

RUI A. R. BOAVENTURA

BRANCA P. GONÇALVES

ARNALDO PEGO (1)

Grupo de Engenharia Química e

(1) Centro de Estudos de Química Nuclear

Faculdade de Engenharia

Porto — Portugal



ESTUDO HIDRODINÂMICO DE UMA COLUNA DE PULVERIZAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO

Apresenta-se um estudo do funcionamento hidrodinâmico de uma coluna de pulverização líquido-líquido, tipo Elgin, com gotas de querosene a circular em contracorrente com a água. Traçam-se as curvas de variação da taxa de retenção da fase dispersa em função dos caudais das duas fases e calcula-se o diâmetro médio de Sauter e a mediana da distribuição dos diâmetros das gotas, para diversos pares de caudais. Pro põem-se correlações entre a velocidade relativa das gotas, a velocidade de uma gota única num meio estacionário e a taxa de retenção da fase dispersa, e comparam-se com correlações já anteriormente encontradas por outros autores.

1 — INTRODUÇÃO

A possibilidade de utilização das colunas de pulverização como permutadores de calor em contacto directo (caso da dessalinização da água do mar) incrementou notavelmente o estudo do seu funcionamento hidrodinâmico em leito compacto.

A aplicação de colunas de pulverização como extractores, funcionando em leito disperso, já não é recente, mas só em 1942 Blanding e Elgin observaram pela primeira vez a formação de um leito compacto de gotas.

Vários autores [1, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 16] se debruçaram depois sobre a obtenção de um leito compacto estável e efectuaram o estudo da transferência de calor ou da transferência de massa em colunas de pulverização a funcionar nessas condições.

O trabalho que aqui se apresenta compreende:

— o estudo da hidrodinâmica de uma coluna de pulverização, funcionando em leito disperso e em leito compacto;

— a verificação de correlações apresentadas por outros autores [8, 10, 11, 15];

— a proposta de novas correlações.

Numa coluna de pulverização, uma das fases (fase dispersa) entra por uma das extremidades sob a forma de gotas e contacta com a outra fase (fase contínua) que circula em sentido contrário (fig. 1). A retenção da fase dispersa (isto é, o volume de fase dispersa por unidade de volume de leito) é função dos caudais das duas fases e do tamanho das gotas.

No funcionamento numa coluna de pulverização há que distinguir:

— funcionamento em leito disperso, a que corresponde uma taxa de retenção baixa;

— funcionamento em leito compacto, a que corresponde uma taxa de retenção elevada;

— funcionamento em leito misto, com a parte superior da coluna em leito compacto e a inferior em leito disperso;

— o regime de alagamento que corresponde ao caudal máximo de uma fase que se pode pôr a circular em contracorrente com um determinado caudal da outra fase.

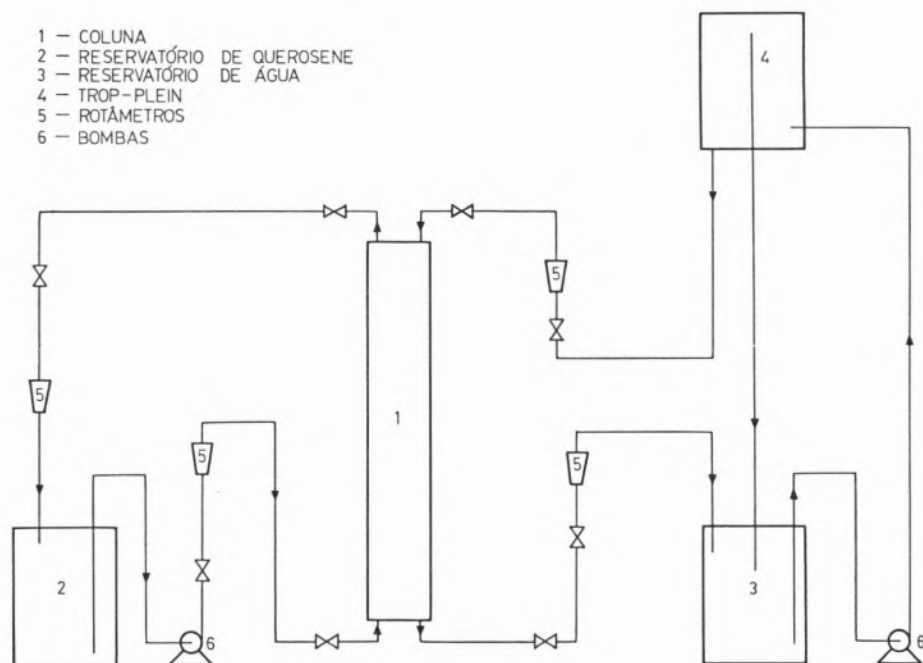


Fig. 1
Diagrama da instalação

O estudo da hidrodinâmica de uma coluna de pulverização que aqui se apresenta incide sobre:

- modos de obtenção dos diferentes tipos de leito e verificação da sua estabilidade;
- variação da taxa de retenção da fase dispersa com os caudais das duas fases;
- distribuição dos tamanhos das gotas e variação do tamanho médio das gotas com os caudais das duas fases.

2 — MONTAGEM EXPERIMENTAL

Efectuou-se o estudo hidrodinâmico numa coluna de pulverização tipo Elgin, cujos pormenores de construção constam de fig. 2. A água é bombada de um reservatório para o topo da coluna, onde circula como fase contínua, antes de sair pela base novamente para o reservatório que a contém.

O querosene, que constitui a fase dispersa, está contido num reservatório de alumínio, passa pelo distribuidor de onde sai sob a forma de pequenas gotas que sobem em contracorrente com a água e coalescem no topo. O querosene volta em seguida

ao reservatório. Os caudais de entrada e saída das duas fases são regulados por válvulas de agulha e medem-se por rotâmetros calibrados. A coluna utilizada é de vidro revestida exteriormente por uma camisa prismática quadrangular de «plexiglas» transparente, cheia de água, para evitar a distorção das gotas fotografadas. O topo — câmara de decantação — e a base da coluna são de «plexiglas» transparente segundo as indicações de Elgin [2].

No interior do decantador foi colocada uma rede de aço inoxidável para facilitar a coalescência e manter a interface líquido-líquido a um nível constante ao longo de uma série de experiências. Na base da coluna está colocado o distribuidor de gotas, com uma entrada cilíndrico-cónica fixada à base da coluna e fechado superiormente por um disco de latão perfurado, com 61 orifícios de 1,61 mm de diâmetro, espaçados entre si de 7 mm. As características físicas dos produtos usados, mutuamente saturados, a 20 °C, são:

$$\rho_D = 0,7864 \text{ g/cm}^3 \quad \mu_D = 1,857 \text{ cP}$$

$$\sigma = 38,2 \text{ dine/cm}$$

$$\rho_c = 0,9981 \text{ g/cm}^3 \quad \mu_c = 1,028 \text{ cP}$$

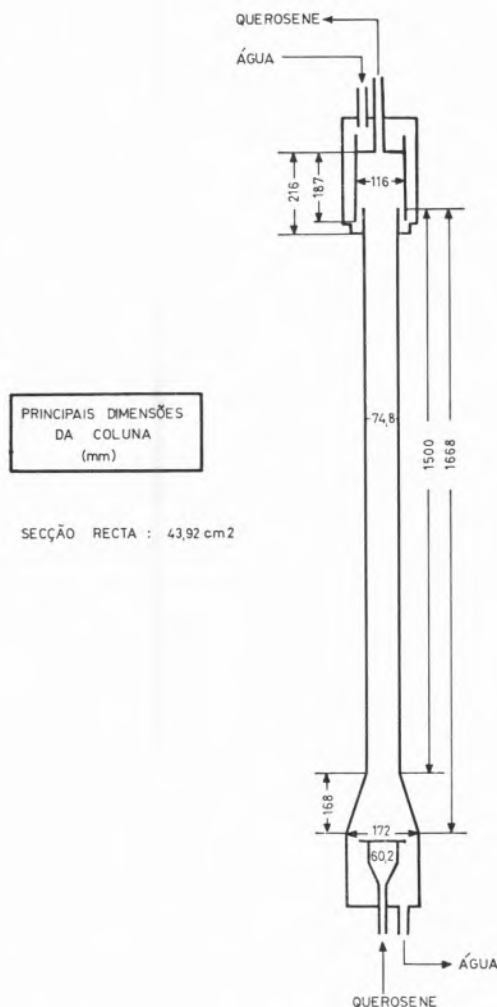


Fig. 2
Esquema da coluna de pulverização

A gama de caudais utilizados foi de 2,5 a 4,5 l/min. para o querosene (velocidade de injeção V_N através dos orifícios de 33,5 a 60,5 cm/s) e de 0 a 4,2 l/min. para a água.

3 — CONDIÇÕES DE EXISTÊNCIA E ESTABILIDADE DE UM LEITO COMPACTO

O tipo de leito formado depende de um equilíbrio entre dois caudais:

- o caudal de alimentação em gotas (número de gotas por segundo) ao nível da interface;
- o caudal de coalescência dessas gotas.

O primeiro depende do caudal de querosene e do número de gotas por unidade de secção da coluna; quanto ao segundo, pode dizer-se que o tempo de coalescência de uma gota numa interface plana é tanto menor quanto maior for a velocidade da gota no momento do impacto. Quando o caudal de coalescência é superior ao caudal de alimentação, cada «grupo» de gotas que chega à interface coalesce antes que outro «grupo» alcance a referida interface. Neste caso não há acumulação de gotas e forma-se um leito disperso.

Quando o caudal de coalescência é inferior ao caudal de alimentação, há acumulação de gotas por baixo da interface e forma-se um leito misto.

Se no início do funcionamento se eleva a interface bastante acima do topo da coluna de vidro, a velocidade das gotas na altura do impacte com a interface é maior do que a velocidade na coluna. Com efeito,

$$V_D = V_r - V_c \quad (1)$$

Ora V_c , que é constante ao longo da coluna, tende para zero à medida que sobe na câmara de decantação e, portanto, uma gota que penetre nesta câmara é acelerada até chocar com a interface (ou atingir uma nova velocidade terminal).

Este aumento de velocidade provoca um acréscimo no caudal de coalescência que, tornando-se superior ao caudal de alimentação, impede a compactação do leito.

Se, pelo contrário, se mantém a interface junto ao topo da coluna, a velocidade das gotas no momento do choque com a interface é aproximadamente igual à velocidade das gotas na coluna. O caudal de coalescência torna-se menor, as gotas não coalescem suficientemente depressa e forma-se um leito misto. Um processo prático de obtenção de leito compacto na coluna é por controle do caudal de saída da água. Com efeito, se o caudal de saída da água é superior ao seu caudal de entrada, o caudal de saída do querosene tem de ser menor que o caudal de entrada, provocando portanto uma acumulação de gotas no interior da coluna.

Se se mantém durante tempo suficiente o caudal de saída de água superior ao seu caudal de entrada, as gotas de querosene começam a empilhar-se abaixo da interface líquido-líquido, progredindo o empilhamento ao longo da coluna. Se se deseja que a coluna funcione em leito misto, igualam-se então os

caudais de entrada e saída de água e espera-se um pouco até que se restabeleça o regime estacionário. Se se pretende que o leito compacto ocupe toda a coluna, mantém-se a diferença de caudais de água durante o tempo suficiente para que a interface leito compacto-leito disperso desça até à base da coluna.

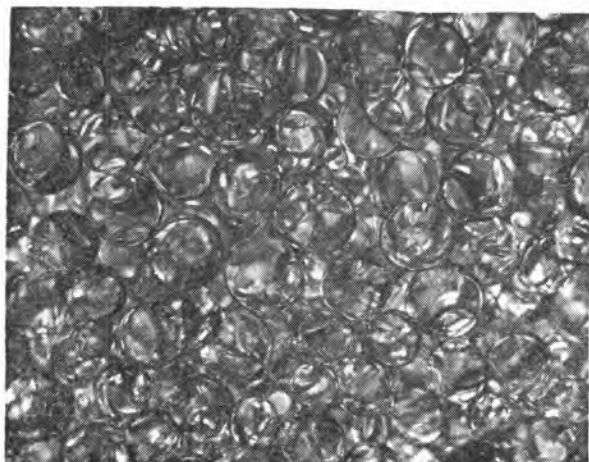


Fig. 3
Exemplo de leito compacto

O aspecto de um leito compacto (fig. 3) é semelhante ao de um empilhamento de esferas com um lento movimento de translação ascendente. Em leito disperso (fig. 4) as gotas deslocam-se mais livremente, com movimentos de translação e rotação mais desordenados.

4 — PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As grandezas medidas foram a taxa de retenção da fase dispersa e o tamanho médio das gotas em função dos caudais das duas fases. Abordou-se ainda o estudo da distribuição de tamanho das gotas.

Com a coluna a funcionar em leito misto, com um determinado par de caudais, determinou-se a retenção γ da fase dispersa fechando simultaneamente as válvulas de entrada e saída das correntes de água e querosene e achando o quociente entre o volume de querosene retido e o volume total de leito misto antes do fecho das válvulas. Repetindo sucessivamente esta operação e fazendo variar no leito misto a altura correspondente a leito disperso, registaram-se graficamente os valores experimentais

da retenção em leito misto para diversas alturas h_1 de leito disperso. As taxas de retenção β em leito disperso e em leito compacto correspondentes a um dado par de caudais foram determinadas extrapolando para h_1 = altura total do leito e $h_1 = 0$ a curva $\gamma = \gamma(h_1)$.

A variação da retenção γ em leito misto com a

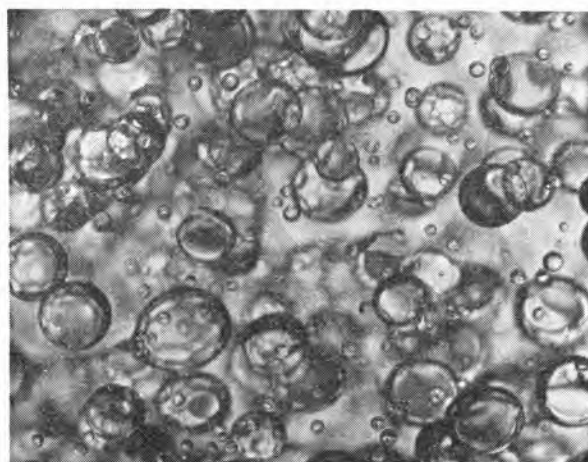


Fig. 4
Exemplo de leito disperso

altura de leito disperso é normalmente linear. No entanto, para pequenos caudais da fase contínua desaparece a linearidade, o que significa uma variação de taxa de retenção ao longo da coluna. Com efeito, as fotografias tiradas ao leito, nestes casos a diferentes alturas da coluna, mostram um aumento do tamanho médio das gotas da base para o topo, em resultado da coalescência no interior da coluna.

Embora se desejasse conservar a interface de coalescência na mesma posição, verificou-se que, para caudais pequenos da fase dispersa, a tendência era para a interface se formar a uma pequena altura na câmara de decantação; para caudais mais elevados, a interface subia na câmara de decantação e o leito compacto podia mesmo ultrapassar a rede metálica se esta fosse colocada a altura insuficiente.

Para a determinação do tamanho das gotas seguiu-se de perto a técnica para fotografar gotas de líquido referida em [4] e adoptou-se uma montagem análoga à apresentada por R. Loutaty [10].

Dos negativos obtidos (24 mm \times 36 mm) explorou-se apenas a zona central de 24 mm \times 18 mm, ampliando-se para 240 mm \times 180 mm.

A conversão da imagem fotográfica ampliada para o tamanho real tornou-se possível fotografando nas mesmas condições pérolas de vidro encostadas à parede interior da coluna e ampliando igualmente os negativos obtidos.

Apesar de se ter corrigido o efeito de distorção com auxílio de uma camisa prismática cheia de água a envolver a coluna, determinaram-se os factores de redução na horizontal e na vertical e os valores obtidos foram respectivamente $f_h = 0,200$ e $f_v = 0,202$. Fotografaram-se as gotas em leito disperso e em leito compacto correspondentes a diversos pares de caudais das duas fases.

Mediram-se as gotas nos seus diâmetros horizontal e vertical e tomou-se a média aritmética como diâmetro equivalente.

De acordo com Christiansen [3], tal procedimento causa um erro inferior a 5% na determinação do volume da gota se a razão dos diâmetros for inferior a 1,7, o que se verifica nas medições que se efectuaram. Para cada par de caudais estudados procurou-se averiguar o tipo de distribuição e os respectivos parâmetros característicos.

5 — RESULTADOS

5.1 — TAXA DE RETENÇÃO

Apresentam-se na fig. 5 as curvas experimentais da variação de taxa de retenção com os caudais das duas fases.

A análise das curvas indica que para par de caudais podem obter-se dois tipos de leito: leito disperso, caracterizado por uma taxa de retenção relativamente baixa, que aumenta com o caudal da fase contínua; leito compacto, caracterizado por uma taxa de retenção mais elevada que diminui com o aumento de caudal da fase contínua. Há um caudal U para o qual os dois tipos de leito se confundem, atingindo-se o alagamento. Não foi possível determinar fisicamente a curva correspondente ao alagamento.

Não se conseguiu ultrapassar a taxa de retenção de 69% correspondente a um caudal nulo de água e a um caudal de querosene de 234 l/h. Tentativas efectuadas com pequenos caudais de querosene e água com vista à obtenção de elevadas taxas de retenção resultaram infrutíferas porque, devido a

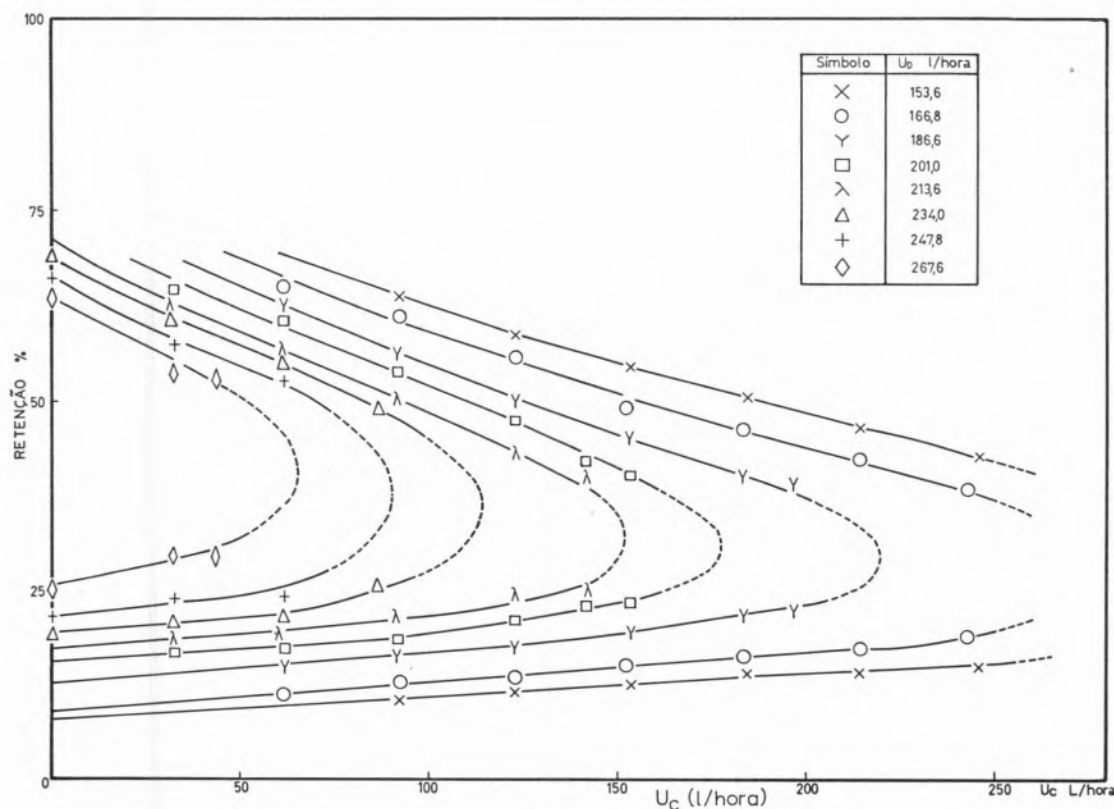


Fig. 5

Curvas experimentais da variação da taxa de retenção β em função dos caudais

elevada coalescência, o leito começou a destruir-se na parte superior e a interface de coalescência começou a descer dentro da própria coluna de vidro.

Para caudais de querosene inferiores a um determinado valor (curvas correspondentes aos caudais de querosene de 153,6 l/h, 166,8 l/h, 186,6 l/h e 201,0 l/h) há um limite inferior do caudal da fase contínua abaixo do qual não é fisicamente possível a obtenção de leito compacto.

5.2 — TAMANHO DAS GOTAS

A análise estatística dos diâmetros das gotas revela a presença de uma distribuição bimodal, em contraste com a distribuição normal monomodal registada por outros autores [7, 8, 11, 13, 14]. Acresce ainda a formação de gotas satélites de pequeno diâmetro, a maior parte das vezes em número insuficiente para se proceder ao estudo da respectiva distribuição.

A insuficiência de dados experimentais não permite desde já um estudo completo da distribuição para cada caso. A fig. 6 indica, de uma maneira aproximada, a variação de d_{32} com os caudais das duas fases.

Verifica-se que d_{32} diminui quando aumenta U_c ; a dependência de U_D não é tão clara, parecendo, no entanto, que, para os valores intermédios de U_D (186,6 a 234,0 l/h), d_{32} é apenas função de U_c . O fenómeno está relacionado com a coalescência

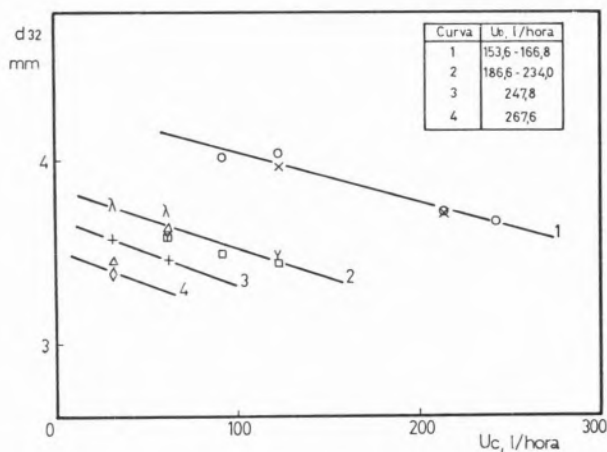


Fig. 6

Variação do diâmetro médio de Sauter com os caudais

observada na coluna: ao aumento de tamanho das gotas corresponde um valor mais elevado para o diâmetro médio de Sauter.

6 — ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utiliza-se habitualmente o conceito de velocidade relativa V_r para a interpretação dos resultados experimentais.

Designando por V_D a velocidade de deslocamento das gotas e por V_c a velocidade de deslocamento da fase contínua, é:

$$V_r = V_D + V_c \quad (2)$$

Como

$$V_D = \frac{U_D}{\beta\Omega} \quad \text{e} \quad V_c = \frac{U_c}{(1-\beta)\Omega},$$

resulta

$$V_r = \frac{U_D}{\beta\Omega} + \frac{U_c}{(1-\beta)\Omega} \quad (3)$$

A velocidade relativa V_r deve ser dependente das propriedades dos fluidos em contacto, da taxa de retenção e da distribuição dos tamanhos das gotas na coluna.

É frequente a introdução da velocidade V_r^∞ de de ascensão de uma gota num meio imóvel e infinito e admite-se que V_r é função do valor de V_r^∞ correspondente à gota representativa da distribuição de tamanhos no interior da coluna:

$$V_r = f(v_r^\infty, \beta) \quad (4)$$

Conforme mostra a fig. 7 começou-se por averiguar a dependência

$$V_r = f(\beta) \quad (5)$$

Em leito disperso, a velocidade relativa V_r parece ser independente do caudal da fase dispersa, sendo função apenas da retenção β .

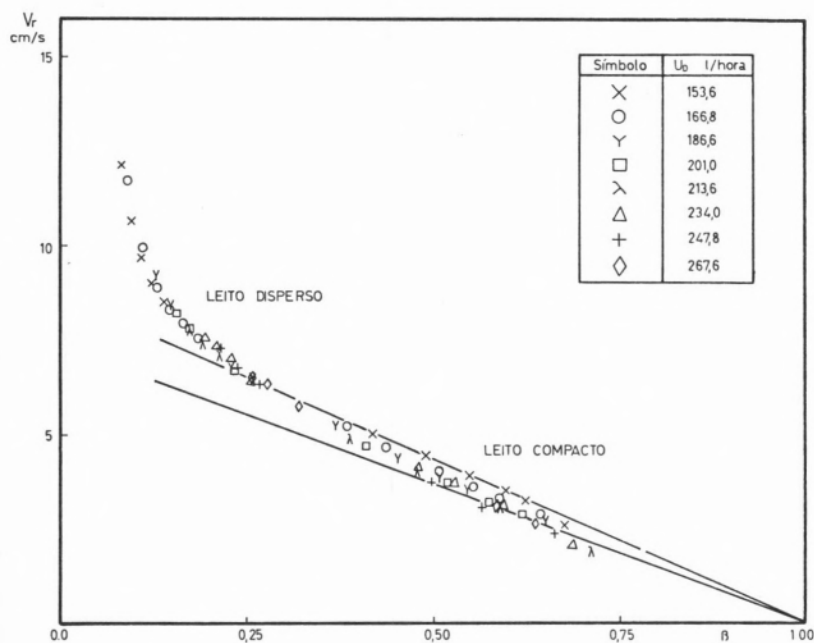


Fig. 7

Variação da velocidade relativa V_r em função da taxa de retenção β

Retomando os trabalhos de Loutaty e Vignes [11] e de Letan e Kehat [8], procedeu-se à primeira tentativa de ajuste admitindo uma relação do tipo

$$V_r = a \exp(-b\beta)$$

Os valores experimentais obtidos não são, porém, devidamente representados por uma expressão deste

tipo. São melhor representados, de acordo com a fig. 8, pela relação:

$$V_r = 3,4 \exp(-0,478 \ln \beta) \quad (6)$$

Em leito compacto, a velocidade relativa não pode ser considerada apenas como função da taxa de retenção (fig. 7).

Utilizando a curva da fig. 9 traçada experimental-

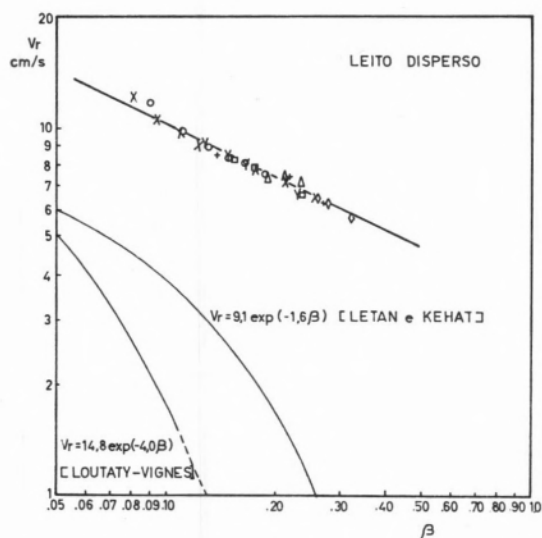


Fig. 8

Variação da velocidade relativa com a taxa de retenção em leito disperso

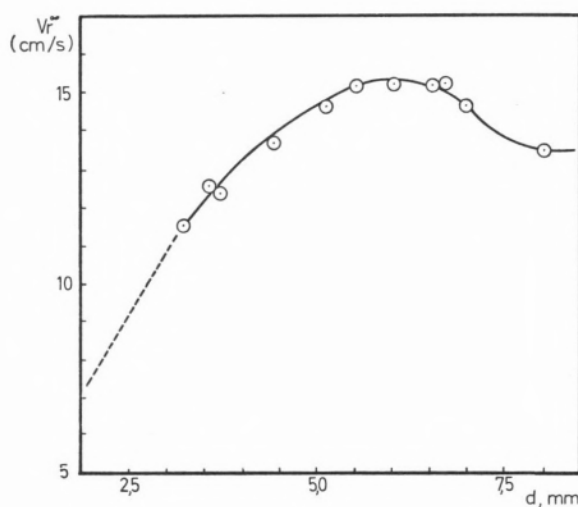


Fig. 9

Velocidade de ascensão de uma gota de querosene na água, em função do seu diâmetro equivalente

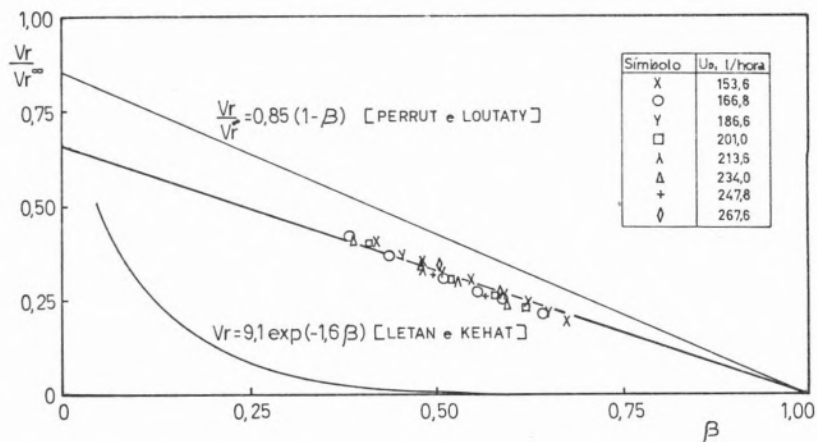


Fig. 10

Varição da razão $\frac{V_r}{V_r^\infty}$ com a taxa de retenção em leito compacto

mente para o sistema querosene/água, determina-se a velocidade de ascensão de uma gota de diâmetro d_{32} , para diversos pares de caudais das duas fases. Admitindo uma relação do tipo $V_r = V_r^\infty f(\beta)$, procede-se à representação gráfica de

$$\frac{V_r}{V_r^\infty}$$

em função de β (fig. 10).

Conclui-se que em leito compacto os pontos experimentais são convenientemente representados pela seguinte expressão:

$$\frac{V_r}{V_r^\infty} = 0,655 (1 - \beta) \quad (7)$$

Esta relação permite a determinação do ponto de alagamento, o qual matematicamente é caracterizado por:

$$\left[\frac{d U_c}{d \beta} \right] = 0 \quad U_D = \text{const.} \quad (8)$$

ou

$$\left[\frac{d U_D}{d \beta} \right] = 0 \quad U_c = \text{const.} \quad (9)$$

A combinação das equações 3, 7, 8 e 9 dá:

$$\left(\frac{U_D}{U_c} \right)_{\text{alag}} = \frac{2\beta^2}{(1 - \beta)(1 - 2\beta)} \quad (10)$$

Esta equação torna possível o cálculo da taxa de retenção da fase dispersa correspondente ao alagamento para cada par de caudais das duas fases.

7 — DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Compararam-se os resultados experimentais com as correlações de Loutaty e Vignes [11] {generalizada por Perrut e Loutaty [15]}, e de Letan e Kehat [8] que estudaram colunas de pulverização com o sistema querosene/água (figs. 8 e 10).

Loutaty e Vignes [11] apresentam os seus resultados para $\beta < 10\%$ sob a forma:

$$V_r = 14,8 \exp(-4,0\beta) \quad (11)$$

e para 10%

$$\frac{V_r}{V_r^\infty} = 0,725 (1 - \beta) \quad (12)$$

Letan e Kehat [8] propõem a relação:

$$V_r = 9,1 \exp(-1,6\beta) \quad (13)$$

que seria válida em leito compacto e em leito disperso.

Não se verifica acordo entre a correlação 6 que propomos para leito disperso e as anteriores relações 11 e 13. Note-se, porém, que a equação 6 só se aplica convenientemente a valores de $9\% < \beta <$

< 35%; por outro lado, a equação 13 representa leito disperso e leito compacto e foi obtida para caudais de água (0 a 50 l/min) e querosene (5 a 40 l/min) muito superiores aos utilizados neste trabalho.

A correlação 7 proposta para leito compacto é formalmente análoga à apresentada por Loutaty e Vignes [11] para $\beta > 10\%$.

Perrut e Loutaty [15] generalizaram, num estudo efectuado sobre catorze pares de líquidos imiscíveis ou contendo um soluto em equilíbrio, a relação 12 sob a forma:

$$V_r = m(1 - \beta) \quad (14)$$

sendo m uma constante que depende apenas da razão das viscosidades das duas fases.

O valor de m determinado teoricamente ($m = 0,85$) difere substancialmente, no nosso caso, do valor experimental ($m = 0,655$).

A discrepância entre os dois valores pode, contudo, fazer-se assentar no seguinte:

— nas condições de trabalho, com velocidade de injeção da fase dispersa inferiores às que ocorriam com Loutaty e Vignes [11], o tamanho médio das gotas varia com U_D e está-se longe do pleno desenvolvimento do jacto em que o tamanho médio das gotas é apenas função do número de Eotvös (E_0) [14];
— para pequenos caudais de uma e outra fase ocorre coalescência no interior da coluna, o que acarreta um tamanho médio das gotas superior ao calculado a partir da ruptura do jacto.

AGRADECIMENTO

Agradecemos aos Senhores Prof. R. Guedes de Carvalho, Eng. João Rui Guedes de Carvalho, Eng. Eduardo Beira e Eng. Romualdo Salcedo a colaboração prestada no decorrer da realização deste trabalho.

NOMENCLATURA

d_{32}	— diâmetro médio de Sauter, mm
E_0	— número de Eotvös, $g \cdot \Delta\rho \cdot d^2 / \sigma$
g	— aceleração da gravidade, cm/s^2
h_1	— altura de leito disperso na coluna, mm
U_D	— caudal da fase dispersa, cm^3/s
U_c	— caudal da fase contínua, cm^3/s
V_D	— velocidade de deslocamento da fase dispersa, cm/s

V_c	— velocidade de deslocamento da fase contínua, cm/s
V_r	— velocidade relativa das duas fases, cm/s
Ω	— secção recta da coluna, cm^2
$\rho_D; \rho_c$	— massa específica da fase dispersa e contínua, respectivamente, g/cm^3
μ_D, μ_c	— viscosidade da fase dispersa e contínua, respectivamente, poise
σ	— tensão interfacial, $dine/cm$
$\Delta\rho$	— $\rho_c - \rho_D$
γ	— retenção da fase dispersa em leito misto
β	— retenção da fase dispersa

BIBLIOGRAFIA

- [1] BAUERLE, G. L. e AHLERT, R. C., *Chim. Ind. (Paris)*, **101**, 2 (1969).
- [2] BLANDING, F. H. e ELGIN, J. C., *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 305 (1942).
- [3] CHRISTIANSEN, R. M., «Ph. D. Thesis», Univ. Pennsylvania, Philadelphia, 1955.
- [4] DANION, K. G., ANGELO, J. B. e PARK, R. W., *Chem. Eng. Sci.*, **21**, 813 (1966).
- [5] GRESKOVICH, E. J., BARTON, P. e HERSH, R. E., *A. I. Ch. E. (Am. Inst. Chem. Engrs.) J.*, **13**, 6 (1967).
- [6] KEHAT, E. e LETAN, R., *Ind. Eng. Chem. Process Design Develop.*, **7**, 3 (1968).
- [7] KEITH, F. W. e HIXSON, A. N., *Ind. Eng. Chem.*, **47**, 258 (1955).
- [8] LETAN, R. e KEHAT, E., *A. I. Ch. E. (Am. Inst. Chem. Engrs.) J.*, **13**, 3 (1967).
- [9] LETAN, R. e KEHAT, E., *A. I. Ch. E. (Am. Inst. Chem. Engrs.) J.*, **16**, 6 (1970).
- [10] LOUTATY, R., «Thèse», Univ. Nancy, 1968.
- [11] LOUTATY, R. e VIGNES, A., *Chim. Ind. (Paris), (Génie Chim.)*, **101**, 2 (1969).
- [12] LOUTATY, R., VIGNES, A. e LE GOFF, P., *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 1795 (1969).
- [13] MUGLE, R. A. e EVANS, H. D., *Ind. Eng. Chem.*, **43**, 1317 (1951).
- [14] PERRUT, M. e LOUTATY, R., *Chem. Eng. J.*, **3**, 286 (1972).
- [15] PERRUT, M. e LOUTATY, R., *Chem. Eng. Sci.*, **27**, 669 (1972).
- [16] PERRUT, M., LOUTATY, R. e LE GOFF, P., *Chem. Eng. Sci.*, **28**, 1541 (1973).

ABSTRACT

A study is presented for the hydrodynamics of a liquid-liquid spray column, Elgin type; where the kerosene drops rise discontinuously and countercurrently through water. Curves of dispersed phase holdup variation as function of the flow rates of the two phases are shown and the Sauter average diameter and median of drop diameter distribution are calculated for several pairs of flow rates. Correlations are proposed for slip velocity of drops, velocity of a single drop in a stationary water field and the holdup dispersed phase. These correlations are compared with equations presented by other authors.