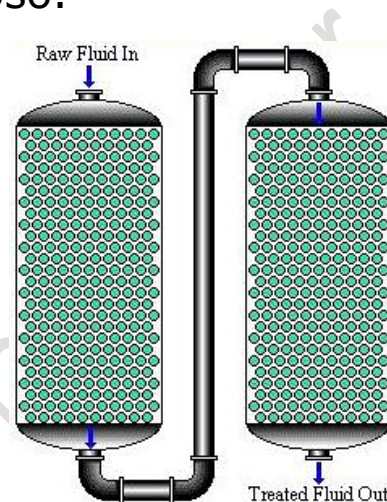


15 – ESCOAMENTO EM LEITO FIXO

O escoamento de um fluido através de um meio poroso está presente em muitas situações na engenharia: filtração, secagem, remoção de poeira, adsorção, absorção, reação catalítica, etc. O meio poroso pode ser um tecido, um leito de partículas ou um sólido poroso.

Um leito fixo ou leito empacotado é uma estrutura formada por partículas sólidas fixas, colocadas no interior de um vaso ou recipiente (coluna), por meio do qual um fluido escoar.

O caso mais simples de um sistema empacotado é um leito composto unicamente por partículas esféricas de mesmo tamanho.



Uma propriedade importante de um leito fixo é a sua porosidade (ϵ) ou fração de vazios:

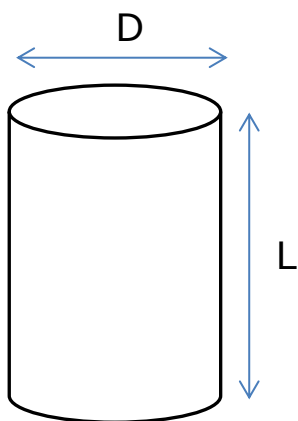
$$\epsilon = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume total do leito}} = \frac{\text{Volume total do leito} - \text{Volume de partículas}}{\text{Volume total do leito}}$$

Vamos assumir um leito fixo recheado de partículas esféricas sólidas para expressarmos outras propriedades importantes do leito.

$$\text{Diâmetro hidráulico } (D_H) = \frac{4 \times \text{Volume de escoamento}}{\text{Superfície molhada total}}$$

O volume de escoamento é o volume disponível para o escoamento (volume vazio), e a superfície molhada total é a área superficial total das partículas no leito.

$$D_H = \frac{4V_L \epsilon}{A_p} = \frac{4V_L \epsilon}{N_p a_p}$$



ε = porosidade do leito;

V_L = volume total do leito;

A_p = área superficial total do recheio;

N_p = número de partículas;

a_p = área superficial de uma partícula.

$$N_p = V_L(1-\varepsilon)/V_p$$

V_p = volume de uma partícula.

$$D_H = \frac{4V_L\varepsilon V_p}{V_L(1-\varepsilon)a_p} = \frac{4\varepsilon V_p}{(1-\varepsilon)a_p} = \frac{4\varepsilon \left[\frac{4}{3}\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \right]}{(1-\varepsilon) \left[4\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \right]} = \frac{4\varepsilon d_p}{6(1-\varepsilon)}$$

d_p = diâmetro da partícula.

Densidade de empacotamento (ρ_{emp}):

$$\rho_{emp} = \frac{\text{Massa de recheio}}{\text{Volume total do leito}} = \frac{N_p m_p}{V_L} = \frac{V_L(1-\varepsilon)}{V_p} \frac{1}{V_L} V_p \rho_p = (1-\varepsilon)\rho_p$$

ρ_p = densidade da partícula.

Velocidade superficial do fluido (V_o):

$$V_o = \frac{\text{Vazão do fluido}}{\text{Área de seção do leito}} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2}$$

Velocidade intersticial do fluido (V_i):

$$V_i = \frac{\text{Vazão do fluido}}{\text{Área de seção vazia do leito}} = \frac{4\dot{V}}{\varepsilon \pi D^2} \quad \rightarrow \quad V_i = V_o/\varepsilon$$

A queda de pressão no leito fixo pode ser estimada pela equação de Ergun:

$$\Delta P = \frac{150\mu LV_0(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{7\rho LV_0^2(1-\varepsilon)}{4d_p \varepsilon^3}$$

μ = viscosidade do fluido;

ρ = densidade do fluido.

Ex. - Ar ($\rho = 1,22 \text{ Kg/m}^3$; $\mu = 1,9 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$) escoia por um leito fixo de 0,5 m de diâmetro e 2,5 m de altura. O leito é formado por partículas esféricas de 10 mm de diâmetro e a porosidade do leito é de 0,38. A vazão mássica do ar é de 0,5 kg/s. Calcule a queda de pressão no leito.

$$V_0 = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} = \frac{4\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)}{\pi D^2} = \frac{4\left(\frac{0,5}{1,22}\right)}{\pi 0,5^2} = \frac{1,64}{0,785} = 2,1 \text{ m/s}$$

$$\Delta P = \frac{150\mu LV_0(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{7\rho LV_0^2(1-\varepsilon)}{4d_p \varepsilon^3}$$

$$\Delta P = \frac{150 \times 1,9 \times 10^{-5} \times 2,5 \times 2,1 \times (1-0,38)^2}{0,01^2 \times 0,38^3} + \frac{7 \times 1,22 \times 2,5 \times 2,1^2 \times (1-0,38)}{4 \times 0,01 \times 0,38^3}$$

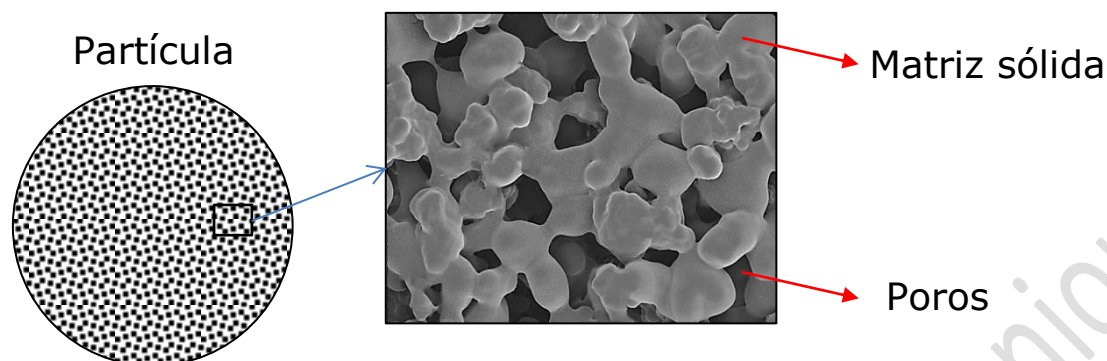
$$\Delta P = 1.048,2 + 26.596 = 27.644 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = 282 \text{ cmH}_2\text{O} = 20,7 \text{ cmHg}$$

Partículas Porosas

Se o leito fixo for preenchido com partículas sólidas porosas, a porosidade da partícula deve ser somada à

porosidade do leito, ou seja, os espaços vazios da partícula devem ser acrescentados ao espaço vazio do leito.



Podemos definir a densidade aparente da partícula porosa:

$$\rho_{ap} = \frac{\text{massa da partícula}}{\text{volume total da partícula}}$$

Neste caso, o volume total da partícula inclui o volume da matriz sólida e o volume vazio do interior da partícula.

Podemos definir a densidade real da partícula porosa:

$$\rho_p = \frac{\text{massa da partícula}}{\text{volume da matriz sólida}}$$

Assim, a porosidade da partícula pode ser expressa:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p}$$

A porosidade total do leito, ou porosidade efetiva do leito (ε_f), pode ser estimada por:

$$\varepsilon_f = \frac{\rho_{emp}}{\rho_{ap}} \varepsilon_p + \varepsilon$$

ε = porosidade do leito;

ε_p = porosidade da partícula;

ρ_{ap} = densidade aparente da partícula;
 ρ_{emp} = densidade de empacotamento do leito.

Área Superficial

Assuma uma esfera de raio R_1 :

$$\text{Volume } (V_{ol1}) = 4/3\pi R_1^3$$

$$\text{Área superficial } (A_{s1}) = 4\pi R_1^2$$

Se dividirmos a esfera inicial em 4 novas esferas idênticas:

$$V_{ol2} = 1/4 V_{ol1}$$

$$4/3\pi R_2^3 = (1/4) 4/3\pi R_1^3$$

$$R_2 = 0,63 R_1$$

A área superficial de cada nova esfera será:

$$A_{s2} = 4\pi R_2^2 = 4\pi(0,63R_1)^2 = 0,40 A_{s1}$$

Como temos 4 novas esferas, a área superficial total será:

$$A_{s2(\text{total})} = 1,60 A_{s1}$$

Isso significa que cada vez que dividimos uma esfera em quatro novas esferas, a área superficial total aumenta em 60%, ou seja, quanto menor o tamanho das partículas de um leito, maior será sua área superficial disponível.