor por convecção sobre a superfície externa do isolante permaneçam nos mesmos valores do caso do tubo sem isolamento.

4- Um tanque esférico de metal com parede delgada e um pequeno orifício na parte superior para alívio de pressão armazena nitrogênio líquido a 77 K. O tanque possui diâmetro de 0,5 m e é coberto por uma camada de isolamento térmico refletivo, composto de pó de sílica com vácuo nos interstícios. O isolamento possui espessura de 30 mm, e sua superfície externa está exposta ao ar ambiente a 295 K. O coeficiente de transferência de calor por convecção nesta superfície vale 25 W/(m²·K). O calor latente de vaporização do nitrogênio líquido é 200 kJ/kg.
(a) Qual a taxa de transferência de calor par ao nitrogênio líquido?
(b) Qual a taxa de perda de líquido por evaporação?

PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Soluções da Lista de Exercícios 09

1) O desenho esquemático da instalação e o respectivo circuito térmico equivalente, para a condição da janela com o isolamento, é mostrado na Figura 1

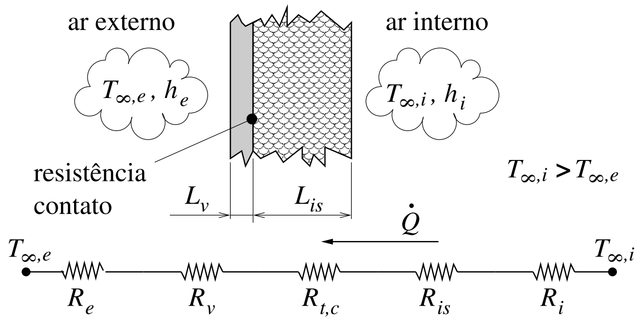


FIGURA 1 – Esquema e circuito térmico equivalente para a condição da janela com isolamento.

a. O percentual de redução da perda de calor associada ao uso do isolamento, PR, é dado por:

$$PR = 100 \cdot \left(\frac{\dot{q}''_{sem} - \dot{q}''_{com}}{\dot{q}''_{sem}} \right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{q}''_{com}}{\dot{q}''_{sem}} \right)$$

onde os subscritos *com* e *sem* referem-se ao fluxo de calor (ou taxa de trsnsferência de calor) com e sem a presença do isolamento, respectivamente. Como em ambos os casos a diferença de temperatura é sempre a mesma, $T_{\infty,i} - T_{\infty,e}$, segue-se que:

$$PR = 100 \cdot \left(1 - \frac{R''_{total,sem}}{R''_{total,com}} \right)$$

onde,

$$R''_{total,sem} = R''_e + R''_v + R''_i = \frac{1}{h_e} + \frac{L_v}{k_v} + \frac{1}{h_i} = \frac{1}{20} + \frac{0{,}006}{1{,}4} + \frac{1}{5} = 0{,}2543\,\mathrm{m^2.K/W}$$

$$R''_{total,com} = R''_e + R''_v + R''_{t,c} + R''_{is} + R''_i = \frac{1}{h_e} + \frac{L_v}{k_v} + R''_{t,c} + \frac{L_{is}}{k_{is}} + \frac{1}{h_i}$$

$$R''_{total,com} = \frac{1}{20} + \frac{0{,}006}{1{,}4} + 0{,}002 + \frac{0{,}025}{0{,}027} + \frac{1}{2} = 1{,}4822\,\mathrm{m^2.K/W}$$

Logo,

$$PR = 100 \cdot \left(1 - \frac{0{,}2543}{1{,}4822} \right) = 82{,}8431\ \% \cong 82{,}84\ \%$$

b. Com área superficial, A, de 12 m^2, as perdas de calor (taxas de transferência de calor) sem, $\dot{Q}_{sem}$, e com, $\dot{Q}_{com}$, isolamento são:

$$\dot{Q}_{sem} = A \cdot \frac{T_{\infty,i} - T_{\infty,e}}{R''_{total,sem}} = 12 \cdot \frac{20 - (-12)}{0{,}2543} = 1510{,}0275\,\mathrm{W} \cong 1510\,\mathrm{W}$$

$$\dot{Q}_{com} = A \cdot \frac{T_{\infty,i} - T_{\infty,e}}{R''_{total,com}} = 12 \cdot \frac{20 - (-12)}{1{,}4822} = 259{,}0743\,\mathrm{W} \cong 259\,\mathrm{W}$$

c. A economia diária, E, associada ao isolamento das janelas por 12 horas por dia é dada por:

$$E = \frac{\dot{Q}_{sem} - \dot{Q}_{com}}{\eta_f} \cdot \Delta t \cdot C_g = \frac{1510{,}0275 - 259{,}0743}{0{,}8} \cdot 12 \cdot 3600 \cdot \frac{0{,}3}{10^6}$$

$$E = R\$\ 20{,}2654/\mathrm{dia} \cong R\$\ 20{,}27/\mathrm{dia}$$

2) A Figura 2 apresenta o esquema do circuito térmico equivalente para este exercício.

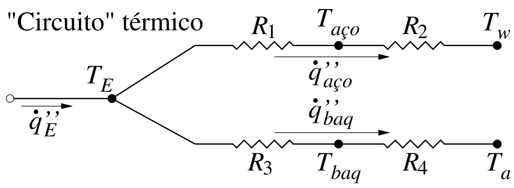


FIGURA 2 – Desenho esquemático do circuito térmico para o exercício 2.

O circuito térmico apresentado na Figura 2 justifica-se pelo fato de que o elemento de aquecimento está inserido **entre** dois materiais. Ao dissipar calor, o faz para os dois materiais que o envolvem. A magnitude do fluxo de calor que atravessará cada um dos materiais irá depender das resistências térmicas associadas.
Neste exercício usaremos os subscritos *aço* para o aço, w para a água, E para o elemento de aquecimento, *baq* para baquelite e a para o ar.
Calculando as resistências térmicas, conforme representadas na Figura 2:

$$R_1 = \frac{\Delta x_{aço}}{k_{aço}.A} \Rightarrow R_1.A = R''_1 = \frac{3{,}175 \times 10^{-3}}{14{,}9} = 0{,}0002\ \mathrm{K.m^2/W}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_w.A} \Rightarrow R_2.A = R''_2 = \frac{1}{2839{,}3} = 0{,}0004\ \mathrm{K.m^2/W}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_{baq}}{k_{baq}.A} \Rightarrow R_3.A = R''_3 = \frac{6{,}35 \times 10^{-3}}{1{,}4} = 0{,}0045\ \mathrm{K.m^2/W}$$

$$R_4 = \frac{1}{h_a.A} \Rightarrow R_4.A = R''_4 = \frac{1}{4{,}54} = 0{,}2203\ \mathrm{K.m^2/W}$$

O fluxo de calor que atravessa a placa de aço pode ser calculado pela troca de calor desta placa com a água ao seu lado:

$$\dot{q}''_{aço} = h_w.\left(T_{aço} - T_w\right) = 2839{,}3.(110 - 93{,}33) = 47321{,}67\ \mathrm{W/m^2}$$

Por outro lado, na placa de aço, podemos escrever que:

$$\dot{Q}_{aço} = -k_{aço}.A.\frac{T_{aço} - T_E}{L_{aço}} \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{aço}}{A} = \frac{k_{aço}}{L_{aço}}.\left(T_E - T_{aço}\right) = \frac{T_E - T_{aço}}{R''_1} = \dot{q}''_{aço}$$

$$T_E = \dot{q}''_{aço}.R''_1 + T_{aço} = 47321{,}67.0{,}0002 + 110 = 119{,}46\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

onde $L_{aço}$ seria a espessura da placa de aço. Procedendo de modo análogo, para o lado da baquelite não conhecemos o valor da sua temperatura superficial em contato com o ar, assim, analisamos o fluxo de calor desde o elemento de aquecimento até o ar:

$$\dot{q}''_{baq} = \frac{T_E - T_a}{R''_3 + R''_4} = \frac{119{,}46 - 15{,}56}{0{,}0045 + 0{,}2203} \Rightarrow \dot{q}''_{baq} = 462{,}19 \text{ W/m}^2$$

Finalmente, o fluxo de calor que emana do elemento de aquecimento, será:

$$\dot{q}''_E = \dot{q}''_{aço} + \dot{q}''_{baq} = 47321{,}67 + 462{,}19 = 47783{,}86 \,\text{W/m}^2 = 47{,}8 \,\text{kW/m}^2$$

Quanto à fração de energia que passa através da placa de aço inoxidável, $f_{aço}$, basta dividir o fluxo de calor que passa por essa placa pela quantidade total gerada no elemento de aquecimento. Matematicamente,

$$f_{aço} = \frac{\dot{q}''_{aço}}{\dot{q}''_E}.100 = \frac{47321{,}67}{47783{,}86}.100 = 99{,}03\%$$

Observe que, quando o enunciado diz para que se despreze a espessura do elemento de aquecimento, uma das conseqüências dessa informação é de que podemos considerar todo o elemento de aquecimento à mesma temperatura.

3) Assume-se transferência de calor em regime permanente, unidimensional (direção radial), sem geração interna de calor e sem resitência térmica de contato entre superfície do tubo e isolante.

a. A taxa de perda de calor a partir do tubo de vapor, $\dot{Q}$, é calculada pela Lei de resfriamento de Newton:

$$\dot{Q} = A_{sup}.h.(T_{sup} - T_\infty) = \pi.d_e.L.h.(T_{sup} - T_\infty)$$
$$\dot{Q} = \pi.0{,}1.50.20.(150 - 15) = 42411{,}5008 \,\text{W} \cong 42{,}4 \,\text{kW}$$

b. Inicialmente, calcula-se a quantidade de calor, Q, perdida em um ano:

$$Q = \dot{Q}.\Delta t = 42411{,}5008.365.24.3600 = 1{,}3375 \times 10^{12} \text{ J/ano}$$

Assim, a quantidade de calor (energia) fornecida pelo gás, num forno com 75% de eficiência, durante um ano, para suprir essa perda de calor anual, será (em therms/ano):

$$Q_{gas} = \frac{Q}{\eta} = \frac{1{,}3375 \times 10^{12} \text{ J/ano}}{0{,}75} \cdot \frac{1 \,\text{therm}}{105500000 \,\text{J}} = 16903{,}6335 \,\text{therms/ano}$$

Finalmente, o custo anual desta perda de energia, C_{anual}, para um custo unitário, C_{unit}, de R$ 1,50/therm, será:

$$C_{anual} = Q_{gas}.C_{unit} = 16903{,}6335.1{,}50 = \text{R\$ } 25.355{,}45/\text{ano}$$

O valor obtido é uma convincente justificativa para a real necessidade de se isolar muito bem tubulações que transportam fluidos a temperaturas diferentes da ambiente!

c. Para poupar 90% da energia perdida na forma de calor, a taxa de transferência de calor perdida pelo tubo deve ser reduzida para 10% do valor calculado no item **a**: $\dot{Q} = 0{,}1.42411{,}5008 = 4241{,}1501 \,\text{W}$. A espessura de isolante necessária para isso seria aquela obtida considerando um circuito térmico equivalente, onde essa nova taxa de transferência se estabeleceria a partir da temperatura externa do tubo, 150 °C, passando pelo isolante e chegando até à temperatura externa (ar). Assim,

$$\dot{Q} = \frac{T_{sup} - T_{\infty}}{R_{is} + R_{conv}} = \frac{T_{sup} - T_{\infty}}{\dfrac{\ln(r_{e,is}/r_{i,is})}{2.\pi.k_{is}.L} + \dfrac{1}{h.2.\pi.r_{e,is}.L}}$$

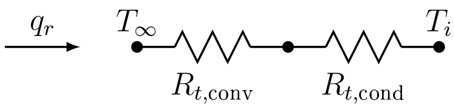
Substituindo os valores e resolvendo para $r_{e,is}$, obtém-se:

$$4241{,}1501 = \frac{150 - 15}{\dfrac{\ln(r_{e,is}/0{,}05)}{2.\pi.0{,}035.50} + \dfrac{1}{20.2.\pi.r_{e,is}.50}} \therefore r_{e,is} = 0{,}0692\,\mathrm{m}$$

A espessura de isolante, t_{is}, será, portanto:

$$t_{is} = r_{e,is} - r_{e,tubo} = 0{,}0692 - 0{,}050{,}0192\,\mathrm{m} = 1{,}92\,\mathrm{cm}$$

4) A condutividade do isolamento pode ser obtido nas tabelas do livro texto: $k = 0{,}0017\,\mathrm{W/(m \cdot K)}$. O circuito térmico é



Os valores das resistências térmicas são

$$R_{t,\mathrm{conv}} = \frac{1}{h4\pi r_2^2} = \frac{1}{25 \times 4 \times \pi \times 0{,}28^2} = 0{,}0406\,\mathrm{K/W}$$

$$R_{t,\mathrm{cond}} = \frac{1}{4\pi k}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{4 \times \pi \times 0{,}0017} \times \left(\frac{1}{0{,}25} - \frac{1}{0{,}28}\right) = 20{,}0615\,\mathrm{K/W}$$

a. Assim,

$$q_r = \frac{T_\infty - T_i}{R_{t,\mathrm{conv}} + R_{t,\mathrm{cond}}} = \frac{295 - 77}{0{,}0406 + 20{,}0615} = 10{,}84\,\mathrm{W}$$

b. A taxa de perda de líquido por evaporação pode ser calculada aplicando a 1ª Lei:

$$q_r = \dot{m} h_{lv} \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \frac{q_r}{h_{lv}} = \frac{10{,}84}{200000} = 5{,}422 \times 10^{-5}\,\mathrm{kg/s}$$