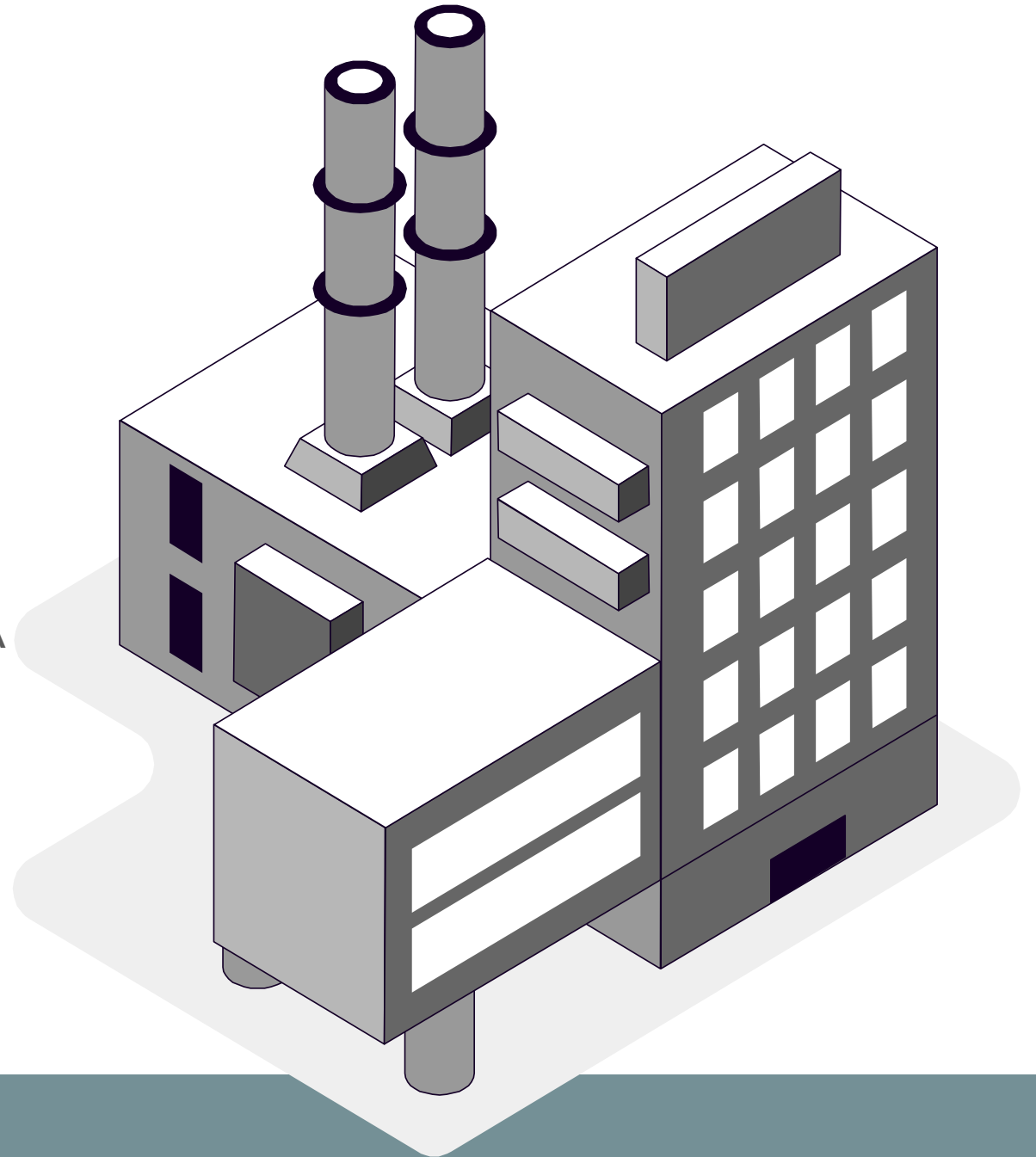


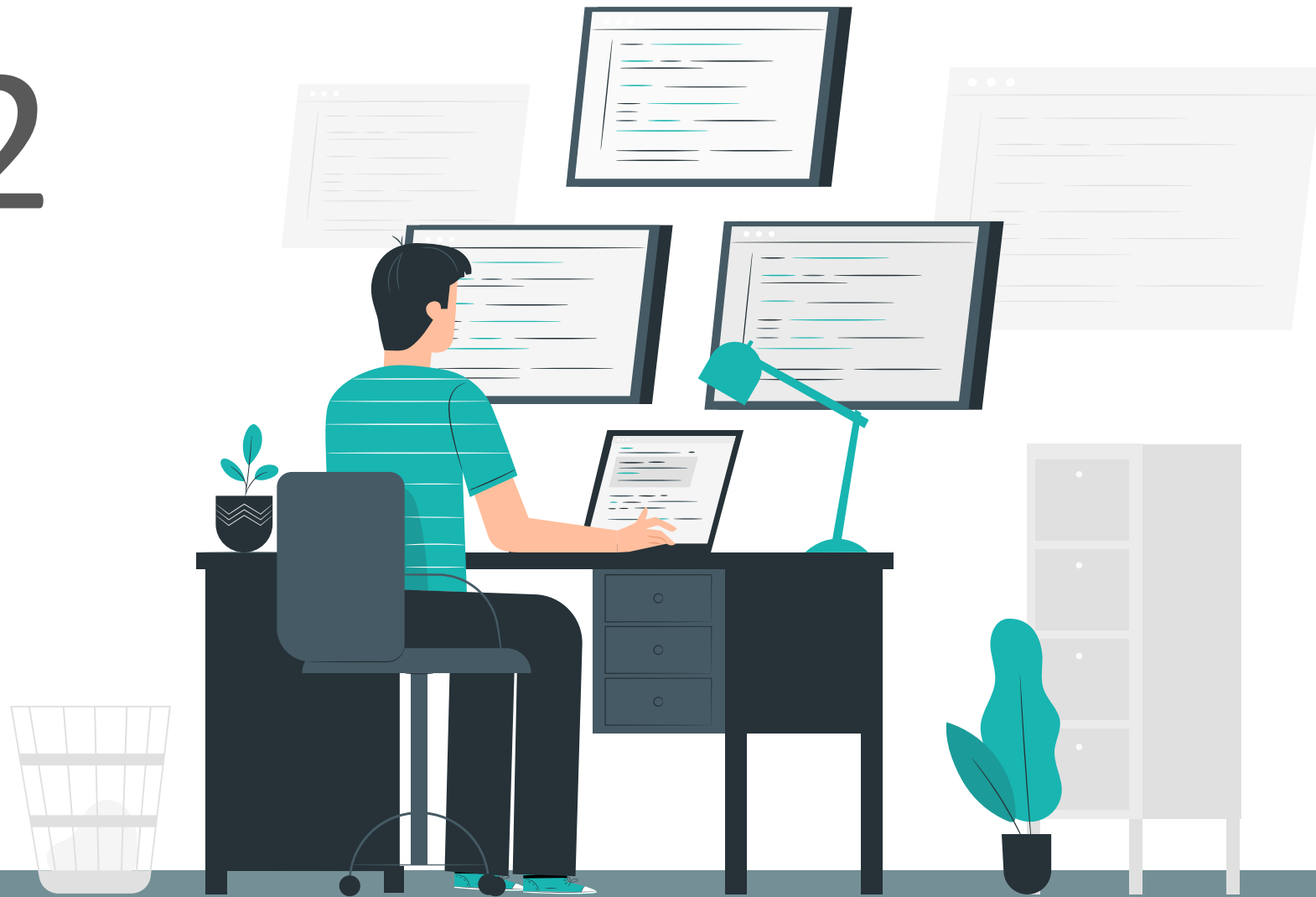
OPERAÇÕES UNITÁRIAS III

PROFª KASSIA G SANTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
UFTM



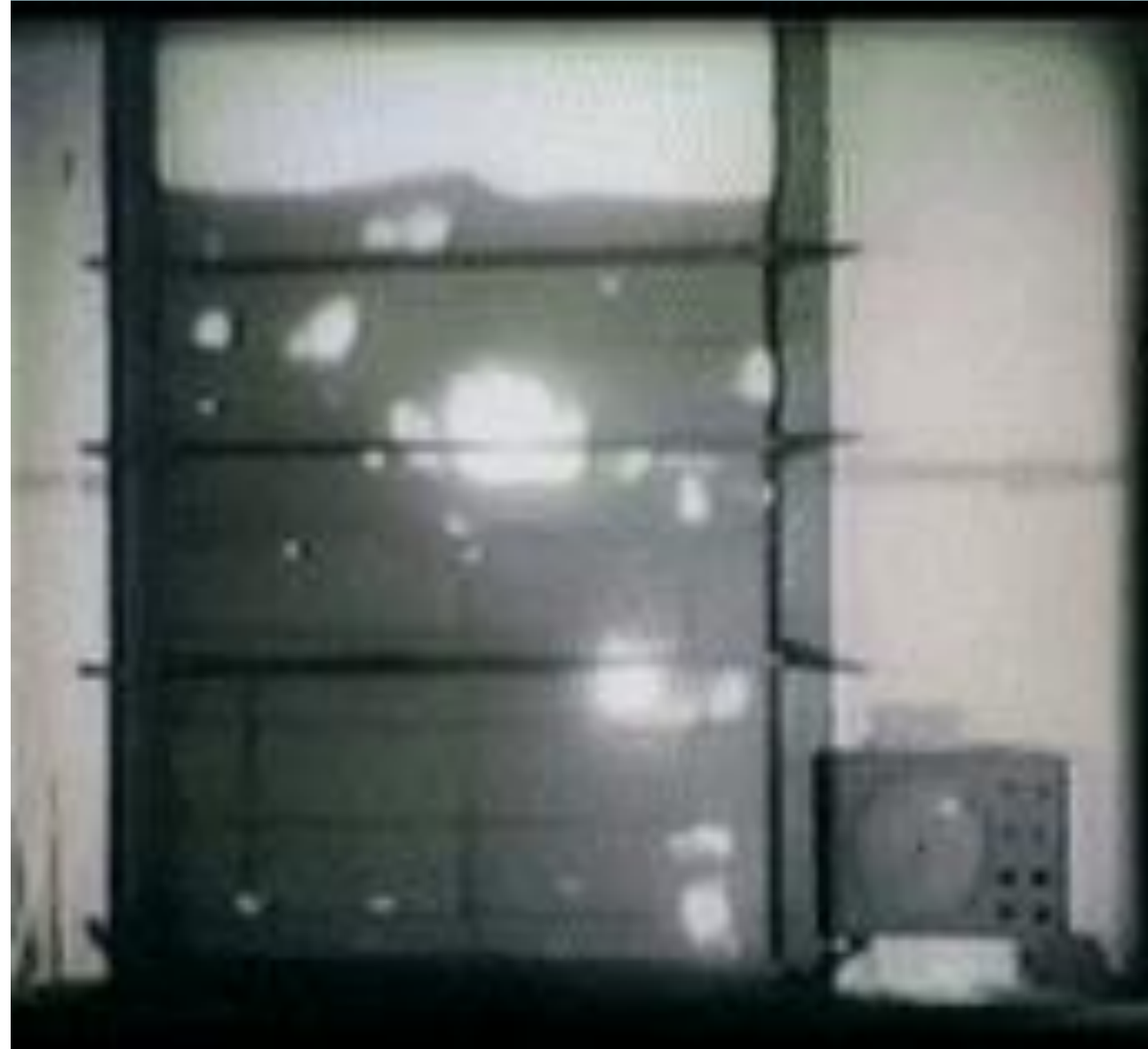
AULA 22

LEITO FLUIDIZADO



LEITO FLUIDIZADO

- ❑ Caracterizada pela percolação ascendente de um fluido (líquido ou gás) através de um leito de partículas suportadas ou apoiadas em uma placa distribuidora.
- ❑ Desenvolvida em 1922 durante a 1ª guerra para a gaseificação do carvão visando a produção de gás de síntese.
- ❑ O gaseificador Winkler foi o primeiro destes sistemas de gaseificação de carvão.



Na fluidização o conjunto fluido/sólido se comporta como líquido em ebulição.

VANTAGENS

A mistura rápida das partículas (leito isotérmico), evitando-se assim os “pontos quentes” (importante para reator químico → maior rendimento);

Elevados coeficientes de transferência de calor e massa entre partículas e fluido;

Baixo custo de operação e instalação e não possui partes móveis;

Permite operação em grandes escalas.

DESVANTAGENS

Desgaste do equipamento (abrasão);

Alguns materiais não conduzem a uma fluidização adequada: como os que pulverizam e os que aglomeram.

APLICAÇÕES

Reator Químico

- Pirólise, eletroquímico, catálise heterogênea, etc

Secagem

- Pastas, de grãos, químicos, farmacêuticos

Recobrimento

- Pellets, fertilizantes, comprimidos de liberação controlada, etc

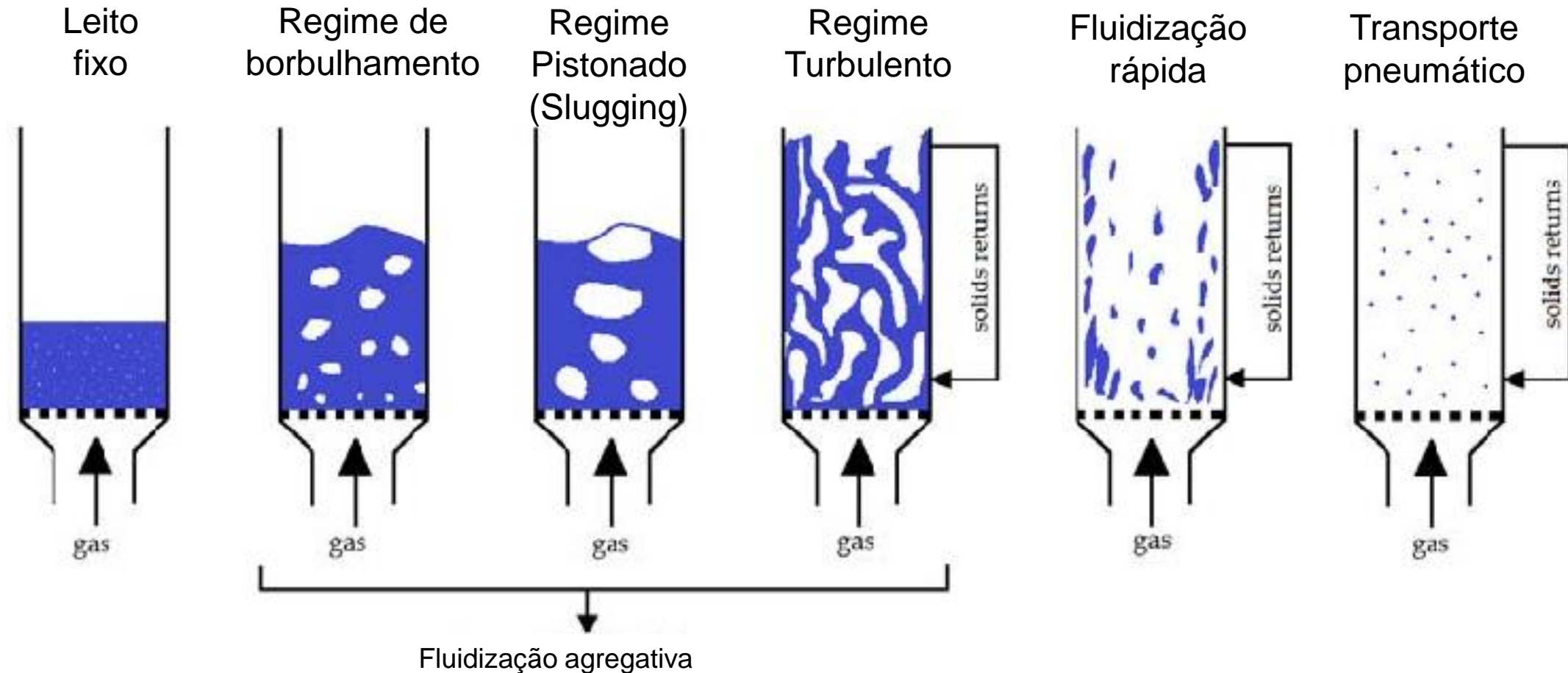
Granulação

Pastas de frutas, microemcapsulamento de óleos, fertilizantes

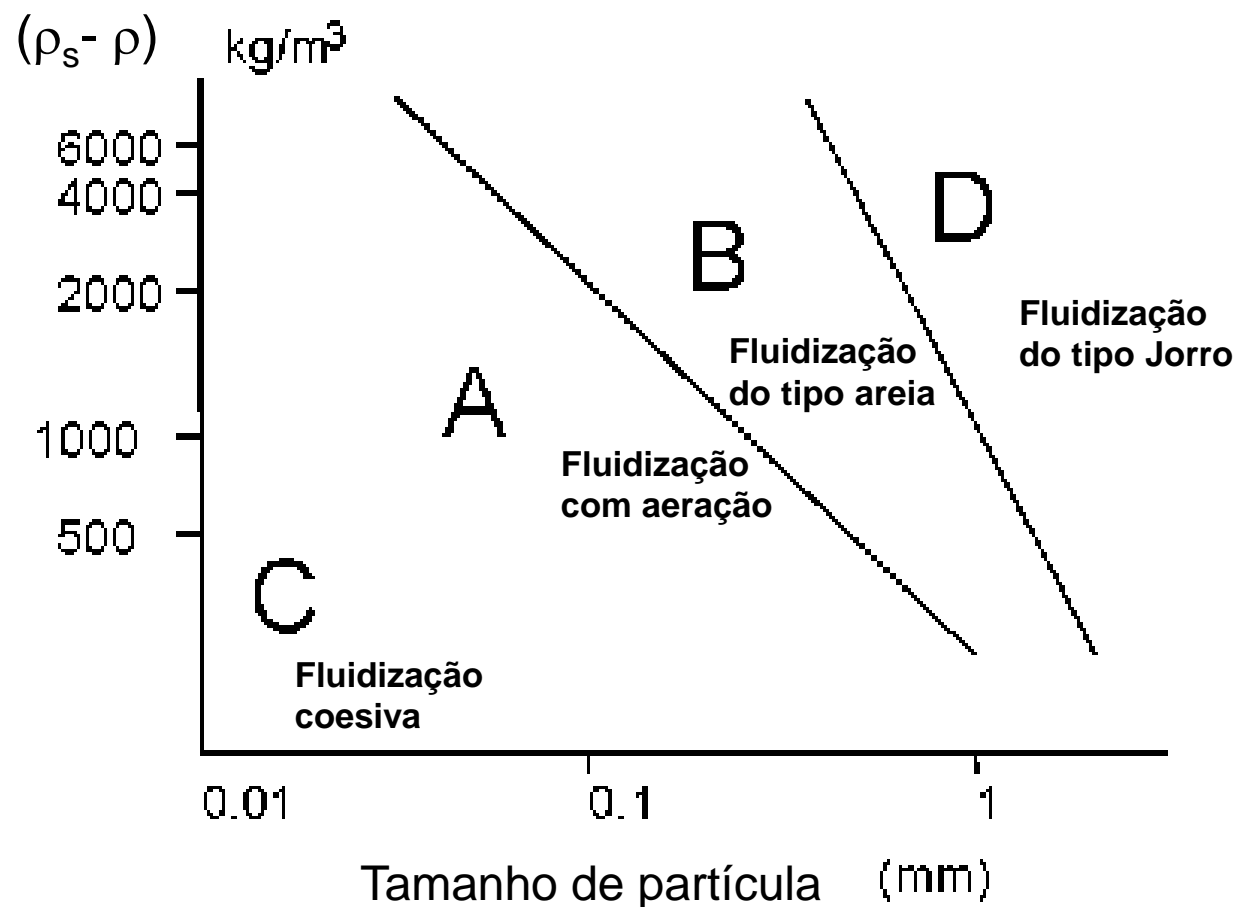
REGIMES DE FLUIDIZAÇÃO

□ HOMOGÊNEA
□ HETEROGÊNEA

Aumento da velocidade superficial do gás



A Classificação de Geldart



Grupo →	Grupo C	Grupo A	Grupo B	Grupo D
Característica mais relevante	Coseivo; de fluidização difícil	Ideal para fluidização Exibe uma faixa de fluidização não-borbulhante	Inicia o borbulhamento a U_{mf}	Sólidos grossos
Sólidos típicos	Farinha de trigo cimento	Cracking catalítico	Areia de construção	Cascalho grãos de café
POPRIEDADE ▼				
Expansão do leito	Baixa devido a canalização	Alta	Moderada	Baixa
Taxa de de-aeração	Inicialmente rápida, em seguida exponencial	Lenta, linear	Rápida	Rápida
Propriedades das Bolhas	Sem bolhas - só canalização	As bolhas quebram e coalescem; Tamanho de bolha máximo	Sem limites de tamanho	Sem limites de tamanho
Mistura de sólidos	Muito baixo	Alto	Moderado	Baixo
Gas Backmixing	Muito baixo	Alto	Moderado	Baixo
Jorro	Não	Não	Somente na superfície	Sim, mesmo em leitos profundos

DIMENSIONAMENTO

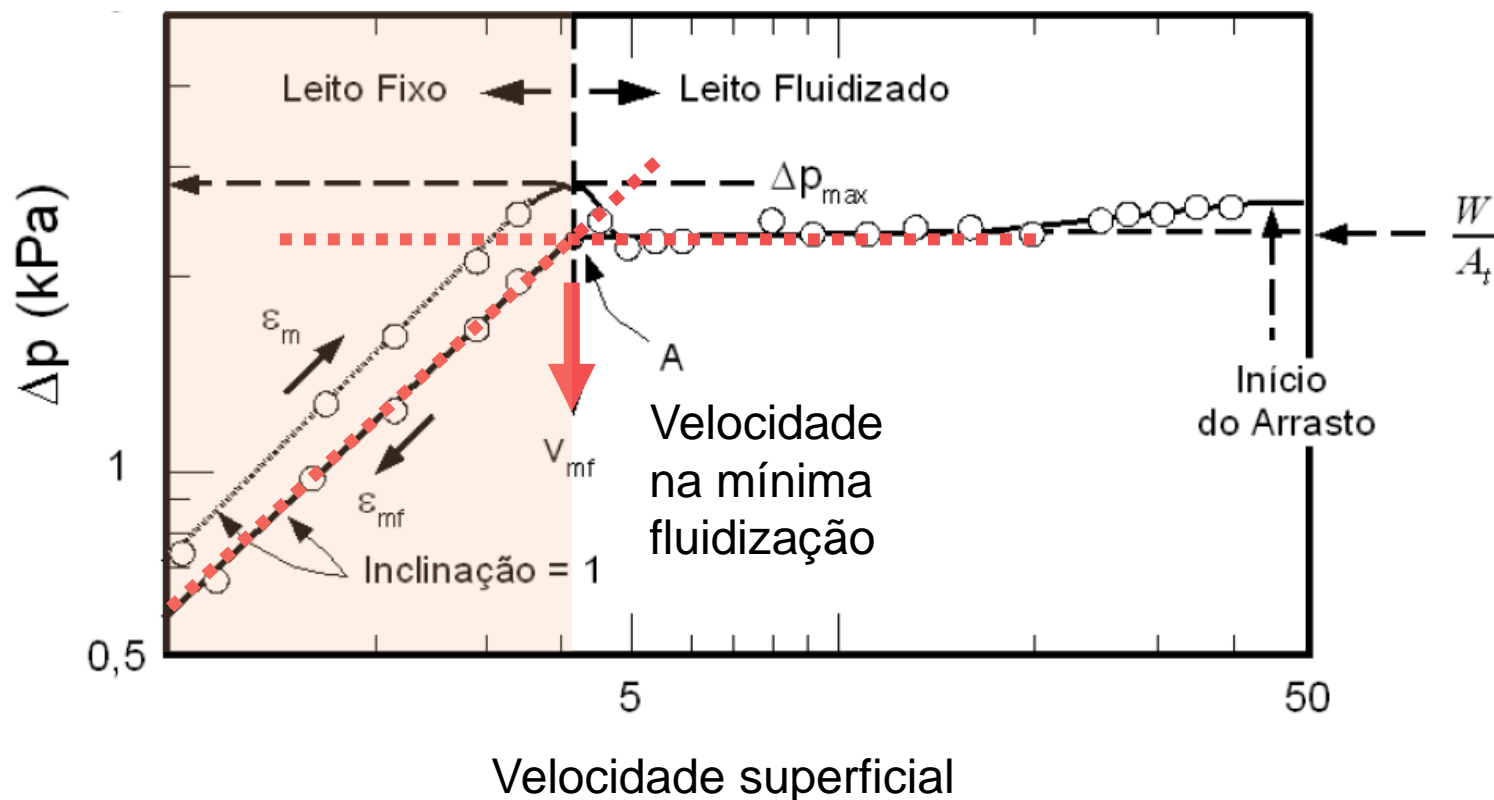
Variáveis importantes:
 D_c , H_0 , H , ε , ρ , ρ_s , ϕ ,
 Q_{mf} , $-\Delta P$, H_{mf} , ε_{mf}

Curva
Característica
(CC) Experimental

Obter $-\Delta P_{max}$ para
dimensionar o
soprador ou a
bomba

Determinar
condição de
mínima
fluidização

Visual e pela CC



Os parâmetros das experiências são sempre tomados no sentido das vazões decrescentes
→ Porque **a volta é sempre igual**, porém, a ida depende da compactação do leito.

CORRELAÇÕES: Queda de pressão - ΔP_{mf}

A fluidização tem início quando:

$$\underbrace{\left(\text{Peso aparente} \right)}_{\text{Peso} - \text{Empuxo}} = \left(\text{Força de Arraste} \right) \Rightarrow (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_{mf}) A L_{mf} g = \underline{m} A L_{mf} \quad \therefore \underline{m} = (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_{mf}) g$$

Perceba que \underline{m} (*força resistiva*) possui unidades de força por unidade de volume.

Do escoamento em meios porosos vimos que (Equação do movimento):

$$\underline{m} = - \frac{\Delta \wp_{mf}}{L_{mf}}$$

Onde: - \wp_{mf} = Queda de Pressão Piezométrica de mínima fluidização

Portanto teremos:

$$-\Delta \wp_{mf} = (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_{mf}) L_{mf} g \times \frac{A}{A}$$

$$\therefore -\Delta \wp_{mf} = \frac{(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_{mf}) A L_{mf} g}{A} = \frac{\text{Peso Aparente do Sólido}}{\text{Área}}$$

Como: $\rho_s \gg \rho$

$$-\Delta \wp_{mf} = - \frac{M g}{A}$$

$$M = (1 - \varepsilon_{mf}) \rho_s (A L_{mf})$$

M é a massa de sólidos

CORRELAÇÕES: velocidade do gas (qmf)

Caso geral: Equação de Darcy (partículas pequenas)

$$\underline{m} = \left(\frac{\mu}{k_{mf}} + \frac{c_{mf}}{\sqrt{k_{mf}}} \rho q_{mf} \right) q_{mf}$$

Para partículas muito pequenas considere desprezível

Permeabilidade K_{mf} definida por Kozeny-Carmann:

$$k_{mf} = \frac{(\overline{dp}\phi)^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1-\varepsilon_{mf})^2}$$

$$\therefore \underline{m} = \left(\frac{\mu}{k_{mf}} \right) q_{mf}$$

$$\therefore \underline{m} = (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_{mf}) g$$



$$q_{mf} = U_{mf} = \frac{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1-\varepsilon_{mf})} \frac{(\overline{dp})^2 (\rho_s - \rho) g}{\mu}$$

Porosidade na mínima fluidização:

$$M = (1 - \varepsilon_{mf}) \rho_s (AL_{mf})$$

$$\rightarrow \varepsilon_{mf} = 1 - \frac{M}{\rho_s (AL_{mf})}$$

CORRELAÇÕES: velocidade do gas (qmf)

Extrapolação de Ergun (1952):

$$\frac{-\Delta \rho_{mf}}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu}{(\phi d_p)^2} U + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho}{(\phi d_p)} U^2$$

Rearranjando:

$$\frac{1,75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2}$$

$$\frac{1,75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} (\text{Re}_{p,mf})^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} (\text{Re}_{p,mf}) = \text{Ar}$$

$$\text{Re}_{p,mf} = \left[(K_1)^2 + K_2 \text{Ar} \right]^{0,5} - K_1$$

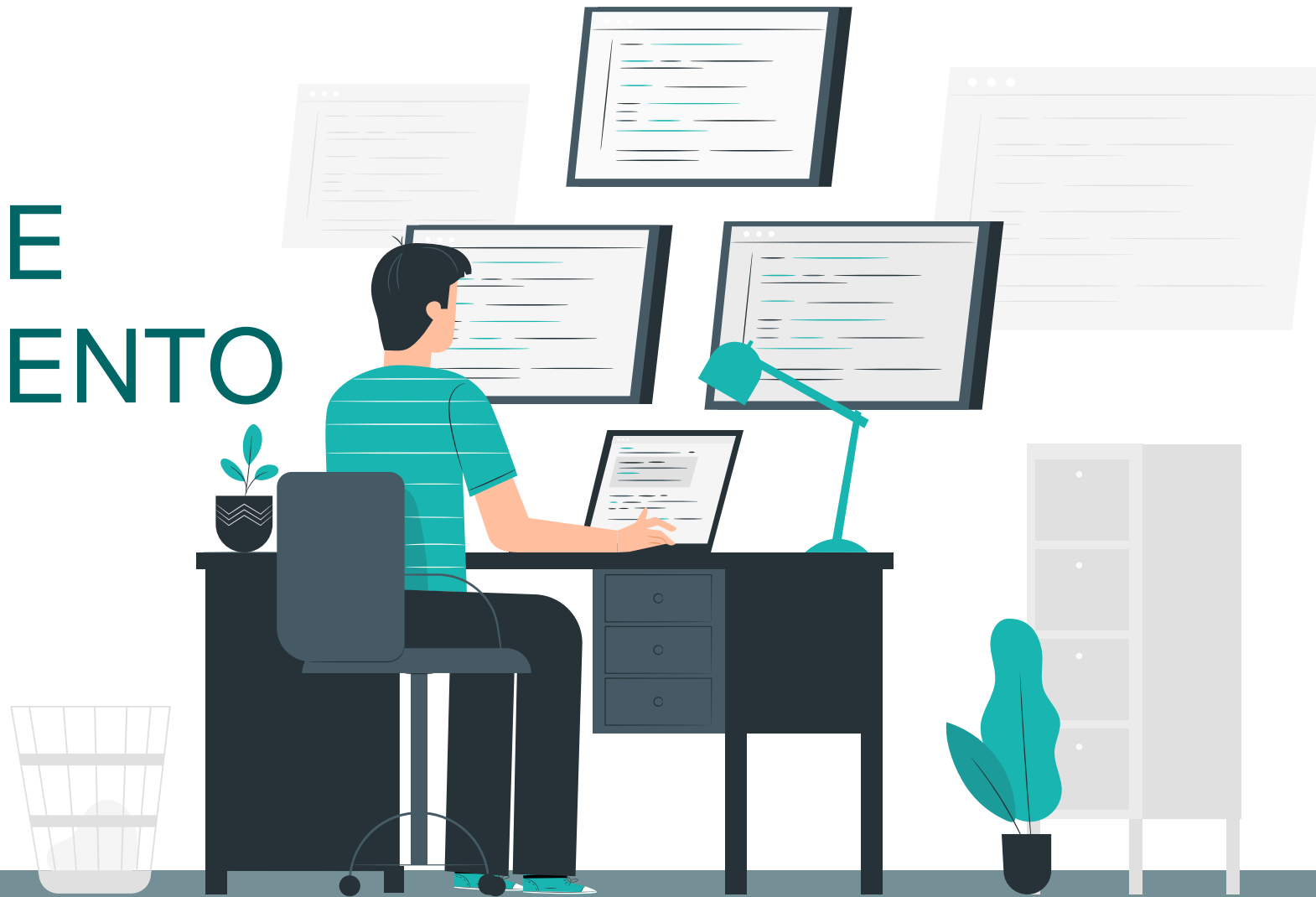
Investigador	K_1	K_2
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena and Vogel (1977)	25,3	0,0571
Babu et al (1978)	25,3	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Tannous et al. (1998)	25,83	0,043

Autores	Correlação
Wen e Yu (1966)	Partículas grosseiras: $\text{Ar} = 1650 \text{Re}_{mf} + 24,5 \text{Re}_{mf}^2$
Chitester et al. (1984)	Partículas grosseiras: $U_{mf} = \frac{\mu}{\rho d_p} \left[\left[(28,7)^2 + 0,0494 \text{Ar} \right]^{0,5} - 28,7 \right]$
King e Harrison (1982)	$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho d_p} \left[(1135,7 + 0,0408 \text{Ar})^{0,5} - 33,7 \right]$
Pavlov	$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho d_p} \left[\frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22 \sqrt{\text{Ar}}} \right]$

Assista a Aula 23:
Exercícios de
Dimensionamento do
Leito Fluidizado

AULA 23

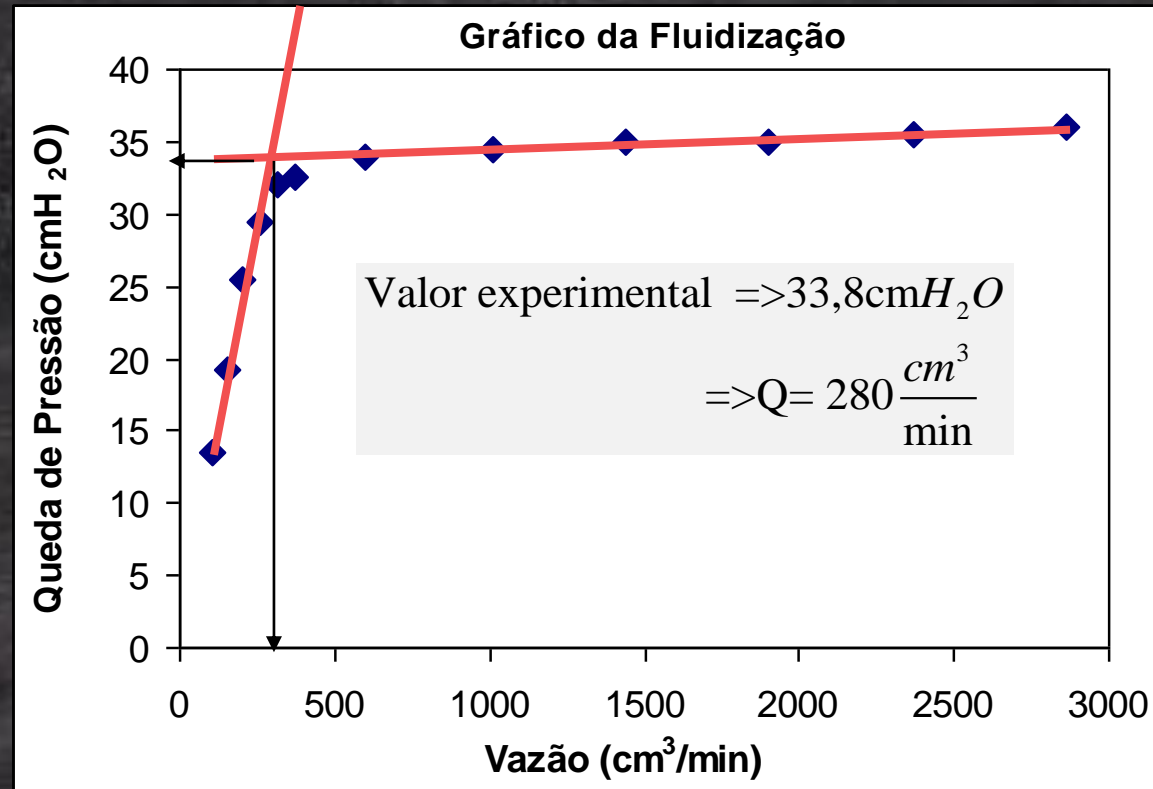
EXERCÍCIOS DE DIMENSIONAMENTO DO LEITO FLUIDIZADO



EX17- A partir da CC, identificar a condição de mínima Fluidização gas-sólido. Partículas esféricas de vidro ($d_p = 52\mu m$); $\rho_s = 2,6 \text{ g/cm}^3$; $D_c = 3,2 \text{ cm}$; Massa de sólidos $M = 267 \text{ g}$; Altura do leito na mínima fluidização $L_{mf} = 26,0 \text{ cm}$.

Dados experimentais: 1º) Fazer o gráfico. Identificar a MF

Vazão (cm³/min)	Queda de Pressão (cm H₂O)
2860	36
2370	35,5
1900	35
1440	35
1010	34,5
600	34
370	32,5
315	32
260	29,5
206	25,5
154	19,2
104	13,5



2º) Calcular a porosidade na MF

$$\rightarrow \varepsilon_{mf} = 1 - \frac{M}{\rho_s (AL_{mf})} =$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{267}{2,6 \times 8,04 \times 26} = 0,509$$

3º) Calcular $-\Delta P_{mf}$

$$\rho_s \gg \rho \Rightarrow -\Delta P_{mf} = \frac{Mg}{A}$$

$$-\Delta P_{mf} = \frac{267 \cdot 981}{8,04} = 32580 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$-\Delta P_{mf} = 33,2 \text{ cmH}_2\text{O}$$

3º) Calcular q_{mf} experimental:

$$q_{mf} = \frac{Q_{mf}}{A} = \frac{280/60}{8,04} = 0,58 \text{ cm/s}$$

EX18- A partir da CC, identificar a condição de mínima Fluidização gas-sólido. Partículas esféricas de vidro ($d_p = 52\mu\text{m}$); $\rho_s = 2,6 \text{ g/cm}^3$; $D_c = 3,2\text{cm}$; Massa de sólidos $M = 267\text{g}$; Altura do leito na mínima fluidização $L_{mf} = 26,0\text{cm}$.

Dados experimentais:

Vazão (cm^3/min)	Queda de Pressão ($\text{cm H}_2\text{O}$)
2860	36
2370	35,5
1900	35
1440	35
1010	34,5
600	34
370	32,5
315	32
260	29,5
206	25,5
154	19,2
104	13,5

3º) Calcular q_m :

$$q_{mf} = U_{mf} = \frac{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{mf})} \frac{(\overline{dp})^2 (\rho_s - \rho) g}{\mu}$$

$$q_{mf} = \frac{0,509^3}{150(1 - 0,509)} \frac{0,0052^2 (2,6) 980}{0,00018} = 0,684 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$Q_{mf} = 330,3 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

EX17- Projeto de um sistema de Fluidização destinado à secagem de produto químico: Diâmetro do secador: $D_c = 30 \text{ cm}$, Carga de sólidos: $M = 39 \text{ kg}$, $\rho_s = 2,1 \text{ g/cm}^3$, $d_p = 90 \text{ }\mu\text{m}$, $\phi = 0,8$, Altura do leito na mínima fluidização $L_{mf} = 50 \text{ cm}$. Fluido: ar a 150°C e 1 atm . Para uma velocidade de ar de duas vezes a de mínima Fluidização, determine: a) A queda de pressão na mínima fluidização; b) A altura do distribuidor (esferas de aço de $200 \text{ }\mu\text{m}$, tal que a dP através deste seja de 10% da queda no leito ($\epsilon_d=0,38$); c) potência do Soprador.

a) Queda de pressão na MF:

$$-\Delta P_{mf} = \frac{Mg}{A} = \frac{39000 \times 981}{706,86} = 54125 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 30^2}{4} = 706,86 \text{ cm}^2$$

b) Calcular a L_d :

$$-\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{\mu}{k} q \right) = \left(\frac{\mu}{k} 2q_{mf} \right) \quad q = 2q_{mf} = 1,053 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$L_d = \frac{\Delta P_d}{(\mu q)} k_d \rightarrow L_d = \frac{5412,5 \times 3,81 \cdot 10^{-7}}{0,023 \cdot 10^{-2} \times 1,053} = 8,5 \text{ cm}$$

• Calculando a permeabilidade no distribuidor:

$$k_{\text{distribuidor}} = \frac{(\overline{dp}\phi)^2 \epsilon_d^3}{36\beta(1-\epsilon_d)^2} = \frac{(200 \cdot 10^{-4} \times 1)^2 (0,38)^3}{150(1-0,38)^2} = 3,81 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2$$

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s (AL_{mf})} = 1 - \frac{39000}{2,1 \times 706,86 \times 50} = 0,475$$

• Calculando a a velocidade q_{mf} :

$$q_{mf} = \frac{\phi^2 \epsilon_{mf}^3}{36\beta(1-\epsilon_{mf})} \frac{(\overline{dp})^2 (\rho_s - \rho) g}{\mu}$$

$$q_{mf} = \frac{(90 \cdot 10^{-4} \times 0,8)^2 (0,475)^3 (2,1 - 8,31 \cdot 10^{-4}) 981}{180(1-0,475) 0,023 \cdot 10^{-2}} = 0,526 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

EX17- Projeto de um sistema de Fluidização destinado à secagem de produto químico: Diâmetro do secador: $D_c = 30 \text{ cm}$, Carga de sólidos: $M = 39 \text{ kg}$, $\rho_s = 2,1 \text{ g/cm}^3$, $d_p = 90 \text{ }\mu\text{m}$, $\phi = 0,8$, Altura do leito na mínima fluidização $L_{mf} = 50 \text{ cm}$. Fluido: ar a 150°C e 1 atm . Para uma velocidade de ar de duas vezes a de mínima Fluidização, determine: a) A queda de pressão na mínima fluidização; b) A altura do distribuidor (esferas de aço de $200 \text{ }\mu\text{m}$, tal que a dP através deste seja de 10% da queda no leito ($\epsilon_d=0,38$); c) potência do Soprador.

c) A Potência do soprador

$$Pot = \frac{C (mmH_2O) Q \left(\frac{m^3}{s} \right)}{75 \times 0,6}$$

$$C = \Delta P_{leito} + \Delta P_{distribuidor} = 54.125 + 5412,5 = 59.537,5 \frac{\cancel{\text{dyn}}}{\cancel{\text{cm}^2}} \frac{\text{mmH}_2\text{O}}{1,013 \cdot 10^6 \frac{\cancel{\text{dyn}}}{\cancel{\text{cm}^2}}}$$

$$C = 607,7 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$Q = 1,053 \frac{\cancel{\text{cm}}}{s} \times 706,86 \cancel{\text{cm}^2} = 744,3 \frac{\cancel{\text{cm}^3}}{s} \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \cancel{\text{cm}^3}} = 744,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{s}$$

$$Pot = \frac{607,7 \times 744,3 \cdot 10^{-6}}{75 \times 0,6} = 0,01 \text{ hp} \rightarrow \text{dependendo do fabricante } \frac{1}{4} \text{ hp ou } \frac{1}{2} \text{ hp}$$

Referências:

- ❑ Kunii & Levenspiel, “Fluidization Engineering”, Wiley, 1991
- ❑ Davidson & Harrison, “Fluidization”, Academic Press, 1971
- ❑ Angelino, “ Fluidization”, PDP 7/76, COPPE/UFRJ, 1976
- ❑ Perry & Chilton – capítulo 20
- ❑ Cremasco, M. A., Operações Unitárias em Sistemas particulados e Fluidomecânicos, Blucher, 2009.

Atividades:

- ❑ Refazer exercícios e fazer exercícios de livros.
- ❑ Fazer projeto orientado de leito fluidizado

