

COEFICIENTES CONVECTIVOS DE TRANSPORTE DE MASSA

Wilson Miguel Salvagnini
(EPUSP/Instituto Mauá de Engenharia)

INTRODUÇÃO Coeficientes convectivos de transporte de calor em trocadores de calor, não oferecem tanta dificuldade de entendimento quanto os coeficientes convectivos de transporte de massa. A dificuldade vem devido à descontinuidade de concentrações que geralmente ocorre na interface das fases que trocam massa, decorrência natural do equilíbrio de fases que aí é admitido. A situação piora quando os coeficientes convectivos individuais de transporte de massa de cada fase não estão tão obviamente relacionados com o global como acontece no transporte de calor. Assim, um pouco de discussão sobre esse assunto pode ajudar a compreender um pouco mais facilmente como esses atores atuam na trama do transporte de massa entre duas fases distintas.

Equação Fenomenológica do Transporte de Massa.

Aspectos formais da equação

O coeficiente convectivo de transporte de massa é definido pela equação do fluxo de massa que se estabelece quando ocorre uma diferença de concentração entre dois pontos de uma mesma fase:

$$\tilde{N}_A = k_{\tilde{x}_A} (\tilde{x}_{AS} - \tilde{x}_{A0}) \quad (1)$$

\tilde{N}_A é fluxo molar (por exemplo em gmol/h.m^2)

$(\tilde{x}_{AS} - \tilde{x}_{A0})$ é a diferença de concentrações entre dois pontos de uma dada fase em contato com outra com troca de massa entre si. Essa diferença de concentrações também é chamada de força motora.

$k_{\tilde{x}_A}$ é o coeficiente convectivo de transporte de massa. Neste ponto podemos parar um

pouco para observar os diferentes nuances desta equação. Comece observando o fluxo. O fluxo é uma grandeza interessante, trata-se de uma vazão que passa em uma determinada área. O grandeza física fluxo carrega dentro de si mais informações do que a vazão. Pense: a vazão de alguma coisa pode ser grande mas se ela ocorrer numa área imensa, quase que não a percebemos. Já, nesse caso, o fluxo vai ser pequeno (vazão grande por uma área muito maior). Isso está mais de acordo com a nossa percepção, se eu botar o dedo lá não percebo nada. Imagine agora o caso contrário: uma pequena vazão numa área diminuta...

Observe agora a simbologia. A letra N é reservada para representar a grandeza física fluxo. O índice A refere-se à espécie química que está sendo transportada. O til encima do N, embora nem sempre utilizado, é útil para diferenciar o fluxo em mols do fluxo avaliado em massa. No caso, a notação \tilde{N}_A refere-se a um fluxo de mols, ou fluxo molar.

Repare que o coeficiente convectivo k tem um índice, este índice é uma notação muito útil pois nos avisa qual tipo de concentração na qual a força motora será expressa. Como

existem vários modos de exprimir concentrações é óbvio que haverá vários tipos de índices para o símbolo k. A tabela abaixo pode ajudar um pouco

Coeficiente convectivo	Concentração	Força motora	Unidade típica
$k_{\tilde{x}}$	Fração molar	$(\tilde{x}_{As} - \tilde{x}_{A0})$	Gmol/(s.m ²)
k_x	Fração mássica	$(x_{As} - x_{A0})$	G/(s.m ²)
$k_{\tilde{\rho}}$	Concentração em mol/volume	$(\tilde{\rho}_{As} - \tilde{\rho}_{A0})$	m/s
k_{ρ}	Concentração em massa/volume	$(\rho_{As} - \rho_{A0})$	m/s
k_p	Concentrações em pressão parcial	$(P_{As} - P_{A0})$	gmol/(s.m ² .Pa)

Nota. Os livros que tratam do transporte de massa costumam, no caso de frações molares, fazer uma distinção na simbologia quando tratam de uma fase líquida ou gasosa. Eles reservam o símbolo x para a fração (de massa ou molar) para a fase líquida e y para a fase gasosa, assim:

$$\tilde{N}_A = k_{\tilde{y}_A} (\tilde{y}_{As} - \tilde{y}_{A0}) \quad (2)$$

Com esta notação sabemos prontamente que se trata de um fluxo molar numa fase gás.

Aspectos Conceituais

Repare como a expressão (1) é interessante. Ela nos diz que o fluxo de massa é governado por duas grandezas distintas: $k_{\tilde{x}_A}$, o coeficiente convectivo de transporte de massa e $(\tilde{x}_{As} - \tilde{x}_{A0})$ a força motora.

O coeficiente convectivo trás dentro de si as influências devido ao mecanismo que determina a velocidade com que a massa é transportada, já a força motora é a mola propulsora que faz a massa ser transportada. Atrás da idéia de que a diferença de concentração é a mola propulsora está escondido um conceito mais complicado, que geralmente, em problemas de transporte de massa, não é abordado. Na verdade a mola propulsora é o **potencial químico** do componente A na solução. Um conceito encrencado da termodinâmica. É o potencial químico de uma espécie dentro da solução responsável pelo transporte de massa por difusão. Como o potencial químico é função da concentração então, considera-se a diferença de concentração como a força motora o que simplifica o tratamento dos problemas de transporte de massa. Veja na figura 2 o perfil de concentrações e do potencial químico quando duas fases distintas estão trocando massa.

Para entendermos melhor esses aspectos pense na seguinte analogia: Alguém pode pular do 5º andar de um prédio. No espaço entre o 5º andar e o chão pode não existir nenhum obstáculo à queda, a não ser o ar que exerce um pequeno atrito, entretanto, pode ser que

nesse espaço existam galhos de árvores, fios da rede elétrica e lá, perto do chão, pode haver um toldo. A força motora é a mesma nos dois casos, a diferença de potencial no campo gravitacional devido à diferença de altura, Δh . A velocidade com que o sujeito cai vai depender do mecanismo: no primeiro caso é direto, nada atrapalha a queda por isso é rápida. Já no segundo caso o coitado bate nos galhos, se enrosca nos fios é aparado pelo toldo, cai bem mais devagar, pode até não morrer!

Para o transporte de massa convectivo a analogia é bastante boa, o fluxo de massa pode ser influenciado por elementos tais como: regimes de escoamento lentos ou agitações brandas que não favorecem uma homogeneização da fase onde ocorre o transporte de massa; viscosidades altas diminuindo a mobilidade da molécula, diferentes geometrias, se é uma esfera, um plano ou outra configuração qualquer a superfície de contato entre as que trocam massa. Tudo isso influi no mecanismo.

Para você sentir as influências de cada um dos fatores mencionados acima, procure lembrar: turbulência; como você homogeneiza rapidamente em açúcar um cafezinho agitando o com uma colher. Como é difícil misturar e homogeneizar fluidos viscosos é o caso que acontece quando você prepara um bolo, para se homogeneizar toda aquela massa a batedeira tem que fazer um bocado de esforço por um bom tempo porque os componentes não se transportam facilmente. Você, certamente, já viu como se calcula o coeficiente convectivo de transporte de massa para de uma esfera e para uma placa plana, veja como as fórmulas são diferentes.

Então, esse coeficiente convectivo tem que trazer dentro de si todas essas influências, tarefa não muito simples, e é a razão pela qual se tem várias fórmulas, cada uma para um determinado caso.

Pode –se lançar mão de outras analogias que também facilitam a visualização:

Eletricidade

$$I = U/R$$

corrente elétrica I , que é um fluxo de cargas elétricas, é proporcional ao mecanismo ($1/R$) com que as cargas se movimentam num determinado meio, no caso é chamado de condutância, inverso da resistência, quando existe uma força motora U , diferença de potencial elétrico.

Transporte de calor

$$q = h.\Delta T$$

q = fluxo de calor, h coeficiente convectivo de transporte de calor (mecanismo) e a força motora diferença de temperatura, ΔT .

Coefficientes Convectivos Individuais e Globais de Transporte de Massa

Não foi dito, mas normalmente o coeficiente convectivo de transporte de massa da equação (1), quando aplicada a dois pontos distintos dentro de uma única fase, recebe mais um nome: k , coeficiente convectivo individual de transporte de massa. Apareceu o nome individual justamente para dizer que o transporte de massa se dá dentro de uma fase individualmente. Esta designação é muito importante quando se tem duas fases diferentes em contato trocando massa entre si. Para entender um pouco melhor, imagine um sistema

constituído por um tubo, em cuja parede interna escoo um líquido na forma de uma película descendente (por exemplo a água) e por dentro sobe um gás contaminado com um substância qualquer (por exemplo a amônia), solúvel no líquido que desce pela parede, como mostrado no esquema da figura 1.

Observando o esquema da figura 1, duas questões se tornam evidentes: Qual o critério pelo qual se escolheu os pontos indicados para definir a força motora? Porque o fluxo na fase gasosa tem o mesmo símbolo da fase líquida? Seriam iguais? Respondendo uma por vez. Necessariamente os fluxos das duas fases não são iguais. Só serão iguais quando o sistema operar em regime permanente e na ausência de reação química. Se o fluxo do contaminante A que entra no líquido não for igual ao que sai do gás, certamente vai se acumular em algum lugar e, se acumula, o regime não é permanente. Agora, a escolha dos pontos dentro da fase considerada que define a força motora, tem que ser analisada com um pouco de cuidado.

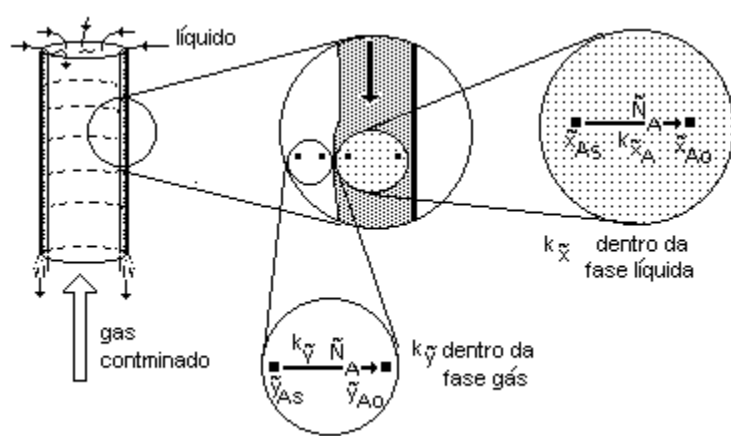


FIG. 1 Localização dos coeficientes convectivos individuais

A escolha dos pontos precisa ser conveniente senão a força motora não tem significado. Imagine que o sistema da figura 1 está operando em regime permanente. O contaminante do gás é transportado desde o meio da fase gasosa até a superfície líquida ai, como ela é solúvel no líquido ela mergulha nessa fase. Uma vez na fase líquida ela se move desde a superfície no lado do líquido para o meio dessa mesma fase. Ora se ela se move é porque existe uma força motora, portanto as concentrações variam desde a superfície até o meio da fase líquida, ou seja há um perfil de concentrações nessa fase, como pode ser observado na figura 2.

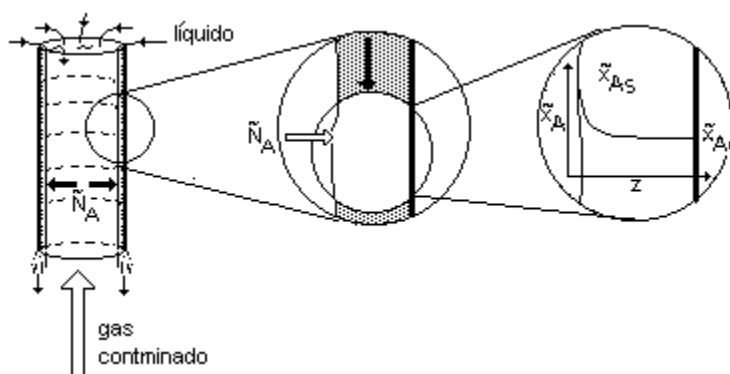
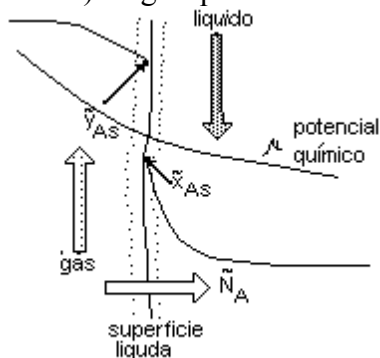


FIG. 2 Perfil de concentrações na fase líquida

O perfil de concentrações na fase líquida expressa como a concentração do contaminante A varia desde a superfície líquida até a parede do duto. Na superfície em contato com o gás a concentração de A é \tilde{x}_{AS} . À medida que se entra na fase líquida a concentração de A diminui até chegar a uma dada distância z da superfície em que ela fica mais ou menos constante e igual a \tilde{x}_{A0} devido à tendência de homogeneização causada pela turbulência do movimento do líquido. Esses são os pontos cujas concentrações são mais características do sistema. Então a força motora será $(\tilde{x}_{AS} - \tilde{x}_{A0})$ isto é, concentração na superfície no lado do líquido menos a concentração em qualquer ponto z suficientemente distante da superfície para que \tilde{x}_{A0} seja constante com z .

Um Pouco sobre \tilde{x}_{AS}

A concentração \tilde{x}_{AS} é a concentração naquela micro região (interface) que forma a superfície líquida e ela está diretamente relacionada com a concentração da micro região (interface) de gás que está encostada ao líquido, veja a figura 3.



Na superfície admite-se que as concentrações das duas fases estejam em equilíbrio. Assim a relação entre \tilde{y}_{AS} e \tilde{x}_{AS} é dada pela constante de equilíbrio:

$$\tilde{y}_{AS} = m \cdot \tilde{x}_{AS} \quad 3$$

onde m é a constante de equilíbrio. Esta hipótese, que funciona na prática, implica que o mecanismo com que o contaminante A saia da fase gasosa e mergulhe na fase li-

FIG. 3 Concentrações na superfície

quida proporcione uma alta velocidade ao transporte de massa ou seja, não ha resistência ao transporte de massa na interface. Uma molécula de A do lado do líquido que sai da

superfície e seja transportada para o meio dessa fase, deixa um lugar que é imediatamente ocupada por outra molécula vinda da fase gasosa.

Esse equilíbrio que é estabelecido nesta região ocasiona a descontinuidade de concentrações entre as duas fases, ocorre um salto de concentrações. Este salto depende da constante de equilíbrio m . Veja as situações abaixo:

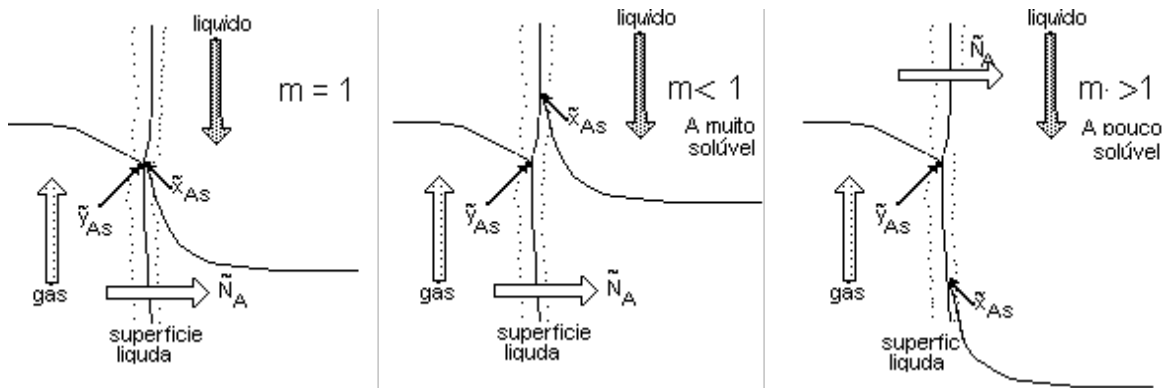


FIG. 4 Tipos de descontinuidades na interface

O grande problema de \tilde{x}_{As}

No sistema de película de líquido descendente, referido anteriormente, pode-se até tirar amostra de líquido do meio da fase líquida e da fase gasosa para análise, obtendo-se \tilde{x}_{A0} e \tilde{y}_{A0} . Mas para se determinar o valor de $k_{\tilde{x}}$ ou $k_{\tilde{y}}$ seriam necessários os valores de \tilde{x}_{As} e \tilde{y}_{As} . Entretanto não é possível se retirar uma amostra de líquido da superfície do líquido ou de gás na camada junto ao líquido. A espessura dessas camadas são microscópicas, não há jeito de tira-las e, portanto, nunca poderemos, de uma maneira direta, saber as concentrações de A nessas camadas. Ai tiramos uma conclusão não muito confortável: Não dá para medir diretamente $k_{\tilde{x}}$ e $k_{\tilde{y}}$. Na prática esses coeficientes podem ser obtidos indiretamente utilizando alguns truques, por exemplo eliminando a resistência da fase líquida colocando se alguma substância que reaja rapidamente com a substância A, o que foge um pouco da discussão atual.

A volta por cima

Se a utilização dos coeficientes $k_{\tilde{x}}$ e $k_{\tilde{y}}$ são pouco práticos, pode-se procurar um caminho mais fácil de abordar o problema. Isso é feito definindo o Coeficiente Convectivo Global de Transporte de Massa $K_{\tilde{x}}$ ou $K_{\tilde{y}}$. A idéia é que se possa exprimir o fluxo de massa \tilde{N}_A através das concentrações \tilde{x}_{A0} e \tilde{y}_{A0} , passíveis de serem medidas, através da expressão:

$$\tilde{N}_A = K_{\tilde{x}A} (\tilde{x}_A^* - \tilde{x}_{A0}) \quad (4)$$

ou

$$\tilde{N}_A = K_{\tilde{y}_A} (\tilde{y}_{A0} - \tilde{y}_A^*) \quad (5)$$

Observe bem a força motora aqui utilizada. \tilde{y}_A^* é a concentração de A na fase gasosa que estaria em equilíbrio com o meio da fase líquida \tilde{x}_{A0} . Essa força motora é passível de ser medida pois \tilde{x}_{A0} e \tilde{y}_{A0} podem ser medidos e \tilde{y}_A^* pode ser determinado por $\tilde{y}_A^* = m \cdot \tilde{x}_{A0}$.

Essa força motora tem uma interpretação muito interessante. Primeiramente deve-se observar que a concentração \tilde{y}_A^* não está presente fisicamente em nenhuma das fases que trocam massa, mas ela determina o potencial de troca massa no sistema. A figura 5 mostra um esquema que ajuda a entender a situação:

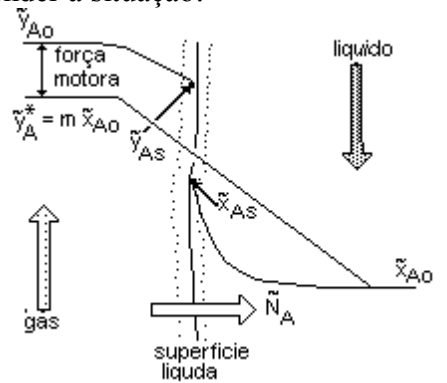


FIG. 5 Força motora para o coeficiente global de Transporte de massa

Essa força motora $(\tilde{y}_{A0} - \tilde{y}_A^*)$ pode ser entendida com a distância que \tilde{y}_{A0} se encontra da condição de equilíbrio com o meio da fase líquida \tilde{x}_{A0} . Pode-se fazer uma analogia com uma mola para entender melhor a situação.

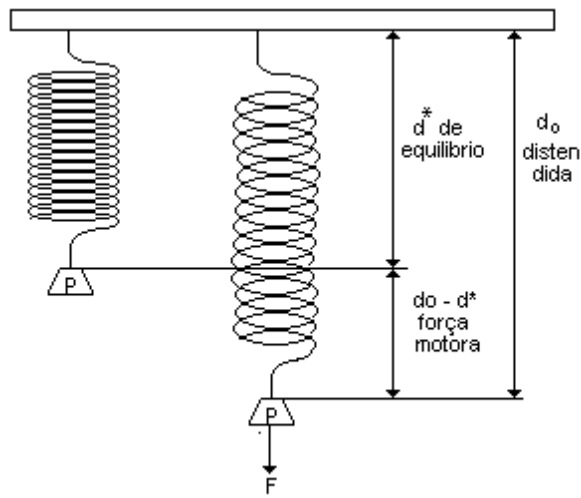


FIG. 6 Analogia entre a força motora e uma mola

Se em uma mola fixa pendurarmos um peso P e a deixarmos em repouso, ela apresentará um comprimento d^* de equilíbrio. Se puxarmos esse peso P com uma força F, a mola distenderá atingindo um comprimento. No momento em que se larga o peso P, cessa a força F, o sistema não está mais equilibrado. A mola fará uma força sobre o peso para que o sistema volte no estado inicial de equilíbrio, ou seja, a força motora que impulsiona o peso para cima sistema será $d_0 - d^*$. A analogia é exatamente a mesma, a força motora global se traduz no quanto \tilde{V}_{A0} se encontra distante do equilíbrio \tilde{V}_A^* . A figura 7 apresenta algumas situações para melhor compreensão do que acontece.

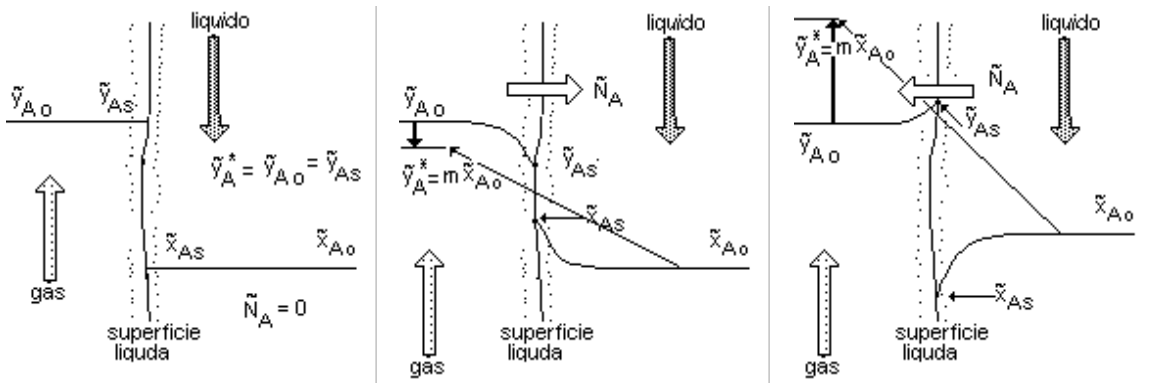


FIG 7 a) fases em equilíbrio b) absorção c) desabsorção

Geralmente há uma certa dificuldade de se entender o que vem a ser \tilde{V}_A^* . Ele é uma peça importante nesse jogo. É uma espécie de concentração virtual, seria a concentração da fase gasosa que **estaria** (veja o tempo do verbo; condicional) em equilíbrio com a fase líquida. Para que haja troca de massa entre as duas fases é necessário que elas não estejam

em equilíbrio, se estiverem não trocam massa, caso a) da figura 7. Os casos apresentados na figura 7 dão uma idéia como a relação de valores entre \tilde{Y}_{A0} e \tilde{Y}_A^* determinam o sentido do fluxo de massa. Observe bem estas figuras, como esta força motora dispensa o uso das concentrações da interface!.

Relação entre coeficiente global e individuais convectivos de transporte de massa

Partindo das equações (1) e (2), pode –se deduzir que:

$$K_{\tilde{y}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\tilde{y}}} + \frac{m}{k_{\tilde{x}}}} \quad (6)$$

O coeficiente convectivo global de transporte de massa é uma condutância, isto é, o inverso de uma resistência. A resistência global é a soma de duas resistências em série :

$\frac{1}{k_{\tilde{y}}} + \frac{m}{k_{\tilde{x}}}$, a soma da resistência ao transporte de massa na fase gasosa mais a resistência

na fase líquida. O interessante é observar que intervêm nesta resistência a constante de equilíbrio. Quanto maior m , menos solúvel é o contaminante A o que reduz o fluxo numa absorção. Então, os coeficientes individuais levam em conta apenas o mecanismo de transporte de massa, já o global além do mecanismo incorpora dentro de si informações sobre o equilíbrio. Na prática os coeficientes globais são aqueles que permitem o dimensionamento de equipamentos e ele podem ser obtidos por meio de medidas experimentais.

Bibliografia

Bennett, C. O e Myers, J. E. Fenômenos de Transporte McGraw - Hill