

## **8– FLUIDIZAÇÃO DE SÓLIDOS**

É A MELHOR E MAIS MODERNA TÉCNICA DA ENGENHARIA QUÍMICA PARA OBTER CONTATO EFICIENTE ENTRE SÓLIDOS E FLUIDOS, E TAMBÉM COMO TRANSPORTÁ-LOS ENTRE VASOS, TUBULAÇÕES, ETC.

O CONTATO ENTRE SÓLIDOS E FLUIDOS PODE SER FEITO DE TRÊS MANEIRAS:

LEITO FIXO

LEITO MÓVEL

LEITO FLUIDIZADO

LEITO FIXO:

O SÓLIDO DIVIDIDO É COLOCADO DENTRO DE TUBOS OU VASOS E ATRAVÉS DOS QUAIS UM FLUIDO CIRCULA DE BAIXO PARA CIMA OU DE CIMA PARA BAIXO ATRAVÉS DO LEITO POROSO.

LEITO MÓVEL:

NESSE CASO O SÓLIDO EM PARTÍCULAS É CONTINUAMENTE ALIMENTADO PELO TOPO DO LEITO E REMOVIDO PELA BASE. O FLUIDO PODE SUBIR OU DESCER PELO LEITO. O SÓLIDO MOVE-SE COMO A AREIA NUMA AMPULHETA.

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.

O SISTEMA FLUIDIZADO É UMA SUSPENSÃO QUE POSSUI A MAIORIA DAS CARACTERÍSTICAS NORMALMENTE APRESENTADAS PELOS FLUIDOS

VERDADEIROS, PODENDO PASSAR POR TUBULAÇÕES E VÁLVULAS E ATÉ DE UM VASO PARA OUTRO POR DIFERENÇA DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA.

AS CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA SÃO MUITO MELHORES QUE NOS CASOS DE LEITO FIXO E MÓVEL.

### 8.1 VANTAGENS DOS LEITOS DE SÓLIDOS FLUIDIZADOS:

ÁREA ESPECÍFICA DO SÓLIDO EXPOSTA AO FLUIDO É MUITO MAIOR DO QUE EM LEITO FIXO PORQUE AS PARTÍCULAS PODEM SER BEM MENORES.

GRANDES VELOCIDADES DE REAÇÃO SÃO CONSEGUIDAS.

OS LEITOS FLUIDIZADOS APRESENTAM CONDUTIVIDADE TÉRMICA BASTANTE ELEVADA COMPARADA COM A DO GÁS.

OS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA ENTRE O LEITO E AS PAREDES DOS VASOS SÃO MUITO MAIORES DOS QUE OCORREM NOS LEITOS FIXOS.

O TRANSPORTE DO LEITO PARA DENTRO E FORA DOS EQUIPAMENTOS É FÁCIL, POIS SE COMPORTAM COMO UM LÍQUIDO.

A ENERGIA TÉRMICA, POR CONSEQUÊNCIA, PODE SER FACILMENTE TRANSPORTADA.

### 8.2 DESVANTAGENS DOS LEITOS FLUIDIZADOS:

NÃO É POSSÍVEL MANTER GRADIENTE AXIAL DE TEMPERATURA OU DE CONCENTRAÇÃO NO LEITO.

O ATRITO É MUITO INTENSO, PRODUZINDO MUITO PÓ QUE É ARRASTADO PELO LEITO, O QUE CAUSA A NECESSIDADE DE REPOSIÇÃO CONSTANTE DO SÓLIDO E NECESSIDADE DE EQUIPAMENTOS PARA EVITAR A SAIDA DE SÓLIDO (PÓ) NO GÁS.

EROSÃO SEVERA DE EQUIPAMENTOS DEVIDO A GRANDE ENERGIA CINÉTICA DO SÓLIDO.

OS FATORES QUE INFLUENCIAM NA EROSÃO, SÃO: TAMANHO, FORMA, VELOCIDADE E DUREZA DAS PARTÍCULAS.

O CONSUMO DE ENERGIA PARA A OPERAÇÃO COM LEITO FLUIDIZADO É MAIOR QUE NO CASO DE LEITO ESTÁTICO DE MESMO PESO, PORQUE A PERDA DE CARGA É MAIOR. REALMENTE, O LEITO SÓ FLUIDIZA QUANDO A PERDA DE PRESSÃO SE TORNA IGUAL AO PESO DO SÓLIDO POR UNIDADE DE ÁREA.

O TAMANHO DOS EQUIPAMENTOS É MAIOR QUANDO OPERAM COM LEITO FLUIDIZADO EM RELAÇÃO AO CORRESPONDENTE ESTÁTICO.

### 8.3 CONDIÇÕES PARA FLUIDIZAÇÃO:

INICIALMENTE O GÁS PASSA PELO LEITO FIXO SEM CAUSAR NENHUM MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS. COMO A VELOCIDADE DO GÁS É GRADUALMENTE ELEVADA, A PERDA DE CARGA AUMENTARÁ, MAS AS PARTÍCULAS AINDA NÃO SE MOVEM E A ALTURA DO LEITO PERMANECERÁ A MESMA.

AO ATINGIR CERTA VELOCIDADE DO GÁS, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO AUMENTARÁ ATÉ ANULAR A FORÇA GRAVITACIONAL DAS PARTÍCULAS, OU SEJA, O PESO DO LEITO.

A PARTIR DAÍ QUALQUER PEQUENO AUMENTO DE VELOCIDADE CAUSARÁ O MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS.

COM MAIS AUMENTO DA VELOCIDADE, AS PARTÍCULAS PASSAM A FICAR SEPARADAS EM DISTÂNCIAS SUFICIENTES PARA SE MOVEREM NO LEITO. ASSIM COMEÇA A VERDADEIRA FLUIDIZAÇÃO.

DESDE QUE O LEITO ESTÁ FLUIDIZADO, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO PERMANECERÁ CONSTANTE, ENQUANTO QUE A ALTURA DO LEITO CONTINUARÁ A CRESCER COM O AUMENTO DA VELOCIDADE DO GÁS.

DO MESMO MODO SE A VELOCIDADE DO GÁS PARA O LEITO FLUIDIZADO FOR REDUZIDA, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO PERMANECERÁ CONSTANTE E A ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO DIMINUIRÁ.

IMPORTANTE:

PORTANTO HAVERÁ UMA VELOCIDADE MÍNIMA PARA SE INICIAR A FLUIDIZAÇÃO.

#### 8.4 VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO ( $V_{min}$ ):

NA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO, OU VELOCIDADE CRÍTICA DE FLUIDIZAÇÃO, TEREMOS:

**A POROSIDADE MÍNIMA**, SERÁ A MENOR POROSIDADE PARA O LEITO FLUIDIZADO (POROSIDADE NO INÍCIO DA FLUIDIZAÇÃO).

A POROSIDADE DO SÓLIDO MACIÇO É ZERO. PORÉM O LEITO DE SÓLIDO FRAGMENTADO PASSA A TER UMA POROSIDADE QUE DEPENDE DA GRANULOMETRIA E DA FORMA DAS PARTÍCULAS.

À MEDIDA QUE O LEITO SE EXPANDE, A POROSIDADE VAI CRESCENDO. QUANDO OCORRE A FLUIDIZAÇÃO CONTÍNUA, A POROSIDADE TORNA-SE IGUAL A 1,0.

A **MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA** DO LEITO FLUIDIZADO, A MAIOR MASSA ESPECÍFICA QUE O LEITO FLUIDIZADO TERÁ (MASSA ESPECÍFICA DO LEITO NO INÍCIO DA FLUIDIZAÇÃO).

HÁ UMA CORRELAÇÃO EMPÍRICA QUE PERMITE CALCULAR A MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA DE UM LEITO FLUIDIZADO, QUE SE APLICA PARA LEITOS COM PARTÍCULAS DE ATÉ 500 MICRONS.

$$\rho_{MAX} = 0,356 \times \rho_s \times [(\log D_s) - 1]$$

$\rho_{MAX}$  = massa específica máxima (t/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = massa específica do sólido (t/m<sup>3</sup>)

$D_s$  = diâmetro da partícula sólida (microns).

POR OUTRO LADO, HÁ UMA RELAÇÃO ENTRE A POSOSIDADE E AS MASSAS ESPECÍFICAS DA PARTÍCULA SÓLIDA E DO FLUIDO (LÍQUIDO OU GÁS).

$$\epsilon_{MIN} = (\rho_s - \rho_{MAX}) / (\rho_s - \rho_f)$$

ENTÃO NA POROSIDADE MÍNIMA, TEM-SE:

$\epsilon_{MIN}$  = porosidade mínima (%)

$\rho_{MAX}$  = massa específica máxima do leito (t/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = massa específica da partícula sólida (t/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$  = massa específica do fluido (t/m<sup>3</sup>)

Assim, a VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO pode ser obtida partindo-se de que:

Perda de carga através do leito = Peso do leito por unidade de área

O que permite que haja uma força de flutuação (empuxo) do fluido deslocado.

$$\Delta p = g \cdot (1 - \epsilon) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot L$$

L = altura total do leito compacto ou fluidizado (m ou ft)

$\Delta p$  = perda de carga no leito compacto ou fluidizado (N/m<sup>2</sup> ou lbf/ft<sup>2</sup>)

Na fluidização insipiente, no início da fluidização, a porosidade ( $\epsilon$ ) é a porosidade mínima para fluidização ( $\epsilon_{\text{MIN}}$ ). Então:

$$(\Delta p)/(L) = g \cdot (1 - \epsilon_{\text{MIN}}) \cdot (\rho_S - \rho_F) \quad (1)$$

Usando a EQUAÇÃO DE ERGUN que considera que as perdas por viscosidade e as perdas de energia cinética são aditivas, temos a referida equação a seguir:

$$\begin{aligned} (\Delta p)/(L) = & [(150 \cdot v \cdot \mu) / (\Phi^2 \cdot D_s^2)] \times [(1 - \epsilon)^2 / (\epsilon^3)] + \\ & + [(1,75 \cdot \rho_F \cdot v^2) / (\Phi \cdot D_s)] \times [(1 - \epsilon) / (\epsilon^3)] \quad (2) \end{aligned}$$

Onde:

$v$  = velocidade média (m/s ou ft/s)

$\mu$  = viscosidade absoluta [cP ou lb/(ft.s)]

$\Phi$  = esfericidade da partícula

$D_s$  = diâmetro da partícula sólida (m ou ft)

$\rho_F$  = massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup> ou lbm/ft<sup>3</sup>)

$\rho_S$  = massa específica da partícula sólida (kg/m<sup>3</sup> ou lbm/ft<sup>3</sup>)

$V_{\text{min}}$  = velocidade mínima para fluidização (m/s ou ft/s)

**IMPORTANTE:**

Observe que uma pequena mudança na porosidade tem um grande efeito na perda de carga, o que torna difícil prever o valor da perda de carga com precisão e reproduzir valores experimentais após o leito ter se compactado novamente.

Igualando as equações (1) e (2), teremos:

$$\begin{aligned} & [(150.V_{min}.\mu)/(\Phi^2.Ds^2)] \times [(1 - \epsilon_{MIN})/(\epsilon_{MIN}^3)] + \\ & + [(1,75.\rho_F.V_{min}^2)/(\Phi.Ds)] \times [(1)/(\epsilon_{MIN}^3)] = g.(Q_S - Q_F) \end{aligned}$$

Para PARTÍCULAS MUITO PEQUENAS, somente o termo referente ao fluxo laminar da equação de Ergun é significativo, podendo ser desprezado o segundo termo referente as perdas de energia cinética.

O Número de Reynolds para a partícula sólida (Res) é calculado:

$Res = Ds.Go/\mu$  sendo:

$Ds$  = diâmetro da partícula sólida (m ou ft)

$Go$  = velocidade mássica do fluido se aproximando da partícula ( $kg/m^2.s$  ou  $lbm/ft^2.s$ )

$\mu$  = viscosidade absoluta [cP ou  $lb/(ft.s)$ ]

Para Reynolds da partícula sólida ( $Res$ ) < 1 a expressão da

VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO fica:

$$V_{min} = [g.(Q_S - Q_F)/150.\mu] \times [(\epsilon_{MIN}^3)/(1 - \epsilon_{MIN})] \times (\Phi^2.Ds^2)$$

IMPORTANTE:

Em muitas aplicações de fluidização, o tamanho das partículas sólidas está na faixa de 50 a 500 microns.

Contudo a fluidização também é usada para partículas sólidas maiores que 1 mm.

No limite de PARTÍCULAS MUITO GRANDES, o termo referente ao fluxo laminar torna-se desprezível e a VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO varia com a raiz quadrada do tamanho da partícula.

Para Reynolds da partícula sólida ( $Re_s$ ) > 1000 a expressão da

VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO fica:

$$V_{min} = [(\Phi \cdot D_s \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot \epsilon_{MIN}^3) / (1,75 \cdot \rho_f)]^{1/2}$$

IMPORTANTE:

PODE HAVER DISCORDÂNCIA ENTRE ESSA VELOCIDADE CALCULADA E O VALOR MEDIDO EXPERIMENTALMENTE. ISTO PODE SER ATRIBUÍDO A:

- a) ESCOAMENTO PREFERENCIAL DAS FASES EM VIRTUDE DO QUAL A FORÇA DE ARRASTE DO LEITO PELO FLUIDO TORNA-SE MENOR.
- b) AÇÃO DE FORÇAS ELETROSTÁTICAS (NO CASO DE FLUIDIZAÇÃO COM GASES).
- c) AGLOMERAÇÃO DE PARTÍCULAS
- d) ATRITO DO SÓLIDO NA PAREDE DO VASO.

IMPORTANTE:

OPERAÇÕES PRÁTICAS SÃO CONDUZIDAS COM O DOBRO OU MAIS DESSE VALOR CALCULADO ACIMA (WALAS). USAR TESTES EM PILOTOS SEMPRE QUE POSSÍVEL (É O CASO DE PROJETOS)

HÁ TAMBÉM CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA A VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO, COMO A DE LEVA, A DE MILLER E LOGWINUK.

### 8.5 TIPOS DE FLUIDIZAÇÃO:

As equações para velocidade mínima de fluidização se aplicam a fluidização com líquidos e com gases. Acontece que além da velocidade mínima, as aparências dos leitos fluidizados com líquido e com gases quase sempre são completamente diferentes.

Quando se fluidiza areia com água a fluidização é caracterizada por uma grande expansão uniforme do leito e altas velocidades. É chamada FLUIDIZAÇÃO PARTICULADA.

Leitos de sólidos fluidizados com ar usualmente apresentam a chamada FLUIDIZAÇÃO AGREGATIVA OU FLUIDIZAÇÃO EM BOLHAS. Na velocidade superficial um tanto maior que a velocidade mínima, boa parte do gás passa pelo leito como bolhas ou vazios os quais estão quase livres de sólido e somente uma pequena fração do gás flui nos espaços entre as partículas.

As partículas se movem erraticamente e são suportadas pelo fluido. Por isso o termo FLUIDIZAÇÃO EM BOLHAS DEFINE MELHOR O FENÔMENO.

### 8.6 EXPANSÃO DE LEITOS FLUIDIZADOS:

Em ambos os tipos de fluidização o leito se EXPANDE quando a VELOCIDADE SUPERFICIAL AUMENTA e como a perda de carga permanece constante, a PERDA DE CARGA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DIMINUI COM O AUMENTO DA POROSIDADE.

$$(\Delta p)/(L) = g \cdot (1 - \epsilon) \cdot (\rho_s - \rho_f)$$

Na FLUIDIZAÇÃO PARTICULADA, expansão uniforme, usa-se o termo da equação de Ergun, para a velocidade do fluido (v):

$$v = [g \cdot (\rho_s - \rho_f) / 150 \cdot \mu] \times [(\epsilon^3) / (1 - \epsilon)] \times (\Phi^2 \cdot D_s^2)$$

Para fluidização particulada de GRANDES PARTÍCULAS, EM ÁGUA, a expansão do leito é esperada ser maior do que a prevista pela base da equação de Ergun, uma vez que a perda de carga depende parcialmente da energia cinética do fluido. Então há uma correlação empírica proposta por Lewis, Gilliland e Bauer, em função do número de Reynolds (Res). A equação é:

$$v = \epsilon^m$$

Os valores de (m) podem ser obtidos de gráfico da literatura.

Para fluidização em bolhas, há uma equação empírica para a velocidade:

$$v = 0,7 (g \cdot D_b)^{1/2}$$

Onde  $D_b$  = diâmetro equivalente da partícula esférica

### 8.7 ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO:

A ALTURA DO LEITO, TAMBÉM CHAMADA PROFUNDIDADE, É A DISTÂNCIA VERTICAL ENTRE O PONTO ONDE O FLUIDO É ALIMENTADO E A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO LEITO.

À MEDIDA QUE A VELOCIDADE DO FLUIDO CRESCE, A POROSIDADE CRESCE E A ALTURA DO LEITO TAMBÉM AUMENTA.

Sendo:

L = altura total do leito expandido ou fluidizado (m ou ft)

L<sub>min</sub> = altura do leito na fluidização insipiente (m ou ft)

$\epsilon$  = porosidade do leito expandido (%)

$\epsilon_{\text{MIN}}$  = porosidade mínima do leito para fluidização (%)

Pelo balanço material:

$$L = L_{\text{min}} \times \frac{(1 - \epsilon_{\text{MIN}})}{(1 - \epsilon)}$$

ESTA EXPRESSÃO VALE IGUALMENTE PARA O CASO DO LEITO ESTÁTICO E PARA O LEITO DE POROSIDADE MÍNIMA.

### 8.8 PERDA DE CARGA NO LEITO FLUIDIZADO:

QUANDO A FLUIDIZAÇÃO TEM INÍCIO, A PERDA DE CARGA É A DIFERENÇA DE PRESSÃO NECESSÁRIA PARA SUSPENDER AS PARTÍCULAS SÓLIDAS NO LEITO. O BALANÇO DE FORÇAS SERÁ:

$$\Delta p \cdot S = (g/gc) \cdot L_{\text{min}} \cdot S \cdot [(1 - \epsilon_{\text{MIN}}) \cdot (\rho_s - \rho_f)]$$

Sendo  $S$  = area transversal do vaso (torre vazia) em (m<sup>2</sup>).

À MEDIDA QUE O LEITO VAI SE EXPANDINDO, SUA ALTURA AUMENTA, MAS A PERDA DE CARGA PERMANECE PRÁTICAMENTE IGUAL AO PESO APARENTE DO SÓLIDO POR UNIDADE DE ÁREA DO LEITO.

ISTO OCORRE, PORQUE O ATRITO SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS COM O FLUIDO SUPERA AS OUTRAS CAUSAS DE PERDA DE ENERGIA, OU SEJA, O ATRITO NA PAREDE E AUMENTO DE ALTURA DO LEITO.

LEWIS, GILLILAND E BAUER, VERIFICARAM QUE A PERDA DE CARGA MEDIDA EXPERIMENTALMENTE PODE SER ATÉ 20% MAIOR DO QUE O PESO DO LEITO, FATO QUE ATRIBUÍRAM AO ATRITO DAS PARTÍCULAS CONTRA A PAREDE, POIS O EFEITO OBSERVADO FOI MUITO SUPERIOR AO ATRITO FLUIDO.

ESSE EFEITO É DESPREZÍVEL PARA LEITOS POUCO PROFUNDOS (L MENOR QUE 2,6 DIÂMETROS), AUMENTANDO À MEDIDA QUE A RELAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE E O DIÂMETRO AUMENTA.

ALGUMAS CORRELAÇÕES EMPÍRICAS VALEM TANTO PARA LEITOS FLUIDIZADOS, COMO LEITOS FIXOS.

A CORRELAÇÃO MAIS IMPORTANTE É A DE Leva, EM FUNÇÃO DE UM NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO (Rem):

$$REM = (D_s \cdot v \cdot \rho_f) / \mu$$

$D_s$  = diâmetro da partícula sólida (m)

$v$  = velocidade do fluido (vazão/área transversal do vaso) (m/s)

$\rho_f$  = massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  = viscosidade absoluta do fluido ( $\text{kg/m.s}$ )

PARA REYNOLDS < 10 A EXPRESSÃO É:

$$\Delta p = (200 \cdot \mu \cdot L \cdot v) / (g_c \cdot D_s^2) \times [(1 - \epsilon) / (\epsilon^3)] \times \lambda_L^2 \text{ (kgf/m}^2\text{)}$$

ONDE O FATOR DE FORMA DE LEVA  $\lambda_L = 0,25 \cdot (a)/(b)^{2/3}$

OUTRAS CORRELAÇÕES PARA PERDA DE CARGA NOS LEITOS FLUIDIZADOS SÃO AS DE CARMAN, ZENS E OTHMER, ERGUN.

A equação de Carman-Kozeny pode ser usada para valores baixos do número de Reynolds.

$$\Delta p = (180 \cdot \mu \cdot L \cdot v) / (g_c \cdot D_s^2) \times [(1 - \epsilon)^2 / (\epsilon^3)]$$