Gabarito das Autoatividades

FENÔMENOS DE TRANSPORTE

UNIASSELVI

Centro Universitário Leonardo da Vinci
Rodovia BR 470, Km 71, nº 1.040
Bairro Benedito - CEP 89130-000
Indaial - Santa Catarina - 47 3281-9000

Elaboração:
Prof.ª Cátia Rosana Lange
Prof.ª Neseli Dolzan

Revisão, Diagramação e Produção:
Centro Universitário Leonardo da Vinci - UNIASSELVI

GABARITO DAS AUTOATIVIDADES DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

UNIDADE 1

TÓPICO 1

1 A massa específica de um determinado óleo é de 830 kg/m³. Determine a massa e o peso de óleo contido em um barril de 200 litros.

R.:

$$\rho = 830kg/m^3$$
$$V = 200L = 0{,}2m^3$$

$$m = \rho V \qquad 830 = \frac{m}{V} \qquad 830 = \frac{m}{0{,}2} \qquad \boldsymbol{m = 166kg}$$

$$P = mg \qquad P = 166kg \cdot 9{,}8\frac{m}{s^2} \qquad \boldsymbol{P = 1626{,}8\frac{kg \cdot m}{s^2} \ ou \ 1626{,}8N}$$

2 Um reservatório está cheio de óleo cuja densidade é ρ = 850 kg/m³. Se o volume do reservatório é V = 2 m³, determine a quantidade de massa m no reservatório.

R.:

$$m = \rho V$$

$$m = (850kg/m^3)(2m^3) = 1700kg$$

3 Um reservatório de inox tem massa de 5kg e está cheio de água, cujo volume é 0,2m³. Considerando a densidade da água 1000kg/m³, determine o peso do sistema combinado.

R.:

$$\rho = 1000kg/m^3$$
$$V = 0{,}2m^3$$

$$m = \rho V \qquad 1000kg/m^3 = \frac{m}{0{,}2m^3} \qquad \boldsymbol{m = 200kg}$$

Sabemos que a massa do reservatório é de 5kg, portanto, o peso combinado do sistema será:

$P = mg$ $\quad P = (200 + 5)kg \cdot 9{,}8\frac{m}{s^2}$ $\quad \boldsymbol{P = 2009\frac{kg \cdot m}{s^2}\ ou\ 2009N}$

4 Discorra a respeito das propriedades dos fluidos.

R.: Os fluidos podem apresentar diversas propriedades. Dentre as mais importantes:

a) Os fluidos submetidos a esforços normais sofrem variações volumétricas finitas. Quando essas variações volumétricas são muito pequenas, consideram-se os fluidos incompressíveis. Geralmente, os líquidos são incompressíveis, enquanto os gases são compressíveis.
b) Existindo tensão cisalhante, ocorre escoamento, ou seja, o fluido entra em movimento.
c) Os fluidos se moldam às formas dos recipientes que os contêm, sendo que os líquidos ocupam volumes definidos e apresentam superfícies livres, enquanto os gases se expandem até ocupar todo o recipiente. Essa moldagem nos líquidos deve-se ao escoamento causado pela existência de componente cisalhante do peso dos elementos de volume do fluido.
d) Para um fluido em repouso, a tensão é exclusivamente normal, sendo seu valor chamado de pressão estática p que, em um ponto, é igual em qualquer direção.

5 Faça uma analogia entre sistema e volume de controle.

R.: Em um sistema, onde não há trocas de massa, esta é inalterada. Em um volume de controle, há situações de entrada e saída de massa. Quando esta entrada é igual à saída, consideramos que a massa no seu interior é constante, porém, devemos entender que esta massa tem energia, quantidade de movimento e outros fenômenos associados a ela.

TÓPICO 2

1 Determine a pressão atmosférica em uma localidade na qual a leitura barométrica é 740 mm Hg e a aceleração da gravidade é g = 9,81 m/s². Considere que a temperatura do mercúrio seja de 10°C, na qual sua densidade é de 13.570 kg/m³.

R.:

$$p = \rho g h$$

$$= (13570 kg/m^3)(9{,}81 m/s^2)(0{,}74 m)\left(\frac{1N}{1kg.m/s^2}\right)\left(\frac{1kPa}{1000 N/m^2}\right)$$

=98,5 kPa

2 Uma sala no nível inferior de um navio de cruzeiro tem uma janela circular com 30 cm de diâmetro. Se o ponto médio da janela estiver 5 m abaixo da superfície da água, determine a força hidrostática que age sobre a janela e o centro de pressão. Tome a densidade da água do mar como 1,025.

R.:

$$P_{méd} = P_C = \rho g h_C = \rho g(s + b/2)$$

$$= (1025 kg/m^3)(9{,}81 m/s^2)(4{,}85 + 0{,}3/2 m)\left(\frac{1kN}{1000 kg.m/s^2}\right) =$$

$$= 50{,}27 kN/m^2$$

então, a força hidrostática resultante sobre a porta torna-se:

$$F_R = P_{méd} A = (50{,}27 N/m^2)(0{,}15x0{,}15x\pi) = 3{,}55 kN$$

o centro da pressão está diretamente abaixo do ponto médio da janela,fazendo P_0=0.

$$y_P = s + \frac{b}{2} + \frac{b^2}{12(s + b/2)} = 4{,}85 + \frac{0{,}3}{2} + \frac{0{,}3^2}{12(4{,}85 + 0{,}3/2)} = 5{,}001 m$$

3 Uma tubulação de água deve ser colocada no leito de um lago. A tubulação tem diâmetro de 300 mm (interno), espessura de 12,5 mm e peso (por unidade de comprimento) igual a 150 Newtons. Pode-se esperar algum problema com empuxo?

R.: Um balanço de forças permite-nos relacionar para a tubulação cheia:

ΣF = Peso da tubulação + Peso da água contida na tubulação – Peso do volume de água deslocado pela tubulação

Se tivermos equilíbrio, a soma destas forças será nula. Considerando um metro de tubulação, teremos:

$$\sum F = 150 + \rho g\left(\frac{\pi d^2}{4} X1\right) - \rho g\left(\frac{\pi D^2}{4} X1\right)$$

Onde d = 0,3 m e D = 0,325 m, temos:

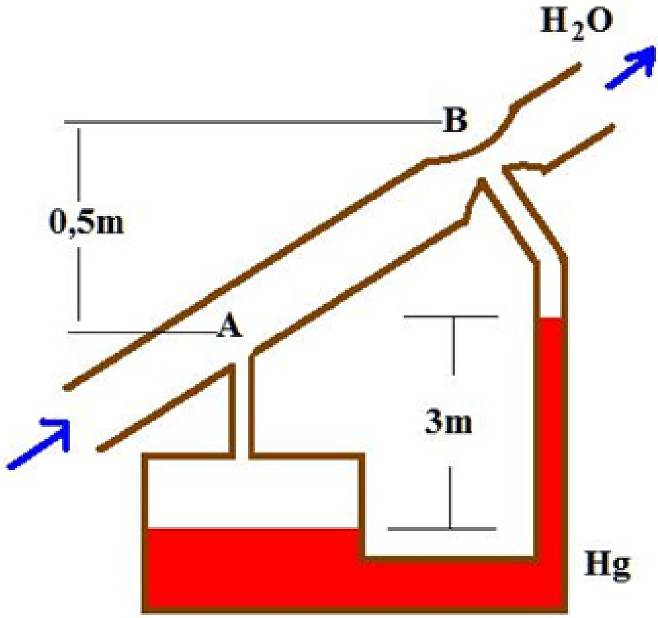
$$\sum F = 150 + 693{,}7 - 814{,}14N = 29{,}56N$$

Assim, com a tubulação cheia, a força resultante age no sentido do peso, isto é, impedindo a flutuação da tubulação. Entretanto, se a tubulação estiver vazia, a força resultante passa a ser:

$$\sum F = 150 - 814{,}14N = -664{,}14N$$

Neste caso, a força é ascendente, dando origem ao levantamento, ou flutuação da tubulação.

4 Um manômetro diferencial é usado para a medição da pressão causada por uma diminuição da seção reta (chamamos de constrição) ao longo do escoamento. Determine a diferença de pressão entre os pontos A e B da figura. Qual é o ponto de maior pressão?



R.: Saindo do ponto A para o ponto B, temos a altura de fluido (água) até o nível de mercúrio. Pelo princípio dos vasos comunicantes, podemos atingir a coluna da direita. Há uma diferença de cotas de 3m e depois há a coluna de fluido (água novamente) que chega ao ponto B. Desconsiderando as cotas comuns, precisaremos considerar apenas a coluna de 3 m de mercúrio e a coluna de 0,5 m de água.

Portanto,

$$P_A - P_B = \rho_{Hg} g h_{Hg} + \rho_{H_2O} g h_{H_2O}$$
$$= (13{,}6 X 1000 X 3 + 1000 X 0{,}5) X 9{,}81 = 405{,}1 kPa$$

Como a coluna de mercúrio em B é mais elevada, e neste ponto a pressão é menor.

TÓPICO 3

1 **Um tanque cilíndrico de água com 4 pés de altura e 3 pés de diâmetro cuja parte superior está aberta para a atmosfera inicialmente está cheio com água. Agora a tampa de descarga próxima à parte inferior do tanque é retirada, e sai um jato de água cujo diâmetro é de 0,5 polegadas. A velocidade média $V = \sqrt{2gh}$, do jato é dada por onde h é a altura da água no tanque medida a partir do centro do orifício (uma variável) e g é a aceleração da gravidade. Determine o tempo necessário para que o nível da água no tanque caia para 2 pés a partir da sua parte inferior.**

R.: 01) a água é uma substância incompressível; 02) a distância entre a parte inferior do tanque e o centro do orifício é desprezível, comparada à altura total da água; 03) a aceleração da gravidade é de 32,2 pés/s^2.
Tomamos o volume ocupado pela água como o volume de controle. O tamanho cai e, portanto, este é um volume de controle variável. Esse é um problema de escoamento não permanente, uma vez que as propriedades (como a quantidade de massa) do volume de controle mudam com o tempo.
A relação de conservação de massa para um volume de controle que está passando por qualquer processo é dada na forma de taxa como:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad \text{(eq. 01)}$$

Durante esse processo nenhuma massa entra no volume de controle ($\dot{m}_e = 0$), e a vazão de massa de água ejetada pode ser expressa como:

$$\dot{m}_s = (\rho V A)_s = \rho\sqrt{2gh}A_{jato} \quad \text{(eq. 02)}$$

Onde $A_{jato} = \pi D_{jato}^2 / 4$ é a área de seção transversal do jato, que é constante. Observando que a densidade da água é constante, a massa no tanque em determinado instante é

$$\dot{m}_{VC} = \rho Q = \rho A_{tanque} h \quad \text{(eq. 03)}$$

Onde $A_{\tan que} = \pi D^2_{\tan que} / 4$ é a área da base do tanque cilíndrico. Substituindo as equações 02 e 03 na ralação de balanço de massa, temos:

$$-\rho\sqrt{2gh}A_{jato} = \frac{d(\rho A_{\tan que} h)}{dt} \rightarrow -\rho\sqrt{2gh}(\pi D^2_{jato} / 4) = \frac{\rho(\pi D^2_{\tan que} / 4)dh}{dt}$$

Cancelando as densidades e outros termos comuns e separando as variáveis, temos:

$$dt = -\frac{D^2_{\tan que}}{D^2_{jato}} \frac{dh}{\sqrt{2gh}}$$

Integrando t = 0, onde h = h_0 a t = t onde h = h_2 temos,

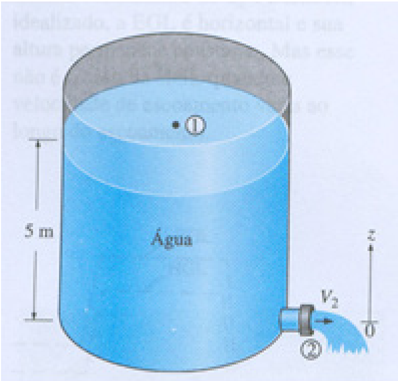
$$\int_0^t dt = -\frac{D^2_{\tan que}}{D^2_{jato}\sqrt{2g}} \int_{h_0}^{h_2} \frac{dh}{\sqrt{h}} \rightarrow t = \frac{\sqrt{h_0} - \sqrt{h_2}}{\sqrt{g/2}} \left(\frac{D_{\tan que}}{D_{jato}}\right)^2$$

Substituindo os valores apropriados, o tempo de descarga é determinado por

$$t = \frac{\sqrt{4\,pés} - \sqrt{2\,pés}}{\sqrt{32,2/2\,pés/s^2}} \left(\frac{3X12\,pol}{0,5\,pol}\right)^2 = 757s = 12,6\min$$

Assim, metade do tanque será esvaziado 12,6 min depois de o orifício de descarga ser destampado.

2 Um tanque grande aberto para a atmosfera é preenchido com água até uma altura de 5m da saída da torneira. Uma torneira próxima à parte inferior do tanque é aberta, e a água escoa para fora da torneira de maneira suave. Determine a velocidade da água na saída.



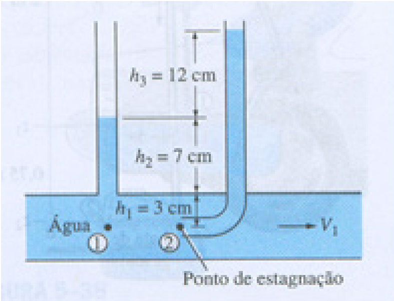
R.: Considerando: 01) o escoamento incompressível; 02) a água drena de forma suficientemente lenta para que o escoamento possa ser considerado permanente. Consideramos o ponto 1 como estando na superfície livre da água de modo que $P_1 = P_{atm}$ (aberto para a atmosfera), $V_1 \cong 0$ (o tanque é grande com relação a saída) e, z_1 = 5m e z_2 = 0 (tomamos o nível de referência no centro da saída). Da mesma forma, $P_2 = P_{atm}$ (a água é descarregada na atmosfera). Assim, a equação de Bernoulli pode ser simplificada para:

$$\frac{P_1}{\rho g}+\frac{V_1^2}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{V_2^2}{2g}+z_2 \rightarrow z_1=\frac{V_2^2}{2g}$$

Isolando V_2 e substituindo:

$$V_2=\sqrt{2gz_1}=\sqrt{2(9{,}81m/s^2)(5m)}=9{,}9m/s$$

3 Um piezômetro e um tubo de Pitot são colocados em um tubo de água horizontal, como mostra a Figura, para medir as pressões estática e de estagnação (estática+dinâmica). Para as alturas de coluna d’água indicadas, determine a velocidade no centro do tubo.



R.: Consideramos: 01) o escoamento é em regime permanente e incompressível; 02) os pontos 01 e 02 estão suficientemente próximos para que a perda irreversível de energia entre eles seja desprezível e, portanto, podemos usar as equação de Bernoulli.

Tomamos os pontos 1 e 2 ao longo do eixo central do tubo, com o ponto 1 diretamente abaixo do piezômetro e o ponto 2 na ponta do tubo de pitot. Este é um escoamento em regime permanente com linhas de corrente retas e paralelas, e as pressões de manômetro nos pontos 1 e 2 podem ser expressas como:

$$P_1 = \rho g(h_1 + h_2)$$
$$P_2 = \rho g(h_1 + h_2 + h_3)$$

Observando que o ponto 2 é um ponto de estagnação e, portanto V_2 = 0 e z_1 = z_2, a aplicação da equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 resulta em

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$

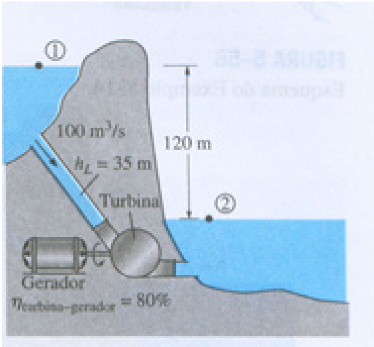
Substituindo as expressões para P_1 e P_2, temos

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = \frac{\rho g(h_1 + h_2 + h_3) - \rho g(h_1 + h_2)}{\rho g} = h_3$$

Isolando V_1 e substituindo

$$V_1 = \sqrt{2gh_3} = \sqrt{2(9{,}81 m/s^2)(0{,}12 m)} = 1{,}53 m/s$$

4 Em uma usina hidrelétrica, 100 m³/s de água escoam de uma elevação de 120 m até uma turbina, onde a energia elétrica é gerada. A perda de carga irreversível total no sistema de tubulação do ponto 1 até o ponto 2 (excluindo a unidade da turbina) é determinada como 35 m. Se a eficiência geral da turbina/gerador for de 80%, estime a saída de potência elétrica.



R.: Consideramos 01) o escoamento é em regime permanente e incompressível; 02) os níveis de água da represa e do local de descarga permanecem constantes.

A vazão de massa da água através da turbina é:

$$\dot{m} = \rho Q = (1000 kg/m^3)(100 m^3/s) = 10^5 kg/s$$

Tomamos o ponto 2 como nível de referência e, portanto, $z_2 = 0$. Além disso, os pontos 1 e 2 são abertos para a atmosfera ($P_1 = P_2 = P_{atm}$) e as velocidades de escoamento são desprezíveis nos dois pontos ($V_1 = V_2 = 0$). Em seguida, a equação da energia para o escoamento em regime permanente e incompressível se reduz a

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina,e} + h_L \rightarrow h_{turbina,e} = z_1 - h_L$$

Substituindo, a carga extraída da turbina e a potência correspondente da turbina são:

$$h_{turbina,e} = z_1 - h_L = 120 - 35 = 85 m$$

$$\dot{W}_{turbina,e} = \dot{m}\,gh_{turbina,e} = (10^5\,kg/s)(9{,}81m/s^2)(85m)\left(\frac{1kJ/kg}{1000m^2/s^2}\right) = 83.400kW$$

Assim, uma unidade turbina-gerador perfeita geraria 83.400 kW de eletricidade dessa fonte. A energia elétrica gerada pela unidade real é:

$$\dot{W}_{elétrica} = \eta_{turbina-ger}\,\dot{W}_{turbina,e} = (0{,}80)(83{,}4MW) = 66{,}7MW$$

TÓPICO 4

1 Discorra sobre os três regimes de escoamento: laminar, de transição e turbulento.

R.: Escoamento em regime laminar: velocidade de escoamento baixa, não há uma mistura macroscópica.
Escoamento em regime de transição: com o aumento da velocidade, podemos observar mudanças no comportamento do escoamento, onde temos um estágio intermediário conhecido como regime de transição.
Escoamento em regime turbulento: velocidades maiores, onde ocorre uma mistura macroscópica.

2 (ÇENGEL e CIMBALA) O ar aquecido a 1 atm e 35°C deve ser transportado em um duto plástico circular com 150 m de comprimento a uma vazão de 0,35 m³/s. Se a perda de carga no tubo não exceder os 20 m, determine o diâmetro mínimo do duto.

R.: 01) o escoamento é estacionário e incompressível; 02) os efeitos da entrada são desprezíveis e, portanto, o escoamento é totalmente desenvolvido; 03) o tubo não envolve nenhum componente, como curvas, válvulas e conectores; 04) o ar é um gás ideal; 05) o duto é liso, uma vez que é feito de plástico.
A densidade, a viscosidade dinâmica e a viscosidade cinemática do ar a 35°C são:
ρ=1,145 kg/m^3
μ=1,895 X 10^{-5} kg/m . s
υ=1,655 X 10^{-5} m^2/s

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 745 - 97 = 648kPa$$
$$A_c = \pi D^2/4 = \pi(0{,}05m)^2/4 = 0{,}001963m^2$$

A vazão pode ser determinada por:

$$Q = \frac{(\Delta P \pi D^4)}{128 \mu L} = \frac{(648 kPa)\pi (0{,}05 m)^4}{128(0{,}800 kg/m\,s)(40m)} \left(\frac{1000 N/m^2}{1 kPa} \right) \left(\frac{1 kg.m/s^2}{1N} \right) =$$

$$= 0{,}00311 m^3/s$$

4 Discorra a respeito do n° de Reynolds, explicando o que é e qual a sua relação com o regime de escoamento.

R.: O regime de escoamento depende das propriedades de cada escoamento em particular. O parâmetro estabelecido pela relação entre o diâmetro (D), a velocidade média (V) e a viscosidade cinemática (ν) é conhecido como o número de Reynolds (R_e) e é definido por:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

A relação entre o número de Reynolds e o escoamento pode sofrer alterações para diferentes autores. Aqui, vamos assumir a relação:

$$\begin{array}{ccc} \mathrm{Re} \leq 2.300 & \textit{escoamento} & \textit{laminar} \\ 2.300 \leq \mathrm{Re} \leq 4.000 & \textit{escoamento} & \textit{transição} \\ \mathrm{Re} \geq 4.000 & \textit{escoamento} & \textit{turbulento} \end{array}$$

UNIDADE 2

TÓPICO 1

1 Qual a relevância do estudo de transmissão de calor?

R.: A maioria dos processos industriais dependem do estudo do tema. Em especial podem-se mencionar processos que envolvam geração e conversão de energia. O conhecimento de transmissão de calor é de extrema

importância para o projeto e operação de motores, turbinas, condensadores, evaporadores, caldeiras, recuperadores, regeneradores, e uma diversidade de equipamentos.
Além destas aplicações, o estudo deste tema é importantíssimo para problemas relacionados ao meio ambiente, à área biomédica e de alimentos, entre diversas outras áreas.

2 Ar com vazão de 2,5 kg/s é aquecido de -10 a 30°C em um trocador de calor. Qual é a taxa de transferência de calor?

R.: Da Termodinâmica sabemos que:

$$q = \dot{m}.c_p.\Delta T = \dot{m}.c_p.\left(T_{final} - T_{inicial}\right)$$

onde c_p representa o calor específico do ar (1,007 $\mathrm{kJ/kg\,^\circ C}$), e $\dot{m}$ representa o fluxo de massa (2,5 kg/s), e:

$$T_{inicial} = -10^\circ C \qquad T_{final} = +30^\circ C$$

Assim:

$$q = 2,5 \cdot 1,007 \cdot (30 - (-10)) = 2,5175 \cdot (30 + 10) = 100,7 \quad kW$$

Observe as unidades: $\frac{kg}{s} \cdot \frac{kJ}{kg \cdot {}^\circ C} \cdot {}^\circ C = \frac{kJ}{s} = kW$

Então, se temos uma determinada quantidade de massa que flui em certo tempo (fluxo de massa) e este ar está sendo aquecido, temos automaticamente uma taxa de transferência de calor.

FONTE: <http://www.google.com.br/search?hl=pt- BR&lr=lang_ pt&ei= qqu1SfrDjsTjmQenhcHnBQ&as=X& oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=TRANSFER%C3%8ANCIA+DE+CALOR+(TCL)+Volume+I+Prof.+ Carlos+Boabaid+Neto&spell=1>.

3 Uma relação empírica para determinar o coeficiente de transmissão de calor para o fluxo de ar num tubo é dada pela relação $h = 0,10\frac{V^{0,3}}{D^{0,7}}$, onde h é o coeficiente de transmissão de calor, em $Btu/h.pé^2\,{}^\circ F$; V a velocidade, em pés/s; e D o

diâmetro interno, em pés. Se quisermos expressar h em W/m^2K qual será a constante, em lugar de 0,10?

R.:

$$h = 0{,}10\frac{V^{0,3}}{D^{0,7}} \times \frac{Btu}{h \cdot pé^{2\circ}F} \times \frac{1054J}{Btu} \times \frac{1h}{3600s}\left(\frac{1pé}{12pol}\right)^2 \times \left(\frac{1pol}{0{,}0254m}\right)^2 \times \frac{1{,}8^\circ F}{1K} =$$

$$= 0{,}567\frac{V^{0,3}}{D^{0,7}}\frac{J}{s.m^2K} = 0{,}567\frac{W}{m^2K}$$

Fonte: KREITH, Frank. (1977, p.17).

4 Desejam-se dissipar cerca de 1840 Watts através de uma parede cujas dimensões não podem ultrapassar 0,08 m² e espessura de 0,10 m. Sabendo-se que a temperatura da face esquerda não pode ultrapassar 110ºC e a temperatura da face direita não pode cair abaixo de 40°C, determine a condutividade térmica do material a ser utilizado.

R.: A Lei de Fourier se escreve: $q = -KA\frac{dT}{dx}$

Supondo propriedades constantes, área constante e regime permanente, o fluxo de calor será constante. Consequentemente poderemos separar as variáveis de integração e escrever:

$$q = -KA\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x}$$

Na falta de outras informações, vamos supor que este seja o caso. Assim, temos que:

$$k = \frac{q\Delta x}{A[T(x+\Delta x) - T(x)]} = \frac{1840 \cdot 0{,}10}{0{,}08 \cdot [110-40]} = 32{,}8 \cdot [W/mK]$$

FONTE: BRAGA FILHO, Washington. (2004, p.12)

5 Uma tubulação de vapor sem isolamento térmico passa através de uma sala onde o ar e as paredes se encontram a 25°C. O diâmetro externo do tubo é de 70 mm, e a temperatura da superfície e a emissividade são, respectivamente, 200°C e 0,8. Quais são o poder emissivo e a irradiação da superfície? Se o coeficiente associado à transferência de calor por convecção natural da superfície para o ar

é de 15 $W/m^2 \cdot K$, qual a taxa de calor perdida pela superfície do tubo por unidade de comprimento?

R.: <u>Dados:</u> Tubo sem isolamento, com diâmetro, emissividade e temperatura da superfície conhecidas, em uma sala com temperatura da superfície conhecidos, em uma sala com temperaturas fixas do ar das paredes.

Achar:
1- Poder emissivo e irradiação da superfície.

2- Perda de calor do tubo por unidade de comprimento, q'.

Considerações:
1- Condições de regime estacionário.
2- A troca de radiação entre o tubo e a sala é semelhante àquela que existe entre uma superfície pequena que se encontra no interior de um espaço fechado muito maior.
3- A emissividade e a absortividade da superfície são iguais.

Análise:
1- O poder emissivo da superfície pode ser avaliado através da equação $E = \varepsilon\sigma T_s^4$, enquanto a irradiação corresponde a $G = \sigma T_{viz}^4$. Logo,

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 = 0,8\left(5,67\times10^{-8}\,W/m^2\cdot K^4\right)\left(473K\right)^4 = 2270W/m^2$$

$$G = \sigma T_{viz}^4 = 5,67\times10^{-8}\,W/m^2\cdot K^4\left(298K\right)^4 = 447W/m^2$$

2- A perda de calor da tubulação para o ar da sala se dá por convecção e, para as paredes, por radiação. Logo, sendo $q = q_{conv} + q_{rad}$ e $A = \pi DL$,

$$q = h(\pi DL)(T_s - T_\infty) + \varepsilon(\pi DL)\sigma\left(T_s^4 - T_{viz}^4\right)$$

A perda de calor por unidade de comprimento da tubulação é então;

$$q^{'} - \frac{q}{L} = 15W/m^2 \cdot K\,(\pi \times 0{,}07m)(200-25)°C$$
$$+0{,}8(\pi \times 0{,}07m)5{,}67\times10^{-8}\,W/m^2 \cdot K^4\,(473^4 - 298^4)K^4$$

$$q^{'} = 577W/m + 421W/m = 998W/m$$

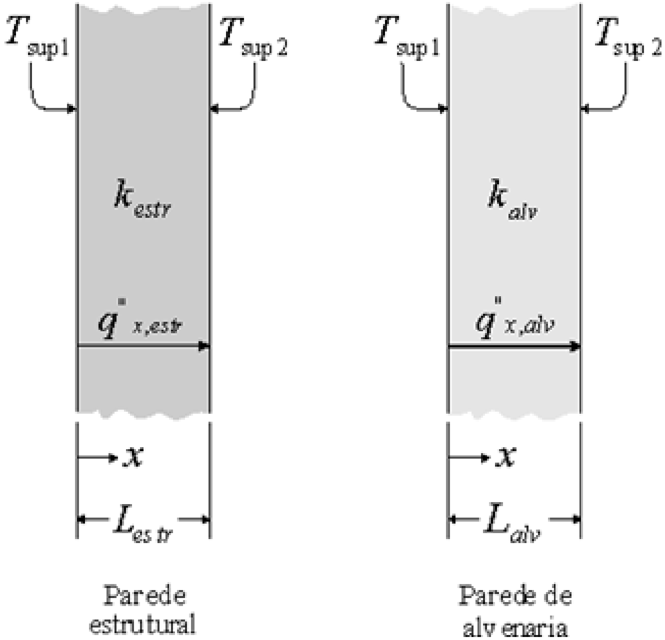
FONTE: INCROPERA (2007 p. 7)

6 Qual a espessura necessária para uma parede de alvenaria com condutividade térmica 0,75 $W/m\cdot K$, se a taxa de calor deve ser 80% da taxa de calor através de uma parede estrutural composta cuja condutividade térmica é 0,25 $W/m\cdot K$ e a espessura é 100 mm? A diferença de temperatura imposta nas duas paredes é a mesma.

R.: **Dados:**
- Parede estrutural com espessura e condutividade térmica conhecidas sujeita a uma diferença de temperatura ΔT.
- Parede de alvenaria com condutividade térmica conhecida sujeita à mesma ΔT.
- A taxa de transferência de calor na parede de alvenaria é 80% da taxa de transferência de calor na parede estrutural, ou seja, $q_{x,alv} = 0{,}8 \cdot q_{x,estr}$.

Achar: A espessura da parede de alvenaria (L_{alv}).
Esquema:

$$T_{sup1} > T_{sup2}$$



Considerações:
1. Condições de regime estacionário.
2. Propriedades constantes.
3. Condução de calor unidimensional na direção *x*.
4. A área para condução de calor na parede estrutural é a mesma que na de alvenaria.

Propriedades: k_{alv} = 0,75 W/m.K

k_{estr} = 0,25 W/m.K

Análise: Segundo o enunciado, $q_{x,alv} = 0,8 q_{x,estr}$

Uma vez que a área para condução de calor na parede estrutural é a mesma que na de alvenaria (consideração 4) então,

$$q''_{x,alv} = 0,8q''_{x,estr}$$

Cálculo de $q''_{x,estr}$

$$q''_{x,estr} = -k_{estr}\frac{dT}{dx}$$

Uma vez que na condução unidimensional, em regime permanente e sem geração de calor a distribuição de temperatura é linear, então:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{L}$$

Assim,

$$q''_{x,estr} = -k_{estr}\frac{\Delta T}{L_{estr}}$$

Cálculo da espessura da parede de alvenaria (L_{alv})

$$q''_{x,alv} = 0,8q''_{x,estr} = -0,8 \cdot k_{estr}\frac{\Delta T}{L_{estr}}$$

mas, $q''_{x,alv} = -k_{estr}\frac{\Delta T}{L_{estr}}$

Igualando (1) com (2) tem-se:

$$-k_{alv} \cdot \frac{\Delta T}{L_{alv}} = -0,8 \cdot k_{estr} \cdot \frac{\Delta T}{L_{estr}}$$

$$L_{alv} = \frac{L_{estr}}{0,8} \cdot \frac{k_{alv}}{k_{estr}} = \frac{0,1}{0,8} \cdot \frac{0,75}{0,25}$$

Portanto: $L_{alv} = 0,375 \ m$

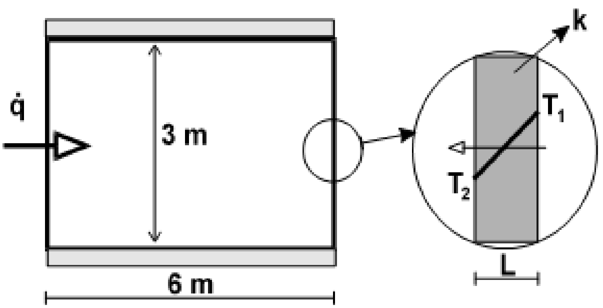
Comentário: É interessante observar que L_{alv} independe de ΔT.

FONTE: <http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/lab/transcal/exercicio_1.6.html>.

TÓPICO 2

1 Um equipamento condicionador de ar deve manter uma sala, de 15 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de altura a 22⁰C. As paredes da sala, de 25 cm de espessura, são feitas de tijolos com condutividade térmica de 0,14 Kcal/h.m. ⁰C e a área das janelas podem ser consideradas desprezíveis. A face externa das paredes pode estar até a 40 ⁰C em um dia de verão. Desprezando a troca de calor pelo piso e pelo teto, que estão bem isolados, pede-se o calor a ser extraído da sala pelo condicionador (em HP).
Dado: 1 HP = 641,2 Kcal/h

R.: Esquema



$T_1 = 40°C$
$T_2 = 22°C$
$k = 0,14\,Kcal/h \cdot m \cdot °C$
$L = 25cm = 0,25m$
$sala: 6 \times 15 \times 3m$

Para o cálculo da área de transferência de calor desprezamos as áreas do teto e piso, onde a transferência de calor é desprezível. Desconsiderando a influência das janelas, a área das paredes da sala é:

$$A = 2 \times (6 \times 3) + 2 \times (15 \times 3) = 126m^2$$

Considerando que a área das quinas das paredes, onde deve ser levada em conta a transferência de calor bidimensional, é pequena em relação ao resto, podemos utilizar a equação (8) do livro texto:

$$\dot{q} = \frac{kA}{L}\Delta T = \frac{0{,}14\left(Kcal/h\cdot m\cdot{}^{\circ}C\right)\times 126m^2}{0{,}25m}\times\left(40-22\right){}^{\circ}C = 1270\ Kcal/h$$

$$q'' = 1270\frac{Kcal}{h}\times\frac{1}{642{,}2}\frac{HP}{Kcal} = 1{,}979HP$$

Portanto a potência requerida para o condicionador de ar manter a sala refrigerada é:

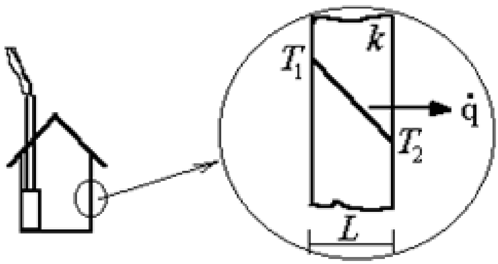
$$q'' \cong 2HP$$

FONTE: <http://www.perdiamateria.eng.br/Transcalb/000.htm>.

2 As superfícies internas de um grande edifício são mantidas a 20 °C, enquanto que a temperatura na superfície externa é -20 °C. As paredes medem 25 cm de espessura, e foram construídas com tijolos de condutividade térmica de 0,6 kcal/h.m.°C.

a) Calcular a perda de calor para cada metro quadrado de superfície por hora.
b) Sabendo-se que a área total do edifício é 1000 m^2 e que o poder calorífico do carvão é de 5500 kcal/kg, determinar a quantidade de carvão a ser utilizada em um sistema de aquecimento durante um período de 10 h. Supor o rendimento do sistema de aquecimento igual a 50%.

R.: Esquema



DADOS:

$T_1 = 20^0 C$

$T_2 = -20^0 C$

$k = 0{,}6Kcal/h\cdot m\cdot{}^0 C$

$L = 25cm = 0{,}25m$

a) Desprezando o efeito do canto das paredes e a condutividade térmica da argamassa entre os tijolos, aplica-se a equação de Fourier para paredes planas.

$$q'' = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_1 - T_2)$$

para $A = 1m^2$,

temos; $q'' = \dfrac{0,6\left(Kcal/h \cdot m \cdot {}^{0}C\right) \times 1m^2}{0,25m} \times \left[20 - (-20)\right] {}^{\circ}C$

Portanto, o fluxo de calor transferido por cada metro quadrado de parede é:

$q'' = 96\ Kcal/h \quad \Rightarrow$ (para m^2 de área)

b) Esta perda de calor deve ser reposta pelo sistema de aquecimento, de modo a manter o interior a 20^{0}C. A perda pela área total do edifício é:

$$A = 1000m^2$$

então; $q''_t = 96 \times 1000 = 96000\ Kcal/h$

O tempo de utilização do sistema de aquecimento é 10 horas. Neste período a energia perdida para o exterior é:

$$q'' = \frac{Q}{t} \quad \Rightarrow Q = q'' \cdot t = 96000 \frac{Kcal}{h} \times 10h = 960.000 Kcal$$

Como rendimento do sistema é 50% a quantidade de calor a ser fornecida pelo carvão é:

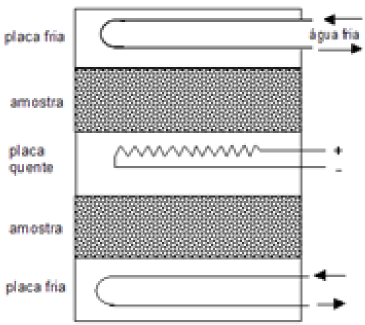
$$Q_f = \frac{Q}{\eta} = \frac{960000}{0,5} = 1920000 Kcal$$

Cada quilo de carvão pode fornecer 5500 Kcal, então a quantidade de carvão é:

$$QT_{carvão} = \frac{1920000 Kcal}{5500 \dfrac{Kcal}{Kg}} = 349 Kg$$

3 O equipamento chamado “placa quente protegida” é utilizado para medir a condutividade térmica de materiais isolantes, baseado na Lei de Fourier. Neste equipamento são medidas: a espessura (L) da amostra; a área superficial da amostra (A), a diferença de temperatura entre um lado e outro da placa (ΔT); a potência elétrica dissipada pela placa quente (*q* “). Suponha que uma amostra de um material (um determinado tipo de argamassa), de 50 cm por 50 cm e 15 cm de espessura esteja sendo testada e tenha fornecido um ΔT de 45,5 °C para uma potência dissipada de 25 W. Qual a condutividade térmica do material sendo testado?

R.: Esquema



DADOS:

$\Delta T = 45,5^{o}\,C$

$\dot{Q} = 25\ \mathrm{W}$

$\mathrm{L=15cm=0,15}$

$\mathrm{A=0,5\times 0,5=0,25m^{2}}$

$$\dot{Q} = kA\frac{\Delta T}{L} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{\dot{Q}\cdot L}{\Delta T\cdot A} = \frac{25\times 0,15}{45,5\times 0,25} \quad \Rightarrow \quad k = 0,33\,W/m\cdot K$$

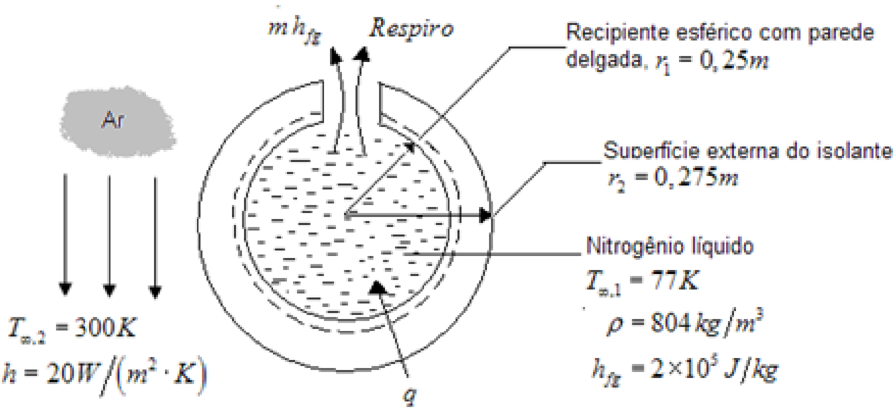
FONTE:<http://www.google.com.br/search?hl=ptBR&lr=lang_es|lang_pt&ei=4NctSuHAE5OktwfyqrGJDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=TRANSFER%C3%8ANCIA+DE+CALOR+(TCL).+Volume+I.+Prof.+Carlos+Boabaid+Neto&spell=1>.

4 Um tambor metálico esférico de parede delgada é utilizado para armazenar nitrogênio líquido a 77 K. O tambor tem um diâmetro de 0,5 m e é coberto com um isolamento reflectivo composto de pó de sílica (com vácuo). A espessura do isolamento é 25 mm, e a sua superfície externa encontra-se exposta ao ar ambiente a 300 K. O coeficiente de convecção é dado por 20 $W/m^{2}\cdot K$. O calor latente de vaporização

e a massa específica do nitrogênio líquido são $2\times10^{5}\ J/kg$ **e 804** kg/m^{3} **, respectivamente.**

a) Qual a taxa de transferência de calor para o nitrogênio líquido?
b) Qual a taxa de evaporação do líquido?

R.: Esquema:



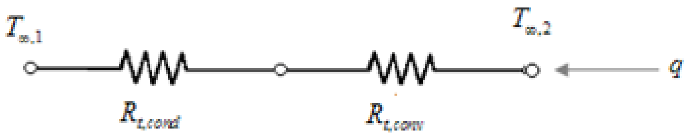
Considerações:
1. Condições em regime estacionário.
2. Transferência de calor unidimensional na direção radial.
3. Resistências à transferência de calor na parede do recipiente e do recipiente para o nitrogênio desprezível.
4. Propriedades constantes.
5. Troca térmica por radiação entre a superfície externa do isolante e a vizinhança desprezível.

Propriedades: Pó de sílica com vácuo nos interstícios (300 K):

$$k = 0,0017\,W/(m\cdot K).$$

Análise:

1. O circuito térmico é composto por uma resistência condutiva e uma convectiva em série e tem forma;



Pelas equações temos:

$$R_{t,cond} = \frac{1}{4\pi k}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h 4\pi r_2^2}$$

A taxa de transferência de calor para o nitrogênio líquido é então;

$$q = \frac{T_{\infty,2} - T_{\infty,1}}{\left(\frac{1}{4\pi k}\right)\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right)\right] + \left(\frac{1}{h 4\pi r_2^2}\right)}$$

$$q = \frac{\left[(300-77)K\right]}{\left[\frac{1}{4\pi\left(0{,}0017\,W/(m\cdot K)\right)}\left(\frac{1}{0{,}25m} - \frac{1}{0{,}275m}\right) + \frac{1}{\left(20W/\left(m^2\cdot K\right)\right)4\pi\left(0{,}275m\right)^2}\right]}$$

$$q = \frac{223}{17{,}02 + 0{,}05} W$$

$$q = 13{,}06 W$$

2. Fazendo um balanço de energia em uma superfície de controle ao redor do nitrogênio;

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0$$

onde $\dot{E}_{ent} = q$ e $\dot{E}_{sai} = \dot{m} h_{fg}$

que está associada à perda de energia latente devido à ebulição.
Assim,

$$q - \dot{m}\, h_{fg} = 0$$

E a taxa de perda por evaporação $\dot{m}$ é

$$\dot{m} = \frac{q}{h_{fg}}$$

$$\dot{m} = \frac{13,06\, J/s}{2 \times 10^{5}\, J/kg} = 6,53 \times 10^{-5}\, kg/s$$

A perda diária é;

$$\dot{m} = 6,53 \times 10^{-5}\, kg/s \times 3600\, s/h \times 24\, h/dia$$

$$\dot{m} = 5,64\, kg/dia$$

FONTE: INCROPERA (2007)

TÓPICO 3

1 Um determinado fluido escoa através de um tubo de 20 cm de diâmetro interno. O fluido se encontra a uma temperatura de 50°. A temperatura da superfície interna do tubo pode ser determinada, e é de 25ºC. Considerando um coeficiente de transferência de calor por convecção de 2000 W/m². K, calcule a taxa de transferência de calor por metro de comprimento linear de tubo.

R.: $T_p = 25°C$

$T_\infty\, 50°C$

$h = 2000\, W/m^2K$

$L = 1m$

$D = 20cm = 0,2m$

A área de troca de calor, por metro de comprimento linear de tubo, pode ser calculada por;

$$A = (perímetro) \times (comprimento) = (\pi \cdot D) \cdot (L) = \pi \times 0,2 \times 1,0 = 0,6283 m^2$$

Assim,

$$\dot{Q} = h \cdot A(T_p - T_\infty) = 2000 \times 0,6283 \times (25 - 50) = -31415 W$$

ou seja, $31,415 kW$ estarão sendo transferidos do fluido para a superfície. Lembrando que o sinal de menos é necessário porque o calor é sempre transferido no sentido da diminuição das temperaturas.

FONTE: Disponível em: <http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&lr=lang_es|lang_pt&ei=4NctSuHAE5OktwfyqrGJDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=TRANSFER%C3%8ANCIA+DE+CALOR+(TCL).+Volume+I.+Prof.+Carlos+Boabaid+Neto&spell=1>.

2 Um prédio metálico recebe, no verão, uma brisa leve. Um fluxo de energia solar total de $450 W/m^2$ incide sobre a parede externa. Destes, $100 W/m^2$ são absorvidos pela parede, sendo o restante dissipado para o ambiente por convecção. O ar ambiente a, $T_\infty = 27°C$, escoa pela parede a uma velocidade tal que o coeficiente de transferência de calor é estimado em $50 W/m^2 \cdot K$. Estime a temperatura da parede.

R.:

Dados: $T_\infty = 27°C$ e $h = 50 W/m^2 \cdot K$

O fluxo de calor líquido de convecção é dado pela diferença entre a radiação incidente e a radiação absorvida pela parede:

$$q'' = 450 - 100 = 350 W/m^2$$

Solução: Utiliza-se a equação: $q'' = h(T_p - T_\infty)$

$$(T_p - T_\infty) = \frac{q''}{h} \quad \Rightarrow \quad T_p = T_\infty + \left(\frac{q''}{h}\right)$$

$$T_p = 27 + \left(\frac{350}{50}\right) = 27 + 7 = 34°C$$

A temperatura da parede é de $34°C$.

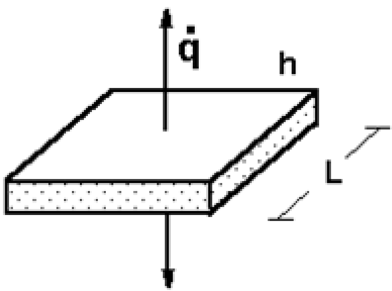
FONTE: Disponível em: <http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&lr=lang_es|lang_pt&ei=4NctSuHAE5OktwfyqrGJDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=TRANSFER%C3%8ANCIA+DE+CALOR+(TCL).+Volume+I.+Prof.+Carlos+Boabaid+Neto&spell=1>.

3 Em uma placa plana de $150 \times 100mm$, eletricamente aquecida, a máxima temperatura permissível no centro da placa é $135°C$. Para este caso específico o número de Grashof é $2,2 \times 10^7$ e o número de Prandt é $0,7$. Sabendo que a equação empírica, obtida com o auxílio da análise dimensional, que descreve a convecção natural (regime laminar) em uma placa plana é dada pela equação.

$Nu = 0,555 \times Gr^{1/4} \times \mathrm{Pr}^{1/4}$ Onde, $Nu = \frac{h \cdot L}{k}$

Calcular o fluxo de calor transferido por convecção, por ambos lados da placa, para o ar atmosférico a $25°C$ ($k_{ar} = 0,026 Kcal / h \cdot m \cdot °C$).

R.:



A dimensão característica (L) é o comprimento da placa : $L = 0,15m$
O coeficiente de transferência de calor do ar em volta da placa é calculado a partir da equação;

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k_{ar}} = 0,555 \times Gr^{1/4} \times \mathrm{Pr}^{1/4}$$

$$\frac{h \times 0{,}15}{0{,}026} = 0{,}555 \times \left(2{,}2 \times 10^{7}\right)^{1/4} \times \left(0{,}7\right)^{1/4}$$

$$h = 6{,}03\, Kcal/h \cdot m^2 \cdot °C$$

O fluxo de calor por convecção é dado pela equação de Newton;

$$q'' = h.A.\Delta T$$

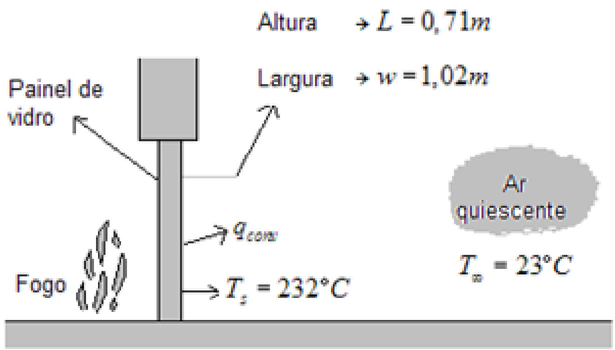
$$q'' = 6{,}03 \times \left[2 \times \left(0{,}10 \times 0{,}15\right)\right] \times \left(135 - 25\right)$$

$$q'' = 19{,}86\, Kcal/h$$

FONTE: <http://www.perdiamateria.eng.br/Transcalb/000.htm>.

4 Um anteparo de vidro, usado em frente a uma lareira para reduzir o arraste do ar ambiente através da chaminé, possui uma altura de $0,71m$ e uma largura de $1,02m$, e atinge uma temperatura de $232°C$. Se a temperatura da sala é de $23°C$, estime a taxa de transferência de calor por convecção da lareira para o ambiente.

R.: Esquema:



Considerações:

1. Tela a uma temperatura uniforme T_s
2. Ar na sala quiescente

Pela tabela das propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica temos para o ar a

$$T_f = 400K: \quad k = 33,8 \times 10^{-3} \, W/(m \cdot K), \quad \nu = 26,4 \times 10^{-6} \, m^2/s,$$

$$\alpha = 38,3 \times 10^{-6} \, m^2/s, \quad \Pr = 0,690, \quad \beta = (1/T_f) = 0,0025K^{-1}.$$

Analise: A taxa de transferência de calor por convecção natural do anteparo para a sala é dada pela lei do resfriamento de Newton.

$$q = hA_s(T_s - T_\infty)$$

onde h pode ser obtido com o conhecimento do número de Rayleigh. Usando a equação,

$$Ra_L = \frac{\delta\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu}$$

$$Ra_L = \frac{9,8m/s^2 \times 1/400K(232-23)°C \times (0,71m)^3}{38,3 \times 10^{-6} \, m^2/s \times 26,4 \times 10^{-6} \, m^2/s}$$

$$Ra_L = 1,813 \times 10^9$$

temos que há transição para o regime turbulento sobre o anteparo.

A correlação apropriada é, então, dada pela equação;

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_L = \left\{0,825 + \frac{0,387\left(1,813\times10^9\right)^{1/6}}{\left[1+\left(\frac{0,492}{0,690}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2$$

onde,

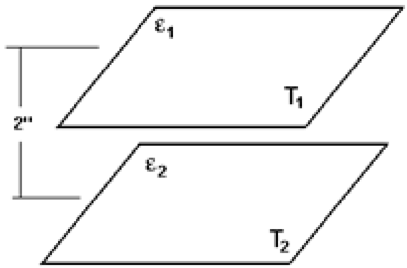
$$h = \frac{Nu_L \cdot k}{L} = \frac{147\times33,8\times10^{-3}\,W/(m\cdot K)}{0,71m} = 7,0W/\left(m^2\cdot K\right)$$

FONTE: INCROPERA (2007, p. 362)

TÓPICO 4

1 Duas placas grandes de metal, distante $2"$ uma da outra, são aquecidas a $300°C$ e $100°C$, respectivamente. As emissividades são 0,95 e 0,3 respectivamente. Calcular as taxas de transferência de calor por radiação através do par de placas.

R.:



Distancias entre as placas = 2”

$$T_1 = 300°C = 573K$$
$$T_2 = 100°C = 373K$$
$$\varepsilon_1 = 0,95$$
$$\varepsilon_2 = 0,3$$

Para o cálculo do fator forma utilizaremos a equação;

$\Rightarrow$ Superfícies cinzentas grandes e paralelas, $F_{12} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}$

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,3}} - 1 = 0,3$$

Como T_1 é maior que T_2, existe um fluxo de calor líquido de (1) para (2). Para uma área unitária, temos;

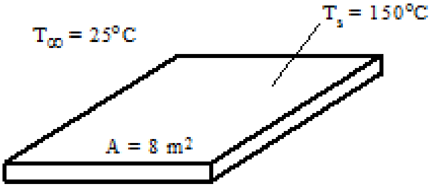
$$q" = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12}\left[T_1^4 - T_2^4\right] = 4,88 \times 10^{-8} \times 1 \times 0,3 \times \left[(573)^4 - (373)^4\right]$$

$$q" = 1295\,Kcal/h \qquad (p/m^2)$$

FONTE: <http://www.perdiamateria.eng.br/Transcalb/000.htm>.

2 A superfície de uma placa de aço polido, de $8m^2$ de superfície, é mantida a uma temperatura de $150°C$. O ar, bem como o ambiente que a cerca, se encontra a uma temperatura de $25°C$. Calcular a taxa de transferência de calor trocado por radiação, entre a placa e o ar.

R.:



Dados:

$$T_s = 150°C = 423K$$

$$T_\infty = 25°C = 298K$$

$$A = 8m^2$$

Para o aço polido temos; $\varepsilon = 0,07$

Solução: Aplicando-se a equação da transferência de calor por radiação temos:

$$q''_{rad} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot \left(T_s^4 - T_\infty^4\right)$$

$$q''_{rad} = 0,07 \times 8 \times 5,669 \times 10^{-8} \times \left(423^4 - 298^4\right)$$

$$q''_{rad} = 3,175 \times 10^{-8} \times \left(3,2 \times 10^{10} - 7,886 \times 10^9\right)$$

$$q''_{rad} = 3,175 \times 10^{-8} \times 2,4114 \times 10^{10}$$

$$q''_{rad} = 766,02W$$

Ou seja, $766,02W$ estarão sendo transferidos da placa para o meio que a cerca.

FONTE: <http://www.perdiamateria.eng.br/Transcalb/000.htm>.

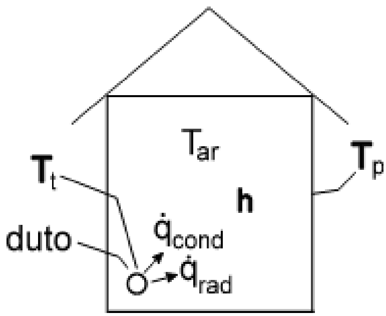
3 Um duto de ar quente, com diâmetro externo de $22cm$ e temperatura superficial de $21°C$, está localizado num grande compartimento cujas paredes estão a $21°C$. O ar no compartimento está a $27°C$ e o

coeficiente de película é $5\,kcal/h\cdot m^2\cdot °C$ **. Determinar a quantidade de calor transferida por unidade de tempo, por metro de tubo, se:**

a) o duto é de estanho ($\varepsilon = 0,1$)

b) o duto é pintado com laca branca ($\varepsilon = 0,9$)

R.:



$T_t = 93\ °C = 366\ K$

$T_{ar} = 27\ °C$

$T_p = 21\ °C = 294\ K$

$h = 5\ Kcal/h.m^2.°C$

$\varnothing = 22\ cm = 0,22\ m \Rightarrow r = 0,11\ m$

a) Para um comprimento unitário do duto de estanho (sem pintura), temos:

$L = 1m$ $\qquad \varepsilon = 0,1$

Como o tubo atravessa um grande compartimento, ou seja, a superfície do tubo é muito menor que a superfície do compartimento, o fator forma é;

$F_{12} = \varepsilon = 0,1 \quad (\text{superf. } 1 \lll \text{ superf. } 2)$

O fluxo de calor é composto de duas parcelas:

$$q'' = q''_{rad} + q''_{cond}$$

$$\boxed{q''_{cond} = h\cdot A\cdot(T_t - T_{ar})}$$

$$q''_{cond} = h\times(2\times\pi\times r\times L)\times(T_t - T_{ar})$$

$$q''_{cond} = 5\times(2\times\pi\times 0,11\times 1)\times(93-27)$$

$$q''_{cond} = 228{,}1\,Kcal/h \quad (p/m)$$

$$\boxed{q''_{rad} = \sigma \cdot A \cdot F_{12}\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right)}$$

$$q''_{rad} = \sigma \times (2 \times \pi \times r \times L) \times \varepsilon \times \left(T_t^4 - T_{ar}^4\right)$$

$$q''_{rad} = 4{,}88 \times 10^{-8} \times 0{,}1 \times (2 \times \pi \times 0{,}11 \times 1) \times \left[(366)^4 - (294)^4\right]$$

$$q''_{rad} = 35\,Kcal/h \quad (p/m)$$

$$\boxed{q'' = 228{,}1 + 35 = 263{,}1\,Kcal/h \quad (p/m)}$$

b) Quando o tubo é pintado com laca branca ($\varepsilon = 0{,}9$) apenas a transferência de calor por radiação é afetada:

$$F_{12} = \varepsilon = 0{,}9 \quad (\text{superf. } 1 \lll \text{ superf. } 2)$$

$$q'' = q''_{rad} + q''_{cond}$$

$$\boxed{q''_{rad} = \sigma \cdot A \cdot F_{12}\left(T_t^4 - T_{ar}^4\right)}$$

$$q''_{rad} = \sigma \times (2 \times \pi \times r \times L) \times \varepsilon \times \left(T_t^4 - T_{ar}^4\right)$$

$$q''_{rad} = 4{,}88 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times (2 \times \pi \times 0{,}11 \times 1) \times \left[(366)^4 - (294)^4\right]$$

$$q''_{rad} = 315\,Kcal/h \quad (p/m)$$

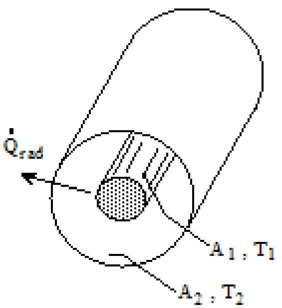
$$\boxed{q'' = 228{,}1 + 315 = 543{,}1\,Kcal/h \quad (p/m)}$$

FONTE: <http://www.perdiamateria.eng.br/Transcalb/000.htm>.

4 Em uma central nuclear, a água de refrigeração passa por uma tubulação que contém, no seu interior, o tubo onde se encontra o combustível nuclear. Se a parede do cilindro interno, que tem uma emissividade de $0{,}19$, se encontra a uma temperatura de $500K$, e a parede interna do cilindro externo, que tem uma emissividade de $0{,}24$, se encontra a uma temperatura de $350K$, qual a transferência de calor por radiação, por metro de comprimento de tubo? O tubo interno tem um diâmetro de $7cm$, e o externo, $12cm$. Desconsidere a presença da água passando entre os tubos.

R.: Dados:

$$T_1 = 500K$$
$$T_2 = 350K$$
$$\varepsilon_1 = 0{,}19$$
$$\varepsilon_2 = 0{,}24$$
$$L = 1m$$
$$D_1 = 7cm = 0{,}07m$$
$$D_2 = 12cm = 0{,}12m$$



Solução: A área de troca é calculada por:

$$A = (perimetro) \times (comp.) = (\pi \cdot D) \cdot (L)$$

$$A_1 = (\pi \times 0,07) \times (1) = 0,22 m^2 \quad \text{e} \quad A_2 = (\pi \times 0,12) \times (1) = 0,377 m^2$$

Aplicando-se a equação;

$$q''_{rad} = \frac{\sigma A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

$$q''_{rad} = \frac{5,669 \times 10^{-8} \times 0,22 \times (500^4 - 350^4)}{\frac{1}{0,19} + \frac{0,22}{0,377} \times \left(\frac{1}{0,24} - 1\right)}$$

$$q''_{rad} = \frac{1,247 \times 10^{-8} \times (6,25 \times 10^{10} - 1,5 \times 10^{10})}{5,263 + 0,583 \times (4,17 - 1)} = \frac{592,25}{7,111} = 83,3W$$

Então, 83,3 W estarão sendo transferidos, por metro de comprimento, do tubo interior para o tubo exterior, por radiação.

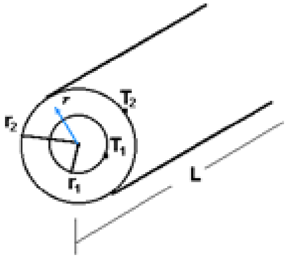
FONTE: Disponível em: <http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&lr=lang_es|lang_pt&ei=4NctSuHAE5OktwfyqrGJDA&sa=X&oi=spell&resnum=0&ct=result&cd=1&q=TRANSFER%C3%8ANCIA+DE+CALOR+(TCL).+Volume+I.+Prof.+Carlos+Boabaid+Neto&spell=1>.

5 Uma tubulação atravessa uma grande sala conduzindo água à $95°C$, com coeficiente de película $20 kcal/h \cdot m^2 \cdot °C$. O tubo, de diâmetro externo $4"$ e resistência térmica desprezível, está isolado com lã de rocha ($k = 0,035 kcal/h \cdot m \cdot °C$) de $2"$ de espessura. Sabendo-se que a temperatura da face externa do isolamento do tubo é $22°C$, determinar:

a) o fluxo de calor transferido através da tubulação.
b) a emissividade da superfície do isolamento, sabendo-se que a metade do

fluxo de calor transferido da tubulação para o ambiente se dá por radiação e que a temperatura da face interna das paredes da sala é 5ºC.

R.:



$$r_1 = 2" = 0{,}0508m$$
$$r_2 = 2"+2" = 4" = 0{,}1016m$$
$$L = 1m$$
$$T_i = 95°C \quad , \quad T_e = 22°C \quad , \quad T_p = 5°C$$
$$h_i = 20kcal / h \cdot m \cdot °C$$
$$k_{iso} = 0{,}035kcal / h \cdot m^2 \cdot °C$$

a) $$q" = \frac{T_i - T_e}{R_i + R_{iso}} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L)} + \frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{k_{iso} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}}$$

$$q" = \frac{95 - 22}{\frac{1}{20 \times (2 \times \pi \times 0{,}0508 \times 1{,}0)} + \frac{\ln\left(0{,}1016/0{,}0508\right)}{0{,}035 \times 2 \times \pi \times 1{,}0}}$$

$$q" = 22{,}06Kcal / h \qquad (p / m)$$

b) $q'' = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)$

como $A_1 <<< A_2 \quad \Rightarrow \quad F_{12} = \varepsilon_1$

$$q'' = \sigma \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

$$22{,}06/2 = 4{,}88\times10^{-8}\times(2\times\pi\times0{,}1016\times1{,}0)\times\varepsilon_1\times\left[(22+273)^4 - (5+273)^4\right]$$

$$\varepsilon_1 = 0{,}22$$

FONTE: Apostila fenômenos dos transportes, Eduardo Emery Cunha Quites <http://comunidade.femc.edu.br/~mauro/Fenomenos%20dos%20Transportes/Apostilas/Apostila%2520de%2520Fen%F4menos.pdf>.

UNIDADE 3

TÓPICO 1

1 Um gás A difunde-se em diversos sistemas: gás B e dois sólidos porosos C (tecido de algodão) e D (tecido sintético de acrílico) e um sistema líquido E. Para cada situação haverá uma difusão mássica associada, como representado abaixo:

Sistema	Sólido poroso C d>λ	Gás B ($M_A \cong M_B$)	Líquido E
Difusão de A	D_{AC}^{eff}	D_{AB}	D_{AE}

Sólido poroso D d≅λ
D_{AD}^{eff}

A variável "d" = diâmetro médio dos poros; λ = caminho livre médio; M_i = peso molecular da espécie "i". Ordene de forma crescente os valores esperados destes coeficientes; justifique o procedimento.

R.: $D_{AD} < D_{AC} < D_{AE} < D_{AB}$
A transferência de massa é influenciada pelo espaçamento molecular, logo, a difusão ocorre mais facilmente: gases > líquidos > sólidos.

2 Determine o valor do coeficiente de autodifusão para o hélio nas condições especiais do exercício resolvido (01). Compare com o valor experimental que é D_{AA}=1,67 cm²/s.

R.: Da definição: $D_{AA} = \frac{1}{3}\lambda\Omega$ Equação (25)

e do exercício resolvido (01) do texto temos: $\Omega = 12,601\times10^{4}\,cm/s$ e $\lambda = 2,659\times10^{-5}\,cm$.

Substituindo esses valores na Equação (25):

$$D_{AA} = \frac{1}{3}\left(2,659\times10^{-5}\right)\left(12,601\times10^{4}\right) = 1,117\,cm^{2}/s$$

Desvio relativo: $\left(\frac{cal-\exp}{\exp}\right)\times100\% = \left(\frac{1,12-1,67}{1,67}\right)\times100\% = -32,9\%$

FONTE: (CREMASCO, 2002).

3 Determine o valor do coeficiente de difusão do H_2 em N_2 a 15°C e 1 atm. Compare o resultado obtido com o valor experimental encontrado na Tabela 1 do texto.

Dados:

Espécies	$d\ (\overset{0}{A})^{*}$	M(g/gmol)
H_2	0,60	2,016
N_2	1,40	28,013

*** Diâmetro atômico**

R.: *Solução*: Aplicação direta de: $D_{AB} = 1,053\times10^{-3}\frac{T^{3/2}}{Pd_{AB}^{2}}\left[\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}\right]^{1/2}$

Na qual: A= H_2; B= N_2; t= 15+273,15= 288,15 K; P= 1 atm.

$$d_{AB}=\frac{1}{2}(d_A+d_B)=\frac{1}{2}(0{,}60+1{,}40)=1{,}0\overset{0}{A}$$

$$D_{AB}=1{,}053\times10^{-3}\frac{(288{,}15)^{3/2}}{(1)(1)^2}\left[\frac{1}{2{,}016}+\frac{1}{28{,}013}\right]^{1/2}=3{,}756\,cm^2/s$$

Desvio relativo: $\left(\dfrac{cal-\exp}{\exp}\right)\times100\%=\left(\dfrac{3{,}76-0{,}743}{0{,}743}\right)\times100\%=405{,}1\%$

Comentário: O que levou a um desvio dessa magnitude? Isso aconteceu, principalmente, em razão da hipótese de serem as moléculas esferas rígidas, com o diâmetro de colisão como sendo o atômico, pressupondo, como decorrência disso, colisões por contato entre elas. Isso serve apenas como aproximação qualitativa, mas não representa a realidade. Devemos lembrar de que as moléculas detêm cargas elétricas, que acarretam forças atrativa e repulsiva entre o par soluto/solvente, governando, sob esse enfoque, o fenômeno das colisões moleculares.

FONTE: (CREMASCO, 2002).

4 Refaça o exercício 3, utilizando a correlação de Fuller, Schetter e Giddings.

R.: *Solução*: Aplicação imediata das correlações:

$$D_{AB}=1{,}0\times10^{-3}\frac{T^{1{,}75}}{Pd_{AB}^2}\left[\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}\right]^{1/2}\quad(1)$$

com; $d_{AB}=\left(\sum v\right)_A^{1/3}+\left(\sum v\right)_B^{1/3}$ (2)

Como se trata de uma molécula simples, temos da Tabela 7 do texto;

$$\left(\sum v\right)_{H_2}=7{,}07 \quad \text{e} \quad \left(\sum v\right)_{N_2}=17{,}9\quad(3)$$

substituindo (3) em (2);

$$d_{H_2,N_2}=\left(\sum v\right)_{H_2}^{1/3}+\left(\sum v\right)_{N_2}^{1/3}=(7{,}07)^{1/3}+(17{,}9)^{1/3}=4{,}535\overset{0}{A}\quad(4)$$

Visto: $M_A = 2,016$; $M_B = 28,013$; T = 15+273,15 = 288,15 K; P = 1 atm (5)

Substituímos (4) e (5) em (1);

$$D_{AB} = 1,0\times10^{-3}\frac{(288,15)^{1,75}}{(1)(4,535)^2}\left[\frac{1}{2,016}+\frac{1}{28,013}\right]^{1/2} = 0,715\ cm^2/s$$

Desvio relativo: $\left(\frac{cal-\exp}{\exp}\right)\times100\% = \left(\frac{0,715-0,743}{0,743}\right)\times100\% = -3,8\%$

O desvio relativo entre o valor experimental apresentado na Tabela 7 e aquele calculado pela correlação Fuller, Schetter e Giddings é de -3,8%.
FONTE: (CREMASCO, 2002).

5 Estime o valor da difusividade do carbono em Fe(ccc) e em Fe(cfc) a 1.000°C. Analise os resultados obtidos.

R.: *Solução*: da Equação (57); $D_{AB} = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$

Da Tabela 10 do texto:

Difundente	Sólido Cristalino	$d_0\left(cm^2/s\right)$	$Q\left(cal/mol\right)$
Carbono $\equiv A$	$Fe_{ccc} \equiv B$	0,0079	18.100
carbono	$Fe_{cfc} \equiv C$	0,21	33.800

Substituindo D_0 e Q presentes nessa tabela na Equação (57), ficamos com:

$$D_{AB} = 0,0079\exp\left(-\frac{18.100}{1,987(1.273,15)}\right) = 6,170\times10^{-6}\ cm^2/s$$

$$D_{AC} = 0,21\exp\left(-\frac{33.800}{1,987(1.273,15)}\right) = 0,331\times10^{-6}\ cm^2/s$$

Como era de se esperar, a mobilidade do soluto é dificultada pelo arranjo atômico. Os átomos face-centrados na configuração cfc, sem duvida, oferecem resistência extra à difusão de átomos de carbono.

FONTE: (CREMASCO, 2002).

6 Utilizando-se os valores dos coeficientes de difusão em diluição infinita presentes no quadro 20 do texto, estime o D_{AB} para o sistema CCl_4/hexano a 25°C, no qual a fração molar do hexano é 0,43. A essa temperatura as viscosidades da solução, do tetracloreto de carbono e do hexano são, respectivamente, 0,515 cp, 0,86 cp e 0,30 cp. O gradiente de atividade para esse sistema, em que A é o hexano e o CCl_4 é a espécie B, é (BIDLACK; ANDERSON, 1964):

$$1+\frac{d\ln\gamma_A}{d\ln x_A}=1-0,354x_Ax_B\,.$$

Compare o resultado obtido com o valor experimental 2,36x10^{-5} cm^2/s e utilize as correlações de Wilke, Equação (64), e de Leffler e Cullinan, Equação (65), para estimar o $\overset{*}{D}_{AB}$.

R.: *Solução*: Podemos escrever o coeficiente de difusão para as duas correlações como:

$$D_{AB}=\alpha\overset{*}{D}_{AB} \qquad (1)$$

em que ; $\alpha=1+\frac{d\ln\gamma_A}{d\ln x_A}=1-0,354x_Ax_B$ (2)

Visto; $x_A=0,43$ e $x_B=1-x_A=0,57$ (3)

Podemos substituir (3) em (2);

$$\alpha=1-0,354(0,43)(1+0,43)=0,9132 \qquad (4)$$

Levando (4) em (1); $D_{AB}=0,9132\overset{*}{D}_{AB}$ (5)

a) *Correlação de Wilke, Equação (64):*

$$\mu_{AB}\overset{\bullet}{D}_{AB} = x_A \mu_A D_{\overset{0}{BA}} + x_B \mu_B D_{\overset{0}{AB}} \qquad (6)$$

Do quadro 20 do texto:

$$D_{\overset{0}{AB}} = 1{,}49\times10^{-5}\, cm^2/s \quad \text{e} \quad D_{\overset{0}{BA}} = 3{,}7\times10^{-5}\, cm^2/s \qquad (7)$$

Do enunciado do problema:

$$\mu_{AB} = 0{,}515cp;\ \ \mu_A = 0{,}30cp;\ \ \mu_B = 0{,}86cp \qquad (8)$$

Substituindo (7) e (8) em (6):

$$\overset{\bullet}{D}_{AB}(0{,}515) = (0{,}30)(0{,}43)(3{,}7\times10^{-5}) + (0{,}86)(0{,}57)(1{,}49\times10^{-5}) =$$

$$= 2{,}345\times10^{-5}\, cm^2/s \qquad (9)$$

Substituindo (9) em (5):

$$D_{AB} = (0{,}9132)(2{,}345\times10^{-5}) = 2{,}14\times10^{-5}\, cm^2/s$$

Desvio relativo: $\left(\dfrac{cal-\exp}{\exp}\right)\times100\% = \left(\dfrac{2{,}14\times10^{-5} - 2{,}36\times10^{-5}}{2{,}36\times10^{-5}}\right)\times100\% =$

$$= -9{,}32\%$$

b) *Correlação de Leffler e Cullinan, Equação (65):*

$$\mu_{AB}\overset{\bullet}{D}_{AB} = \left(x_A \mu_A D_{\overset{0}{BA}}\right)^{x_A}\left(x_B \mu_B D_{\overset{0}{AB}}\right)^{x_B} \qquad (10)$$

Trazendo (7) e (8) em (10):

$$\overset{\bullet}{D}_{AB}(0{,}515) = \left[(0{,}30)(3{,}7\times10^{-5})\right]^{0{,}43} + \left[(0{,}86)(1{,}49\times10^{-5})\right]^{0{,}57} =$$

$$= 2{,}731\times10^{-5}\, cm^2/s$$

(11)

Substituindo (11) em (5):

$$D_{AB} = (0{,}9132)(2{,}731\times10^{-5}) = 2{,}49\times10^{-5}\ cm^2/s$$

Desvio relativo: $\left(\dfrac{cal-\exp}{\exp}\right)\times100\% = \left(\dfrac{2{,}49\times10^{-5}-2{,}36\times10^{-5}}{2{,}36\times10^{-5}}\right)\times100\% =$

$$= 5{,}51\%$$

FONTE: (CREMASCO, 2002).

TÓPICO 2

1 Uma garrafa de 40 cm de altura contém 5 cm de etanol. Calcule o tempo necessário para que o nível do álcool decresça em 0,05 cm, considerando que a garrafa esteja preenchida por ar seco e estagnado a 1 atm e 25°C. Suponha que o valor de etanol é totalmente arrastado no topo da garrafa. Nessas condições, são conhecidos:

$$\rho_{A_L} = 0{,}787\ g/cm^3$$
$$P_A^{vap} = 58{,}62\ mmHg$$
$$M_A = 46{,}069\ g/gmol$$

Onde, A é etanol e B é ar seco.

R.:

Utilizamos a equação: $D_{AB} = \left(\dfrac{\rho_{A_L}}{M_A}\right)\dfrac{y_{B,médio}}{C(y_{A_1}-y_{A_2})t}\left(\dfrac{z_t^2-z_{t0}^2}{2}\right)$

a) Cálculo de $y_{B,médio}$:

$$y_{B,médio} = \frac{(y_{B_2}-y_{B_1})}{\ln(y_{B_2}/y_{B_1})}$$

Considerando 2 a fronteira no topo da garrafa, a concentração de A será nula, pois este soluto é arrastado pela corrente de ar, portanto $y_{A2}=0$, no que resulta:

$$y_{B_2} = 1 - y_{A_2} \rightarrow y_{B_2} = 1$$

Na fronteira 1 está a interface gás-líquido. Neste contorno, a fração molar de A é:

$$y_{A_1} = \frac{P_A^{vap}}{P} = \frac{58{,}62}{760} = 0{,}0771$$

Assim:

$$y_{B_1} = 1 - y_{A_1} = 0{,}9229$$

Assim, podemos determinar $y_{B,médio}$:

$$y_{B,médio} = \frac{1 - 0{,}09229}{\ln(1/0{,}9229)} = 0{,}961$$

a) Cálculo de C, admitindo que a mistura gasosa venha a ser ideal, temos que:

$$C = \frac{P}{RT} = \frac{1}{(82{,}05)(298{,}15)} = 40{,}88X10^{-6}(gmol/cm^3)$$

b) Determinação do D_{AB} (ar/etanol) utilizando o quadro 09:

$$D_{AB} = 0{,}132\,cm^2/s$$

c) Determinação do termo relacionado à variação da fronteira:

$$\left(\frac{z_t^2 - z_{t0}^2}{2}\right) = \frac{(35{,}05)^2 - (35{,}0)^2}{2} = 1{,}75125$$

Sendo a massa molecular do etanol 46,069 g/gmol, aplicamos então na equação:

$$D_{AB} = \left(\frac{\rho_{A_L}}{M_A}\right)\frac{y_{B,médio}}{C(y_{A_1} - y_{A_2})t}\left(\frac{z_t^2 - z_{t0}^2}{2}\right)$$

Que irá resultar em:

$$t = \left(\frac{0{,}787}{46{,}069}\right)\frac{(0{,}961)(1{,}75125)}{(40{,}88X10^{-6})(0{,}0771-0)(0{,}132)} = 69089{,}34s \cong 19h$$

2 Faça uma pesquisa em livros de Fenômenos de Transporte e explique o que é:

a) adsorção;
b) absorção;
c) dessorção.

R.: a) **Adsorção** é a adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o adsorvente); o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área da superfície - os sólidos porosos como o carvão são ótimos adsorventes. As forças que atraem o adsorvato podem ser químicas ou físicas.
b) **Absorção** na química é a fixação de um gás por um sólido ou um líquido, ou a fixação de um líquido por um sólido. A substância absorvida se infiltra na substância que absorve.
c) **Dessorção** é a absorção no sentido contrário. O soluto migra do seio da fase líquida para a gasosa.

TÓPICO 3

1 De que forma o autor (CREMASCO) esclareceu a difusão em regime transiente com resistência externa desprezível?

R.: Considera a secagem de dois tipos de sólidos:

a. sólidos compactos: a umidade se concentra totalmente na superfície do material, dispondo de um tempo relativamente curto para ser removida. Neste caso: $B_M \to 0$;
b. sólidos porosos: além da umidade externa, existe aquela contida no interior do material. No decorrer, denominado de equilíbrio dinâmico. Enquanto isso, devido ao gradiente interno de umidade, a remoção desta é mais lenta, continuando após a concentração do soluto na superfície a atingir o equilíbrio, o qual depende do teor de umidade no seio do gás. Supondo a remoção da umidade interna muito lenta, admite-se desprezível o tempo necessário para atingir a concentração de equilíbrio na superfície do sólido, a ponto de a resistência externa ao transporte ser considerada insignificante quando comparada a interna. Aqui, $B_M \to \infty$.

Percebemos que a resistência interna está associada ao que acontece no interior da matriz, na qual o fenômeno é governado pela difusão do soluto.

2 O que significa o número de Fourier mássico?

R.: O número de Fourier mássico representa um tempo adimensional em função das características do difundente e do meio difusivo e pode ser determinado por:

$$Fo_M = \frac{D_{ef}t}{z_1^2}$$

Sendo o denominador z_1 a distância do início da difusão à superfície da matriz considerada.

3 Um pedaço cilíndrico de madeira foi seco a 135°C através de convecção mássica natural. Após 4 horas, foi observado que a umidade média adimensional atingiu 0,17 em base seca. Calcule o Bi_M, sabendo que

$$D_{ef} = 1{,}78x10^{-4}cm^2/s$$

e admitindo que a madeira possui diâmetro constante de 3,50 cm, enquanto o seu comprimento é doze vezes maior que o diâmetro.

R.:

$$\bar{\theta}(Fo_M) = \bar{\theta} = 4\sum_{n=1}^{\infty}\frac{Bi_M^2}{\gamma_n^2(\gamma_n^2 + Bi_M^2)}e^{-\gamma_n^2 Fo_M}$$

Pelo enunciado, sabemos que $\bar{\theta}(Fo_M) = 0{,}17$,

que sendo substituído na equação acima, fornece:

$$0{,}0425 = \frac{Bi_M^2}{\gamma_1^2 + Bi_M^2)}e^{-\gamma_1^2 Fo_M}$$

Como $Fo_M = \dfrac{D_{ef}t}{s^2}$

E pelo enunciado, s=3,50/2=1,75 cm; t=4h=14.400s e D_{ef}=1,78x10^{-4} cm^2/s

Temos:

$$Fo_M = \frac{(1{,}78x10^{-4})(14400)}{(1{,}75)^2} = 0{,}834$$

Considerando Bi_M = 0,5, do quadro 13, verificamos que $\gamma_1 = 0{,}9408$. Deste modo:

$$\frac{Bi_M^2}{\gamma_1^2(\gamma_1^2 + Bi_M^2)} e^{-0{,}834\gamma_1^2} = \frac{(0{,}25)}{(0{,}8987)(0{,}8987 + 0{,}25)} \exp\left[-(0{,}8987)(0{,}834)\right] =$$

$$= 0{,}1144 > 0{,}0425$$

Considerando Bi_M = 1, do quadro 13, verificamos que $\gamma_1 = 1{,}2558$. Deste modo:

$$\frac{Bi_M^2}{\gamma_1^2(\gamma_1^2 + Bi_M^2)} e^{-0{,}834\gamma_1^2} = \frac{(1)}{(1{,}57703)(1{,}57703 + 1)} \exp\left[-(1{,}57703)(0{,}834)\right] =$$

$$= 0{,}066 > 0{,}0425$$

Considerando Bi_M = 2, do quadro 13, verificamos que $\gamma_1 = 1{,}5994$. Deste modo:

$$\frac{Bi_M^2}{\gamma_1^2(\gamma_1^2 + Bi_M^2)} e^{-0{,}834\gamma_1^2} = \frac{(2)}{(2{,}558)(2{,}558 + 2)} \exp\left[-(2{,}558)(0{,}834)\right] =$$

$$= 0{,}020 < 0{,}0425$$

Ao analisarmos os resultados acima, podemos concluir que o Bi_M será aproximadamente 1,5. Para determinar o valor exato, sugiro que seja feito uma regressão linear entre os pontos 1 e 2 para a determinação correta do Bi_M.