

**SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA NO CÁLCULO DA EXPANSÃO DE UM LEITO
FLUIDIZADO SÓLIDO-LÍQUIDO**DANIEL S. JUNIOR², VICTOR O. FERREIRA¹, GABRIELA C. LOPES^{1,2*}¹ Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,² Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: gclopes@ufscar.br

RESUMO – Neste trabalho, analisou-se a sensibilidade do cálculo da porosidade (ε) de um leito fluidizado sólido-líquido a imprecisões nas características do líquido e das partículas. Quatro grupos de partículas, de três materiais diferentes (ABS, Alumina e Porcelana), foram caracterizados quanto a: diâmetro (d_p), densidade (ρ_p) e velocidade terminal (U_0). Estas partículas foram submetidas à fluidização em diferentes vazões, com temperatura do líquido (T) monitorada, e foi obtido o coeficiente angular da pressão em função da altura (dP/dz). A porosidade foi calculada por dois métodos: utilizando a equação de Richardson-Zaki, e utilizando dP/dz . Foram obtidos os valores de porosidade com os valores médios das variáveis de entrada (ρ_p, T, d_p, U_0), e em seguida foram repetidos os cálculos utilizando valores-limite dados por média \pm incerteza ou variação. A porosidade avaliada nestes limites foi comparada à porosidade obtida com os valores médios, para quantificar a influência de cada um deles no cálculo. Os desvios foram baixos, mostrando que as incertezas ficaram em um nível aceitável. O aumento de temperatura não comprometeu os resultados, apesar da grande amplitude. Em quase todas as relações analisadas, o desvio relativo foi menor que 1, mostrando que os dois métodos analisados possuem boa resistência a imprecisões nas entradas.

INTRODUÇÃO

Leitos fluidizados sólido-líquido possuem diversas aplicações na indústria, como classificação de partículas (Piovano, et al. 2015), adsorção (Koppejan, et al. 2018), biorreações (Deng, et al. 2016), entre outras. Esses equipamentos consistem em colunas preenchidas com partículas, que são percoladas por um líquido em movimento ascendente com velocidade entre a de mínima fluidização (U_{mf}) e a velocidade terminal (U_0). Esse movimento é responsável pela agitação das partículas, promovendo uma melhora na transferência de calor e massa entre fases se comparado ao leito fixo (Bello, Raman e Purushothaman 2017).

Apesar de sua grande aplicabilidade, a utilização de leitos fluidizados é limitada pela robustez das equações disponíveis para predição de sua porosidade (ε), importante para

estimar, por exemplo, a conversão de reações e taxas de transferência de calor e massa. A porosidade corresponde à fração de fluido do leito, definida pela Equação 1.

$$\varepsilon = \frac{V_l}{V_T} \quad (1)$$

em que V_l é o volume de líquido, e V_T é o volume total do leito.

A porosidade é maior quanto maior for a velocidade superficial do fluido (U). A equação proposta por Richardson & Zaki (1954) (Equação 2) é amplamente utilizada para determinar essa relação.

$$\frac{U}{U_0} = k\varepsilon_{R-Z}^n \quad (2)$$

em que n e k são parâmetros adimensionais, e ε_{R-Z} é a porosidade do leito. Esses dois parâmetros (n e k) podem ser calculados pelas correlações propostas por Khan & Richardson (1989), descritas pelas Equações 3 e 4.

$$\frac{4,8 - n}{n - 2,4} = 0,043Ar^{0,57} \quad (3)$$

$$k = 1 - 1,15 \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,6} \quad (4)$$

em que Ar é o número de Arquimedes, dado pela Equação 5.

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_l (\rho_p - \rho_l) g}{\mu^2} \quad (5)$$

em que d_p é o diâmetro da partícula, ρ_l é a densidade do líquido, ρ_p é a densidade da partícula, g é a gravidade e μ é a viscosidade do líquido.

As correlações mostram que a relação entre porosidade e velocidade superficial depende de características do fluido e das partículas. Essas características podem variar com o tempo durante a fluidização, ou entre partículas individuais. Como essas variações não são previstas pelas correlações, é importante avaliar a sensibilidade da porosidade a elas.

A avaliação pode ser feita calculando-se a porosidade, empregando valores médios para as variáveis de entrada, e em seguida repetindo os cálculos com valores maiores ou menores para cada variável. A sensibilidade paramétrica de leitos fluidizados gás-sólido tem sido investigada (Taghipour et al., 2005; Bakshi et al., 2018; Shi et al., 2019; Pan et al., 2022), avaliando majoritariamente o efeito da variação dos valores de parâmetros de simulações na fluidodinâmica do leito.

Em se tratando de fluidização líquida, são poucos os trabalhos que analisam a sensibilidade de propriedades a variáveis de entrada. Chen et al. (2010), por exemplo, estudaram a expansão de um biorreator de leito fluidizado sólido-líquido, com produção de gases. A expansão do leito se mostrou igualmente sensível à velocidade superficial do líquido e do gás, enquanto o tempo de contato

foi mais sensível à velocidade superficial do líquido. Lopes et al. (2018) analisaram o efeito da rugosidade superficial e propriedades mecânicas das partículas na expansão de um leito fluidizado sólido-líquido. Foi verificado que, para partículas macias, o número de Stokes possui uma influência maior no desvio da porosidade, do que para partículas rígidas.

Apesar disso, nenhum dos trabalhos encontrados avaliou a sensibilidade do cálculo da expansão do leito em relação às imprecisões nas medidas de parâmetros relativos às características do líquido e das partículas. Nesse sentido, o presente trabalho realizou uma análise de sensibilidade paramétrica na fluidização de quatro grupos diferentes de partículas em água, com o objetivo de avaliar a sensibilidade da equação de Richardson-Zaki a estas imprecisões. Também foi estudada a sensibilidade do método do coeficiente angular da pressão em função da altura, para determinação experimental da porosidade. Para isso, foram analisados os efeitos de alterações nos valores de: densidade e diâmetro da partícula; temperatura da água e velocidade terminal.

METODOLOGIA

Caracterização das Partículas

Neste trabalho, foram utilizados quatro grupos de partículas esféricas comerciais, de três materiais diferentes: Porcelana, Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) e Alumina (em dois diâmetros: 6,37 e 3,09 mm). Os grupos de partículas foram caracterizados quanto aos seus diâmetros, densidades e velocidades terminais.

A densidade foi obtida por picnometria. Para isso, utilizou-se um picnômetro de 25 mL, uma balança analítica (marca Bel, modelo L3102i) e água destilada como fluido de referência. Pesou-se uma amostra de partículas de cada grupo, que foi inserida no picnômetro, e ele foi preenchido com água. A densidade foi calculada por:

$$\rho_p = \frac{m_p \rho_l}{V_{pic} \rho_l + m_p + m_{pic} - m} \quad (6)$$

em que m_p é a massa das partículas, m_{pic} é a massa do picnômetro vazio, V_{pic} é o volume do

picnômetro, ρ_l é a densidade da água e m é a massa do picnômetro preenchido com a amostra de partículas e água. As medidas foram repetidas 5 vezes para cada grupo de partículas. As densidades obtidas, assim como o desvio padrão, estão apresentados na Tabela 1.

Os diâmetros das partículas foram obtidos por análise de imagens. Para isso, foi considerada uma amostra com 20 partículas de cada um dos grupos supramencionados. Foram feitas fotografias de cada amostra, com as partículas posicionadas em um fundo de cor escura, sem se tocarem. Na mesma imagem, foi fotografada uma partícula de referência com diâmetro conhecido. Com base nela, foi determinado o diâmetro de cada partícula. As imagens foram analisadas por meio de um código escrito em Python utilizando a biblioteca OpenCV (Bradski 2000) para análise de imagem. Os valores de diâmetro para cada grupo equivalem ao diâmetro médio do círculo de mesma área projetada. Os resultados e o desvio padrão estão apresentados na Tabela 1.

A velocidade terminal foi obtida medindo-se a velocidade de queda livre das partículas em um tanque preenchido com água. Para isso, a queda livre de 10 partículas de cada grupo foi filmada a 960 quadros por segundo utilizando uma câmera de alta velocidade (marca Sony, modelo DSC-RX100M). A velocidade terminal foi obtida com o software Tracker (Brown, Hanson e Christian 2022) de processamento de vídeos. Os valores médios obtidos, assim como os respectivos desvios-padrão, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades das Partículas.

Partícula	ρ_p (kg/m ³)	d_p (mm)	U_0 (m/s)
ABS	1822 ± 5	5,95 ± 0,07	0,39 ± 0,01
Alumina maior	3573 ± 10	6,37 ± 0,21	0,71 ± 0,03
Alumina menor	3586 ± 10	3,09 ± 0,16	0,48 ± 0,02
Porcelana	2407 ± 3	6,13 ± 0,19	0,51 ± 0,02

Aparato Experimental

O equipamento utilizado nos experimentos de fluidização e suas partes constituintes são mostrados na Figura 1.

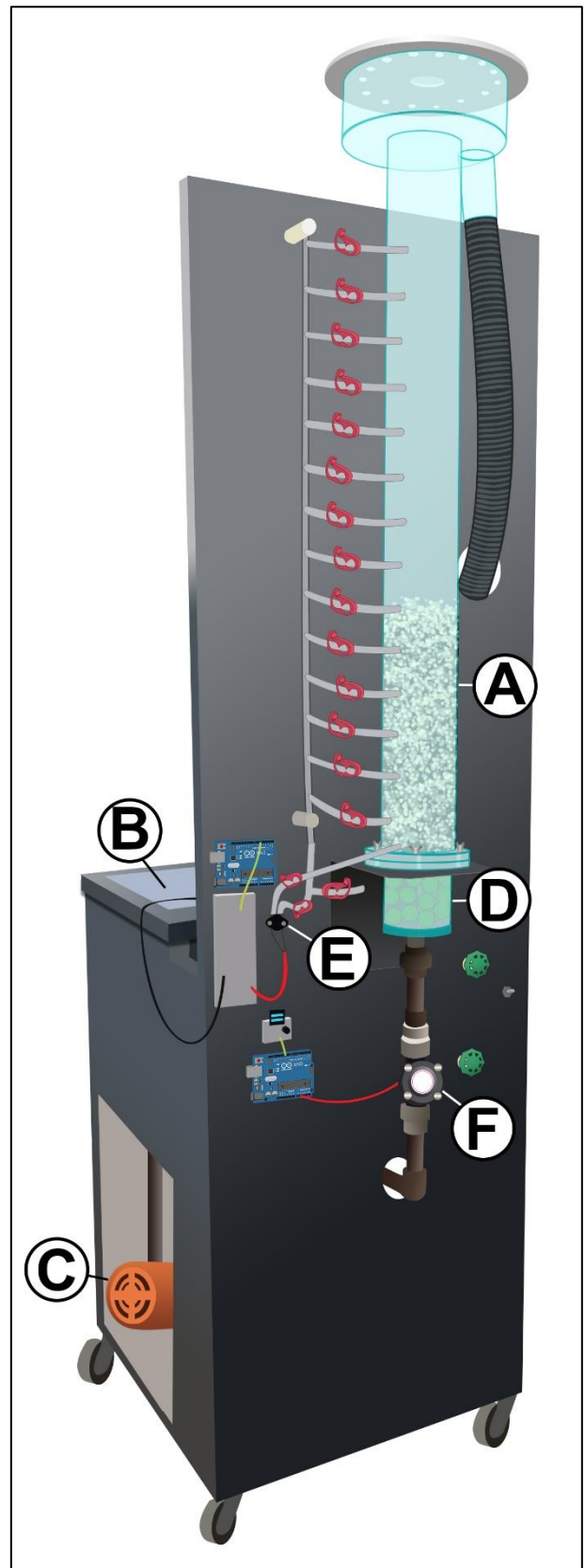


Figura 1. Equipamento de Fluidização.

O equipamento consiste em uma coluna de acrílico transparente de 10 cm de diâmetro interno e 1 m de altura (A); um reservatório de água (B); uma bomba centrífuga de ½ HP (C); um leito fixo de partículas de vidro utilizado para uniformizar o perfil de velocidades na entrada (D), sobre o qual há uma placa perfurada que funciona como distribuidor; um sensor de pressão diferencial (modelo MPX5010-DP) (E); e um sensor de vazão de efeito Hall (modelo YF-G1) (F).

Ao longo da altura da coluna, há 15 tomadas de pressão. A primeira fica 1,5 cm acima do distribuidor, a segunda fica a 4,5 cm da primeira, e as outras estão espaçadas 6 cm entre si. Em cada uma delas, há tubos flexíveis que podem ser fechados ou abertos por presilhas. Esses tubos são conectados ao sensor de pressão diferencial, que permite medir a queda de pressão entre dois pontos da coluna, correspondentes aos dois tubos que estiverem abertos no momento da medição.

Em cada corrida experimental, uma quantidade de partículas foi pesada e introduzida na coluna. A água do reservatório foi então bombeada, passando pela coluna em movimento ascendente e provocando a fluidização das partículas. Ao atravessar a coluna, a água era reconduzida ao reservatório. Foi realizada a fluidização de cada grupo de partículas em diferentes vazões de líquido, que podem ser alteradas por válvulas na entrada da coluna e monitoradas pelo sensor de vazão.

A temperatura da água foi monitorada com um sensor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) posicionado no reservatório. Foram obtidos valores de temperatura a cada 50 milissegundos, durante todos os experimentos. Durante a fluidização, a temperatura da água subiu em decorrência do bombeamento. As temperaturas máxima, mínima e média observadas durante a fluidização de cada grupo de partículas foram registradas. Os valores de porosidade calculados com a temperatura máxima e mínima foram comparados aos valores obtidos com o valor médio, para avaliar a sensibilidade em relação à temperatura.

Com o sensor de pressão, foram obtidos os valores de pressão diferencial mantendo aberta a primeira tomada de pressão (1,5 cm acima do distribuidor) e utilizando sucessivamente cada uma das outras tomadas

como segundo ponto de medida. A pressão diferencial foi medida a cada 50 milissegundos, durante 30 segundos, para cada dupla de tomadas de pressão, e foi registrado o valor médio durante este período. Isso permitiu obter a queda de pressão em várias alturas, e determinar o coeficiente angular da pressão em função da altura (dP/dz). Cada medida foi tomada em triplicata. Estes valores foram utilizados no cálculo da porosidade experimental por meio da Equação 7. As condições experimentais empregadas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Massas e Vazões utilizadas nos Experimentos

Partícula	Massa (kg)	Nº vazões	Faixa vazões (L/min)
ABS	2,0	11	25 - 75
Alumina maior	4,0	8	40 - 75
Alumina menor	4,0	8	40 - 75
Porcelana	2,7	9	25 - 75

Determinação da Porosidade

A porosidade do leito fluidizado sólido-líquido foi determinada experimentalmente utilizando o coeficiente angular da pressão em função da altura (dP/dz), conforme Equação 7.

$$\varepsilon_{exp} = 1 - \frac{dP/dz}{(\rho_p - \rho_l)g} \quad (7)$$

A densidade e a viscosidade da água foram calculadas a partir da temperatura (T) com as correlações fornecidas por DDBST (2021), a seguir:

$$\rho_l = 0,14395 \cdot 0,0112 \left[1 + \left(1 - \frac{T+273}{649,727} \right)^{0,05107} \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu &= 0,001 \\ &\cdot \exp \left[-3,7188 \right. \\ &\quad \left. + \frac{578,919}{(T + 273) - 137,546} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Para cada vazão de líquido, foram realizados os cálculos da porosidade experimental (Equação (7) e da porosidade obtida por Richardson-Zaki (Equação (2), utilizando os valores médios das variáveis de entrada (ρ_p, T, d_p, U_0). Em seguida, foram repetidos os cálculos com os limites superior e inferior, dados pela incerteza (caso de ρ_p, d_p e U_0) ou variação no tempo (caso de T) destas variáveis. A magnitude dos desvios correspondentes foi analisada para determinar a sensibilidade dos cálculos a cada uma destas variáveis de entrada, e para avaliar se neste experimento a precisão dos valores de porosidade pode ter sido afetada significativamente.

As relações entre as entradas (Medidas Experimentais) e saídas (Resultados) do equacionamento utilizado são mostradas na Figura 2. A porosidade calculada pelas correlações é afetada pelas quatro variáveis analisadas, enquanto a porosidade obtida experimentalmente é afetada, dentre estas variáveis, apenas pela densidade da partícula e temperatura do líquido. A sensibilidade de cada uma destas seis relações foi analisada individualmente.

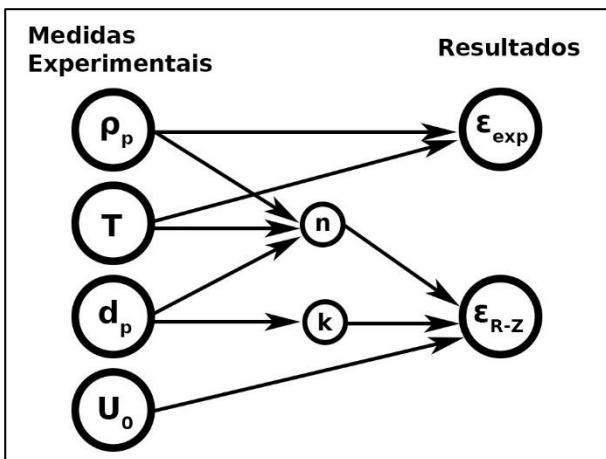


Figura 2. Relações entre Medidas Experimentais e Resultados

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em virtude do calor gerado pela bomba durante o bombeamento, e da recirculação do líquido, a temperatura da água subiu durante os experimentos. As distribuições de temperatura para cada grupo de partículas estão representadas nas Figuras 3 a 6.

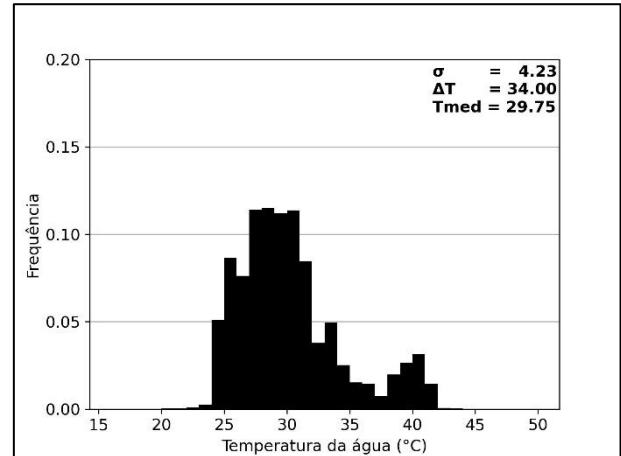


Figura 3. Distribuição de Temperaturas – ABS

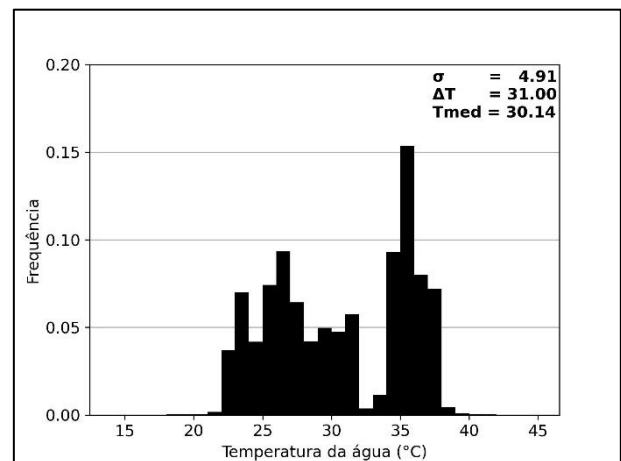


Figura 4. Distribuição de Temperaturas – Alumina maior

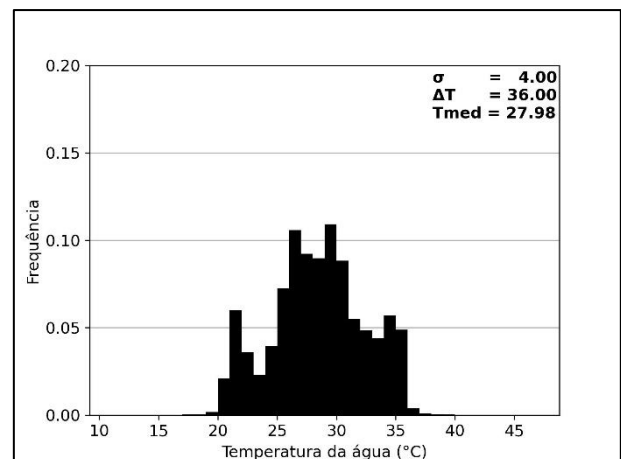


Figura 5. Distribuição de Temperaturas – Alumina menor

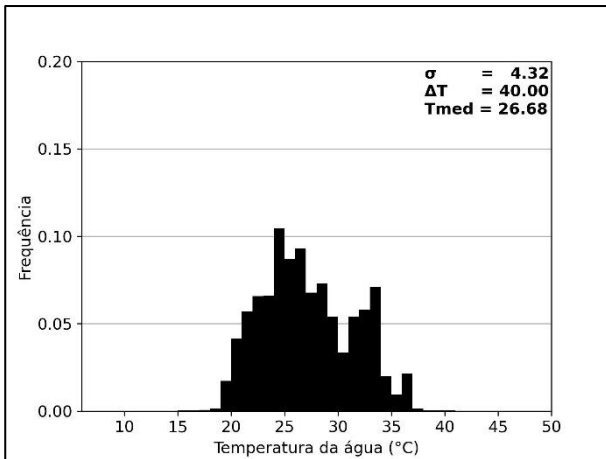


Figura 6. Distribuição de Temperaturas – Porcelana

Como observado nas Figuras 3 a 6, a distribuição de temperaturas assumiu formas diferentes entre os experimentos. Isso mostra que a temperatura não subiu de forma uniforme. No caso dos grupos ABS e Alumina maior, podem ser observados dois picos de frequência, que correspondem a dados de experimentos com temperaturas iniciais da água diferentes. Isso se deve à variação da temperatura ambiente em dias e horários diferentes, e a experimentos realizados em sequência.

Os valores máximo, mínimo e médio de temperatura, assim como a amplitude observada para cada tipo de partícula estão listados na Tabela 3. As temperaturas médias ficaram na mesma faixa. Os valores de amplitude foram consideráveis (31 a 40°C). Isso pode ser relacionado ao fato de os experimentos de fluidização utilizarem um tempo relativamente grande (cerca de 3h), o que causou um grande aumento de temperatura.

Tabela 3: Dados de Temperatura.

Partícula	T _{máx}	T _{mín}	T _{med}	Amplitude
ABS	50°C	16°C	29,8°C	34°C
Alumina maior	45°C	14°C	30,1°C	31°C
Alumina menor	47°C	11°C	28,0°C	36°C
Porcelana	48°C	08°C	26,7°C	40°C

Os desvios percentuais máximos observados na porosidade, em relação a cada medida experimental analisada, são mostrados

na Tabela 4. Para cada relação entre medida experimental e porosidade, foi listado o maior desvio observado entre os quatro grupos. Os maiores desvios foram da porosidade experimental em relação à temperatura, e da porosidade calculada em relação à velocidade terminal. Porém, o maior de todos os desvios foi de 2,03%, o que pode ser considerado baixo. Estes valores atestam a robustez do método experimental e das correlações utilizadas para cálculo da porosidade.

Em quatro das seis relações analisadas, os maiores desvios foram observados nas partículas de alumina. Este é o material com a maior densidade entre as partículas utilizadas. Isso pode indicar que o cálculo da porosidade é mais sensível a incertezas com partículas de materiais mais densos.

As incertezas percentuais nas medidas experimentais ficaram, de uma maneira geral, dentro da faixa reportada na literatura (Lopes, et al. 2018). Entre as alterações percentuais que causaram os maiores desvios, as maiores foram observadas no valor de temperatura. Isso causou um efeito maior na porosidade experimental (por meio da densidade do líquido) do que na porosidade calculada (por meio do parâmetro n). Isso mostra a relativa insensibilidade do parâmetro n ao número de Arquimedes (Ar), quando este assume valores maiores que 10^6 (Khan e Richardson 1989).

O desvio relativo foi calculado pela razão entre o desvio e a alteração que o causou. Ele pode ser entendido como a derivada média do desvio percentual em relação à alteração percentual na entrada, na faixa de valores analisada. Por exemplo, a partícula de Porcelana apresentou em média 0,28% de desvio em ε_{exp} para cada 1% de alteração em T . Em quase todos os casos, o desvio relativo foi menor que 1, o que indica que o desvio nos resultados é menor que a alteração nas entradas. Isso mostra que, nas relações analisadas, os cálculos atenuam o efeito destas alterações. A única exceção foi da porosidade experimental em relação à densidade da partícula. O desvio correspondeu à alteração da densidade multiplicada por 2,54. Isso indica que esta é a relação mais sensível entre as analisadas. Contudo, devido à alteração na densidade ser pequena, o desvio permaneceu menor que 1%.

Tabela 4: Desvios Máximos nos Resultados.

Medida	Partícula	Alteração	Desvio máximo	Desvio relativo
ρ_p	Alumina	0,28 %	ε_{exp} : 0,71 %	2,54 %/ %
	ABS	0,27 %	ε_{R-Z} : 0,001 %	0,005 %/ %
T	Porcelana	7,11 %	ε_{exp} : 1,96 %	0,28 %/ %
	Alumina_min	6,32 %	ε_{R-Z} : 0,32 %	0,05 %/ %
d_p	Alumina	3,30 %	ε_{R-Z} : 0,23 %	0,07 %/ %
U_0	Alumina	4,23 %	ε_{R-Z} : 2,03 %	0,48 %/ %

CONCLUSÃO

A sensibilidade na determinação da porosidade de um leito fluidizado sólido-líquido foi analisada. Quatro grupos de partículas com diferentes propriedades físicas foram caracterizados quanto à densidade, o diâmetro e a velocidade terminal. Estas partículas foram submetidas à fluidização em água, em diferentes vazões, e foi obtido o coeficiente angular da pressão em função da altura, utilizando um sensor de pressão diferencial. A temperatura durante os experimentos foi registrada. A porosidade do leito foi calculada utilizando a equação de Richardson & Zaki (1954) em conjunto com as correlações de Khan & Richardson (1989). A porosidade também foi calculada com os valores de gradiente vertical de pressão obtidos experimentalmente. Estes cálculos foram primeiramente feitos utilizando valores médios das variáveis de entrada (ρ_p, T, d_p, U_0). Os cálculos foram então repetidos, usando valores maiores e menores que os médios, determinados pela incerteza nas propriedades das partículas e pela variação da temperatura durante o experimento. Os desvios correspondentes em ε_{exp} e ε_{calc} foram analisados.

O maior desvio observado foi de 2,03%, o que pode ser considerado baixo. Isso mostra que, neste experimento, as incertezas das medidas experimentais ficaram em um nível aceitável, pois não produziram desvios muito grandes nos valores de porosidade. Os valores de porosidade podem ser obtidos utilizando os valores médios das variáveis de entrada com boa confiabilidade.

A variação na temperatura durante os experimentos, apesar de ter sido relativamente grande (amplitude de 31 a 40 °C), não produziu alterações significativas nos valores de porosidade. Para todos os grupos de partículas, o desvio da porosidade em relação à temperatura ficou em menos de 2,0%. A utilização direta da temperatura média nos cálculos não comprometeu a precisão dos resultados.

O maior desvio relativo observado (2,54 %/%) foi de ε_{exp} em relação a ρ_p . Isso indica a maior sensibilidade do método experimental ao valor da densidade da partícula. Isso mostra que é necessário um cuidado na avaliação da densidade das partículas em experimentos deste tipo. Se a sua incerteza for muito grande, a imprecisão da porosidade experimental pode se tornar significativa em decorrência de sua maior sensibilidade.

Os demais desvios relativos ficaram em menos de 1 %/%. Isso mostra que, na maioria das relações analisadas, uma alteração de 1% em uma variável de entrada causa menos de 1% de alteração na saída. O método experimental e o equacionamento proposto para obter valores de porosidade mostraram, de forma geral, uma boa resistência a imprecisões nas entradas. A utilização de valores médios de temperatura, densidade, diâmetro e velocidade terminal das partículas se mostrou válida para calcular a porosidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), da

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo nº 408618/2018-3 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - processo nº 2019/19173-9, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

NOMENCLATURA

ε_{exp}	Porosidade do leito determinada experimentalmente [-]
ε_{R-Z}	Porosidade do leito calculada por correlações [-]
dP/dz	Coefficiente angular da pressão no leito em função da altura [Pa/m]
ρ_p	Densidade da partícula [kg/m ³]
ρ_l	Densidade do líquido [kg/m ³]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
U	Velocidade superficial do líquido [m/s]
U_0	Velocidade terminal de sedimentação livre [m/s]
n	Índice de expansão da Equação de Richardson-Zaki [-]
k	Fator de correção da Equação de Richardson-Zaki [-]
d_p	Diâmetro da partícula [m]
D	Diâmetro da coluna de fluidização [m]
Ar	Número de Arquimedes [-]
μ	Viscosidade do Líquido [Pa.s]
T	Temperatura [°C]

REFERÊNCIAS

- Bakshi, A., et al. “Comprehensive multivariate sensitivity analysis of CFD-DEM simulations: Critical model parameters and their impact on fluidization hydrodynamics.” *Powder Technology* (Elsevier BV) 338 (October 2018): 519–537.
- Bello, Mustapha Mohammed, Abdul Aziz Abdul Raman, e Monash Purushothaman. “Applications of fluidized bed reactors in wastewater treatment – A review of the major design and operational parameters.” *Journal of Cleaner Production* (Elsevier BV) 141 (January 2017): 1492–1514.
- Bradski, Gary. “The openCV library.” *Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer* (Miller Freeman Inc.) 25 (2000): 120–123.
- Brown, Douglas, Robert Hanson, e Wolfgang Christian. “Tracker Video Analysis and Modeling Tool.” *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. April de 2022.
- Chen, Xiao-guang, Ping Zheng, Jing Cai, e Mahmood Qaisar. “Bed expansion behavior and sensitivity analysis for super-high-rate anaerobic bioreactor.” *Journal of Zhejiang University SCIENCE B* (Zhejiang University Press) 11 (February 2010): 79–86.
- DDBST. *Dortmund Data Bank. Online Calculation*. 2021. <http://www.ddbst.com/calculation.html>
- Deng, Zhiyi, Ka Y. Fung, Ka M. Ng, e Chaohai Wei. “Design of anaerobic fluidized bed bioreactor – Dyeing effluents.” *Chemical Engineering Science* (Elsevier BV) 139 (January 2016): 273–284.
- Epstein, Norman. *Liquid-Solids Fluidization. Handbook of fluidization and fluid-particle systems*. Edição: Wen-Ching Yang. Marcel Dekker, 2003.
- Khan, A R, e J F Richardson. “FLUID-PARTICLE INTERACTIONS AND FLOW CHARACTERISTICS OF FLUIDIZED BEDS AND SETTLING SUSPENSIONS OF SPHERICAL PARTICLES.” *Chemical Engineering Communications* (Informa UK Limited) 78 (April 1989): 111–130.
- Koppejan, Victor, Guilherme Ferreira, Dong-Qiang Lin, e Marcel Ottens. “Mathematical modelling of expanded bed adsorption - a perspective on in silico process design.” *Journal of*

Chemical Technology & Biotechnology (Wiley) 93 (April 2018): 1815–1826.

- Lopes, Gabriela C., Xiatao Bi, Norman Epstein, Susan A. Baldwin, e John R. Grace. “Hydrodynamic characteristics of particles with different roughness and deformability in a liquid fluidized bed.” *Chemical Engineering Science* (Elsevier BV) 185 (August 2018): 50–63.
- Pan, Suyang, Jiliang Ma, Daoyin Liu, Xiaoping Chen, e Cai Liang. “Theoretical and experimental insight into the homogeneous expansion of wet particles in a fluidized bed.” *Powder Technology* (Elsevier BV) 397 (January 2022): 117016.
- Piovano, Stella, Gabriel L. Salierno, Emiliano Montmany, Mauro D'Agostino, Mauricio Maestri, e Miryan Cassanello. “Bed Expansion and Particle Classification in Liquid Fluidized Beds with Structured Internals.” *Chemical Engineering & Technology* (Wiley) 38 (January 2015): 423–430.
- Richardson, J. F., e W. N. Zaki. “Sedimentation and fluidisation: Part I.” *Chemical Engineering Research and Design* (Elsevier BV) 75 (December 1954): S82–S100.
- Shi, Hongbo, Alexandra Komrakova, e Petr Nikrityuk. “Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments.” *Powder Technology* (Elsevier BV) 343 (February 2019): 479–494.
- Taghipour, Fariborz, Naoko Ellis, e Clayton Wong. “Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics.” *Chemical Engineering Science* (Elsevier BV) 60 (December 2005): 6857–6867.