

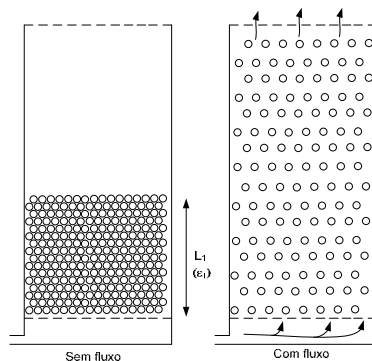
# Fluidização

N. Bojorge

1

## Definição

- A **fluidização** ocorre quando um fluxo de fluido (gás ou líquido) ascendente através de um leito de partículas adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, **porém sem arrastá-las junto com o fluido**.



O leito assume então o **aspecto de um líquido** em ebulição e devido a isso surgiu o termo **“fluidizado”**

2

## Aplicação

A **fluidização** é empregada em:

- **Secagem,**
- Mistura,
- Revestimento de partículas,
- Aglomeração de pós,
- Aquecimento e resfriamento de sólidos,
- Congelamento.

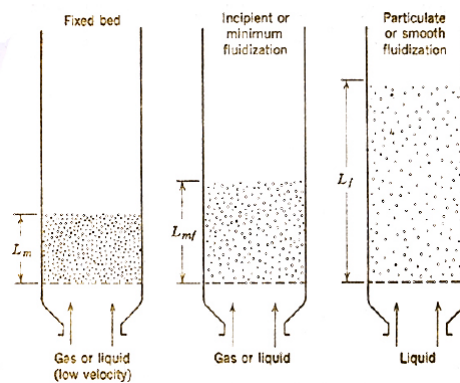
### Vantagens da Fluidização:

- Elevados coeficientes de transferência de calor e massa;
- Boa mistura dos sólidos;
- A área superficial das partículas sólidas fica completamente disponível para a transferência.

3

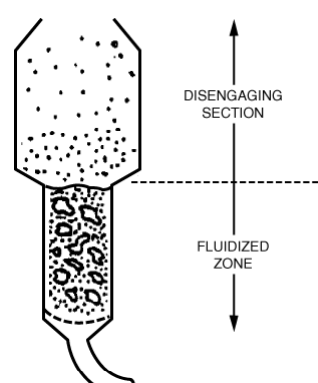
## Fluidização

A eficiência na utilização de um leito fluidizado depende em primeiro lugar do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Abaixo desta velocidade o leito não fluidiza; e muito acima dela, os sólidos são carregados para fora do leito.



4

### Características



The diagram shows a vertical reactor vessel. The lower portion is labeled 'FLUIDIZED ZONE' with a downward-pointing arrow, indicating the region where the solid particles are in contact with the fluid. The upper portion is labeled 'DISENGAGING SECTION' with an upward-pointing arrow, indicating the region where the fluid and particles are separated. A dashed horizontal line separates the two zones.

From D. Kunii and O. Levenspiel, *Fluidization Engineering* (Melbourne, Fla.: Robert E. Krieger Publishing Co., 1969).

- O material fluidizado é quase sempre um sólido e o meio fluidizante é um líquido ou um gás.
- As características e comportamento de um leito fluidizado é fortemente dependente de ambas propriedades difásicas, da fase sólida e das propriedades da fase líquida ou do gás.
- À velocidade muito baixa: O fluido percorre pequenos e tortuosos canais, perdendo energia e pressão; sendo  $\Delta P$  (Perda de Carga) função da permeabilidade, rugosidade das partículas,  $\rho$ ,  $\mu$  e velocidade superficial.
- Com aumento da velocidade: Atinge um valor que a ação dinâmica do fluido permite reordenação das partículas, de modo a oferecer menor resistência à passagem.
- Maiores Velocidades: As partículas deixam de estar em contato e parecem como líquido em ebulição.

5

- Geralmente, leitos fluidizados industriais se caracterizam por intensa mistura axial (ao longo do leito), o que propicia as altas taxas de transferência de calor e massas nesses sistemas.



The diagram compares two types of columns. On the left is a 'Coluna de leito fixo' (fixed bed column), showing a vertical vessel with a bed of particles and a distributor at the bottom. On the right is a 'Coluna de leito fluidizado' (fluidized bed column), showing a more complex system with a distributor, a bed of particles, and a dust collector at the top. Labels include 'Coletor de pó', 'Entrada de Areia', 'Ar', 'Areia', 'Sopradores', and 'Areia Regenerada'.

Coluna de leito fixo  $\neq$  Coluna de leito fluidizado

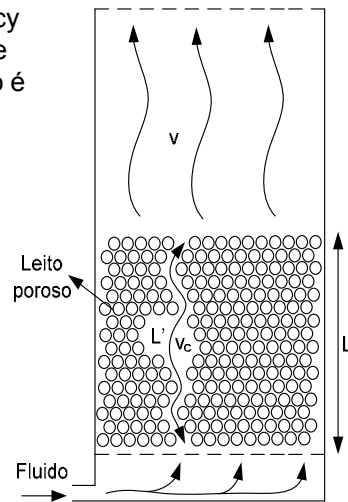
6

## Lei de Darcy:

Depois de uma série de experimentos, Darcy demonstrou que a **velocidade média ( $v$ )** de um fluido quando escoa em um leito poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão disponível para o escoamento do fluido e inversamente proporcional ao comprimento do percurso:

$$v = K \frac{(-\Delta P)}{L}$$

Onde:  
 **$(-\Delta P)$**  = queda de pressão através do leito;  
 **$L$**  = percurso realizado no leito poroso;  
 **$k$**  = constante de proporcionalidade, que depende de propriedades físicas do leito e do fluido.



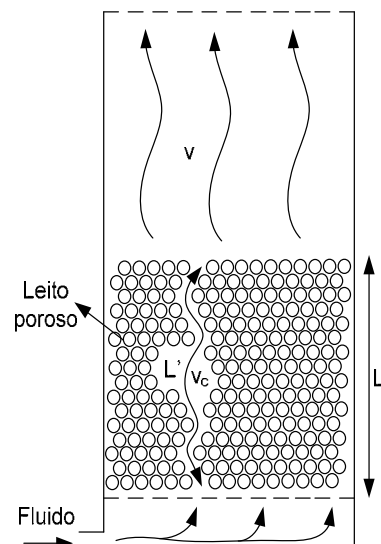
7

## Lei de Darcy

A equação de Darcy também pode ser escrita como:

$$v = \frac{1}{\alpha} \frac{(\Delta P)}{\mu L}$$

Onde:  
 **$1/\alpha$**  = coeficiente de permeabilidade;  
 **$\mu$**  = viscosidade do fluido.



8

## Superfície do leito poroso

Para caracterizar a estrutura de um leito poroso, uma série de variáveis precisam ser definidas para estudar a circulação do fluido através desse leito.

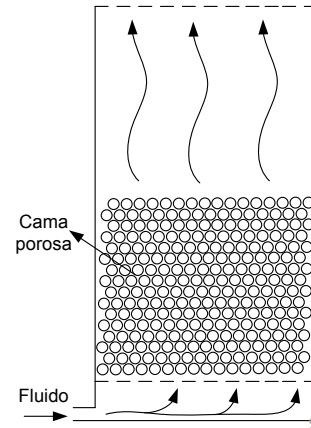
### Superfície específica do leito poroso

$$\hat{A} = \frac{\text{área do leito exposta ao fluido}}{\text{volume do leito poroso}}$$

### Superfície específica de uma partícula

$$A_p = \frac{\text{área da partícula}}{\text{volume da partícula}}$$

Considerando uma esfera:  
 área da partícula = área da superfície =  $4\pi r^2$



## Superfície específica da partícula

Para uma partícula esférica:

$$dp = \frac{6 V_p}{A_p}$$

Por definição:

$$\phi = \frac{\pi \cdot d_{eq}^2}{A_p}$$

Para partículas quase esféricas:

$$\phi = \frac{\pi \cdot d_{eq}^2}{\pi \cdot d_p^2}$$

$$d_{eq}^2 = \Phi \cdot d_p^2$$

$\Phi$  = esfericidade  
 (deq = diâmetro equivalente)  
 (dp é o diâmetro da partícula)

TABLE 8.1

Sphericity of Particles

Form of the Particle	Sphericity
Sphere	1
Cube	0.81
Cylinders	
h = d	0.87
h = 5d	0.70
h = 10d	0.58
Discs	
h = d/3	0.76
h = d/6	0.60
h = d/10	0.47
Beach sand	As high as 0.86
River sand	As low as 0.53
Other types of sand	0.75
Triturated solids	0.5–0.7
Granulated particles	0.7–0.8
Wheat	0.85
Raschig rings	0.26–0.53
Berl chairs	0.30–0.37

Source: Levenspiel, O., *Flujo de Fluidos. Intercambio de Calor*, Reverté, Barcelona, 1993.

## Porosidade

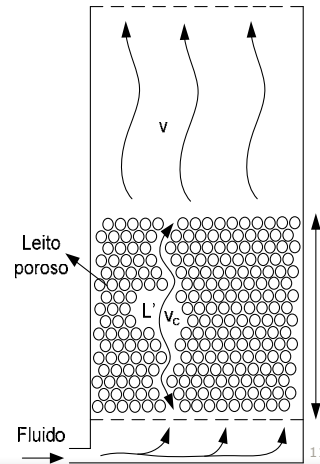
Em um leito poroso existem zonas sem partículas.

A **porosidade** ( $\varepsilon$ ) é definida como a razão entre o volume do leito que não está ocupado com material sólido e o volume total do leito:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume vazio}}{\text{Volume total do leito}}$$

Devido à **porosidade** do leito, sua superfície específica ( $A_L$ ) e a superfície da partícula ( $A_P$ ) não coincidem, mas estabelecem a seguinte relação:

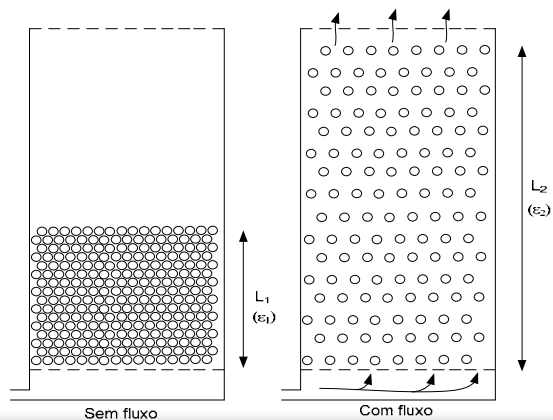
$$\hat{A} = A_P (1 - \varepsilon)$$



## Altura do leito poroso

Quando inicia-se a fluidização, há um aumento da **porosidade** do leito e da **altura** também. Essa relação é da pela seguinte expressão:

$$S L_1 (1 - \varepsilon_1) = S L_2 (1 - \varepsilon_2)$$



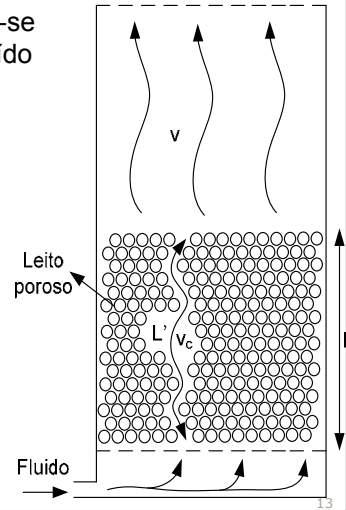
## Velocidade do fluido no reator

Considerando área de fluxo igual, através da equação anterior e de outras relações, chega-se à equação da velocidade de circulação do fluido através do canal ( $v_c$ ):

$$v_c = v \frac{L'}{L \cdot \varepsilon}$$

Onde:

$v$  = velocidade do fluido livre de partículas;  
 $L'$  = deslocamento do fluido no interior do leito  
 $L$  = altura do leito



## Regimes de escoamento

Número de Reynolds da partícula:

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot v_f \cdot d_{eq}}{\mu_f}$$

Definição do regime do fluxo do fluido:

- **Laminar** quando  $Re_p < 40$
- **Turbulento** quando  $Re_p > 40$

14

## Equação de Ergun

A equação de **Ergun** descreve a variação de pressão por unidade de comprimento do leito fluidizado.

É derivada do fator de fricção modificado, equação de Fanning, diâmetro equivalente, lei de Darcy, número de Reynolds da partícula; dados experimentais e outras pequenas considerações.

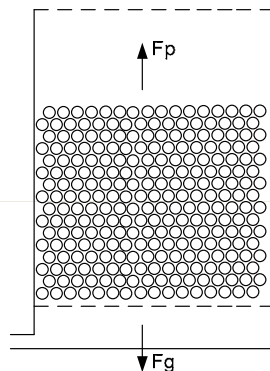
Pode ser utilizada para ambos os regimes, **laminar e turbulento**:

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\Phi_p^2 \varepsilon^3 d_p^2} v + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f}{\Phi_p \varepsilon^3 d_p} v^2$$

15

## Velocidade mínima de fluidização

O leito somente fluidizará a partir de um valor de velocidade do fluido ascendente ( $v_{mf}$ ).



Quando temos esta  $v_{mf}$ , a força de pressão do fluido ( $F_p$ ) se iguala a força peso do leito ( $F_g$ ).

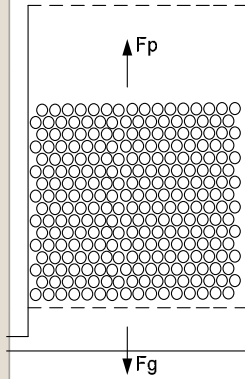
Logo,

$$(F_p) = (F_g)$$

16



## Velocidade mínima de fluidização



Sabe-se que

$$\begin{cases} Fp = (-\Delta P) \cdot S \\ Fg = (\rho_p - \rho) \cdot S \cdot L \cdot (1 - \varepsilon) g \end{cases}$$

S=área transversal da coluna que contém as partículas;

L=altura do leito)

$\rho_p$ =densidade da partícula

Assim, quando **Fp = Fg**

$$(\rho_p - \rho) \cdot S \cdot L \cdot (1 - \varepsilon) g = (-\Delta P) \cdot S$$

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon) g \quad (*)$$

17

## Velocidade mínima de fluidização

### Regime laminar

Quando o regime é laminar, a segunda parte do segundo termo da equação de Ergun é insignificante em relação à primeira, logo temos:

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu}{\Phi_p^2 \varepsilon^3 dp^2} v_{mf} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_f}{\Phi_p \varepsilon^3 dp} v_{mf}^2$$

Se  $\Phi_p = 1$

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu}{\varepsilon^3 dp^2} v_{mf}$$

Substituindo

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon) g$$

$$v_{mf} = \frac{1}{150} \frac{(\varepsilon_{mf})^3}{(1 - \varepsilon_{mf})} \frac{\rho_p - \rho}{\eta} g \cdot dp^2$$

Considerando  $\varepsilon_{mf} = \varepsilon$

18

## Velocidade mínima de fluidização

### Regime turbulento

Quando o regime é turbulento, o termo de velocidade na equação de Ergun é insignificante em relação à velocidade ao quadrado, logo temos:

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\Phi_p^2 \varepsilon^3 dp^2} v_{mf} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f}{\Phi_p \varepsilon^3 dp} v_{mf}^2$$

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho}{\varepsilon^3 dp} v^2 \quad \text{Se } \Phi_p = 1$$

Substituindo  $\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho)(1-\varepsilon)g$

$$v_{mf}^2 = 0,756 \left[ \frac{\rho_p - \rho}{\rho} g (\varepsilon_{mf})^3 dp \right]^{1/2}$$

Considerando  $\varepsilon_{mf} = \varepsilon$

19

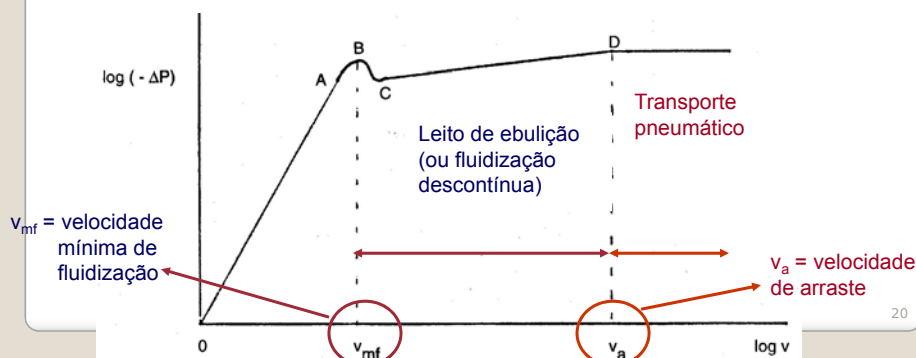
## Etapas da fluidização

**O→A:** Aumento da velocidade e da queda de pressão do fluido;

**A→B:** O leito está fluidizado;

**B→C:** Com o aumento da velocidade, há pouca variação na pressão de maneira instantânea, devido à mudança repentina da porosidade do leito;

**C→D:** A velocidade varia linearmente com a queda de pressão até chegar no ponto D. Após o ponto D, as partículas começam a ser carregadas pelo fluido e perde-se a funcionalidade do sistema.



## Porosidade mínima de fluidização

➤ Para determiná-la, usam-se as seguintes relações:

$$\varepsilon_{mf} = \frac{V_{leito\ mf} - V_p}{V_{leito\ mf}}$$

➤ Experimentalmente:

$$\Phi_p \cdot \varepsilon_{mf}^3 \approx \frac{1}{14}$$

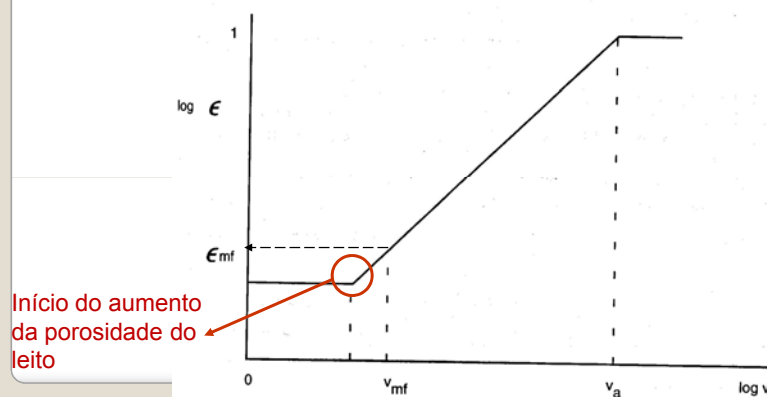
21

## Porosidade mínima de fluidização

E ainda, podemos usar a seguinte relação:

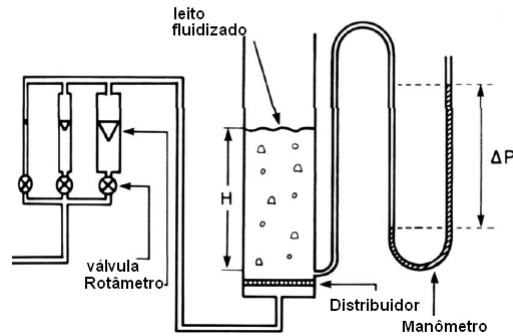
$$\varepsilon_{mf} = 1 - 0,356(\log d_p - 1) \quad , \text{lembrando que } (\varepsilon_{mf} = \varepsilon)$$

OBS:  $d_p$  é em microns ( $10^{-6}m$ ); válida para  $d_p$  entre 50 a  $500\mu m$ .



22

## Prática Experimental



- Coluna Vertical contendo as partículas de areias
- Válvula de Controle para vazão de gás ( $v_g$ )
- tubo Pitot para medir a queda da pressão ( $\Delta P$ )

23

## Objetivos

1. Determinar a densidades (ou massa específicas) médias das partículas da areia ( $\rho_s$ );
2. Determinar a velocidade mínima de fluidização ( $q_{mf}$ );
3. Determinar a porosidade mínima de fluidização ( $\epsilon_{mf}$ );
4. Determinar a queda de pressão de fluidização ( $\Delta p_f$ );
5. Prever  $q_{mf}$  com as correlações de a) Leva, b) Davies e Richardson; c) Miller e Logwinug. Comparar os valores previstos e experimental;
6. Prever  $\epsilon_{mf}$  com as correlações de Kozeny-Cármán. Comparar os valores previstos e experimental;
7. Prever a queda de pressão do leito fluidizado com o resultado teórico clássico  $p/$  leitos fluidizados a gás ( $\rho_s \gg \rho$ )

$$\Delta p_f = \frac{\text{pesodo sólido}}{\text{área transversal}}$$

8. Determinar a esfericidade medias das partículas com base nos dados experimentais,.... (continua no roteiro)

24

## PICNOMETRIA – Densidades das partículas

$$d_{\text{areia}} / \text{água} = \frac{\rho_{\text{areia}}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (\text{adimensional})$$

onde:

m1 = massa do picnômetro vazio,

m2 = massa do picnômetro com areia

m3 = massa do picnômetro com areia + água

m4 = massa do picnômetro com água

### Granulometria

diâmetro médio da areia ( ± 65/80 mesh Tyler)

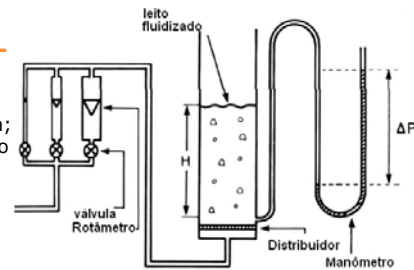
### Porosidade

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon) \rho_s g$$

25

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- Pesar uma quantidade suficiente de areia seca e transferi-la para o tubo de vidro, anotando a massa de areia utilizada;
- Compactar a areia batendo suavemente no tubo e anotar a altura do leito;
- Abrir devagar e com cuidado a válvula da linha de ar, de forma a variar a posição da esfera do rotâmetro (iniciar com baixa vazão);
- Anotar a vazão (o rotâmetro dá a vazão, diretamente, em L/min), a queda de pressão e a altura do leito para cada posição escolhida do rotâmetro, até atingir-se vazão de ar que fluidize plenamente o leito (condição em que muitas bolhas atravessam o leito – cuidado deve ser tomado para que não se atinja uma vazão alta demais que arraste as partículas);
- Medir a temperatura do ar na saída da coluna;
- Atingida a posição máxima no rotâmetro que mantém o leito fluidizado, começar a fechar gradualmente a válvula, anotando-se a vazão, a queda de pressão e a altura do leito para cada uma destas posições do rotâmetro;
- Após o fechamento total da válvula, anotar a altura do leito;
- Repetir o procedimento descrito nos itens c e d e
- Fechar completamente a válvula de ar.



26



27

### Dados Experimentais

**Tabela 1- Fluidização inicial (leito compactado)**

Q (L/min)	Q (m3/s)	q(m/s)	$\Delta P$ (cm H2O)	$\Delta P$ (Pa)	L (m)
0					
1					
2					
3					
4					
4,5					

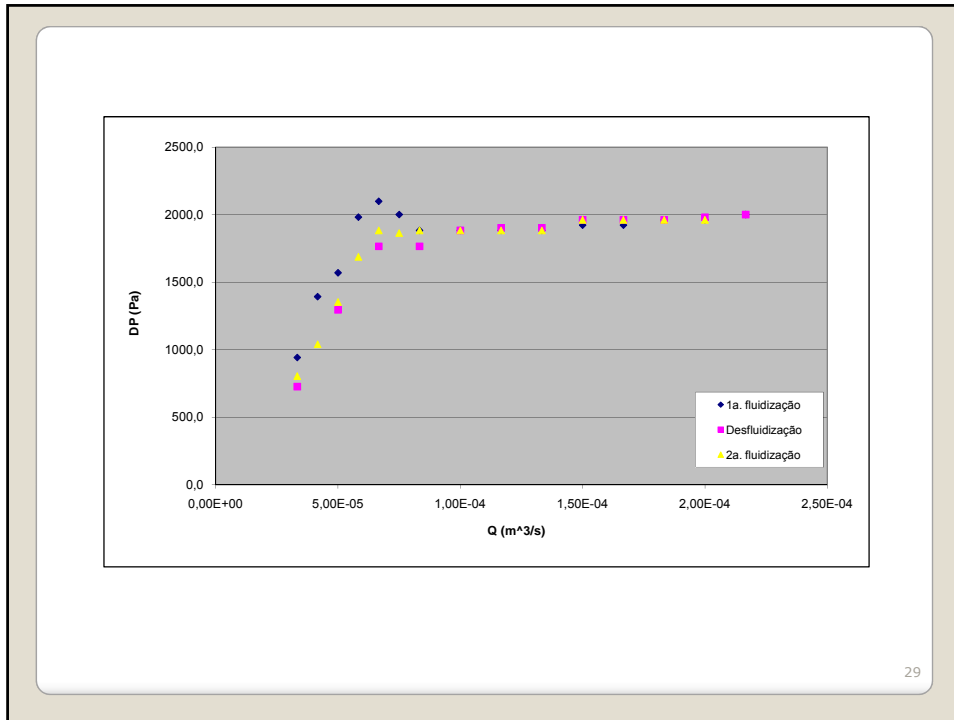
**Tabela 2 - Desfluidização**

Q (L/min)	Q (m3/s)	q(m/s)	$\Delta P$ (cm H2O)	$\Delta P$ (Pa)	L (m)
13					
12					
8					
11					
10					
9					
8					

**Tabela 3 - Nova Fluidização**

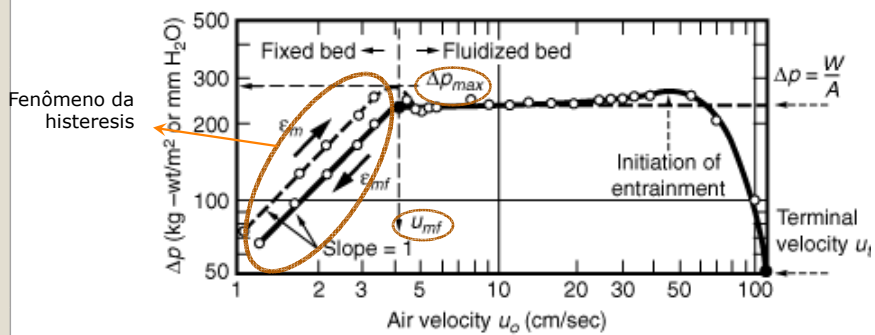
Q (L/min)	Q (m3/s)	q(m/s)	$\Delta P$ (cm H2O)	$\Delta P$ (Pa)	L (m)
2					
2,5					
3					
3,5					
4					
4,5					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

28



29

### Determinação gráfica de $q_{mf}$



From D. Kunii and O. Levenspiel, *Fluidization Engineering* (Melbourne, Fla.: Robert E. Krieger Publishing Co., 1977).

30

## Correlações:

Equação teórica:

Miller e Logwinug :

$$G_{mf} = 0,00125 \frac{d^2 (\rho_s - \rho)^{0,9} \rho^{1,1} g}{\mu}$$

Leva :

$$G_{mf} = 0,0093 \frac{d^{1,82} (\rho(\rho_s - \rho))^{0,94}}{\mu^{0,88}}$$

Davies e Richardson :

$$G_{mf} = 0,00078 \frac{d^2 \rho(\rho_s - \rho)g}{\mu}$$

onde:  $G_{mf}$  = velocidade mássica nas condições de fluidização mínima ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

IMPORTANTE: as 3 equações acima listadas, que fornecem  $G_{mf}$ , devem ser usadas no Sistema Internacional de Unidades (SI).

31

## mais informação

- Roteiros da prática de Fluidização do Prof. Medronho e do Prof. Peçanha (**Leiam!!**)
- Livros:
  - Fluidization Engineering, Kunii & Levenspiel, ISBN 0409902330
  - Gas Fluidization, Mell Pell, ISBN 0444883355
  - Circulating Fluidized Beds, Grace, ISBN 0751402710
- Artículos:
  - Grewall, N.S. et al., Comparison of Commonly used correlations for minimum fluidization velocity of small solid particles ,Powder Technol. (1980) p. 229 – 234
  - Bi et al., Review turbulent fluidization, Chem.Eng.Sci. (2000) 55, p. 4789
  - Measurement techniques, Werther, Powder Technol., 102 (1999) p. 15
- Web-sites:
  - Tutorial: [www.erpt.org/technoar/fluidbed.htm](http://www.erpt.org/technoar/fluidbed.htm)

32