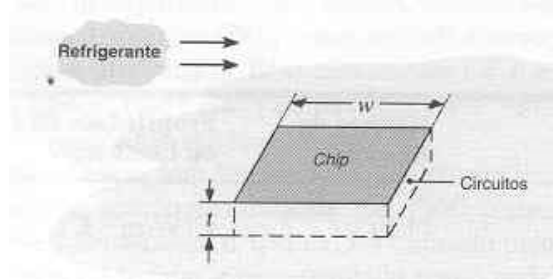


## FA 673 – Transferência de Calor e Massa

### Lista 1

OBS.: Estas respostas podem conter erros. Assim, sejam críticos, questionem os resultados. Em caso de dúvidas, falar com Prof. Rafael ou PED/PAD.

1)– Um circuito integrado (*chip*) quadrado de silício ( $k = 150 \text{ W/m.K}$ ) possui  $w = 5 \text{ mm}$  de lado e uma espessura  $t = 1 \text{ mm}$ . O *chip* está alojado no interior de um substrato de tal modo que as suas superfícies laterais e inferior estão isoladas termicamente, enquanto sua superfície superior encontra-se exposta a uma substância refrigerante.

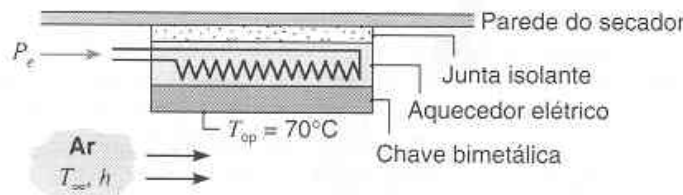


Se  $4 \text{ W}$  estão sendo dissipados pelos circuitos que se encontram montados na superfície inferior do *chip*, qual a diferença de temperatura que existe entre as suas superfícies inferior e superior, em condições de regime permanente?

**Resposta:**

$$\Delta T = 1,067 \text{ K}$$

2)– O controlador de temperatura de um secador de roupas consiste em uma chave bimetalica montada sobre um aquecedor elétrico que se encontra preso a uma junta isolante que, por sua vez, se encontra montada sobre a parede do secador.



A chave se abre a  $70^\circ\text{C}$ , que é a temperatura máxima do ar permitida no secador. A fim de operar o secador a uma temperatura do ar mais baixa, uma potência suficiente é fornecida ao aquecedor de tal modo que quando a chave atinge  $70^\circ\text{C}$  ( $T_{op}$ ) a temperatura do ar  $T_\infty$  é inferior. Se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar e a superfície exposta da chave, com  $30 \text{ mm}^2$ , é de  $25 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , qual a potência do aquecedor  $P_e$  necessária quando a temperatura desejada para o ar no secador é de  $T_\infty = 50^\circ\text{C}$ ?

**Resposta:**

$$P_e = 0,015 \text{ W}$$

3)– Em uma estação espacial orbital, um conjunto eletrônico está alojado em um compartimento que possui uma área superficial,  $A_{sup} = 1 \text{ m}^2$ , que está exposta ao espaço. Em condições normais de operação, os componentes eletrônicos dissipam  $1 \text{ kW}$ , que deve ser totalmente dissipado pela superfície exposta para o espaço. Se a emissividade

da superfície é de 1,0 e ela não se encontra exposta ao sol, qual a sua temperatura em condições de regime estacionário? Se a superfície estivesse exposta a um fluxo solar de  $750 \text{ W/m}^2$  e sua absorvidade à radiação solar fosse de 0,25, qual seria, então, a sua nova temperatura em condições de regime permanente?

**Respostas:**

**CASO 1:**

$$T_{\text{sup}} = 364,4 \text{ K} = 91,3^\circ \text{C}$$

**CASO 2:**

$$T_{\text{sup}} = 380,4 \text{ K} = 107,3^\circ \text{C}$$

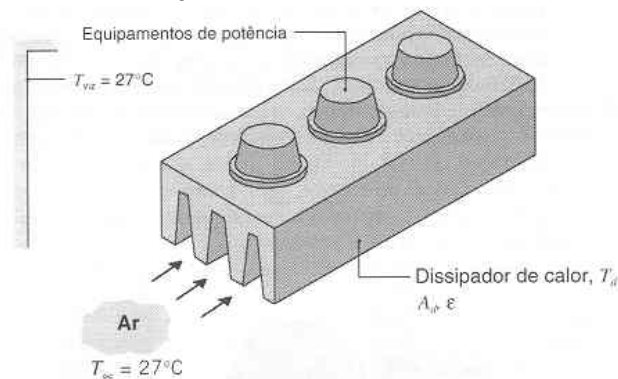
4)- Três aquecedores de resistência elétrica, com comprimento  $L = 250 \text{ mm}$  e diâmetro  $D = 25 \text{ mm}$ , estão submersos em 10 galões de água em um tanque, que está inicialmente a  $295 \text{ K}$ . Pode se considerar a densidade e o calor específico da água como  $\rho = 990 \text{ Kg/m}^3$  e  $c = 4180 \text{ J/kg.K}$ .

a) Se os aquecedores forem ativados, cada um dissipando  $q_l = 500 \text{ W}$ , estime o tempo necessário para a água ser levada a uma temperatura de  $335 \text{ K}$ .

b) Sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção natural dado por uma expressão da forma  $h = 370(T_s - T)^{1/3}$ , sendo  $T_s$  e  $T$  as temperaturas da superfície do aquecedor e da água, respectivamente, quais são as temperaturas de cada aquecedor logo após a sua ativação e antes de sua desativação? As unidades do  $h$  e de  $(T_s - T)$  são  $\text{W/m}^2.\text{K}$  e  $\text{K}$ , respectivamente.

c) Se os aquecedores forem inadvertidamente ativados com o tanque vazio, o coeficiente de transferência de calor por convecção natural associado à transferência de calor para o ambiente a  $T_\infty = 300 \text{ K}$  pode ser aproximado por  $h = 0,70(T_s - T)^{1/3}$ . Sendo a temperatura das paredes do tanque também igual a  $300 \text{ K}$  e a emissividade da superfície dos aquecedores  $\varepsilon = 0,85$ , qual é a temperatura da superfície de cada aquecedor nas condições de regime estacionário?

5)- Equipamentos eletrônicos de potência são instalados sobre um dissipador de calor que possui uma área superficial exposta de  $0,045 \text{ m}^2$  e uma emissividade de 0,80. Quando os equipamentos produzem uma potência total de  $20 \text{ W}$  e a temperatura do ar e da vizinhança é de  $27^\circ \text{C}$ , a temperatura média do dissipador de calor é de  $42^\circ \text{C}$ . Qual será a temperatura média do dissipador se os equipamentos eletrônicos produzirem uma potência total de  $30 \text{ W}$  e as condições do ambiente se mantiverem as mesmas?



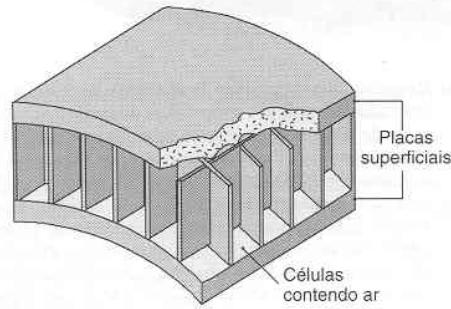
**Resposta:**

$$T_{\text{sup2}} = 322,3 \text{ K} = 49,2^\circ \text{C}$$

**6)–** Ao analisar o desempenho de um sistema térmico, o engenheiro deve ser capaz de identificar os processos de transferência de calor relevantes. Somente após a correta identificação de tais processos é que o comportamento do sistema pode ser apropriadamente quantificado. Para os sistemas a seguir, identifique os processos pertinentes, designando-os através de setas apropriadamente denominadas em um esquema do sistema. Responda também às perguntas adicionais que aparecem no enunciado de cada problema.

- a) Identifique os processos de transferência de calor que determinam a temperatura de um pavimento de asfalto em um dia de verão. Escreva um balanço de energia para a superfície do pavimento.
- b) Sabe-se que a radiação de microondas é transmitida por plásticos, vidros e materiais cerâmicos, sendo absorvida por materiais que contêm moléculas polares como a água. Ao serem expostas às microondas, as moléculas de água se alinham e reverterem o seu alinhamento com a radiação, com frequência de até  $10^9 \text{ s}^{-1}$ , causando a geração de calor. Compare o cozimento em um forno de microondas com o cozimento por radiação e convecção em um forno convencional. Em cada caso, qual o mecanismo físico responsável pelo aquecimento da comida? Qual o tipo de forno que possui a maior eficiência na utilização da energia? Por que? O aquecimento por meio de microondas tem sido cogitado para a secagem de roupas. Como a operação de um secador a microondas diferiria da operação de um secador convencional? Qual o tipo de secador que deve apresentar a maior eficiência na utilização de energia, e por quê?
- c) Considere uma parte exposta do seu corpo (por exemplo, o seu antebraço se você estiver vestindo uma camisa de mangas curtas) enquanto você se senta em uma sala. Identifique todos os processos de transferência de calor que ocorrem na superfície da sua pele. Com o propósito de conservar combustível e dinheiro, a esposa de um engenheiro insiste em manter o termostato de sua casa em  $15^\circ\text{C}$  durante os meses de inverno. O engenheiro é capaz de tolerar essa condição se a temperatura do ar ambiente fora de sua casa for superior a  $-10^\circ\text{C}$ , mas reclama do frio se a temperatura externa cair muito abaixo deste valor. Está o engenheiro imaginando coisas?
- d) Considere uma fonte de luz incandescente que consiste em um filamento de tungstênio no interior de uma campânula de vidro contendo um gás (uma lâmpada). Considerando uma operação em regime estacionário (permanente) com o filamento a uma temperatura de aproximadamente  $2900 \text{ K}$ , liste todos os processos de transferência de calor relevantes para (i) o filamento e (ii) a campânula de vidro.
- e) Existe um crescente interesse em se desenvolver materiais de construção com melhores propriedades isolantes. O desenvolvimento de tais materiais traria um grande avanço na área da conservação de energia, reduzindo o consumo no aquecimento de ambientes. Há indicações de que a estrutura composta, mostrada na figura, possui boas propriedades estruturais e isolantes. A estrutura é constituída por uma colméia, com células de seção reta quadrada, posicionada entre duas placas sólidas. As células são preenchidas com ar, enquanto as placas sólidas, bem como a matriz da colméia, são fabricadas em material plástico de baixa condutividade térmica. Identifique todos os processos de transferência de

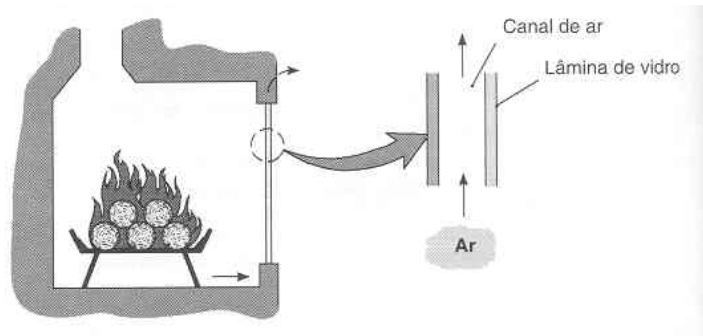
calor relevantes para a performance térmica da estrutura. Sugira formas que possibilitem a melhora dessa performance.



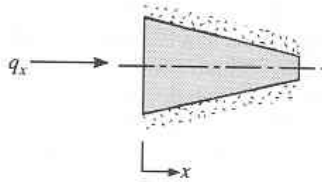
- f) A junta de um termopar é usada para medir a temperatura de uma corrente de ar quente que escoia através de um canal, através da imersão da junta na corrente de gás. A superfície do canal é resfriada de modo que sua temperatura é bem inferior à do gás. Identifique os processos de transferência de calor associados à superfície da junta do termopar. O contato do termopar estará (medirá) a uma temperatura inferior, igual, ou superior à temperatura do gás? Um pequeno tubo, envolvendo a junta do termopar e com extremidades abertas de modo a permitir a passagem do gás, forma, nesta situação, o que se chama de barreira de radiação. Com o uso de tal barreira melhora a precisão na medida da temperatura do gás?



- g) Uma tela para lareiras com lâmina dupla de vidro é colocada entre uma lareira a lenha e o interior de uma sala. A tela consiste em duas lâminas verticais de vidro que estão separadas por um espaço através do qual o ar ambiente pode fluir (o espaço está aberto no topo e no fundo). Identifique os processos de transferência de calor associados a esta tela de lareira.



7)– Considere condução de calor unidimensional, em regime estacionário, através do sólido simétrico mostrado na figura:



Supondo que não existe geração interna de calor, desenvolva uma expressão para a condutividade térmica  $k(x)$  para as seguintes condições:  $A(x) = (1 - x)$ ,  $T(x) = 300(1 - 2x - x^3)$ , e  $q_x = 6000 \text{ W}$ , onde  $A$  está em metros quadrados,  $T$  em kelvins, e  $x$  em metros.

**Resposta:**

$$k(x) = \frac{-20}{(1-x)(2+3x^2)}$$

8)– Um cilindro com raio  $r_0$ , comprimento  $L$  e condutividade térmica  $k$  está imerso em um fluido com coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  e temperatura desconhecida  $T$ . Em um dado instante do tempo, a distribuição de temperatura no cilindro é  $T(r) = a + br^2$ , onde  $a$  e  $b$  são constantes. Obtenha expressões para a taxa de transferência de calor em  $r_0$  e para a temperatura do fluido.

**Resposta:**

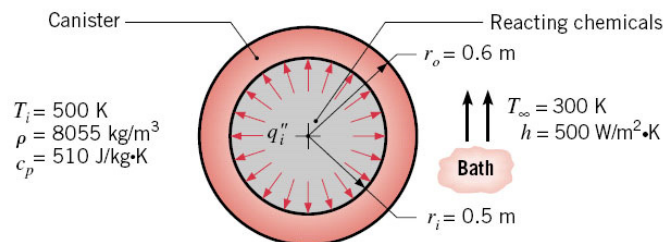
$$q(r_0) = -4\pi \cdot L \cdot r_0^2 \cdot k \cdot b$$

$$T_\infty = \frac{-2r_0 \cdot k \cdot b}{h} + a + br_0^2$$

9)– Um reator esférico de aço inoxidável (AISI 302) é usado para armazenar um meio reacional que fornece um fluxo de calor uniforme  $q_i''$  para sua superfície interna. O reator é subitamente submerso em um banho líquido a uma temperatura  $T_\infty < T_{ini}$ , sendo  $T_{ini}$  a temperatura inicial da parede do reator.

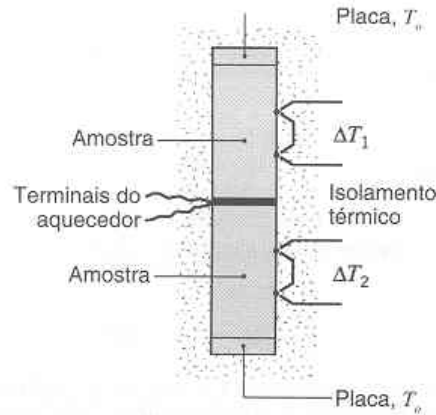
a) Considerando que o gradiente de temperatura na parede do reator seja desprezível e um fluxo de calor constante é igual a  $q_i''$ , desenvolva uma equação para variação da temperatura da parede em função do tempo durante o processo transiente. Qual é a taxa inicial de variação da temperatura na parede se  $q_i'' = 10^5 \text{ W/m}^2$ ?

b) Qual a temperatura da parede em condições de regime estacionário?



10)– Um aparelho para medir condutividade térmica de sólidos emprega um aquecedor elétrico que é posicionado entre duas amostras idênticas, com 30 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, do material cuja condutividade se deseja medir. As amostras encontram-se pressionadas entre placas que são mantidas a uma temperatura uniforme de  $T_0 = 77^\circ\text{C}$ , através da circulação de um fluido. Uma graxa condutora é colocada entre todas as superfícies para garantir um bom contato térmico. Termopares diferentes, com espaçamento de 15 mm, são instalados no interior das amostras. As superfícies laterais

das amostras são isoladas de modo a garantir transferência de calor unidimensional através do sistema.



- a) Com duas amostras de aço inoxidável AISI 316 no aparelho, a corrente elétrica no aquecedor é de 0,353 A a 100 V, enquanto os termopares diferenciais indicam  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 25,0^\circ\text{C}$ . Qual a condutividade térmica do aço inoxidável das amostras? Qual a temperatura média das amostras? Compare o seu resultado com o valor da condutividade térmica deste material fornecida na Tabela mostrada no livro base (Incropera).

**Resposta:**

$$k_{\text{inox}} = 15 \text{ W/m.K}$$

$$T_{\text{media}} = 127^\circ\text{C}$$

- b) Por engano, uma amostra de ferro Armco foi colocada na posição inferior do aparelho. Na posição superior permanece a amostra de aço inoxidável 316 utilizada no item a). Para essa situação, a corrente no aquecedor é de 0,601 A a 100V, e os termopares diferenciais indicam  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 15,0^\circ\text{C}$ . Quais são a condutividade térmica e a temperatura média da amostra de ferro Armco?

**Resposta:**

$$k_{\text{ferro}} = 70 \text{ W/m.K}$$

$$T_{\text{media}} = 107^\circ\text{C}$$

- c) Qual a vantagem em se construir o aparelho com duas amostras idênticas imprensando o aquecedor, em vez de construí-lo com uma única combinação aquecedor-amostra? Em qual situação a perda de calor pelas superfícies laterais das amostras se tornaria significativa? Em quais condições você esperaria  $\Delta T_1 \neq \Delta T_2$ ?

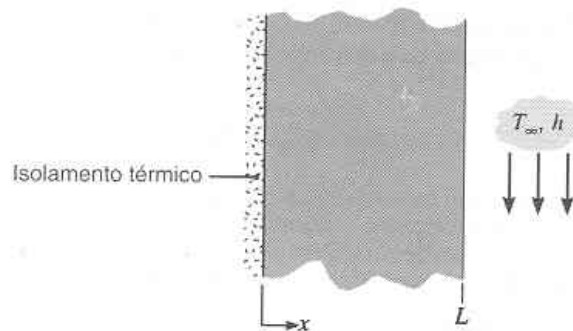
**11)–** Em um elemento combustível cilíndrico para reator nuclear, com 50 mm de diâmetro, há geração interna de calor a uma taxa uniforme de  $\dot{q}_1 = 5 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ . Em condições de regime permanente, a distribuição de temperatura no seu interior tem a forma  $T(r) = a + br^2$ , onde  $T$  está em graus Celsius e  $r$  em metros, enquanto  $a = 800^\circ\text{C}$  e  $b = -4,167 \cdot 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}^2$ . As propriedades do combustível são  $k = 30 \text{ W/m.K}$ ,  $\rho = 1.100 \text{ kg/m}^3$  e  $c_p = 800 \text{ J/kg.K}$ .

- a) Qual a taxa de transferência de calor, por unidade de comprimento do elemento, em  $r = 0$  (a linha do centro) e em  $r = 25 \text{ mm}$  (a superfície)?

- b) Se o nível de potência do reator for subitamente aumentado para  $\dot{q}_2 = 10^8 \text{ W/m}^3$ , qual a taxa inicial de variação da temperatura em função do tempo em  $r = 0$  e  $r = 25 \text{ mm}$ ?

**12)-** Uma parede plana unidimensional com espessura  $2L = 100 \text{ mm}$  apresenta uma geração de energia térmica uniforme igual a  $\dot{q} = 1000 \text{ W/m}^3$  e é resfriada por convecção em  $x = \pm 50 \text{ mm}$  por um fluido ambiente caracterizado por  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . Se a distribuição de temperaturas em estado estacionário no interior da parede for  $T(x) = a(L^2 - x^2) + b$ , em que  $a = 10^\circ\text{C/m}^2$  e  $b = 30^\circ\text{C}$ , qual é a condutividade térmica da parede? Qual é o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ ?

**13)-** A parede plana, com propriedades termofísicas constantes e onde não existe geração interna de calor, mostrada na figura, está inicialmente a uma temperatura uniforme  $T_i$ . De repente, a superfície em  $x = L$  é aquecida por um fluido à temperatura  $T_\infty$ , com um coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$ . A fronteira em  $x = 0$  encontra-se perfeitamente isolada.



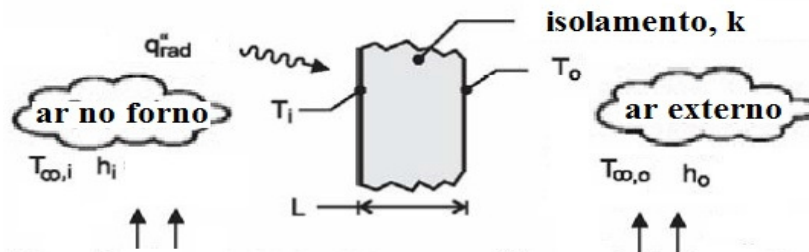
- Escreva a equação diferencial e identifique as condições inicial e de contorno que permitem determinar a temperatura na parede em função da posição e do tempo.
- Em um sistema de coordenadas  $T$ - $x$ , esboce as distribuições de temperatura para as seguintes condições: condição inicial ( $t \leq 0$ ), condição de regime permanente ( $t \rightarrow \infty$ ), e dois instantes de tempo intermediários.
- Em um sistema de coordenadas  $q''_x$ - $t$ , plote o fluxo térmico nas posições  $x = 0$  e  $x = L$ . Ou seja, mostre qualitativamente como  $q''_x(0, t)$  e  $q''_x(L, t)$  variam em função do tempo.
- Escreva uma expressão para o total de energia transferido para a parede, por unidade de volume da parede ( $\text{J/m}^3$ )

**14)-** Considere uma parede plana de espessura  $L$  tendo suas duas superfícies mantidas a temperaturas  $T_0$  e  $T_L$ . Se a condutividade térmica varia de acordo com  $k = k_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$ , desenvolva uma expressão para o estado estacionário e fluxo unidirecional. Considere ainda que a área transversal decresce linearmente de  $A_0$  para  $x = 0$  e  $A_L$  para  $x = L$ .

**15)-** As paredes de uma geladeira são tipicamente construídas com uma camada de isolante entre dois painéis de folhas de metal. Considere uma parede feita com isolante de fibra de vidro, com condutividade térmica  $k_i = 0,046 \text{ W/(m.K)}$  e espessura  $L_i = 50 \text{ mm}$ , e painéis de aço, cada um com condutividade térmica  $k_p = 60 \text{ W/(m.K)}$  e espessura  $L_p =$

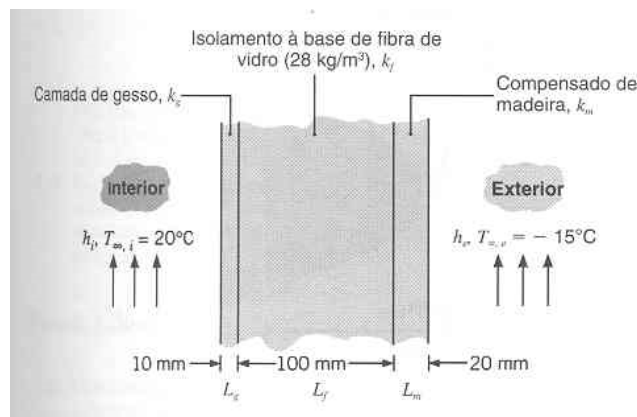
3mm. Com a parede separando ar refrigerado a  $T_{\infty,i} = 4^\circ\text{C}$  do ar ambiente a  $T_{\infty,a} = 25^\circ\text{C}$ , determine o ganho de calor por unidade de área superficial. Os coeficientes associados à convecção natural nas superfícies interna e externa podem ser aproximados por  $h_i = h_e = 5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

**16)–** A parede de um forno de secagem é construída com a colocação de um material isolante de condutividade térmica  $k = 0,05\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  entre folhas finas de metal. O ar no interior do forno está a  $T_{\infty,i} = 300^\circ\text{C}$  e o coeficiente convectivo correspondente é  $h_i = 30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . A superfície interna da parede absorve um fluxo radiante de  $q''_{\text{rad}} = 100\text{ W}/\text{m}^2$  vindo de objetos quentes no interior do forno. A temperatura no ambiente externo do forno é  $T_{\infty,e} = 25^\circ\text{C}$  e o coeficiente total para a convecção e a radiação na superfície externa é  $h_o = 10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .



- Desenhe o círculo térmico para a parede e identifique todas as temperaturas, taxas de transferência de calor e resistências térmicas.
- Qual espessura  $L$  do isolamento é necessária para manter a superfície externa da parede a uma temperatura segura para o toque de  $T_o = 40^\circ\text{C}$ ?

**17)–** Uma casa possui uma parede composta com camadas de madeira, isolamento à base de fibra de vidro e gesso, conforme indicado no desenho. Em um dia de inverno, os coeficientes de transferência de calor por convecção são de  $h_e = 60\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$  e  $h_i = 30\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ . A área total da superfície da parede é de  $350\text{ m}^2$ .



- Para as condições dadas, determine uma expressão simbólica para a resistência térmica total da parede, incluindo os efeitos da convecção térmica nas superfícies interna e externa da parede.
- Determine a perda total de calor através da parede. **Resposta:**  $q = 4,21\text{ kW}$
- Se o vento soprasse violentamente, aumentando o valor de  $h_e$  para  $300\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ , determine o aumento percentual na perda de calor. **Resposta:** aprox. 1%



- d) Qual é a resistência que controla o processo térmico, ao ser a mais importante na determinação da quantidade de calor que atravessa a parede?

**18)–** A parede de uma câmara é composta de 3 camadas:

- A externa, de 9" de espessura de tijolo de construção;
- A intermediária, de 2" de espessura de espuma plástica;
- A interna, de ½" de espessura de placa de cortiça.

No interior da câmara, há convecção natural que determina o  $h_{\text{int}} = 1,0$  U.I. No exterior, cuja temperatura ambiente é de 82°F, há um vento de 30 pés/s. A temperatura medida na superfície cortiça-espuma plástica é de 0°F. Calcular:

- a. As infiltrações de calor em (Btu/h.pé<sup>2</sup>) pela parede;
- b. As temperaturas das superfícies externa e interna.

**Dados:**  $h_{\text{ext}} = 0,75$  U.I.

$h_v = 1 + 0,225V$ ; em que:  $V$  = velocidade do vento em (pé/s) e  $h_v$  em U.I.

Condutividades térmicas dos materiais:

- 0,40 Btu/h.pé°F para tijolo;
- 0,020 Btu/h.pé°F para espuma plástica;
- 0,025 Btu/h.pé°F para placa de cortiça.

**19)–** Um aquecedor elétrico delgado é enrolado ao redor da superfície externa de um tubo cilíndrico longo cuja superfície interna é mantida a uma temperatura de 5°C. A parede do tubo possui raios interno e externo iguais a 25 e 75 mm, respectivamente, e condutividade térmica de 10 W/m.K. A resistência térmica de contato entre aquecedor e a superfície externa do tubo (por unidade de comprimento do tubo) é de  $R'_{t,c} = 0,01$  m.K/W. A superfície externa do aquecedor está exposta a um fluido com  $T_{\infty} = -10^{\circ}\text{C}$  e um coeficiente de convecção de  $h = 100$  W/m<sup>2</sup>.K. Determine a potência do aquecedor, por unidade de comprimento do tubo, requerida para mantê-lo a  $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$ .

**Resposta:**

$$q' = 2377 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

**20)–** Uma sonda criocirúrgica esférica pode ser introduzida em tecidos doentes com o propósito de congelar e dessa maneira destruí-los. Considere uma sonda com 3 mm de diâmetro cuja superfície é mantida a  $-30^{\circ}\text{C}$  quando introduzida em um tecido que se encontra a  $37^{\circ}\text{C}$ . Ocorre a formação de uma camada esférica de tecido congelado ao redor da sonda, com uma temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  na fronteira (interface) entre os tecidos congelado e normal. Se a condutividade térmica do tecido congelado é de aproximadamente 1,5 W/m.K e a transferência de calor na fronteira entre as fases pode ser caracterizada por um coeficiente efetivo de transferência de calor por convecção de 50 W/m<sup>2</sup>.K, qual a espessura da camada de tecido congelado?

**Resposta:**

$$e = 5,3 \text{ mm}$$

**21)–** Rejeitos radioativos ( $k_{rr} = 20$  W/m.K) são armazenados em um recipiente esférico de aço inoxidável ( $k_{ai} = 15$  W/m.K), com raios interno e externo iguais a  $r_i = 0,5$  m e  $r_e = 0,6$  m. Calor é gerado no interior dos rejeitos a uma taxa volumétrica uniforme  $\dot{q} = 105$  W/m<sup>3</sup> e a superfície externa do recipiente está exposta um escoamento de água no qual  $h = 1000$  W/m<sup>2</sup>.K e  $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ .

- a) Calcule a temperatura da superfície externa  $T_{s,e}$ , em condições de regime estacionário.
- b) Calcule a temperatura da superfície interna  $T_{s,i}$ , em condições de regime estacionário.
- c) Obtenha uma expressão para a distribuição de temperaturas  $T(r)$ , nos rejeitos radioativos. Expresse o seu resultado em termos de  $r_i$ ,  $T_{s,i}$ ,  $k_{rr}$  e  $\dot{q}$ . Calcule a temperatura em  $r = 0$ .