Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LOQ4085 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

PROFESSORA: LÍVIA CHAGURI E CARVALHO – Maio 2019

OPERAÇÕES EM SISTEMAS PARTICULADOS

1. Dinâmica de partículas

Entender o comportamento dinâmico das partículas em relação ao fluido (líquido ou gasoso) em movimento ou em repouso é importante em muitos processos de separação mecânica.

Movimento da partícula através de um fluido

A teoria básica do movimento dos sólidos através de fluidos está baseada no movimento dos corpos livres, portanto:

$$F = m\frac{dv}{dt} \qquad (1)$$

Em que F (N) é força resultante das forças atuantes sobre qualquer corpo, m (kg) é a massa das partículas e (dv/dt) é a aceleração, em que v é a velocidade (m/s) e t é o tempo (s).

As forças que atuam sobre uma partícula em queda livre estão representadas na Figura 1, sendo: *Fex* força externa, proveniente da aceleração da gravidade ou de um campo centrífugo, *Fa* a força de arraste e *Fe* força de empuxo.

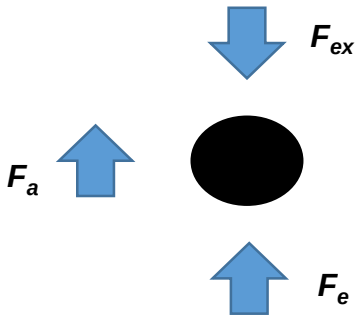


Figura 1. Forças que atuam sobre uma partícula esférica

Aplicando a segunda lei de Newton considerando a Figura 1, tem-se:

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

$$\sum F = m\frac{dv}{dt} = F_{ex} - F_e - F_a \quad (2)$$

A F_{ex} pode ser expressa pela aceleração da gravidade ou pelo campo centrífugo como:

$$F_{ex} = mg \quad ou \quad F_{ex} = ma_c \quad (3)$$

Em que g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2) e a_c é a aceleração centrífuga m/s^2.

Descrevendo a Fe de acordo com princípio de Arquimedes, tem-se:

$$F_e = \left(\frac{m}{\rho_p}\right)\rho g \quad ou \quad F_e = \left(\frac{m}{\rho_p}\right)\rho a_c \quad (4)$$

Em que ρ é a densidade do fluido (kg/m^3)

Sendo o ΣF=0, portanto, aceleração da partícula igual a zero, substituindo as equações (3) e (4) em (2):

$$mg - F_a - \left(\frac{m}{\rho_p}\right)\rho g = 0 \quad (5)$$

$$mg\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) - F_a = 0 \quad (6)$$

<u>Coeficiente de arraste (C_D)</u>

Do atrito existente entre a superfície de determinada partícula se movimentado por um fluido, origina-se a força de arraste. Portanto, a definição do coeficiente de arraste (C_D) será análoga à definição do fator de atrito (f) utilizada em escoamento de fluidos nas tubulações. O coeficiente de arraste é definido em função da força de arraste por:

$$F_a = \frac{1}{2}C_D v^2 \rho A_p \quad (7)$$

Em que C_D é o coeficiente de arraste (adimensional), v é a velocidade relativas entre a partícula e o fluido (m/s) e A_p é a área projetada da partícula (m^2) sobre um plano perpendicular a direção do escoamento.

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

O coeficiente de arraste depende de diversos fatores, como as propriedades físicas dos fluidos, velocidade relativa, tamanho das partículas, entre outras, como da forma, ou esfericidade da partícula, e também do número de Reynolds definido para a partícula ($N_{Re,p}$) como:

$$N_{\mathrm{Re},p} = \frac{\rho v D_p}{\mu} \tag{8}$$

Em que D_p é o diâmetro da partícula (m).

No Anexo I encontram-se o coeficiente de arraste em função do número de Reynolds de partículas com diferentes esfericidades. Portanto, para valores do número de Reynolds de partícula baixos, a força de arraste atuante sobre uma esfera é calculada pela lei de Stokes:

$$F_a = 3\pi\mu D_p v \tag{9}$$

Do Anexo I e substituindo a equação (9) na equação (7), o C_D predito pela lei de Stokes, ou seja, para regime laminar ($N_{\mathrm{Re},p} \langle 0{,}4$) é:

$$C_D = \frac{24}{N_{\mathrm{Re},p}} \tag{10}$$

Para o regime de transição $\left(0{,}4 \langle N_{\mathrm{Re},p} \langle 500\right)$ C_D é:

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{N_{\mathrm{Re},p}}} \tag{11}$$

E para regime turbulento $\left(N_{\mathrm{Re},p} \rangle 500\right)$ o valor de C_D = 0,44, obtido experimentalmente.

<u>Velocidade terminal (v_t)</u>

Na queda de uma partícula através de um fluido, Figura 1, verifica-se que existem 2 períodos de velocidade, devido a aceleração da gravidade, a queda com velocidade acelerada e a de velocidade constante. Sabe-se que o período de velocidade acelerada é muito curto e a partícula rapidamente atinge o período de velocidade constante. Portanto, o tempo gasto para queda da partícula é calculado com base no período de velocidade constante, ou seja, a aceleração é zero, o que corresponde á velocidade

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

máxima alcançada nas condições em que a partícula está submetida, denominada velocidade terminal.

Substituindo as equações (3), (4) e (7) em (2), obtém-se a expressão que representa a força total que age sobre qualquer campo de forças, para partícula sob influência da aceleração da gravidade (equação 12) ou sobre aceleração centrífuga (equação 13):

$$\frac{dv}{dt} = g\left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)-\left(\frac{C_D v^2 \rho A_p}{2m}\right) \tag{12}$$

$$\frac{dv}{dt} = a_c\left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)-\left(\frac{C_D v^2 \rho A_p}{2m}\right) \tag{13}$$

Assumindo a condição de que a partícula está se movimentando com velocidade constante (aceleração igual a zero) e para uma partícula esférica $A_p=\pi D^2_p/4$ e $\rho_p=m/V_p=6m/\pi D^3_p$ a equação (12) é:

$$\frac{3C_D v_t^2 \rho}{4D_p \rho_p} = g\left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right) \tag{14}$$

Para uma partícula esférica em queda livre a v_t em m/s:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p-\rho)gD_p}{3C_D\rho}} \tag{15}$$

A equação (15) é usada para obter a velocidade terminal em qualquer regime de escoamento, substituindo a expressão para C_D, e a partir da definição do número de Reynolds para partícula, têm-se os seguintes casos em função do regime de escoamento:

1º caso: Escoamento lento de uma esfera caindo em um fluido em repouso: regime laminar ou regime de Stokes ($N_{\mathrm{Re},p}\langle 0{,}4$), a expressão de C_D é substituída pela equação (10):

$$v_t = \frac{(\rho_p-\rho)gD^2_p}{18\mu} \tag{16}$$

2º caso: Para região intermediária: regime de transição $(0{,}4\langle N_{\mathrm{Re},p}\langle 500)$ a equação (11) é utilizada para expressar C_D:

$$v_t=\left(\frac{4}{225}\frac{(\rho_p-\rho)^2\cdot g^2}{\rho\cdot\mu}\right)^{\frac{1}{3}} D_p \tag{17}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

3º caso: Para região de número de Reynolds muito elevado: regime turbulento $\left(N_{\mathrm{Re},p} \rangle 500\right)$ C_D=0,44, portanto:

$$v_t = \left(3{,}03 \frac{\left(\rho_p - \rho\right)}{\rho} g D_p \right)^{1/2} \qquad (18)$$

Método de cálculo de v_t pelo processo iterativo:

a) Estimar um valor para v_t
b) Calcula $N_{Re,p}$, achar C_D pelo Anexo I e recalcular v_t
c) Comparar v_t calculado com v_t estimado
d) Repetir o método até v_t calculado se igualar ao estimado.

Exemplo 1: No processamento de açúcar a partir de caldo de cana, é usada a operação de decantação para separar as partículas indesejadas. O processo ocorre a 30 ºC e o diâmetro das partículas foi obtido experimentalmente, sendo 2,9 µm e a densidade das partículas foi de 1180 kg/m^3. Determine a velocidade terminal dessas partículas considerando regime em escoamento laminar e adote as propriedades da água para o caldo clarificado. Dados da água a 30 ºC: viscosidade 8x10^{-4} Pa.s e densidade 995,67 kg/m^3.

NAO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

2. Leitos porosos

Muitas operações unitárias envolvem a interação sólido-fluido, dado que normalmente ocorre a circulação intensa de sólidos em conjunto com um fluido (gás ou líquido). Entre essas operações, está a filtração, fluidização, operações em colunas de recheio, entre outras.

Dependendo de como o sólido está se movimentando, têm-se os seguintes tipos de leito:

- Leito fixo: quando o sólido está em repouso. O fluido percola entre os espaços vazios entre as partículas.
- Leito fluidizado: quando a velocidade do fluido é suficiente para provocar movimento aleatório nas partículas no leito.

A Figura 2 representa um esquema do leito fixo:

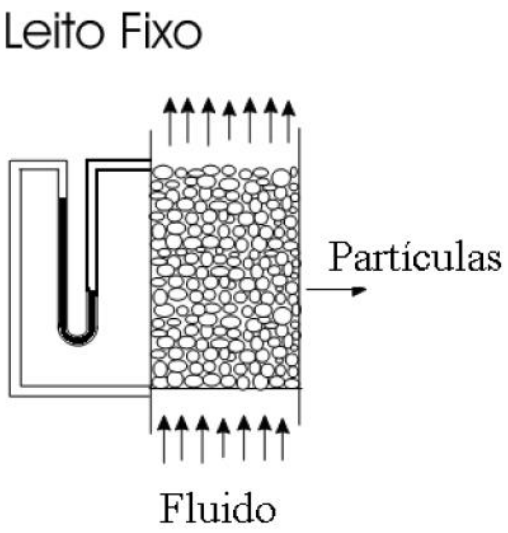


Figura 2. Leito fixo ou coluna de recheio.

2.1 Propriedades físicas do leito

Os leitos são caracterizados pela granulometria das partículas nele contidas, sua área específica, porosidade, densidade, etc. A forma e tamanho das partículas abordadas anteriormente são propriedades da partícula isolada. Para partículas em conjunto, dependendo de como estão dispostas, tem-se o leito fixo, fluidizado ou névoa.

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Densidade global (bulk) do leito (ρ_b):

A densidade global do leito é definida quando o material está empacotado ou empilhado em um leito, portanto, é a razão entre a massa do material e o volume total que ele ocupa.

$$\rho_b = \frac{m_p + m_{fluido}}{V_L} = \frac{m_p + m_{fluido}}{V_S + V_V} \tag{19}$$

Em que: ρ_b densidade global do leito (kg/m^3); m_p massa das partículas (kg); m_{fluido} massa do fluido que escoa através das partículas.(kg); V_L volume do leito; V_S volume ocupado pelos sólidos; V_V volume dos vazios, todos em (m^3).

A densidade do global depende do formato, tamanho e propriedades das partículas individuais.

Porosidade global (bulk) do leito (ε_b):

A porosidade global do leito é definida como a fração do volume total que está vazio e depende do formato, tamanho, distribuição do tamanho, rugosidade, tipo de empacotamento e razão entre diâmetro da partícula e o diâmetro da coluna.

Um leito não é totalmente compacto, apresenta zonas livres de partículas, portanto, define-se a porosidade ou fração de vazios como o volume do leito não ocupado pelo material sólido, poros internos das partículas não são levados em consideração.

$$\varepsilon_b = \frac{volume\,de\,espaço\,vazio}{volume\,total\,do\,leito} = \frac{volume\,total\,do\,leito - volume\,de\,sólidos}{volume\,total\,do\,leito} \tag{20}$$

Reescrevendo em função das partículas como sólidos:

$$\varepsilon_b = \frac{V_L - V_p}{V_L} \tag{21}$$

A porosidade global (bulk) do leito também pode ser expressa em função das densidades da partícula e aparente (equação 22).

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \tag{22}$$

Área superficial específica do leito (asL)

A área superficial específica do leito é definida pela relação entre a área de superfície do leito exposta pelo fluido por unidade de volume do leito. Em razão da porosidade do leito, a área superficial específica do leito não coincide com a área superficial da partícula (A_{SP}) e podem ser relacionadas como:

$$a_{sL} = \frac{A_{SP}}{V_L} \tag{23}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

A área superficial específica do leito também pode ser expressa em função da porosidade global (bulk).

$$a_{SL=}a_S(1-\varepsilon_b) \qquad (23a)$$

Para partículas esféricas:

$$a_{SL=}\frac{6}{D_{esf}}(1-\varepsilon_b) \qquad (23b)$$

Exemplo 2: cenouras dispostas em um leito são submetidas a um processo de secagem, cujo os resultados obtidos experimentalmente, para cada conteúdo de umidade, são apresentados na tabela. Determine a porosidade global do leito para cada conteúdo de umidade.

Considerando as cenouras em cubos de 4mm de aresta, determine a área superficial específica do leito no início da secagem.

X (kg água/kg s.s.)	m_p (kg)	V_L (m3)	V_p (m3)
0,873	1,316	0,0020	0,0013
0,744	1,214	0,0017	0,0010
0,623	1,100	0,0015	0,0009
0,559	1,006	0,0014	0,0007
0,495	0,966	0,0013	0,0007

2.2 Escoamento em leitos

Para conhecer o escoamento em leitos como uma operação unitária é preciso conhecer as equações fundamentais que explicam como ocorre o contato íntimo entre as fases envolvidas no processo (fase fluida gasosa e/ou líquida com a fase estacionária/partículas ou entre diferentes fases fluidas).

O contato entre os sólidos e o fluido pode ser realizado por três tipos de operação ou técnicas chamadas:

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

a) leito fixo – o sólido em pedaços grandes (5 a 10 cm) ou em partículas menores (2mm) é colocado dentro de um tanque no qual o fluido circula de baixo para cima, ou ao contrário, através do leito poroso sem que haja movimentação dos sólidos.
b) leito móvel – o sólido em partículas relativamente grandes é continuamente alimentado pelo topo do leito e removido pela base. O fluido pode subir ou descer pelo leito.
c) leito fluidizado – envolve a suspensão do sólido finamente dividido numa corrente ascendente de fluido a uma velocidade suficientemente elevada para causar a flutuação e movimentação vigorosa das partículas.

Assim a perda de carga do fluido que atravessa uma leito de partículas tem grande importância no estudo da circulação de fluidos em sistemas particulados ou leitos porosos.
Escoamento em leitos – perda de carga depende do regime com que o fluido circula - equacionamento varia com regime de escoamento laminar ou turbulento.
A abordagem mais comum para determinação da perda de carga em leitos porosos é a analogia ao modelo de fluxo em tubo, conhecido como modelo capilar, que aproxima o fluxo através do leito empacotado pelo fluxo através de um conjunto de capilares de igual tamanho.
As maiores contribuições seguindo essa abordagem, para determinar a perda de carga do fluido percolando o leito, em função do regime com que o fluido circula no leito, incluem equações que serão descritas em função de seus estudiosos:

Lei de Darcy

Os trabalhos experimentais realizados por Darcy por volta de 1830 demonstraram que a velocidade média de um fluido newtoniano escoando em regime laminar dentro de um leito poroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à distância percorrida no leito. A vazão volumétrica do fluido percolando através do leito fixo pode ser expressa em termos da altura do leito e de sua área:

$$\dot{Q} = \frac{K_p A_s (-\Delta P)}{H_L} \tag{24}$$

$$\bar{v} = \frac{\dot{Q}}{A_s} = \frac{K_p (-\Delta P)}{H_L} \tag{25}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

$\bar{v}$ – velocidade média do fluido percolando o leito (m/s);

$\dot{Q}$ – vazão volumétrica do fluido percolando o leito (m^3/s);

K_p – constante de permeabilidade (m^2/Pa s), depende das propriedades físicas do leito e fluido que nele circula;

A_s – área da seção de escoamento (m^2);

ΔP – perda de carga (Pa) ou gradiente de pressão;

H_L – altura do leito (m) – distancia percorrida no leito.

Em que Kp é definido como:

$$Kp = \frac{P_s}{\mu}$$

P_s – permeabilidade específica (m^2) do leito – resistência ao escoamento;
μ = Viscosidade do fluido (Pa.s)

O sinal negativo da perda de carga indica que o fluxo ocorre na direção oposta à altura do coluna. A equação (25) é conhecida como Lei de Darcy. Essa equação indica que a relação entre a velocidade de escoamento do fluido e a perda de carga é linear, supondo regime de escoamento laminar (número de Reynolds da partícula menor que 10).

Equação de Carman-Koseny

Por volta de 1937 Carman estudou o fluxo de fluidos através de vários empacotamentos em uma faixa de viscosidade, propondo a seguinte equação:

$$f = \frac{90(1-\varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3 N_{\mathrm{Re},p}} \qquad 0{,}26 \langle \varepsilon_b \langle 0{,}89 \qquad (26)$$

Em que *f* é o fator de fricção (adimensional).

A equação (26) pode ser aplicada a partículas de outros formatos regulares, desde que suas superfícies sejam determinadas com precisão. Já a equação (27) expressa a determinação de D_p:

$$D_p = \frac{6V_p}{A_{SP}} \qquad (27)$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Quando o leito é formado por uma mistura de partículas de vários tamanhos e formatos, V_p e A_{SP} podem ser obtidos dos valores médios de todas as partículas. Então a queda de pressão através do leito fixo de partícula é obtida por:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = \frac{2 f \rho v_S^2}{D_p} \tag{28}$$

Em que: v_s – velocidade superficial do fluido percolando o leito livre de partículas (m/s).

Koseny derivou uma equação assumindo que determinado fluido escoa através de um leito de partículas distribuídas de forma homogêneas, permitindo a formação de percursos de escoamento contínuo e uniformes entre as partículas, denominados dutos de escoamento.

Os estudos de Koseny levaram ao surgimento da equação geral para fluxo de fluidos através de um canal uniforme, sendo portanto, necessário conhecer o raio hidráulico do canal (ε_b/a_S).

Essa hipótese equivale dizer que a superfície interna total e o volume interno total do grupo de canais similares paralelos são iguais à superfície da partícula e ao volume de vazios do leito.

Portanto, o diâmetro hidráulico de um tubo (duto) é definido por:

$$D_h = 4\frac{A_s}{P_w} = 4\frac{volume\,de\,vazios}{perímetro\,molhado} = 4\frac{\left(\frac{\pi}{4}D_C^2\right)H_L\varepsilon_b}{\left(\frac{\pi}{4}D_C^2\right)H_L a_{SL}}$$

$$D_h = 4\frac{\varepsilon_b}{a_s(1-\varepsilon_b)} \tag{29}$$

Em que:

A_s – área da seção de escoamento (m^2);

P_w– perímetro molhado (m);

D_C – diâmetro da coluna (m)

H_L – altura do leito (m).

Algumas suposições são necessárias para estudar as características do leito:

- ✓ Assume-se que o leito é composto de partículas dispostas de forma aleatória;
- ✓ Assume-se que o fluido atravessa os canais formados entre as partículas;

NAO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

- ✓ Assume-se que o comprimento dos dutos (L_d) é o mesmo e tem o mesmo diâmetro hidráulico (D_h).

Com essas considerações, a área superficial específica da partícula é definida como:

$$a_S = \frac{(número\,total\,de\,dutos\,no\,leito)(área\,\text{int}erfacial\,de\,um\,duto)}{volume\,ocupado\,pelas\,partículas} = \frac{n_d \pi D_h L_d}{V_L(1-\varepsilon_b)}$$

$$a_S = \frac{\left(n_d^{'}\frac{\pi}{4}D_C^2\right)\pi D_h L_d}{\frac{\pi}{4}D_C^2 H_L(1-\varepsilon_b)} = \frac{n_d^{'} D_h L_d}{H_L(1-\varepsilon_b)} \tag{30}$$

Em que:

n_d – número total de dutos no leito;

L_d– comprimento do duto (m);

n'_d – número de dutos por m^2 de seção transversal no leito (m^2).

A correlação da velocidade através do duto (v_d) com a velocidade do fluido percolando o leito livre de partículas (v_S) é realizada aplicando o equação da continuidade:

$$\begin{aligned} &\rho A_s v_S = \rho A_d v_d \\ &\frac{\pi}{4}D_C^2 v_s = n\left(\frac{\pi}{4}D_h^2\right)v_d = n_d^{'}\frac{\pi}{4}D_C^2\left(\frac{\pi}{4}D_h^2\right)v_d \\ &v_d = \frac{4v_s}{\pi n_d^{'} D_h^2} \end{aligned} \tag{31}$$

Em que: A_d – área de um duto (m^2).

A expressão da velocidade do duto (v_d) em função da velocidade do fluido (v_S) é obtida substituindo n'_d da equação (30) e D_h da equação (29) em (31) tem-se:

$$v_d = v_s \frac{L_d}{H_L \varepsilon_b} \tag{32}$$

O número de Reynolds equivalente para o duto (N_{Reeq}) é definido como:

$$N_{\text{Reeq}} = \frac{\rho v_d D_h}{\mu} \tag{33}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Como o escoamento do fluido através dos dutos ocorrem em regime laminar, a equação de Hagen-Poiseuille $\left(\dot{Q} = \pi(P_1 - P_2)R^4 \Big/ 8\mu L\right)$ para cada duto pode ser aplicada:

$$\frac{(-\Delta P)}{\rho} = \frac{64}{N_{\mathrm{Re}eq}} \frac{L_d (v_d)^2}{2D_h} \tag{34}$$

Substituindo as equações (29) (32) (33) em (34):

$$(-\Delta P) = 2v_s \mu \frac{(a_S)^2 (L_d)^2 (1-\varepsilon_b)^2}{(\varepsilon_b)^3 H_L} \tag{35}$$

Na equação (35) é possível observar que a perda de carga depende do comprimento de cada duto e das características de cada leito. Sabendo que o comprimento do duto é superior ao comprimento do leito e supondo que distintos comprimentos sejam proporcionais a altura do leito: $L_d = \tau H_L$ e definindo uma constante K" = $2(\tau)^2$ a equação (35) torna-se a conhecida equação de Koseny-Carman:

$$\begin{aligned} (-\Delta P) &= 2v_S \mu a_S^2 \tau^2 H_L^2 \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{(\varepsilon_b)^3 H_L} \\ \frac{(-\Delta P)}{H_L} &= K" v_S \mu a_S^2 \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3} \quad ou \\ v_s &= \frac{(-\Delta P)}{\mu H_L} \frac{\varepsilon_b^3}{K" a_S^2 (1-\varepsilon_b)^2} \end{aligned} \tag{36}$$

Em que: τ – é a tortuosidade (adimensional); K" constante de Koseny (adimensional) e seu valor varia com o tipo de leito dado que $\tau = L_d/H_L$.

Substituindo a expressão $(-\Delta P/H_L)$ da equação (36) na Lei de Darcy (25) obtém-se a expressão para a constante K" em função da permeabilidade específica:

$$\begin{aligned} v_s &= K_p \frac{(-\Delta P)}{H_L} = K_p K" v_s \mu a_S^2 \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3} \\ K" &= \frac{1}{K_p} \frac{\varepsilon_b^3}{\mu a_S^2 (1-\varepsilon_b)^2} = \frac{\mu}{P_S} \frac{\varepsilon_b^3}{\mu a_S^2 (1-\varepsilon_b)^2} \\ K" &= \frac{1}{P_S} \frac{\varepsilon_b^3}{a_S^2 (1-\varepsilon_b)^2} \end{aligned} \tag{37}$$

Carman demonstrou que:

$$K" = K_0 (L_d / H_L) \tag{38}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

A relação $\tau=L_d/H_L$ recebe o nome de tortuosidade; K_0 é um fator que depende da seção transversal do duto. A tortuosidade será sempre maior que a unidade ($L_d > H_L$) e quanto maior seu valor, mais tortuoso serão os dutos no interior do leito.

Equação de Burke-Plumer

A equação de Koseny-Carman foi derivada para escoamento em regime laminar. Se o regime é turbulento a equação de Hagen-Poiseuille pode ser aplicada para escoamento de fluido através de duto, para regime turbulento:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 4f\,\frac{L_d\left(v_d\right)^2}{2D_h} \tag{39}$$

Em que: f – fator de atrito de Fanning (adimensional).

Substituindo as definições de D_h e v_d na equação 39, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 4f\,\frac{1}{2}\frac{\left(v_S L_d\right)^2}{\left(\varepsilon_b H_L\right)^2}\frac{L_d a_S\left(1-\varepsilon_b\right)}{\varepsilon_b} \tag{40}$$

Sabendo que $L_d = \tau\, H_L$ e que a área superficial específica da partícula está relacionada com seu diâmetro, sabendo que $a_S=6/D_{esf}$, se obtém:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 3\left(\tau\right)^3 f\,\frac{\rho v_S^2\left(1-\varepsilon_b\right)}{D_{esf}\left(\varepsilon_b\right)^3} \tag{41}$$

Definindo o fator de atrito modificado como $f'=f(\tau)^3$, tem-se a equação de Burke-Plummer, em que o fator de atrito é obtido experimentalmente em função do número de Reynolds da partícula:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 3f'\,\frac{\rho\left(1-\varepsilon_b\right)}{D_{esf}\left(\varepsilon_b\right)^3}v_S^2 \tag{42}$$

NAO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Equação de Ergum

Todas as equações vistas anteriormente são utilizadas para regime laminar ou turbulento, separadamente. No entanto, a equação de Ergum é conveniente, dado que é a única que considera regime laminar e turbulento ao mesmo tempo.

Das equações de Koseny-Carman e Burke-Plummer, é possível descrever a perda de carga por unidade de altura do leito segundo a expressão:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = \alpha' \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{(\varepsilon_b)^3} v_S + \beta' \frac{(1-\varepsilon_b)}{(\varepsilon_b)^3} v_S^2 \qquad (43)$$

Em que α' e β' são coeficientes experimentais e foram encontrados por alguns autores como sendo: $a=\alpha' 36K''$ e $b=\beta' 3f'$. Assim, é possível escrever uma combinação das equações Koseny-Carman e Burke-Plummer utilizando as equações ($a_S=6/D_{esf}$), (36) e (42):

$$\frac{\Delta P}{H_L} = \alpha' \frac{36K'' \mu (1-\varepsilon_b)^2}{(D_{esf})^2 (\varepsilon_b)^3} v_S + \beta' \frac{3f' \rho}{D_{esf}} \frac{(1-\varepsilon_b)}{(\varepsilon_b)^3} v_S^2 \qquad (44)$$

Da equação (44) se obtém a equação para o fator de atrito modificado:

$$3f' = \frac{\Delta P}{H_L} \frac{D_{esf} (\varepsilon_b)^3}{\rho v_S^2 (1-\varepsilon_b)} \qquad (45)$$

Multiplicando a equação (44) pela expressão $\frac{D_{esf}}{\rho v_S^2} \frac{\varepsilon_b^3}{(1-\varepsilon_b)}$:

$$\frac{(-\Delta P)}{H_L} \frac{D_{esf}}{\rho v_S^2} \frac{\varepsilon_b^3}{(1-\varepsilon_b)} = a \frac{\mu v_S}{(D_{esf})^2} \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3} \frac{D_{esf}}{\rho v_S^2} \frac{\varepsilon_b^3}{(1-\varepsilon_b)} + b \frac{\rho v_S^2}{D_{esf}} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b^3} \frac{D_{esf}}{\rho v_S^2} \frac{\varepsilon_b^3}{(1-\varepsilon_b)}$$

$$3f' = a \frac{\mu}{D_{esf} \rho v_s} (1-\varepsilon_b) + b \qquad (46)$$

$$3f' = a \frac{(1-\varepsilon_b)}{N_{\mathrm{Re},p}} + b$$

Na equação (46) em que aparece o $N_{Re,p}$, deve-se considerar que o diâmetro da partícula é o diâmetro de uma esfera.

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Observa-se que assim como na equação (43) as constantes *a* e *b* da equação (46) são obtidas a partir de dados experimentais em que a expressão para $3f'$ é plotada versus $(1-\varepsilon_b)/ N_{Re,p}$, portanto, ajustando os dados a uma reta, obtém-se as constantes *a* (coeficiente angular) e *b* (coeficiente linear).

Grande número de resultados experimentais sobre leitos de sólidos granulares mostraram que $a = 150$ e $b = 1{,}75$, substituindo os valores dos coeficientes na equação (44), obtém-se a equação de Ergum:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 150\frac{\mu}{\left(D_{esf}\right)^2}\frac{\left(1-\varepsilon_b\right)^2}{\varepsilon_b^3}v_S + 1{,}75\frac{\rho}{D_{esf}}\frac{\left(1-\varepsilon_b\right)}{\varepsilon_b^3}v_S^2 \qquad (47)$$

A equação (47) pode ser utilizada para o cálculo da perda de carga do fluido que percola um leito de partículas esféricas independente do regime de escoamento.

A equação de Ergum (47) se reduz a equação de Koseny-Carman e Burke-Plummer para baixos valores de Reynolds da partícula e para altos valores de Reynolds a equação de Ergum se reduz à equação de Burke-Plummer.

No entanto, a equação (47) só é válida para partículas esféricas, para partículas do leito que apresentam formas variadas, Kuni e Levenspiel expressaram a equação (48) em termos do diâmetro equivalente da partícula:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 150\frac{\mu}{\left(D_{eq}\right)^2}\frac{\left(1-\varepsilon_b\right)^2}{\varepsilon_b^3}v_S + 1{,}75\frac{\rho}{D_{eq}}\frac{\left(1-\varepsilon_b\right)}{\varepsilon_b^3}v_S^2 \qquad (48)$$

O primeiro termo da equação de Ergun é predominante para o regime laminar, o segundo termo tem maior importância para valores mais elevados de Reynolds, devido ao termo quadrático de velocidade.

Yang (2003): utilizou a equação de Ergun para determinar a esfericidade de partículas irregulares, portanto, para baixos valores de vazão volumétrica, forças viscosas predominam e a equação (47) é rearranjada para ϕ:

$$\phi = \left[\frac{150H_L(1-\varepsilon_b)^3\left(\frac{lnH_{L0}-lnH_{L1}}{t}\right)\mu}{D_p^2\varepsilon_b^2\rho g\left(1-\frac{H_L}{H_{L1}}\right)}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad H_{L0} > H_{L1} > H_L$$

O experimento deve ser conduzido com um leito fixo de partículas irregulares e drenando o líquido em fluxo laminar da altura do leito H_{L0} até H_{L1} e medindo o tempo t.

Exemplo 3: As propriedades físicas de sementes de maça, secas a 30ºC com teor de umidade de 0,442 kg água/kg, foram obtidas experimentalmente em laboratório. A densidade das sementes foi de 1232,7 kg/m^3, a densidade aparente do leito de 706,9 kg/m^3 e altura de 0,4 m. O diâmetro médio da partícula foi determinado experimentalmente a partir de dados obtidos pela passagem das sementes entre 2 peneiras de aberturas consecutivas sendo seu valor igual a 7,253 mm. A densidade do ar de secagem a 30ºC é de 1,167 kg/m^3 e a viscosidade é 1,988 x 10^{-5} Pa.s. As condições estudadas foram: (i) perda de carga = 998,8 Pa exercida com velocidade = 0,922 m/s; (ii) perda de carga = 1217,8 Pa exercida com velocidade = 1,027 m/s. Determine a esfericidade efetiva das sementes de maça. Considere que as partículas são irregulares, nem compridas e nem curtas, $\phi * D_p \approx D_{eq}$.

3. Tipos de leito

Os leitos têm princípios semelhantes, mas apresentam diferenças em seu funcionamento, como a existência ou não de fluidização, o uso de vibração, etc.

Os leitos mais utilizados na indústria são o fixo, fluidizado, vibrofluidizado e jorro.

O leito fluidizado apresenta algumas vantagens com relação ao leito fixo, já que aumenta a transferência de calor e massa, maiores velocidades de reação por sua uniformidade, fácil escoamento em dutos, pois os sólidos se comportam como fluidos. Além disso, são compactos, com estrutura simples e de menor custo. Sua desvantagem está na dificuldade em manter um gradiente de temperatura, formação de aglomerados e aumento no consumo de energia, quando comparado ao leito fixo.

O leito vibrofluidizado apresenta algumas vantagens em relação ao leito fluidizado, já que a aplicação de vibração mecânica facilita a fluidização, reduz o tempo de processo e a quantidade de ar, além de eliminar zonas mortas no equipamento. A desvantagem desse tipo de equipamento é o maior custo com o equipamento, repercutindo em aumento de custo no processo.

O leito de jorro tem como características fundamentais o movimento cíclico do leito e o efetivo contato entre o fluido e as partículas, além disso, tem a vantagem de apresentar maiores taxas de transferência de calor e massa, além de um maior controle da

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

temperatura, em relação aos outros tipos de leito. A sua grande desvantagem está a dificuldade no estabelecimento do regime fluidodinâmico em larga escala.

3.1 Leito fixo

Em um leito fixo, o fluido escoa através de uma fase sólida particulada estacionária. Nete tipo de leito a velocidade do fluido (v) é menor que a velocidade mínima necessária para o leito expandir (v_{mf}), portanto, $v < v_{mf}$, em que v_{mf} é definida como a velocidade mínima de fluidização.

Neste tipo de equipamento, o leito não fluidiza e as partículas permanecem estáticas.

Exemplos de leito fixo: colunas de destilação, secagem e extração sólido-líquido.

Perda de carga (ΔP):

A ΔP em leito fixo é proveniente do escoamento de fluido em um leito fixo, sendo composto o leito por tubulações, placa de orifícios, ciclone etc, além do próprio leito de partículas. A ΔP em leito fixo, nesta parte da disciplina somente abrangerá a perda de carga provocada pelo leito de partículas.

A perda de carga em leito fixo pode ser determinada pelas equações vistas anteriormente, dependendo do tipo de regime de escoamento, laminar, transição ou turbulento.

A equação de Koseny-Carman é utilizada para regime laminar, portanto, $N_{Re,p} < 10$:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 150 \frac{\mu}{(D_{esf})^2} \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3} v_S \qquad (49)$$

A equação de Burke-Plummer é utilizada para regime turbulento, portanto $N_{Re,p} > 100$:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 1{,}75 \frac{\rho}{D_{esf}} \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b^3} v_S^2 \qquad (50)$$

Quando o regime de escoamento é desconhecido, a equação de Ergum (48) deve ser empregada, pois ela é aplicável para quando ambos os regimes ocorrem ao mesmo tempo.

Potencia de bombeamento (P_o):

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

A potência de bombeamento do fluido através do leito fixo é determinada pela equação (52):

$$P_o = \frac{\Delta P}{\rho}\dot{m} = \frac{\Delta P}{\rho}\rho\dot{Q} = \Delta P\dot{Q} \qquad (51)$$

Em que: P_o = potência (W); m = vazão mássica (kg/s); Q = vazão volumétrica (m^3/s).

3.2 Leito fluidizado

Os leitos fluidizados são caracterizados, basicamente por apresentar partículas suspensas e distantes entre si quando estão no escoamento com um fluido. As partículas quando entram no regime de fluidização, não sofrem arraste no leito. Os leitos fluidizados são amplamente utilizados em processos industriais, pois proporcionam uma mistura intensa entre o fluido e a partícula, contribuindo para o aumento da transferência de calor e massa, assim como permitindo uma maior uniformidade de distribuição de temperatura e de concentração das fases no interior do equipamento.

Os leitos fluidizados são utilizados industrialmente na síntese e em reações catalíticas, na combustão e gaseificação do carvão, tais exemplos, incluem procedimentos reacionais. O leito fluidizado também é utilizado em processos físicos (não reacionais), como exemplo, na secagem de partículas, recobrimento e granulação de sólidos.

Regimes fluidodinâmicos na fluidização:

Os regimes fluidodinâmicos na fluidização dependem das características físicas da fase particulada (distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas, forma, densidade, etc). e da fase fluida (viscosidade dinâmica, densidade, etc), bem como das condições operacionais da coluna (temperatura e vazão da fase fluida, compactação da fase particulada, altura e diâmetro).

O estado de fluidização no leito é atingido quando o equilíbrio entre a força de atrito das partículas sólidas e o fluxo ascendente, equilibra o peso do leito. A velocidade do escoamento (fluido v) necessária para fluidizar os sólidos é denominada de v_{mf} – velocidade mínima de fluidização, situação em que os sólidos ficam suspensos no fluido $v = v_{mf}$ em que o leito atinge uma altura mínima de fluidização H_{mf} (Figura 3b).

Ao aumentar a velocidade de escoamento do fluido, o leito sofre uma maior expansão, em sistema gás-sólido, quando a velocidade do fluido é maior que a velocidade mínima

NÃO DIVULGAR

de fluidização quando $v>v_{mf}$, ocorre a instabilidade do leito, podendo haver ou não a formação de bolhas ou canais (Figura 3d), neste ponto, o leito atinge a altura de fluidização H_f (observadas na Figura 3 c e d). Quando as partículas mais leves são arrastadas pelo fluido, ocorre a elutriação.

Quando o leito é fixo a velocidade do fluido v é menor que a v_{mf} $v<v_{mf}$, neste ponto, a aluta do leito de partículas não se desloca, sendo conhecido como leito fixo, com altura H_L (altura do leito), conforme Figura 3 a.

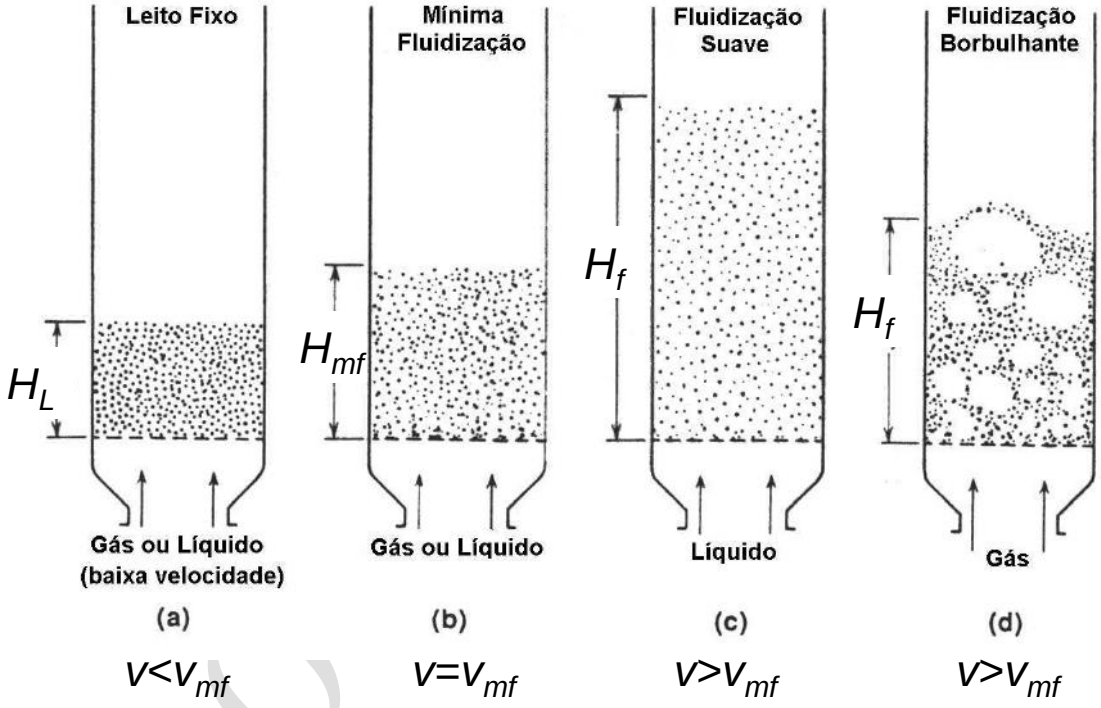


Figura 3. Comportamento em leito fixo (a), leito em estado de mínima fluidização (b) e leito fluidizado (c) e (d).

Perda de carga (ΔP):

As partículas fluidizarão ($v= v_{mf}$) quando as forças de arraste e empuxo exercidas elo fluido sobre as partículas forem iguais a força da gravidade exercida sobre as partículas no leito. A expressão para perda de carga na condição de mínima fluidização é dada pela expressão (52).

$$-\Delta P = H_{mf}(1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)g \qquad (52)$$

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Uma característica importante da fluidização da equação (52) é que ela pode ser relacionada com a altura do leito (H_L) com a sua porosidade (ε_b), pois nessa condição, a a queda de pressão é constante. Desta forma, para duas vazões distintas de fluido, obtêm-se duas alturas diferentes com porosidades relativas:

$$H_{L1}(1-\varepsilon_{b1}) = H_{L2}(1-\varepsilon_{b2}) \qquad (53)$$

Velocidade mínima de fluidização (v_{mf}):

A estimativa da v_{mf} é um parâmetro essencial, pois é um dos mais importantes na fluidização. Essa velocidade representa o ponto de transição entre o leito fixo e o fluidizado.

A v_{mf} pode ser obtida experimentalmente obtendo dados de ΔP versus a velocidade, da curva obtida pode-se obter os dados de v_{mf} experimental e sua correspondente ΔP_{mf}.

A ΔP é dada pela equação de Ergum, que pode ser simplificada dependendo do regime de escoamento.

Nas condições de fluidização incipiente, a ΔP, para fluido newtoniano, pode ser igualada a equação de Ergun (48):

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)g = 150\frac{\mu}{(D_{eq})^2}\frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3}v_{mf} + 1{,}75\frac{\rho}{D_{eq}}\frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3}v_{mf}^2 \qquad (54)$$

Rearranjando a Equação (54) e introduzindo a definição do diâmetro equivalente em que $\phi * D_p \approx D_{eq}$, tem-se:

$$\frac{(N_{Remf})^2}{\emptyset} + \frac{150}{1{,}75}\frac{(1-\epsilon_{mf})}{\emptyset^2}N_{Remf} - \frac{\epsilon_{mf}{}^3}{1{,}75}N_{Ar} = 0 \qquad (54a)$$

A solução da equação quadrática (54a) raiz única é:

$$K_1 = (N_{Remf})^2 + K_2 N_{Remf} = N_{Ar}$$

$$N_{Remf} = \left(\left(\frac{K_2}{2K_1}\right)^2 + \frac{1}{K_1}N_{Ar}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{K_2}{2K_1}$$

em que:

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

$$K_1 = \frac{1{,}75}{\varepsilon_{mf}^3 \emptyset} \text{ e } K_2 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \emptyset^2} \qquad (54b)$$

Para regime laminar, a equação (54) pode ser simplificada para:

$$v_{mf} = \frac{D_{eq}^2(\rho_p - \rho)g}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1-\varepsilon_{mf})} \qquad (55) \text{ com } N_{Remf}<20$$

Enquanto para regime turbulento a equação (54) torna-se:

$$\left(v_{mf}\right)^2 = \frac{D_{eq}(\rho_p - \rho)g}{1{,}75\rho} \varepsilon_{mf}^3 \qquad (56) \text{ com } N_{Remf}>1000$$

A ΔP em leito fixo é proveniente do escoamento de fluido em um leito fixo, sendo composto o leito por tubulações, placa de orifícios, ciclone etc, além do próprio leito de partículas. A ΔP em leito fixo, nesta parte da disciplina somente abrangerá a perda de carga provocada pelo leito de partículas.

As equações (54) (55) e (56) são aplicáveis quando se conhecem os parâmetros D_{eq}, ρ_p, ρ e μ, assim mesmo, ainda é necessário conhecer a ε_{mf} e a ϕ para obter o valor do N_{Remf} e então a v_{mf}.

Uma alternativa para substituição das equações (54), (55) e (56) são as equações (57) e (58):

$$\frac{D_p v_{mf} \rho}{\mu} = \left[(28{,}7)^2 + 0{,}0494\left(\frac{\left(D_p\right)^3 \rho\left(\rho_p - \rho\right)g}{\mu^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}} - 28{,}7 \qquad (57a)$$

$$N_{\mathrm{Re}\,mf} = \left[(28{,}7)^2 + 0{,}0494 N_{Ar}\right]^{\frac{1}{2}} - 28{,}7 \qquad (57b)$$

Em que as equações (57a) e (57b) são válidas para partículas grossas ou para regime laminar $N_{Remf}<20$.

Para partículas finas ou em regime turbulento $N_{Remf}>1000$ utiliza-se a equação (58):

$$N_{\mathrm{Re}\,mf} = \left[(33{,}7)^2 + 0{,}0408 N_{Ar}\right]^{\frac{1}{2}} - 33{,}7 \qquad (58)$$

em que:

$$N_{\mathrm{Re}mf} = \frac{v_{mf} D_p \rho}{\mu}; N_{Ar} = \frac{D_p^3 \rho(\rho_p - \rho)g}{\mu^2}$$

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

(59)

Sendo N_{Remf} e N_{Ar} número adimensionais de Reynolds na mínima fluidização e de Arquimedes, respectivamente.

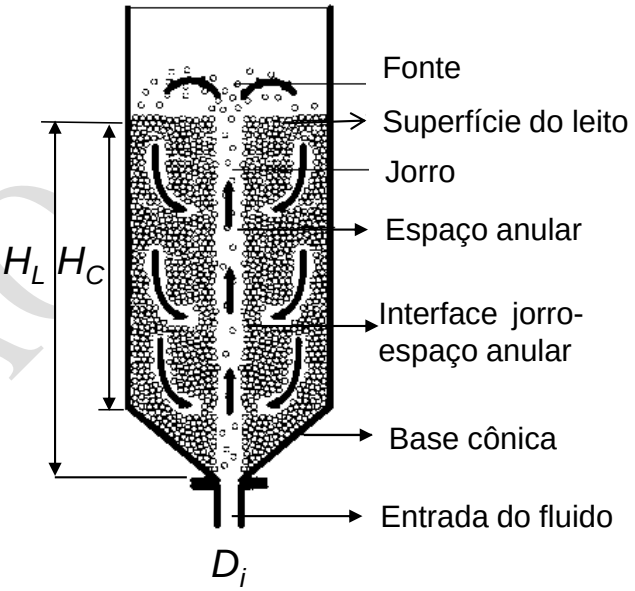
Potencia de bombeamento:

Para o leito fluidizado, a potência de bombeamento é calculada do mesmo modo que para leito fixo, ou seja, com a equação (51).

3.3 Leito de Jorro

Aplicado na secagem, recobrimento de partículas, mistura de sólidos, tratamento de sementes, etc.

Este tipo de equipamento promove, por meio de movimentos cíclicos, contato efetivo entre fluido e sólido particulado.



Em que:

H_L – altura total do leito;
H_C – altura da coluna;
D_C – diâmetro da coluna;
D_i – diâmetro interno do tubo alimentador

NÃO UTILIZAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Os principais parâmetros ligados ao projeto de equipamentos de leito de jorro são:

- Perda de carga em função da vazão do fluido;
- Perda de carga no jorro estável;
- Velocidade mínima de jorro;
- Altura máxima do jorro estável.

Perda de carga (Δ*P*):

A perda de carga neste equipamento esta relacionada a perda que ocorre um pouco antes do jorro ser estabelecido.

A perda de carga máxima para leito de jorro pode ser dada pela expressão:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H_L(\rho_b)g} = \left(\frac{6{,}8}{f_a}\left(\frac{D_i}{D_C}\right) + 0{,}8\right) - 34{,}4\frac{D_p}{H_L} \tag{60}$$

Em que D_i é o diâmetro interno do tubo alimentador (m); D_C é o diâmetro da coluna (m), f_a o fator de atrito (entre 1,25 a 3,2) adimensional.

Velocidade mínima de jorro:

$$v_{mj} = \left(\frac{D_p}{D_C}\right)\left(\frac{D_i}{D_C}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2gH_L(\rho_p - \rho)}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{61}$$

Altura máxima de jorro estável:

$$H_L = 0{,}67\frac{(D_C)^{\frac{4}{3}}}{(D_p)^{\frac{1}{3}}} \tag{62}$$

Bibliografia:

1) CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p. 2012;
2) FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008;
3) GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4ed. New York: Prentice Hall, 1026p. 2010;

NÃO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

4) MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 1140 p. 2005;
5) PERRY's chemical engineers handbook. Editor in Chief Don W. Green; Late Editor Robert H. Perry New York: McGraw-Hill, 2008.
6) TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. Operações Unitárias na indústria de alimentos. v1 1. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.

NAO DIVULGAR

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

Anexo I – C_D em função do número de Reynolds para partículas com diferentes esfericidades.

