



TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Aula 8

6 Ago 2013

Prof. José Viriato Coelho Vargas

TM035 – Transferência de Calor e Massa II

Tabela 11.2 Difusividades Mássicas em Misturas Binárias a Pressão Atmosférica^a

Mistura Gasosa	D (m ² /s)	T (K)
Ar - acetona	$1,09 \times 10^{-5}$	273
Ar - amônia	$2,80 \times 10^{-5}$	298
Ar - benzeno	$0,77 \times 10^{-5}$	273
Ar - dióxido de carbono	$1,42 \times 10^{-5}$	276
	$1,77 \times 10^{-5}$	317
Ar - etanol	$1,45 \times 10^{-5}$	313
Ar - hélio	$7,65 \times 10^{-5}$	317
Ar - <i>n</i> -hexano	$0,80 \times 10^{-5}$	294
Ar - metanol	$1,32 \times 10^{-5}$	273
Ar - naftaleno	$5,13 \times 10^{-6}$	273
Ar - vapor d'água	$2,60 \times 10^{-5}$	298
	$2,88 \times 10^{-5}$	313
Amônia - hidrogênio	$5,70 \times 10^{-5}$	263
	$1,10 \times 10^{-4}$	358
Argônio - dióxido de carbono	$1,33 \times 10^{-5}$	276
Argônio - hidrogênio	$8,29 \times 10^{-5}$	295
Benzeno - hidrogênio	$4,04 \times 10^{-5}$	311
Benzeno - nitrogênio	$1,02 \times 10^{-5}$	311
Dióxido de carbono - nitrogênio	$1,67 \times 10^{-5}$	298
Dióxido de carbono - oxigênio	$1,53 \times 10^{-5}$	293
Dióxido de carbono - vapor d'água	$1,98 \times 10^{-5}$	307
Ciclohexano - nitrogênio	$0,73 \times 10^{-5}$	288
Hélio - metano	$6,76 \times 10^{-5}$	298
Hidrogênio - nitrogênio	$7,84 \times 10^{-5}$	298
Hidrogênio - vapor d'água	$9,15 \times 10^{-5}$	307
Metano - vapor d'água	$3,56 \times 10^{-5}$	352
Nitrogênio - vapor d'água	$3,59 \times 10^{-5}$	352
Oxigênio - vapor d'água	$3,52 \times 10^{-5}$	352

^a Dados coletados nas Refs. [5 - 7].

Tabela 11.3 Difusividades Mássicas de Gases e Solutos Orgânicos com Baixa Concentração em Água (Soluções Aquosas Dilutas) ^a

Soluto	Solvente	D (m ² /s)	T (K)
Acetona	Água	$1,16 \times 10^{-9}$	293
Ar	Água	$2,5 \times 10^{-9}$	293
Anilina	Água	$0,92 \times 10^{-9}$	293
Benzeno	Água	$1,02 \times 10^{-9}$	293
Dióxido de carbono	Água	$1,92 \times 10^{-9}$	298
Cloro	Água	$1,25 \times 10^{-9}$	298
Etanol	Água	$0,84 \times 10^{-9}$	298
Etileno glicol	Água	$1,04 \times 10^{-9}$	293
Glicerina	Água	$0,72 \times 10^{-9}$	288
Hidrogênio	Água	$4,5 \times 10^{-9}$	298
Nitrogênio	Água	$2,6 \times 10^{-9}$	293
Oxigênio	Água	$2,1 \times 10^{-9}$	298
Propano	Água	$0,97 \times 10^{-9}$	293
Uréia	Água	$1,2 \times 10^{-9}$	293
Cloreto de vinila	Água	$1,34 \times 10^{-9}$	298

^a Dados coletados das Refs. [5 - 6].

Tabela 11.7 Números de Schmidt, Lewis ^a e Coeficientes de Expansão por Variação de Composição. Dados Referentes a Concentrações Baixas, 1 atm e Aproximadamente 25 °C^b

Fluido Principal	Espécie com Concentração Baixa	Sc = ν/D	Le = Sc/Pr	$\rho\beta_c = -(\partial\rho/\partial\rho_i)_{T,P}$
Ar (Pr = 0.7)	Amônia	0,78	1,11	+1,07
	Dióxido de carbono	0,94	1,34	-0,34
	Hidrogênio	0,22	0,314	+13,4
	Oxigênio	0,75	1,07	-0,094
	Vapor d'água	0,60	0,86	+0,61
	Benzeno	1,76	2,51	-0,63
	Éter	1,66	2,37	-0,61
	Metanol	0,97	1,39	-0,095
	Álcool etílico	1,30	1,86	-0,37
	Etilbenzeno	2,01	2,87	-0,73
Água (Pr = 7)	Amônia	445	63,57	-0,5
	Dióxido de carbono	453	64,71	
	Hidrogênio	152	21,71	
	Oxigênio	356	50,86	
	Nitrogênio	468	66,86	
	Cloro	617	88,14	
	Dióxido de enxofre	523	74,71	
	Cloreto de cálcio	750	107,14	+0,8
	Cloreto de sódio	580	82,86	+0,7
	Metanol	556	79,43	-0,17
Sucrose	1.700	242,86		

^a O número de Lewis é a razão entre a difusividade térmica e a difusividade mássica, $Le = \alpha / D = Sc / Pr$. Warren K. Lewis que foi professor de Engenharia Química no Massachusetts Institute of Technology. Atribui-se a Lewis e Sherwood o desenvolvimento do currículo moderno de Engenharia Química.

^b Dados obtidos em Gebhart e Pera [21].

Exemplo 11.3

Camada Limite Laminar - Escoamento de Ar Úmido

A chuva deixou um filme fino de água na superfície das telhas de um telhado (veja a figura). O vento sopra com velocidade de 10 km/h ao longo de uma telha que apresenta comprimento igual a 0,1 m. O ar atmosférico e a superfície da telha apresentam temperaturas iguais a 25 °C e a umidade relativa do ar atmosférico é 40%.

- Calcule o coeficiente médio de transferência de massa na superfície do filme.
- Determine a taxa de transferência de massa na superfície do filme.
- Verifique se a hipótese de superfície impermeável é adequada neste caso.

Solução. (a) As propriedades relevantes do ar seco a 25 °C e pressão atmosférica podem ser encontradas no Apén. D,

$$\rho_a = 1,185 \text{ kg/m}^3 \quad \nu_a = 1,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

e as Tabs. 11.2 e 11.7 fornecem as propriedades do vapor d'água em ar,

$$D = 2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad Sc = 0,6$$

O número de Reynolds baseado no comprimento da telha, $L = 0,1 \text{ m}$, mostra que a camada limite é laminar:

$$Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \equiv \frac{U_\infty L}{\nu_a} = \frac{10000 \times 0,1}{3600 \times 1,55 \times 10^{-5}} = 17921 \quad (\text{laminar})$$

Esta estimativa é baseada na hipótese de que o valor médio de ν para o ar úmido (avaliado entre o valor relativo a superfície molhada e o valor referente ao longe) é aproximadamente igual a viscosidade cinemática do ar seco, ν_a .

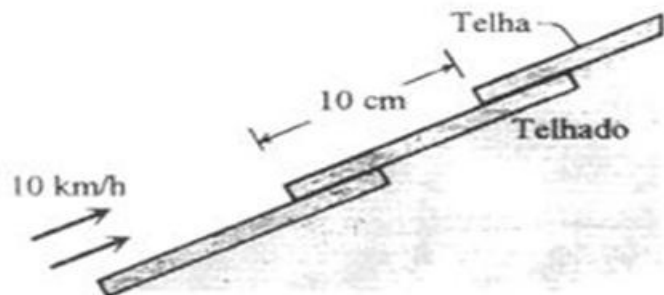


Figura E11.3

O coeficiente de transferência de massa na telha pode ser calculado com a Eq. 11.70 e com a definição do número de Sherwood. Assim,

$$\overline{\text{Sh}}_L = 0,664 \text{ Sc}^{1/3} \text{ Re}_L^{1/2} = 0,664 (0,6)^{1/3} (17921)^{1/2} = 75$$

$$\bar{h}_m = \frac{D}{L} \overline{\text{Sh}}_L = \frac{2,88 \times 10^{-5}}{0,1} 75 = 0,0216 \text{ m/s}$$

(b) A taxa de transferência de massa na superfície do filme, ou seja, a vazão em massa de água que deixa a telha, por unidade de comprimento perpendicular ao plano da figura, é dada por

$$\dot{m}' = \bar{h}_m L (\rho_w - \rho_\infty)$$

É necessário utilizar os conceitos da Termodinâmica das Misturas (especialmente a psicrometria) para que seja possível determinar a concentração de vapor d'água na mistura ar - vapor d'água logo acima da interface. Nos sabemos que a pressão de saturação do vapor d'água a 25°C é

$$p_{\text{sat}}(25^\circ\text{C}) = 3169 \text{ N/m}^2$$

e que a pressão na mistura ar - vapor d'água é 1 atm = 1,0133 × 10⁵ N / m². A fração molar de vapor d'água logo acima da interface é

$$x_w = \frac{p_{\text{sat}}(25^\circ\text{C})}{p} = \frac{3169}{1,0133 \times 10^5} = 0,0313$$

A concentração em massa de vapor d'água que corresponde a esta fração molar pode ser calculada com as Eq. 11.23 e 11.24.

$$\rho_w = M_{\text{H}_2\text{O}} C_w = M_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\rho}{M} x_w \equiv M_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\rho_a}{M_a} x_w = 18,02 \frac{\rho_a}{28,97} 0,0313 = 0,0195 \rho_a \quad (1)$$

Assim, a concentração em massa de vapor d'água saturado é

$$\rho_w = 0,0195 \rho_a = 0,0195 \times 1,185 = 0,0231 \text{ kg/m}^3$$

Um método alternativo para encontrar este valor é utilizando uma tabela de propriedades termodinâmicas para a água. Deste modo, basta procurarmos o valor do volume específico do vapor saturado a 25 °C e invertê-lo:

$$\rho_w = (43,36 \text{ m}^3 / \text{kg})^{-1} = 0,0231 \text{ kg/m}^3$$

Agora nós calcular ρ_∞ . Para isto, lembre que a umidade relativa é definida pela razão (veja, também, o final do Apen. D)

$$\phi = \frac{p_v}{p_{\text{sat}}(T)}$$

No nosso caso, $\phi = 0,4$ e $p_{\text{sat}}(25^\circ\text{C}) = 3169 \text{ N/m}^2$. Assim, a pressão parcial do vapor d'água ao longe (fora da camada limite) é

$$p_{v,\infty} = 0,4 \times 3169 = 1268 \text{ N/m}^2$$

Para calcular ρ_∞ nós usaremos o mesmo procedimento utilizado para determinar ρ_w , ou seja,

$$x_\infty = \frac{1268}{1,0133 \times 10^5} = 0,0125$$

$$\rho_\infty \equiv M_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\rho_a}{M_a} x_\infty = 18,02 \frac{\rho_a}{28,97} 0,0125 = 0,0078 \rho_a \quad (2)$$

Agora nós temos todas as informações necessárias para calcular a taxa de transferência de massa:

$$\dot{m}' = \bar{h}_m L (\rho_w - \rho_\infty)$$

$$= 0,0216 \times 0,1 [(0,0195 - 0,0078) 1,185] = 3 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Note que nós utilizamos a hipótese de que a relação ρ / M da mistura ar vapor d'água é igual a relação ρ_a / M_a nos cálculos de ρ_w e ρ_∞ . Esta aproximação está discutida na formulação da Eq. 11.20.

(c) A validade da hipótese de superfície impermeável é verificada utilizando a Eq. 11.80. Assim,

$$\frac{\rho_w - \rho_\infty}{\rho} < Sc^{1-n}$$

$$\frac{0,0195 \rho_a - 0,0078 \rho_a}{\rho_a} < (0,6)^{1-1/3}$$

$$0,012 < 0,71$$

O critério da Eq. 11.80 está satisfeito e, deste modo, a utilização da aproximação de superfície impermeável é adequada neste caso.

11.4.3 Outras Configurações de Escoamentos Externos Forçados

Nós vimos que as equações para a avaliação da taxa de transferência de massa podem ser deduzidas a partir das equações referentes aos problemas similares de transferência de calor. Por exemplo, no Cap. 5 nós estabelecemos que a equação para o número de Nusselt global adequado para o escoamento numa camada limite turbulenta sobre uma placa plana é

$$\overline{Nu}_L = 0,037 Pr^{1/3} (Re_L^{4/5} - 23550) \quad (Pr \geq 0,5 \text{ e } 5 \times 10^5 < Re_L < 10^8) \quad (5.134)$$

Substituindo \overline{Nu}_L por \overline{Sh}_L e Pr por Sc , nós obtemos a versão desta equação aplicável ao problema análogo de transferência de massa, ou seja, uma equação que fornece o número de Sherwood global (ou o coeficiente médio de transferência de massa, \overline{h}_m)

$$\overline{Sh}_L = \frac{\overline{h}_m L}{D} = 0,037 Sc^{1/3} (Re_L^{4/5} - 23550) \quad (Sc \geq 0,5 \text{ e } 5 \times 10^5 < Re_L < 10^8) \quad (11.81)$$

Nós podemos obter uma expressão alternativa, adequada para a faixa onde Re_L é alto, se utilizarmos a relação de Colburn para o coeficiente local de transferência de calor,

$$St_x = \frac{1}{2} C_{f,x} Pr^{-2/3} \quad (Pr \geq 0,5) \quad (5.131)$$

e a expressão correspondente para o coeficiente local de atrito na parede

$$\frac{1}{2} C_{f,x} = 0,0296 \left(\frac{U_\infty x}{\nu} \right)^{-1/5} \quad (5.121)$$

Assim, combinado as Eqs. 5.121 e 5.131, obtemos

$$St_x = 0,0296 Pr^{-2/3} Re_x^{-1/5} \quad (Pr \geq 0,5) \quad (11.82)$$

O próximo passo consiste em determinar o análogo ao número de Stanton local que aparece no lado esquerdo da Eq. 11.82, ou seja,

$$St_x = \frac{h_x}{\rho c_p U_\infty} = \frac{h_x \alpha}{k U_\infty} = \frac{q_w'' \alpha}{(T_w - T_\infty) k U_\infty} \quad (11.83)$$

A tabela de transformação (veja as Eqs. 11.62 e 11.62') mostra que o análogo do número de St_x pode ser obtido se trocarmos q_w'' por \hat{j}_w , $T_w - T_\infty$ por $C_w - C_\infty$, α por D e k também por D . Procedendo deste modo, obtemos

$$\frac{q_w'' \alpha}{(T_w - T_\infty) k U_\infty} \rightarrow \frac{\hat{j}_w D}{(C_w - C_\infty) D U_\infty} \quad (11.84)$$

O lado direito desta equação é equivalente a h_m / U_∞ e esta quantidade é denominada número de Stanton local para a transferência de massa,

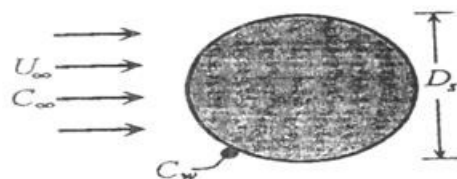


Figura 11.10 Escoamento (uniforme) perpendicular a um cilindro ou sobre uma esfera.

$$St_m = \frac{h_m}{U_\infty} \quad (11.85)$$

Assim, a equação para a taxa local de transferência de massa análoga a Eq. 11.82 é

$$St_m = 0,0296 Sc^{-2/3} Re_x^{-1/5} \quad (Sc \geq 0,5) \quad (11.86)$$

e a equação média para esta taxa local (a média é avaliada no comprimento L da placa)

$$\overline{St}_m = \frac{\overline{h}_m}{U_\infty} = 0,037 Sc^{-2/3} Re_L^{-1/5} \quad (Sc \geq 0,5) \quad (11.87)$$

É fácil verificar que a Eq. 11.81 fornece o mesmo resultado para \overline{h}_m quando Re_L excede 10^7 .

A expressão que fornece o número de Sherwood médio para o escoamento cruzado em torno de um cilindro (avaliado na superfície do cilindro) pode ser obtida a partir da correlação para a transferência de calor, referente ao problema térmico análogo, apresentada no Cap. 5,

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4 / Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (5.135)$$

Do modo usual, nós vamos substituir \overline{Nu}_D por

$$\overline{Sh}_{D_e} = \frac{\overline{h}_m D_e}{D} \quad (11.88)$$

e o número de Prandtl (Pr) pelo número de Schmidt (Sc). O resultado destas substituições é

$$\overline{Sh}_{D_e} = 0,3 + \frac{0,62 Re_{D_e}^{1/2} Sc^{1/3}}{\left[1 + (0,4 / Sc)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{D_e}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (Re_{D_e} Sc > 0,2) \quad (11.89)$$

Note que é importante não confundir o diâmetro do cilindro (D_e , Fig. 11.10) com o coeficiente de difusividade mássica, D .

De modo análogo, o número de Sherwood para a transferência de massa referente ao escoamento uniforme (U_∞ , C_∞ , Fig. 11.10) em torno de uma esfera com diâmetro D_e pode ser obtida a partir da Eq. 5.139. Esta operação consiste em substituir Pr por Sc e \overline{Nu}_L pelo número médio de Sherwood definido na Eq. 11.88:

$$\overline{Sh}_{D_e} = 2 + (0,4 Re_{D_e}^{1/2} + 0,06 Re_{D_e}^{2/3}) Sc^{0,4} \quad (3,5 < Re_{D_e} < 7,6 \times 10^4) \quad (11.90)$$