OSF
OPERAÇÕES SÓLIDO-FLUIDO
SOLID FLUID OPERATIONS

LEQB/MEQB, 2023-24

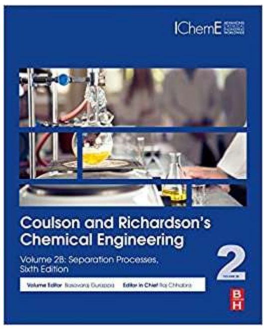
Chemical and Biological Engineering Section , Department of Chemistry, FCT/NOVA

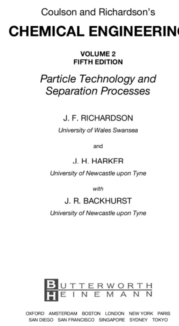
Isabel Esteves

Instructors

- **Prof. Rui Oliveira (T, TP)**
  - Office 628 DQ
  - Email: rmo@fct.unl.pt
- **Prof. Isabel Esteves (TP, P)**
  - Office 226 DQ/Lab 513 DQ
  - Email: i.esteves@fct.unl.pt

Book C&R
J.M. Coulson and J.F. Richardson, Chemical Engineering, II Vol., 5ª Ed., 2002, Elsevier Butterworth-Heinemann





NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

TP Plan

IE

Fluidization

- 1 class

Filtration

- 2 classes
- *Test 2 9.dez.2023*

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Fluidization (Chapter 7)

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

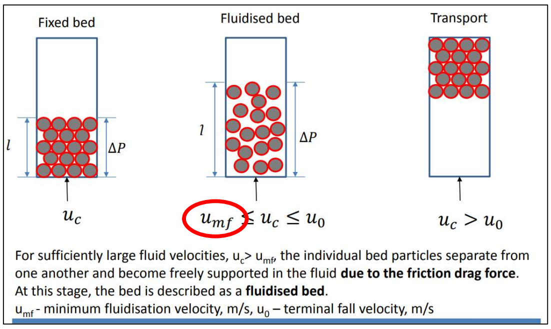
Óleo de densidade 900 kg/m^3 e viscosidade 3 cP ascende verticalmente através de um leito de catalisador constituído por partículas aproximadamente esféricas com 0.1 mm de diâmetro e densidade 2600 kg/m^3. Aproximadamente a que caudal em massa por unidade de área é que se verificará:

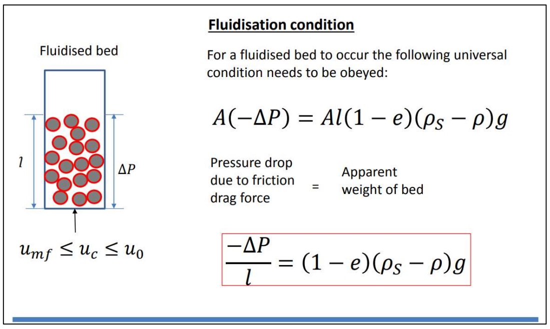
(a) a fluidização?

(b) o transporte de partículas?

Pergunta: qual é a velocidade a partir da qual ocorre fluidização?

Pergunta: qual é a velocidade a partir da qual ocorre fluidização?





$$\boxed{u_c = \frac{1}{K''}\frac{e^3}{S_B^2}\frac{1}{\mu}\frac{(-\Delta P)}{l}}$$

Equação de Kozeny
Eq. 4.9 (C&R, p.195)
Cap. 6

Eq. Fluidização (*regime esc. laminar*)

$$\boxed{u_c = f(e) = \frac{e^3(\rho_S - \rho)g}{K''S^2(1-e)\mu}}$$

Eq. 6.3 (C&R, p.295)

$$\boxed{\frac{-\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_S - \rho)g}$$

Condição de Fluidização
Eq. 6.1 (C&R, p.295)

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

Fluidisation – laminar flow

Question: How to determine bed expansion (i.e. porosity - e) for a given fluid velocity u_c?

$$\begin{cases} \dfrac{-\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_S - \rho)g & \text{Fluidisation condition} \\ u_c = \dfrac{1}{K''}\dfrac{e^3}{S_B^2}\dfrac{1}{\mu}\dfrac{(-\Delta P)}{l} & \text{Kozeny equation} \end{cases}$$

Kozeny equation (because pressure drop is caused by friction)

Fluidisation Eq. laminar flow:

Home-work!

$$u_c = f(e) = \frac{e^3(\rho_S - \rho)g}{K''S^2(1-e)\mu} \qquad u_{mf} \le u_c \le u_0$$

u_c – average velocity of fluid flow
S_B – surface area of packing per unit volume of bed (length^{-1}), $\boldsymbol{S_B = S(1-e)}$
S – specific surface area of the particles
μ – fluid viscosity
ρ – fluid density; ρ_s – solid density
e – bed porosity; (1-e) – fractional volume of bed occupied by the solid
l – bed thickness
K'' – Kozeny's constant ≈ 5

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

ρ μ d ρ_s

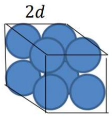
Óleo de densidade 900 kg/m^3 e viscosidade 3 cP ascende verticalmente através de um leito de catalisador constituído por partículas aproximadamente esféricas com 0.1 mm de diâmetro e densidade 2600 kg/m^3. Aproximadamente a que caudal em massa por unidade de área é que se verificará (a) a fluidização? (constante de Kozeny=5)

? G_{mf}

S_B – surface area of packing per unit volume of bed (length^{-1}), $\boldsymbol{S_B = S(1-e)}$

Specific surface area of the particle, $\boldsymbol{S} = \dfrac{particle\ surface\ area}{particle\ volume} = \dfrac{\pi d^2}{\pi(d^3/6)} = \dfrac{\mathbf{6}}{\boldsymbol{d}}$

$$\boxed{u_c = \frac{1}{K''}\frac{e^3}{S_B^2}\frac{1}{\mu}\frac{(-\Delta P)}{l}}$$



Cube with 8 spheres of diameter d

porosity $\boldsymbol{e_{mf}} = \dfrac{V_{cube} - V_{sphere}}{V_{cube}} = \dfrac{(2d)^3 - 8(\pi/6)d^3}{(2d)^3} = \mathbf{1} - \dfrac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{6}} = \mathbf{0.48}$

$$\begin{cases} -\dfrac{\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_s - \rho)g \\ u_{mf} = \dfrac{1}{K''}\dfrac{e^3}{(1-e)^2 S^2}\dfrac{1}{\mu}\dfrac{(-\Delta P)}{l} \end{cases}$$

$$G_{mf} = \rho u_{mf} = \frac{1}{5}\frac{d^2 e^3}{(1-e)^{\cancel{2}}\,36}\frac{1}{\mu}\rho\cancel{(1-e)}(\rho_s - \rho)g$$

$$G_{mf} = \rho\frac{1}{5}\frac{e^3}{(1-e)}\frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{36\mu} = \mathbf{0.06\ kg/m^2s}$$

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

Óleo de densidade 900 kg/m^3 e viscosidade 3 cP ascende verticalmente através de um leito de catalisador constituído por partículas aproximadamente esféricas com 0.1 mm de diâmetro e densidade 2600 kg/m^3. Aproximadamente a que caudal em massa por unidade de área é que se verificará

(a) a fluidização?

(b) o transporte de partículas?

Pergunta: qual é a velocidade a que ocorre transporte de partículas?

Velocidade terminal de queda, $\boldsymbol{u_0}$

$$\boxed{u_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu}} \qquad \acute{R}e < 0{,}2$$

Lei de Stokes
Cap. 3, Eq. 3.24 (C&R, p.155)

Particle Reynolds - Re'

$$Re' = \frac{\rho u d}{\mu} < 0.2 \quad \text{(laminar flow)}$$

Modified Reynolds (of the bed)

$$Re_1 = \frac{u\rho}{S(1-e)\mu} \leq 2$$

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

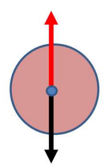
Lei de Stokes
Cap. 3, Eq. 3.24 (C&R, p.155)

FCT

Terminal fall velocity, u_0

If the drag force equals the apparent weight of the particle then the accelaration is zero and sphere settles at a constant velocity u_0. For a sphere:

$\vec{F}$ – Drag force



Apparent weight

$\frac{\pi d^3}{6}(\rho_s - \rho)g$

$$F = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_s - \rho)g$$

For laminar flow ($\acute{R}e < 0{,}2$), then stoke's law holds:

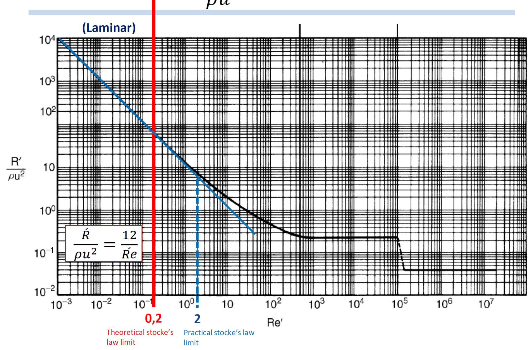
$$3\pi\mu u_0 d = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_s - \rho)g \qquad \boxed{u_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu}} \qquad \acute{R}e < 0{,}2$$

For turbulent flow ($10^3 \leq \acute{R}e \leq 10^5$), then Newton's law holds:

$$0.055\pi d^2 \rho u_0^2 = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_s - \rho)g \qquad \boxed{u_0 = \sqrt{\frac{3d(\rho_s - \rho)g}{\rho}}}$$

$$10^3 \leq \acute{R}e \leq 10^5$$

Friction factor $\frac{R'}{\rho u^2}$ over particle Re'



NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

Passa óleo de densidade 900 kg/m^3 e viscosidade 3 cP, ascendendo verticalmente através de um leito de catalisador constituído por partículas aproximadamente esféricas com 0.1 mm de diâmetro e densidade 2600 kg/m^3. Aproximadamente que caudal em massa por unidade de área é que se verificará

(a) a fluidização?

(b) o transporte de partículas?

$$\boxed{u_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu}} \Rightarrow u_0 = 0.0031 \text{ m/s} \qquad Re_0' = \frac{u_0 d\rho}{\mu} = 0.093$$

✓ Lei de Stokes

1 cP = 1 mNs/m^2= 0.001 kg m^{-1}s^{-1}

$$G_0 = \rho u_0 = \mathbf{2.79\ kg/m^2s}$$

Pergunta: como resolver (b) de outra forma?

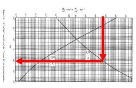
✓ Método gráfico

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 1

Terminal fall velocity, u_0: graphical method

Case 1. Condition for terminal fall velocity: $F = \frac{\pi d_i^3}{6}(\rho_s - \rho)g \Leftrightarrow$

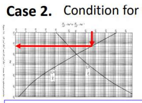


By manipulating and rearranging it may be shown:

$$\Leftrightarrow \frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2 = \frac{2d^3(\rho_s - \rho)\rho g}{3\mu^2} = \frac{2}{3}Ga$$

If d is known $\Rightarrow$ calculate $\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2$ $\Rightarrow$ Take from picture $\acute{R}e$ $\Rightarrow$ take from $\acute{R}e$ the value of u_0

Case 2. Condition for terminal fall velocity: $F = \frac{\pi d_i^3}{6}(\rho_s - \rho)g \Leftrightarrow$



By manipulating and rearranging it may be shown:

$$\Leftrightarrow \frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^{-1} = \frac{2(\rho_s - \rho)\mu g}{3\rho^2 u^3}$$

If u_0 is known $\Rightarrow$ calculate $\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^{-1}$ $\Rightarrow$ Take from picture $\acute{R}e$ $\Rightarrow$ take from $\acute{R}e$ the value of d

Ga – Galileo number (dimensionless)

Cap. 3, C&R (1965, pp.158)

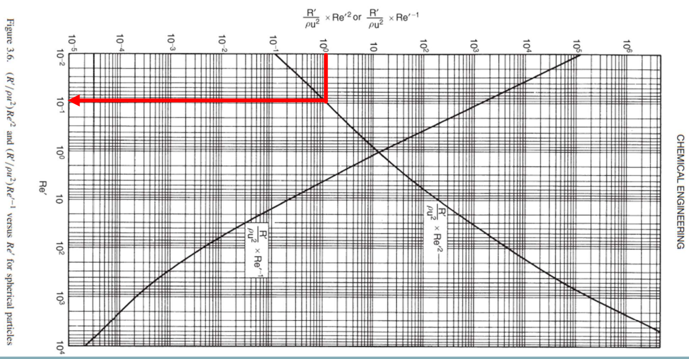
$$\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2 = \frac{2d^3(\rho_s - \rho)\rho g}{3\mu^2} = 1.11 \Rightarrow$$

$$Re_0' = 0.09$$

$$u_o = \frac{Re_0'\mu}{\rho d} = 0.0031 \text{ m/s}$$

$$G_0 = \rho u_o = \mathbf{2.7\ kg/m^2s}$$

anteriormente… G_0 = 2.79 kg/m^2 s



NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

? ρ_s d, d_{col}

Problema 2

Calcule a velocidade mínima a que fluidizarão partículas esféricas (densidade 1600 kg/m³) de 1.5 mm de diâmetro numa coluna de 1 cm de diâmetro. Discutir as incertezas deste cálculo.
Dados: viscosidade da água = 1cP, constante de Kozeny = 5

μ

Pergunta: qual é a diferença do problema 2 para o problema 1.a)?

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 2

Calcule a velocidade mínima a que fluidizarão partículas esféricas (densidade 1600 kg/m³) de 1.5 mm de diâmetro numa coluna de 1 cm de diâmetro. Discutir a incerteza deste cálculo.
Dados: viscosidade da água = 1cP, constante de Kozeny = 5

Eq. 4.23 (C&R, p.200)

$$\begin{cases} -\dfrac{\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_s - \rho)g \\[2ex] u_{mf} = \dfrac{1}{K''}\dfrac{e^3}{(1-e)^2 S^2}\dfrac{1}{\mu}\dfrac{(-\Delta P)}{l}\, f_w \end{cases}$$

200 CHEMICAL ENGINEERING

K_0 were constant, then K'' would increase with increase in tortuosity. The reason for K'' being near to 5.0 for many different beds is probably that changes in tortuosity from one bed to another have been compensated by changes in K_0 in the opposite direction.

Wall effect. In a packed bed, the particles will not pack as closely in the region near the wall as in the centre of the bed, so that the actual resistance to flow in a bed of small diameter is less than it would be in an infinite container for the same flowrate per unit area of bed cross-section. A correction factor f_w for this effect has been determined experimentally by COULSON[15]. This takes the form:

$$f_w = \left(1 + \frac{1}{2}\frac{S_c}{S}\right)^2 \qquad (4.23)$$

where S_c is the surface of the container per unit volume of bed.

Equation 4.9 then becomes:

$$u_c = \frac{1}{K''}\frac{e^3}{S^2(1-e)^2}\frac{1}{\mu}\frac{(-\Delta P)}{l} f_w \qquad (4.24)$$

The values of K'' shown on Figure 4.2 apply to equation 4.24.

Problema 2

Calcule a velocidade mínima a que fluidizarão partículas esféricas (densidade 1600 kg/m^3) de 1.5 mm de diâmetro numa coluna de 1 cm de diâmetro. Discutir as incertezas deste cálculo.
Dados: viscosidade da água = 1cP, constante de Kozeny = 5

$$\begin{cases} -\dfrac{\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_s-\rho)g \\ u_{mf} = \dfrac{1}{K''}\dfrac{e^3}{(1-e)^2 S^2}\dfrac{1}{\mu}\dfrac{(-\Delta P)}{l} f_w \\ f_w = \left(1+\dfrac{1}{2}\dfrac{S_c}{S}\right)^2 \Rightarrow f_w = 1.1 \end{cases}$$

porosity $e_{mf} = \frac{V_{cube}-V_{sphere}}{V_{cube}} = \frac{(2d)^3 - 8(\pi/6)d^3}{(2d)^3} = 1-\frac{\pi}{6} = 0.48$

S_c – column surface per volume bed (= column surface area/column volume)

$$S_c = \frac{2\pi(d/2)h}{\pi h(d/2)^2} = \frac{4}{d_{col}} = 400\ \mathrm{m}^{-1}$$

$$\boxed{S_{sphere} = \frac{\pi d^2}{\pi d^3/6} = \frac{6}{d}}$$

$S = 6/d = 4000\ \mathrm{m}^{-1}$

$u_{mf} = 0.0155\, f_w$
$u_{mf} = \mathbf{0.0163\ m/s}$

$$\boxed{u_{mf} = \frac{1}{K''}\frac{e^3}{(1-e)}\frac{d^2(\rho_s-\rho)g}{36\mu} f_w}$$

Equação de Kozeny, Eq. 4.9 (C&R, p.195)

$$Re'_{mf} = \frac{u_{mf} d\rho}{\mu} = \frac{0.0163\times 1.5\times 10^{-3}\times 1000}{1\times 10^{-3}} = 24.5$$

$$Re_1 = \frac{u_{mf}\rho}{S(1-e_{mf})\mu} = \frac{0.0163\times 1000}{4000(1-0.48)1\times 10^{-3}} = 7.84$$

Incertezas no cálculo:
- Necessidade de f_w
- Valores de e_{mf} e K''
- ✕ Regime laminar

Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2},

a) o leito encontra-se fluidizado?
b) Calcule a porosidade do leito.

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

ρ μ d

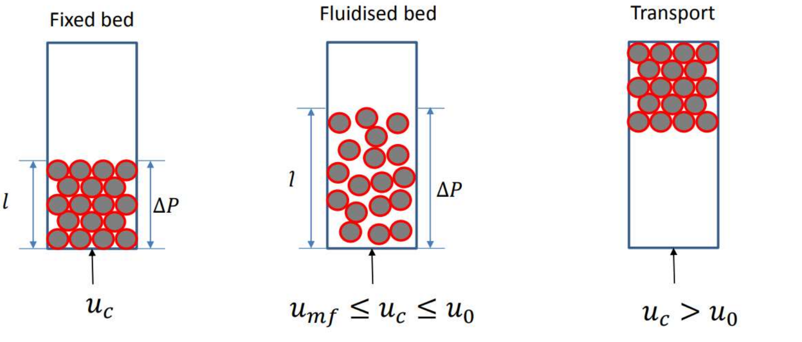
Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2},

a) o leito encontra-se fluidizado?

d_t ρ_s

Pergunta: o que é preciso calcular para verificar se o leito está fluidizado?

Pergunta: o que é preciso calcular para verificar se o leito está fluidizado?



For sufficiently large fluid velocities, $u_c > u_{mf}$, the individual bed particles separate from one another and become freely supported in the fluid **due to the friction drag force**. At this stage, the bed is described as a **fluidised bed**.

u_{mf} - minimum fluidisation velocity, m/s, u_0 – terminal fall velocity, m/s

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

ρ μ d

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2},

a) o leito encontra-se fluidizado?

d_t ρ_s

Pergunta: o que é preciso calcular para verificar se o leito está fluidizado?

$$\boxed{G_{mf}} < G < \boxed{G_0} \; (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1})$$

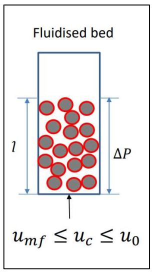
?

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2},

a) o leito encontra-se fluidizado?



$$\boxed{\frac{-\Delta P}{l} = (1-e)(\rho_s - \rho)g}$$

$$\boxed{u_c = \frac{1}{K''}\frac{e^3}{S_B^2}\frac{1}{\mu}\frac{(-\Delta P)}{l}}$$

Kozeny

$K'' = 5$

$e_{mf} = 0.48$

$S = \frac{6}{d}$

$$\boxed{u_c = \frac{e^3 d^2(\rho_s - \rho)g}{180(1-e)\mu}}$$

Condição de Fluidização

$$G = u\rho \; ; \quad Re_1 = \frac{u\rho}{S(1-e)\mu} = \frac{Gd}{6(1-e)\mu} = 0.24$$

✓ Kozeny

Velocidade mínima para fluidização

$$u_{mf} = \frac{1}{K''}\frac{e_{mf}^3 d^2(\rho_s - \rho)g}{36(1-e_{mf})\mu} = \frac{e_{mf}^3 d^2(\rho_s - \rho)g}{180(1-e_{mf})\mu} = 3.13\text{x}10^{-4}\text{ m/s}$$

$$\begin{cases} G_{mf} = u_{mf}\rho = \mathbf{0.313\ kg\ m^{-2}s^{-1}} \\ Re_1 = \frac{G_{mf}d}{6(1-e)\mu} = 0.015 \end{cases}$$

Caudal mássico mínimo para fluidização

✓ Regime esc. laminar

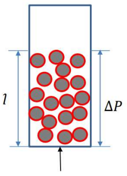
Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2}.

a) o leito encontra-se fluidizado?

Velocidade terminal de queda

Fluidised bed



$u_{mf} \leq u_c \leq u_0$

$$\boxed{u_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu}} \qquad \acute{R}e < 0{,}2$$

Particle Reynolds - Re'

$$Re' = \frac{\rho u d}{\mu} < 0.2 \quad \text{(laminar flow)}$$

Lei de Stokes, Cap. 3, Eq. 3.24 (C&R, p.155)

$$u_o = 0.01472 \text{ m/s} \qquad G_0 = u_0\rho = \mathbf{14.72\ kg\ m^{-2}s^{-1}}$$

$$Re'_0 = \frac{u_o d\rho}{\mu} = 2.21 \qquad Re_1 = \frac{G_0 d}{6(1-e)\mu} = 0.71$$

$$G_{mf} < G < G_0 (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1})$$

0.313 < 5 < 14.72

✓ Validade de Kozeny (approx. no limite para regime laminar)

Verifica-se! O leito está fluidizado!

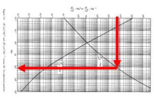
Existe outro método alternativo?

Problema 4

Para calcular u_0 pode, em alternativa, usar-se o método gráfico (de modo idêntico ao problema 1.b) ou a Tabela 3.4 C&R (p.157):

Terminal fall velocity, u_0: graphical method

Case 1. Condition for terminal fall velocity: $F = \frac{\pi d_i^3}{6}(\rho_s - \rho)g \Leftrightarrow$

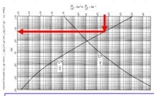


By manipulating and rearranging it may be shown:

$$\Leftrightarrow \boxed{\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2 = \frac{2d^3(\rho_s-\rho)\rho g}{3\mu^2}} = \frac{2}{3}Ga$$

If d is known ⇒ calculate $\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2$ ⇒Take from picture $\acute{R}e$ ⇒take from $\acute{R}e$ the value of u_0

Case 2. Condition for terminal fall velocity: $F = \frac{\pi d_i^3}{6}(\rho_s - \rho)g \Leftrightarrow$



By manipulating and rearranging it may be shown:

$$\Leftrightarrow \frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^{-1} = \frac{2(\rho_s-\rho)\mu g}{3\rho^2 u^3}$$

If u_0 is known ⇒ calculate $\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^{-1}$ ⇒Take from picture $\acute{R}e$ ⇒take from $\acute{R}e$ the value of d

Ga – Galileo number (dimensionless)

Cap. 3, C&R (1965, pp.158)

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Para calcular u_o pode, em alternativa, usar-se o método gráfico (de modo idêntico ao problema 1.b) OU ainda a Tabela 3.4 C&R (p.157):

$$\frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2 = \frac{2d^3(\rho_s-\rho)\rho g}{3\mu^2}$$

$$\log \frac{\acute{R}}{\rho u^2}\acute{R}e^2 = 1.42$$

$$\log Re_0' = 0.236 \rightarrow Re_0' = 1.72$$

$$u_o = \frac{Re_0'\mu}{\rho d} = 0.011467 \text{ m/s}$$

u_o calculado a partir de eq. Carman-Kozeny e Re válido para qq regime de escoamento

$$G_0 = \rho u_o = \mathbf{11.47\ kg/m^2s}$$

anteriormente… $G_0 = 14.72$ kg/m² s

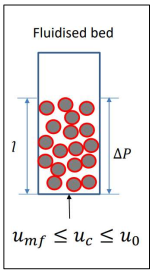


Table 3.4. Values of log Re' as a function of log$\{(R'/\rho u^2)Re'^2\}$ for spherical particles

log$\{(R'/\rho u^2)Re'^2\}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\bar{2}$								$\bar{3}.620$	$\bar{3}.720$	$\bar{3}.819$
$\bar{1}$	$\bar{3}.919$	$\bar{2}.018$	$\bar{2}.117$	$\bar{2}.216$	$\bar{2}.315$	$\bar{2}.414$	$\bar{2}.513$	$\bar{2}.612$	$\bar{2}.711$	$\bar{2}.810$
0	$\bar{2}.908$	$\bar{1}.007$	$\bar{1}.105$	$\bar{1}.203$	$\bar{1}.301$	$\bar{1}.398$	$\bar{1}.495$	$\bar{1}.591$	$\bar{1}.686$	$\bar{1}.781$
1	$\bar{1}.874$	$\bar{1}.967$	0.008	0.148	0.236	0.324	0.410	0.495	0.577	0.659
2	0.738	0.817	0.895	0.972	1.048	1.124	1.199	1.273	1.346	1.419
3	1.491	1.562	1.632	1.702	1.771	1.839	1.907	1.974	2.040	2.106
4	2.171	2.236	2.300	2.363	2.425	2.487	2.548	2.608	2.667	2.725
5	2.783	2.841	2.899	2.956	3.013	3.070	3.127	3.183	3.239	3.295

$$G_{mf} < G < G_0 (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1})$$

0.313 < 5 < 11.47

Verifica-se que o leito se encontra fluidizado!

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m³, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m³. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s⁻¹m⁻²,

a) O leito encontra-se fluidizado?

b) Calcule a porosidade do leito.

Pergunta: como calcular a porosidade do leito?

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2},

b) Calcule a porosidade do leito.

Método 1

$$G = u_c\rho = 5 \text{ kg s}^{-1}\text{m}^{-2} \rightarrow u_c = 0.005 \text{ m/s}$$

$$\boxed{u_c = \frac{e^3 d^2(\rho_s - \rho)g}{180(1-e)\mu}}$$ Condição de Fluidização

$$3.398 = \frac{e^3}{(1-e)} \rightarrow e^3 + 3.398e - 3.398 = 0$$

$\boldsymbol{e = 0.83}$

(usando o *Solver* do Excel ou tentativa-erro)

Método 2

$$G = u_c\rho = 5 \text{ kg s}^{-1}\text{m}^{-2} \rightarrow u_c = 0.005 \text{ m/s}$$

$$Re' = \frac{\rho u_c d}{\mu} = \frac{Gd}{\mu} = 0.75$$

$$\left\{\begin{array}{l} \boxed{\dfrac{u_c}{u_i} = e^n} \\ \log_{10} u_o = \log_{10} u_i + \dfrac{d}{d_t} \end{array}\right.$$

Eqs. 6.31 e 6.33 C&R (p.302,303)

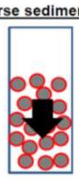
NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Solid-liquid fluidization

Solid-liquid fluidization (bed expansion) is in its essence the opposed operation of coarse sedimentation (bed contraction). The mathematical formalism of coarse sedimentation (Chapter 5) applies to solid-liquid fluidization.

Coarse sedimentation

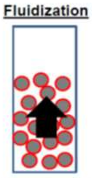


Bed contraction

$$\boxed{\frac{u_c}{u_i} = e^n}$$

$$\log(u_0) = \log(u_i) + \frac{d}{d_t}$$

Fluidization



Bed expansion

Solid-liquid systems

$$\frac{u_c}{u_i} = e^n$$

u_c – settling velocity or fluidisation velocity, m/s
u_i – settling velocity for infinit dilution, m/s
e – void faction
n = coeficiente = $f(Re'_0, d/d_t)$
d – particle diameter
d_t – tube diameter
$Re'_0 = \frac{\rho u_0 d}{\mu}$ - particle Reynolds at u_0

$$\log_{10}(u_0) = \log_{10}(u_i) + \frac{d}{d_t}$$

0.00075 é muito pequeno! $d_t >> d \rightarrow u_0 \approx u_i$
(i.e. desprezam-se efeitos de parede)

Table 5.1. n as a function of Ga or Re'_0 and d/d_t

Range of Ga	Range of Re'_0	n as function of $Ga, d/d_t$	n as function of $Re'_0, d/d_t$
0–3.6	0–0.2	$4.6 + 20\,d/d_t$	$4.6 + 20\,d/d_t$
3.6–21	0.2–1	$(4.8 + 20\,d/d_t)\,Ga^{-0.03}$	$(4.4 + 18\,d/d_t)\,Re_0'^{-0.03}$
21–2.4 $\times 10^4$	1–200	$(5.5 + 23\,d/d_t)\,Ga^{-0.075}$	$(4.4 + 18\,d/d_t)\,Re_0'^{-0.1}$
2.4×10^4–8.3×10^4	200–500	$5.5Ga^{-0.075}$	$4.4Re_0'^{-0.1}$
$>8.3 \times 10^4$	>500	2.4	2.4

J.M. Coulson and J.F. Richardson, pp 272

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Problema 4

Um fluido (massa específica=1000 kg/m^3, viscosidade=1 cP) ascende verticalmente através de uma coluna de 0.2 m de diâmetro e 1 m de altura com um leito constituído por partículas esféricas com diâmetro de 0.15 mm e densidade 2200 kg/m^3. Se o caudal em massa por unidade de área de secção recta da coluna for 5 kg s^{-1}m^{-2}.

b) Calcule a porosidade do leito.

Método 2

Sabendo que $\log_{10} u_o = \log_{10} u_i + \frac{d}{d_t}$ $\rightarrow$ $\log_{10} u_i = \log_{10}(0.011467) - \frac{0.15 \times 10^{-3}}{0.2} = -4.46903$

$\boldsymbol{u_i} = 0.011458 \text{ m/s} \approx \boldsymbol{u_0} = 0.011467 \text{ m/s}$ (observa−se ≠ de 0.075%)

$$Re_0' = \frac{u_o d \rho}{\mu} = 2.21$$

Table 5.1. n as a function of Ga or Re_0' and d/d_t

Range of Ga	Range of Re_0'	n as function of $Ga, d/d_t$	n as function of $Re_0', d/d_t$
0–3.6	0–0.2	$4.6 + 20\,d/d_t$	$4.6 + 20\,d/d_t$
3.6–21	0.2–1	$(4.8 + 20\,d/d_t)\,Ga^{-0.03}$	$(4.4 + 18\,d/d_t)\,Re_0'^{-0.03}$
21–2.4 $\times 10^4$	1–200	$(5.5 + 23\,d/d_t)\,Ga^{-0.075}$	$(4.4 + 18\,d/d_t)\,Re_0'^{-0.1}$
2.4×10^4–8.3×10^4	200–500	$5.5Ga^{-0.075}$	$4.4Re_0'^{-0.1}$
$>8.3 \times 10^4$	>500	2.4	2.4

Usando a Tabela 5.1 (C&R p. 272) resulta então que

$1 < Re_0' < 200$ $\quad n = \left(4.4 + 18\frac{d}{d_t}\right) Re_0'^{-0.1} = 4.08$ $\rightarrow$ $\boxed{\frac{u_c}{u_0} = e^n}$ $\rightarrow$ $\boldsymbol{e = 0.82}$

anteriormente… $e = 0.83$

Cálculo exato sem aproximação (ao regime de escoamento)

NOVA SCHOOL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Study both theory and class exercises…

and visit the C&R book!