

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DANIEL SILVA JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA A LASER PARA DETERMINAÇÃO DA  
POROSIDADE DE UM LEITO FLUIDIZADO SÓLIDO-LÍQUIDO**

SÃO CARLOS  
2024

DANIEL SILVA JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA A LASER PARA DETERMINAÇÃO DA  
POROSIDADE DE UM LEITO FLUIDIZADO SÓLIDO-LÍQUIDO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes

SÃO CARLOS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a  
Defesa de TCC do aluno Daniel Silva Junior, realizada em 22/01/2024:

---

Prof. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes

DEQ – Universidade Federal de São Carlos

---

Prof. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega

DEQ – Universidade Federal de São Carlos

---

Prof. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares

DEQ – Universidade Federal de São Carlos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que participaram deste trabalho, em especial ao Victor e à Prof<sup>a</sup> Gabriela.

Também agradeço o 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).

## RESUMO

A determinação confiável da porosidade é uma etapa importante no projeto de leitos fluidizados. Neste trabalho, foram estudados diferentes métodos experimentais de determinação da porosidade de um leito fluidizado sólido-líquido. Foi realizada a fluidização em água de quatro grupos de partículas com diferentes propriedades, em um equipamento de fluidização em escala de bancada, para obter pontos de porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) em função da velocidade superficial do líquido ( $U$ ), utilizando três técnicas diferentes. A primeira técnica utiliza um sensor de pressão diferencial para obter o gradiente vertical de pressão ( $dP/dz$ ) e então relacioná-lo à porosidade por meio do balanço de forças. A segunda técnica consiste em obter visualmente a altura média do leito de partículas ( $H$ ) e relacioná-la à porosidade por meio da definição de porosidade e do volume do leito. A terceira técnica, desenvolvida neste trabalho, consiste em utilizar um diodo emissor de laser e um sensor de luz acoplados à coluna, com o objetivo de determinar a altura do leito com maior precisão e repetibilidade. Os perfis de luminosidade ao redor da superfície do leito apresentaram o formato sigmoide, como esperado. Foi possível encontrar a superfície do leito com uma precisão de menos de 5 mm. Houve grande proximidade entre os valores obtidos de porosidade pelas três técnicas, principalmente entre as duas técnicas que utilizam a altura do leito. As maiores diferenças entre as três técnicas foram observadas para velocidades superficiais menores, indicando que os métodos concordam mais para leitos menos densos. O método a laser foi significativamente mais preciso que o método visual, fornecendo valores de desvio padrão até 7 vezes menores. As curvas experimentais concordaram com o modelo de Richardson-Zaki. Os valores dos parâmetros adimensionais  $n$  e  $k$  indicam que os dois métodos baseados na altura do leito concordam mais com os valores reportados na literatura.

**Palavras-chave:** Leito Fluidizado, Porosidade, Técnicas de Medida.

## ABSTRACT

Obtaining reliable values for bed voidage is a crucial step in the design of fluidized beds. In this work, we studied different experimental methods for determination of a liquid-solid fluidized bed voidage. Four groups of particles with different properties were fluidized in water using laboratory-scale fluidization equipment. We obtained experimental values of bed voidage ( $\varepsilon$ ) as a function of liquid superficial velocity ( $U$ ) using three different techniques. The first one uses a differential pressure sensor for obtaining the vertical pressure gradient ( $dP/dz$ ) and relating it to the voidage using the force balance. The second one consists of visually obtaining the average bed height ( $H$ ) and relating it to the voidage using the definition of voidage and the bed volume. The third technique, developed in this work, consists in using a light-emitting diode (LED) and a LDR light sensor on the outside of the column, for determining the bed height with more precision and reproducibility. The luminosity profiles around the bed's surface had a sigmoid shape, as expected. We could find the bed's height with less than 5 mm difference between measurements. The voidage values obtained by the three techniques were remarkably similar, specially between the two techniques based on the bed's height. We observed the biggest differences for smaller superficial velocities, showing that the methods have better agreement in less dense beds. The laser method was more precise than the visual method, with standard deviation being seven times smaller. The experimental curves agreed with Richardson-Zaki model. The values of parameters  $n$  and  $k$  showed that the two methods based on bed height are closer to the bed behavior reported in literature.

**Keywords:** Fluidized bed, Bed voidage, Measurement techniques.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sonda de Fibra Ótica	5
Figura 2 – Boroscopia	6
Figura 3 – Imagens das Partículas	9
Figura 4 – Determinação da velocidade terminal	11
Figura 5 – Leito Fluidizado usado nos testes experimentais	12
Figura 6 – Aparato a laser e resposta esperada do sinal de luminosidade	15
Figura 7 – Equipamento a laser para determinação da altura do leito	16
Figura 8 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (30 L/min – Luz ambiente apagada)	18
Figura 9 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (50 L/min – Luz ambiente apagada)	18
Figura 10 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (70 L/min – Luz ambiente apagada)	19
Figura 11 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (30 L/min – Luz ambiente acesa)	19
Figura 12 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (50 L/min – Luz ambiente acesa)	20
Figura 13 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (70 L/min – Luz ambiente acesa)	20
Figura 14 – Perfil de Pressão (Partículas de ABS)	21
Figura 15 – Perfil de Pressão (Partículas de Alumina – Diâmetro maior)	22
Figura 16 – Perfil de Pressão (Partículas de Alumina – Diâmetro menor)	22
Figura 17 – Perfil de Pressão (Partículas de Porcelana)	23
Figura 18 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade (Partículas de ABS)	24

Figura 19 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade (Partículas de Alumina – diâmetro maior)	24
Figura 20 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade (Partículas de Alumina – diâmetro menor)	25
Figura 21 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade (Partículas de Porcelana)	25
Figura 22 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki (Partículas de ABS)	30
Figura 23 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki (Partículas de Alumina – Diâmetro Maior)	30
Figura 24 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki (Partículas de Alumina – Diâmetro Menor)	31
Figura 25 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki (Partículas de Porcelana)	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das partículas	11
Tabela 2 – Condições experimentais	13
Tabela 3 – Comparação percentual dos valores de porosidade (Partículas de ABS)	26
Tabela 4 – Comparação percentual dos valores de porosidade (Partículas de Alumina – Diâmetro maior)	27
Tabela 5 – Comparação percentual dos valores de porosidade (Partículas de Alumina – Diâmetro menor)	27
Tabela 6 – Comparação percentual dos valores de porosidade (Partículas de Porcelana)	28
Tabela 7 – Comparação dos desvios padrão na determinação da altura pelos métodos Visual e de Laser.	29
Tabela 8 – Valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo de Richardson-Zaki linearizado	32
Tabela 9 – Comparação entre valores do parâmetro $n$ do modelo de Richardson-Zaki	33
Tabela 10 – Comparação entre valores do parâmetro $k$ do modelo de Richardson-Zaki	33

## LISTA DE SÍMBOLOS

$U$	Velocidade superficial do líquido [m/s]
$\varepsilon$	Porosidade do leito [-]
$dP/dz$	Gradiente vertical de pressão no leito [Pa/m]
$H$	Altura do leito [m]
$\rho_p$	Densidade das partículas [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_l$	Densidade do líquido [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$A$	Área da seção transversal da coluna de fluidização [m <sup>2</sup> ]
$m_p$	Massa total de partículas no leito [kg]
$U_0$	Velocidade terminal das partículas [m/s]
$n$	Índice de expansão do modelo de Richardson-Zaki [-]
$k$	Fator de correção do modelo de Richardson-Zaki [-]
$Ar$	Número de Arquimedes [-]
$D$	Diâmetro da coluna de fluidização [m]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do líquido [Pa.s]
$T$	Temperatura média da água [°C]
$m_{pic}$	Massa do picnômetro vazio [kg]
$V_{pic}$	Volume do picnômetro [m <sup>3</sup> ]

$m$  Massa do picnômetro preenchido com partículas e água [kg]

$d_p$  Diâmetro das partículas [m]

$Re$  Número de Reynolds [-]

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Fluidização</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Técnicas de determinação da porosidade</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1 Sonda de Fibra ótica</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2 Boroscopia</b>	<b>5</b>
<b>2.2.3 Gradiente de pressão vertical</b>	<b>6</b>
<b>2.2.4 Altura do leito</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Previsão da porosidade do leito utilizando o modelo de Richardson-Zaki</b>	<b>7</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Caracterização das partículas</b>	<b>9</b>
<b>3.1.1 Determinação da densidade das partículas</b>	<b>9</b>
<b>3.1.2 Determinação do diâmetro das partículas</b>	<b>10</b>
<b>3.1.3 Determinação da velocidade terminal das partículas</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Leito Fluidizado</b>	<b>12</b>
<b>3.3 Determinação experimental da porosidade do leito</b>	<b>13</b>
<b>3.3.1 Técnica do gradiente de pressão vertical (sensor de pressão)</b>	<b>13</b>
<b>3.3.2 Técnica da determinação visual da altura do leito</b>	<b>14</b>
<b>3.3.3 Técnica a laser para determinação da altura do leito</b>	<b>14</b>

3.4 Concordância das curvas experimentais com a equação de Richardson-Zaki	17
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>18</b>
4.1 Estudo do comportamento da luminosidade ao redor da superfície	18
4.2 Perfis de queda de pressão no leito (técnica do gradiente de pressão)	21
4.3 Comparação dos valores de porosidade obtidos pelas três técnicas	23
4.4 Comparação entre as duas técnicas de medida de altura	29
4.5 Concordância das curvas experimentais com a equação de Richardson-Zaki	30
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A fluidização de partículas sólidas é um fenômeno que ocorre em equipamentos industriais utilizados para vários fins, como classificação de partículas (Piovano, et al. 2015), adsorção (Koppejan, et al. 2018), biorreações (Deng, et al. 2016), entre outras.

Uma etapa importante do projeto de leitos fluidizados é a determinação da relação entre velocidade superficial do fluido ( $U$ ) e a porosidade do leito ( $\varepsilon$ ). É necessário determinar a porosidade de maneira confiável, pois ela interfere na estimativa de taxas de transferência de calor e massa e na taxa de reações que dependem da interação entre partículas e fluido (Epstein, 2003).

Há diversas técnicas experimentais para determinação da porosidade de um leito fluidizado (Van Ommen & Mudde, 2008). Estas incluem métodos baseados no gradiente de pressão no leito, métodos baseados na altura do leito durante a fluidização, e métodos de imagem para determinar a concentração de partículas.

Os métodos baseados no gradiente de pressão no leito envolvem determinar a queda de pressão do leito fluidizado em várias alturas. Pode ser aplicado a qualquer tipo de leito fluidizado sólido-líquido, mas requer um método confiável de determinação de pressão diferencial (manômetro diferencial ou sensor de pressão) e várias perfurações na coluna de fluidização para que sejam feitas as tomadas de pressão. A aplicação destes métodos depende fortemente da escolha do instrumento de medida, de maneira de sua faixa de valores e resolução sejam compatíveis com o perfil de queda de pressão de cada leito de partículas (Ferreira et al. 2023).

Os métodos de imagem envolvem filmar ou fotografar as partículas durante a fluidização, ou medir a quantidade de luz refletida ou transmitida pelo leito. Estes métodos requerem a análise de imagens ou valores de luminosidade, e a conversão em valores de porosidade depende de uma curva de calibração adequadamente preparada. Além disso, não permitem obter dados sobre o interior do leito de forma não-invasiva, já que necessitam que um aparelho seja introduzido no escoamento (Aguilar Corona 2011; Duris et al. 2013). Em leitos transparentes, somente é possível investigar com fidelidade as partículas na parte externa.

Os métodos baseados na altura do leito se baseiam na determinação do volume ocupado pelo leito quando ele se expande durante a fluidização. Podem ser colocados em prática com uma medida direta em leitos transparentes, ou com sensores de distância em leitos opacos. Possuem a vantagem de poderem ser implementados de forma não-invasiva, e não dependem de curvas de calibração para a determinação da porosidade (Ferreira et al. 2023).

Neste trabalho, três técnicas diferentes para determinação da porosidade de um leito fluidizado sólido-líquido foram testadas, e seus resultados foram comparados. A primeira técnica utiliza um sensor de pressão diferencial para obter o gradiente vertical de pressão ( $dP/dz$ ) e então relacioná-lo à porosidade por meio do balanço de forças. A segunda técnica consiste em obter visualmente a altura média do leito de partículas ( $H$ ) e relacioná-la à porosidade por meio da definição de porosidade e do volume do leito. A terceira técnica, desenvolvida neste trabalho, consiste em utilizar um diodo emissor de laser e um sensor de luz acoplados à coluna, com o objetivo de determinar a altura do leito com maior precisão e repetibilidade.

O objetivo foi comparar as três técnicas, verificar se havia diferenças significativas entre elas, e mostrar que a técnica a laser pode ser implementada de forma simples, barata e eficiente, gerando resultados confiáveis de porosidade do leito, de forma não-invasiva e com baixo desvio padrão entre réplicas de experimentos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta seção, os regimes de fluidização para escoamentos líquido-sólido são introduzidos, e são descritas algumas técnicas de determinação da porosidade de leitos fluidizados, com destaque para o método de cálculo da porosidade por meio da altura do leito, que é a base para o desenvolvimento da técnica a laser apresentada nas demais seções.

### **2.1 – Fluidização**

Em equipamentos de leito fluidizado, um compartimento é preenchido com partículas sólidas, e um fluido (líquido ou gás) é injetado pela parte inferior. O fluido percorre o equipamento de baixo para cima e sai pela parte superior. Quando a vazão de fluido é baixa, ele escoar pelos interstícios entre os sólidos, sem provocar sua ascensão. Em vazões maiores, as forças aplicadas pelo fluido nos sólidos serão suficientes para vencer seu peso, erguendo as partículas sólidas e promovendo sua fluidização. Durante a fluidização, as partículas são agitadas e seu movimento se assemelha ao de um fluido.

O regime de fluidização é caracterizado pela velocidade superficial do fluido, definida como a velocidade média que o fluido teria, se não houvesse partículas. A velocidade superficial em que o leito passa de leito fixo para leito fluidizado é chamada de velocidade mínima de fluidização. Acima desta velocidade, o leito se expande de acordo com a vazão de fluido. Aumentando a velocidade superficial acima da velocidade terminal, as partículas são arrastadas para fora da coluna. A velocidade terminal é a máxima velocidade que uma partícula atinge em queda livre em determinado meio. Ela também determina a transição do regime de fluidização para o regime de transporte hidráulico (ou pneumático). A fluidização ocorre entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal, e nesta faixa a expansão do leito aumenta com o aumento da velocidade superficial (EPSTEIN, 2003).

## **2.2 Técnicas de determinação da porosidade**

A determinação confiável da porosidade de um leito fluidizado é importante pois afeta outras etapas do projeto de equipamentos de fluidização, sendo necessária para estimar: tamanho do equipamento, taxas de transferência de calor e massa ou taxas de reações químicas e bioquímicas. Nesta seção são apresentadas quatro técnicas para determinação da porosidade: sonda de fibra ótica, boroscopia, gradiente de pressão vertical e altura do leito.

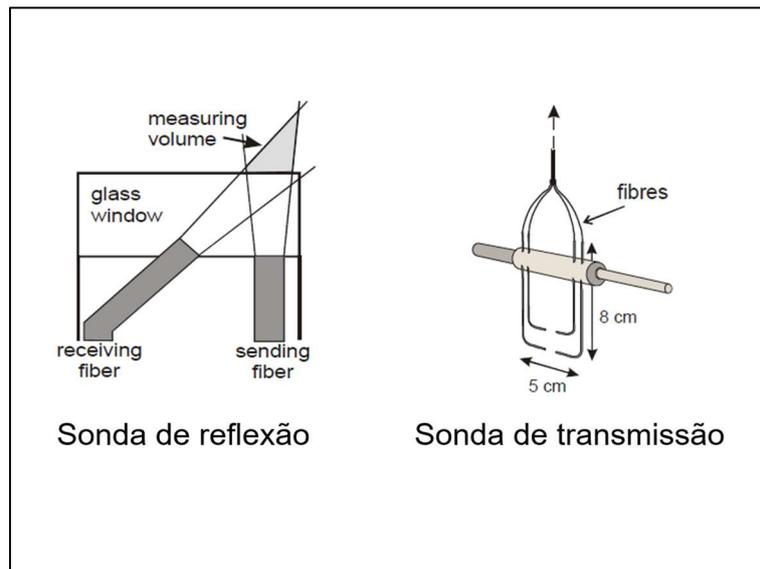
### **2.2.1 – Sonda de Fibra ótica**

As sondas de fibra ótica fazem parte de um grupo de técnicas para determinação da concentração de sólidos em sistemas multifásicos que se baseiam na aplicação de um feixe de luz e na captação da intensidade luminosa transmitida ou refletida pelo leito. Estes equipamentos de medição consistem em conjuntos de fibras emissoras ou receptoras de luz.

Nas sondas que medem a reflexão de luz, as fibras emissoras e receptoras fazem parte de um mesmo feixe, que é introduzido na coluna. Nas sondas que medem a transmissão de luz, dois feixes (um com fibras emissoras e outro com fibras receptoras) são posicionados frente a frente, no interior da coluna. Por meio de uma curva de calibração, a quantidade de luz captada é relacionada à concentração de partículas e à porosidade do leito.

A principal vantagem desta técnica é estar bem estabelecida, ser barata e simples. Porém, é um método invasivo, que pode perturbar o comportamento do leito pela introdução da sonda (Van Ommen & Mudde, 2008). A Figura 1 ilustra sondas de fibra ótica.

Figura 1 – Sonda de fibra ótica



(Adaptado de Van Ommen & Mudde, 2008)

### 2.2.2 – Boroscopia

A Boroscopia consiste na utilização de um equipamento chamado Boroscópio, que é usado industrialmente na inspeção visual da parte interna de máquinas e equipamentos de processo. Ele consiste em um tubo flexível com uma câmera na ponta, que pode ser introduzido em locais fechados e permite realizar a observação em um visor.

Boroscópios que são capazes de gravar uma filmagem da inspeção são também chamados de videoscópios. Por meio da análise de vídeos produzidos por boroscopia, a concentração de sólidos em sistemas multifásicos pode ser estimada. Há modelos compatíveis com câmeras, telefones ou computadores, e este método possui como vantagem apresentar boa reprodutividade. A desvantagem, no caso da determinação da porosidade de leitos fluidizados, é que este é um método invasivo, e o diâmetro do equipamento pode alterar o escoamento de forma significativa (COCCO, 2010). A Figura 2 ilustra um boroscópio.

Figura 2 – Boroscopia



(Yuqiao Store, 2023)

### 2.2.3 – Gradiente de pressão vertical

Durante a fluidização, as partículas sólidas estão em equilíbrio dinâmico, movendo-se ao redor do centro de massa do leito, que permanece fixo. Nestas condições, as forças atuantes sobre a partícula são o peso, o empuxo e o arrasto do líquido. Para que o balanço de forças esteja em equilíbrio, a soma de empuxo e arrasto deve ser igual ao peso da partícula. O gradiente vertical de pressão no leito ( $dP/dz$ ), então, é dado pela Equação 1.

$$\frac{dP}{dz} = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_l)g \quad (1)$$

em que  $\rho_p$  é a densidade das partículas,  $\rho_l$  é a densidade do líquido e  $g$  é a aceleração da gravidade.

O gradiente de pressão vertical pode ser obtido por meio de um sensor de pressão diferencial ou de um manômetro diferencial. Por meio do gradiente de pressão e as densidades do sólido e do líquido, podemos utilizar a Equação 1 para estimar a porosidade do leito fluidizado.

A vantagem desta técnica é poder ser aplicada a diferentes tipos de leito fluidizado, porém requer perfurações no leito, e um instrumento de medida de pressão diferencial que seja compatível com a queda de pressão total do leito e com a precisão desejada nos resultados.

#### 2.2.4 – Altura do leito

A porosidade é definida como a fração volumétrica de vazios, ou a fração do volume do leito (líquido + partículas) que é ocupada pelo líquido. Em uma coluna de fluidização com área horizontal constante ( $A$ ), podemos relacionar a altura média do leito ( $H$ ) ao volume total do leito. Conhecendo-se a massa de partículas no leito ( $m_p$ ) e sua densidade ( $\rho_p$ ), podemos obter o volume de partículas. Por meio destes valores, é possível estimar a porosidade utilizando a Equação 2.

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\rho_p A H} \quad (2)$$

A vantagem deste método é de poder ser implementado de forma não invasiva, porém é necessária uma padronização na definição da superfície do leito entre réplicas, já que o movimento aleatório das partículas produz uma interface cuja altura média não é diretamente identificável.

### 2.3 Previsão da porosidade do leito utilizando o modelo de Richardson-Zaki

Na literatura sobre fluidização sólido-líquido, há um modelo bastante utilizado, proposto por Richardson e Zaki (1959) que relaciona a porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) à velocidade superficial do líquido ( $U$ ) por meio da velocidade terminal ( $U_0$ ) e de dois parâmetros adimensionais: o índice de expansão ( $n$ ) e o fator de correção ( $k$ ). A forma linearizada do modelo de Richardson-Zaki é mostrada na Equação 3.

$$\ln U = \ln(kU_0) + n \ln(\varepsilon) \quad (3)$$

Os parâmetros  $n$  e  $k$  podem ser estimados por correlações baseadas nas propriedades do fluido e das partículas. Khan & Richardson (1989) desenvolveram as Equações 4 e 5 para este fim.

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

$$k = 1 - 1,15 \left( \frac{d_p}{D} \right)^{0,6} \quad (5)$$

Nestas equações,  $Ar$  é o número de Arquimedes (Equação 6),  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas e  $D$  é o diâmetro da coluna.

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_l (\rho_p - \rho_l) g}{\mu^2} \quad (6)$$

Nesta equação,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do líquido, que pode ser calculada, para a água, por meio da Equação 7 (DDBST, 2021), em que  $T$  é a temperatura da água.

$$\mu = 0,001 \cdot \exp \left[ -3,7188 + \frac{578,919}{(T + 273) - 137,546} \right] \quad (7)$$

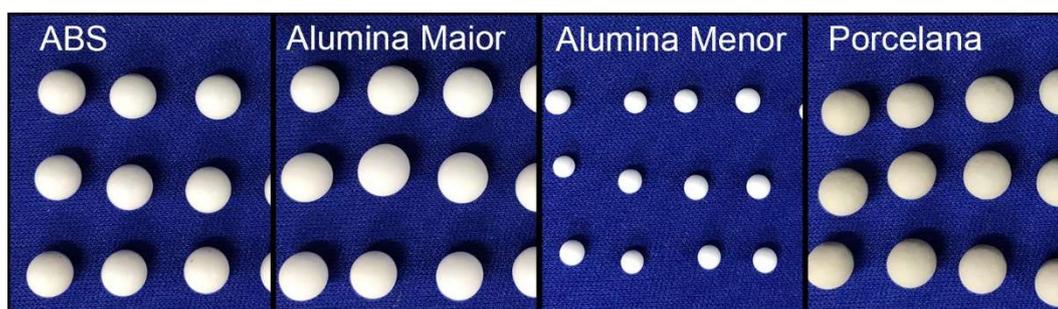
### 3. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia dos experimentos de fluidização. Serão descritos: a caracterização das partículas (obtendo valores de densidade, diâmetro e velocidade terminal), o leito fluidizado, e os experimentos para determinação da porosidade do leito utilizando três técnicas.

#### 3.1 – Caracterização das partículas

Neste trabalho foram utilizados quatro grupos de partículas, de três materiais diferentes. Estes materiais são: Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), Porcelana e Alumina (em dois diâmetros diferentes). Estes materiais foram selecionados para abranger diferentes valores de propriedades físicas das partículas. A Figura 3 mostra imagens das partículas.

Figura 3 – Imagens das Partículas



As partículas são esferas comerciais, e foram utilizadas como adquiridas, sem passar por algum tratamento. Apenas houve o cuidado de mantê-las em água entre experimentos para evitar que as partículas porosas (de Alumina e Porcelana) perdessem água e sua densidade fosse alterada. Todos os grupos de partículas foram caracterizados quanto à sua densidade, diâmetro e velocidade terminal.

##### 3.1.1 – Determinação da densidade das partículas

A densidade foi obtida utilizando um picnômetro de 25 mL. Uma amostra de partículas de cada grupo foi pesada e inserida no picnômetro, que foi preenchido com água.

A densidade média das partículas ( $\rho_p$ ) foi obtida por meio da Equação 8:

$$\rho_p = \frac{m_p \rho_l}{V_{pic} \rho_l + m_p + m_{pic} - m} \quad (8)$$

em que  $m_p$  é a massa das partículas,  $m_{pic}$  é a massa do picnômetro vazio,  $V_{pic}$  é o volume do picnômetro,  $\rho_l$  é a densidade da água e  $m$  é a massa do picnômetro preenchido com a amostra de partículas e água. A densidade do líquido foi calculada a partir da temperatura ( $T, ^\circ\text{C}$ ) por meio da Equação 9 (DDBST, 2021):

$$\rho_l = 0,14395 \cdot 0,0112 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{T+273}{649,727} \right)^{0,05107} \right] \quad (9)$$

### 3.1.2 – Determinação do diâmetro das partículas

O diâmetro das partículas foi obtido por meio de fotografias de 20 partículas de cada grupo. Elas foram posicionadas em um suporte de cor escura, sem se tocarem. Também foi fotografada, na mesma imagem, uma partícula de referência de diâmetro conhecido. As imagens foram tratadas com um código escrito em Python utilizando a biblioteca de análise de imagens OpenCV (BRADSKI, 2000). Baseando-se na área da imagem ocupada por cada partícula, e utilizando a partícula de referência, foi possível obter o diâmetro das outras 20 partículas, e utilizar o valor médio como representativo do grupo.

### 3.1.3 – Determinação da velocidade terminal das partículas

A velocidade terminal foi obtida por meio da filmagem da queda de 10 partículas de cada grupo em um tanque vertical de base quadrada, com 20 cm de lado, preenchido com água. Cada partícula foi presa em uma pinça sobre o tanque, e solta ao mesmo tempo que foi iniciada a filmagem. Foi utilizada uma câmera de alta velocidade (Sony DSC RX100M) para produzir vídeos da queda individual de cada partícula, a 960 quadros por segundo. Estes vídeos foram

analisados com o software Tracker (BROWN et al., 2022) para obter a velocidade terminal, e a média de todos os vídeos foi utilizada como valor final. A posição das partículas a cada quadro da filmagem foi obtida com base em uma fita métrica imersa no tanque. Durante o tratamento de dados com o software, as marcações da fita foram utilizadas para calcular o deslocamento da partícula e obter sua velocidade média durante a queda. A Figura 4 ilustra o procedimento experimental.

Figura 4 – Determinação da velocidade terminal



A Tabela 1 mostra os valores de densidade ( $\rho_p$ ), diâmetro ( $d_p$ ) e velocidade terminal ( $U_0$ ) para cada grupo de partículas.

Tabela 1 – Propriedades das partículas

Partícula	$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_p$ (mm)	$U_0$ (m/s)
ABS	1822 ± 05	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 ± 03	6,13 ± 0,19	0,51 ± 0,02

### 3.2 – Leito Fluidizado

O equipamento utilizado para fluidizar as partículas é mostrado na Figura 5. Ele consiste em: uma coluna de acrílico transparente de 1 m de comprimento e 10 cm de diâmetro interno; um reservatório de água; uma bomba centrífuga de ½ HP; um leito fixo de partículas de vidro utilizado para uniformizar o perfil de velocidades na entrada, sobre o qual há uma placa perfurada que funciona como distribuidor; um sensor de temperatura NTC posicionado no reservatório; um sensor de pressão diferencial MPX5010-DP; um diodo laser de 5V e um sensor de luz LDR montados sobre uma plataforma deslizante; e um sensor de vazão de efeito Hall YF-G1.

Figura 5 – Leito Fluidizado usado nos testes experimentais



Em cada experimento, uma quantidade de partículas de determinado grupo foi pesada e introduzida na coluna. A vazão de líquido foi ajustada em um valor, e foi medida a porosidade do leito. Este procedimento foi repetido para vários valores de vazão de água, e em triplicata, para cada técnica de determinação da porosidade. A Tabela 2 mostra a massa total de partículas (obtida de modo a manter um volume inicial aproximadamente igual entre os grupos de partículas), número e faixa de vazões testadas, e faixa de número de Reynolds ( $Re$  considerando o diâmetro da coluna).

Tabela 2 – Condições experimentais

Partícula	$m_p$ (kg)	Nº vazões	Faixa	
			Vazões (L/min)	Faixa $Re$
ABS	2,0	11	25 – 75	5944 – 17740
Alumina maior	4,0	8	40 – 75	9483 – 17740
Alumina menor	4,0	8	40 – 75	9483 – 17740
Porcelana	2,7	11	25 – 75	5944 – 17740

### 3.3 – Determinação experimental da porosidade do leito

Aqui serão apresentadas as três técnicas utilizadas para determinação da porosidade do leito, que serão posteriormente comparadas.

#### 3.3.1 Técnica do gradiente de pressão vertical (sensor de pressão)

Nesta técnica, a porosidade do leito é determinada a partir do gradiente vertical de pressão no leito. A coluna possui 14 perfurações, a cada 6 cm, ao longo de sua altura. A elas estão acoplados tubos flexíveis ligados ao sensor de pressão diferencial. Cada tubo possui uma presilha, que permite abrir ou fechar o tubo. Em cada experimento, o tubo ligado à base do leito foi mantido aberto, e, em sequência, cada um dos outros foi aberto, e foi medida a pressão diferencial entre os dois tubos abertos. Em todos os momentos de medição, havia somente dois tubos abertos ligados ao sensor, sendo um deles o tubo ligado à base. Ajustando uma reta a estes pontos de pressão em função da altura, foi obtido o gradiente vertical de pressão ( $dP/dz$ ), que foi convertido em porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) pela Equação 1. A temperatura da água aumentou com o tempo durante o experimento, por causa do bombeamento, e foi utilizado o valor médio para obter a densidade da água.

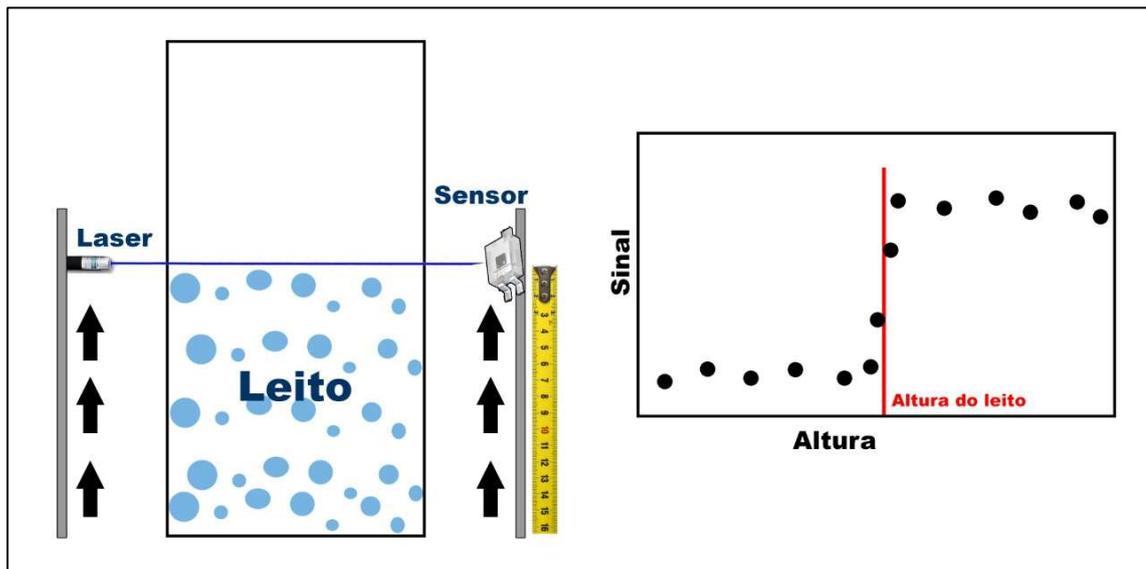
### **3.3.2 – Técnica da determinação visual da altura do leito**

Nesta técnica, a porosidade do leito é calculada a partir da altura do leito ( $H$ ), por meio da utilização direta de uma fita métrica colada na parte externa da coluna. Conhecendo-se a altura do leito, podemos estimar o volume que o leito ocupa, por meio da equação para o volume de um cilindro. Deste volume, deduzimos o volume ocupado pelas partículas, obtido por meio da densidade e massa total de partículas, para obter o volume do leito ocupado pelo líquido. Dividindo este volume pelo volume total do leito, obtemos a “fração de vazios” que representa a porosidade do leito. Este raciocínio fornece a Equação 2, que foi utilizada para determinar a porosidade em função da altura do leito.

### **3.3.3 – Técnica a laser para determinação da altura do leito**

Esta técnica foi desenvolvida neste trabalho como um aperfeiçoamento da técnica anterior, com o objetivo de torná-la mais reprodutível e menos dependente do observador. Nesta técnica, a porosidade do leito é calculada a partir da altura do leito, determinada com um sistema óptico desenvolvido em Arduino. Neste sistema, um diodo laser e um sensor de luz foram posicionados em lados opostos da coluna transparente, na parte externa. O diodo laser emite um feixe de luz direcionado para o sensor. A plataforma na qual estão fixados pode deslizar sobre um eixo vertical e ser posicionada em diferentes alturas. Quando a plataforma está acima da superfície do leito, não há partículas no caminho do laser, e o sensor retorna um sinal de alta luminosidade. Quando a plataforma está abaixo da superfície, há muitas partículas interrompendo o caminho do laser, e o sensor retorna um sinal de baixa luminosidade. Quando a plataforma estiver exatamente na altura da superfície do leito, o sensor acusará um sinal próximo à média entre os dois sinais anteriores. Este método é indicado para leitos homogêneos. A Figura 6 mostra um esquema do funcionamento do aparato e do comportamento esperado dos valores de luminosidade.

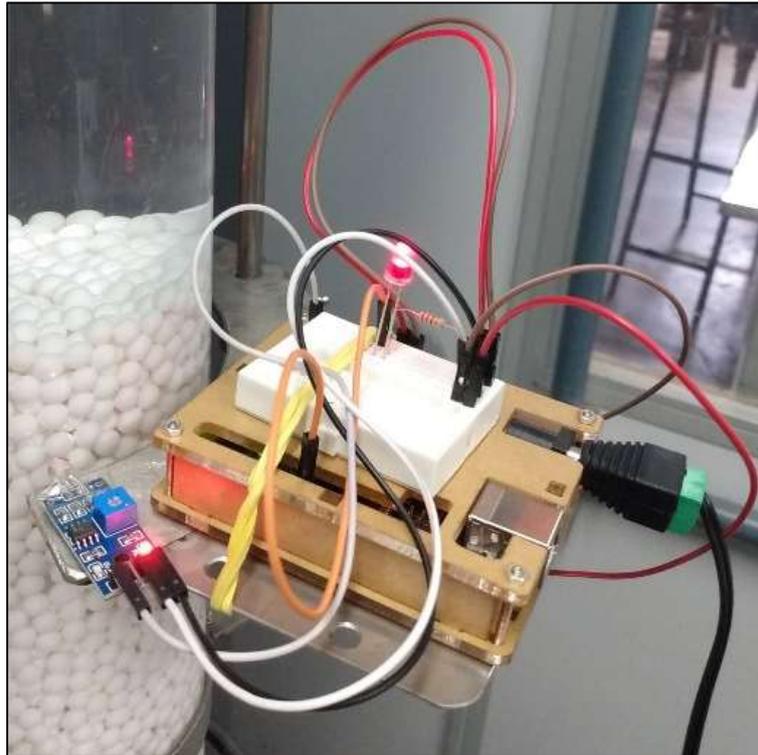
Figura 6 – Aparato a laser e resposta esperada do sinal de luminosidade



Para fins de calibração, antes de cada corrida experimental eram medidos os valores de sinal de luminosidade muito acima e muito abaixo do leite, com o objetivo de obter os valores-limite recebidos pelo sensor longe da superfície. Os dois valores eram inseridos no código utilizado pelo microcontrolador Arduino, que calculava a média entre eles, e passava a acender uma luz indicativa sempre que a média móvel de 15 segundos de medição ficasse dentro da faixa de  $\pm 10\%$  do valor médio.

Quando a luz indicativa se estabilizava e ficava ligada continuamente, a plataforma era fixada e sua altura era medida precisamente com uma fita métrica. A porosidade foi calculada da mesma maneira que no método anterior. Esta técnica é mais rigorosa que a simples inspeção visual, pois contorna o problema da difícil identificação da superfície do leite em virtude da movimentação aleatória das partículas. A Figura 7 mostra o equipamento utilizado na técnica a laser, com destaque para o sensor de luz, o microcontrolador Arduino e a luz indicativa.

Figura 7 – Equipamento a laser para determinação da altura do leito



Para validar a faixa adequada de valores de luminosidade ao redor da média em que a luz indicativa indicaria a superfície ( $\pm 10\%$ ), foram realizados experimentos de avaliação do sinal recebido pelo sensor de luz. Se esta faixa fosse grande demais, a precisão da determinação da altura seria prejudicada, pois a luz permaneceria ligada a uma grande distância da superfície. Se fosse pequena demais, seria muito difícil encontrar uma altura em que a luz indicativa ficasse continuamente ligada, por causa das oscilações no sinal causadas pelo movimento das partículas na superfície do leito. Por isso, foi determinado o perfil do sinal de luz em relação à distância até a superfície. Também foi estudada a interferência da luz ambiente no sinal recebido pelo sensor de luz, obtendo os perfis para dois níveis diferentes de luz ambiente.

Uma massa de 2,7 kg de partículas do grupo de Porcelana foi submetida à fluidização em três vazões diferentes (30, 50 e 70 L/min), em duas condições: luz ambiente acesa ou apagada. Durante 1 minuto, o sinal de luminosidade foi medido em diferentes alturas ao redor da superfície do leito, espaçadas verticalmente em 2,5 mm. Além disso, o sinal de luminosidade foi medido a uma grande distância acima ou abaixo da superfície, para obter o valor-limite do sinal.

A média de 1 minuto de cada valor foi obtida, e plotada em função da distância até a superfície para obter o perfil de sinal de luminosidade ao redor da superfície.

### **3.4 – Concordância das curvas experimentais com a equação de Richardson-Zaki**

Para avaliar se a curva experimental de  $\varepsilon$  vs.  $U$  apresentou o formato esperado, o modelo de Richardson-Zaki foi ajustado aos pontos experimentais, e o coeficiente de determinação foi analisado.

Além disso, os parâmetros  $n$  e  $k$  obtidos pelo ajuste foram comparados com os valores obtidos pelas correlações empíricas propostas por Khan & Richardson (1989) (Equações 4 e 5).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Estudo do comportamento da luminosidade ao redor da superfície

As Figuras 8 a 13 mostram os perfis obtidos de sinal de luminosidade ao redor da superfície do leito. O ponto azul é a superfície. As linhas em preto são os valores longe da superfície. Os pontos em vermelho foram medidos a cada 2,5 mm, acima e abaixo da superfície.

Figura 8 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (30 L/min – Luz ambiente apagada)

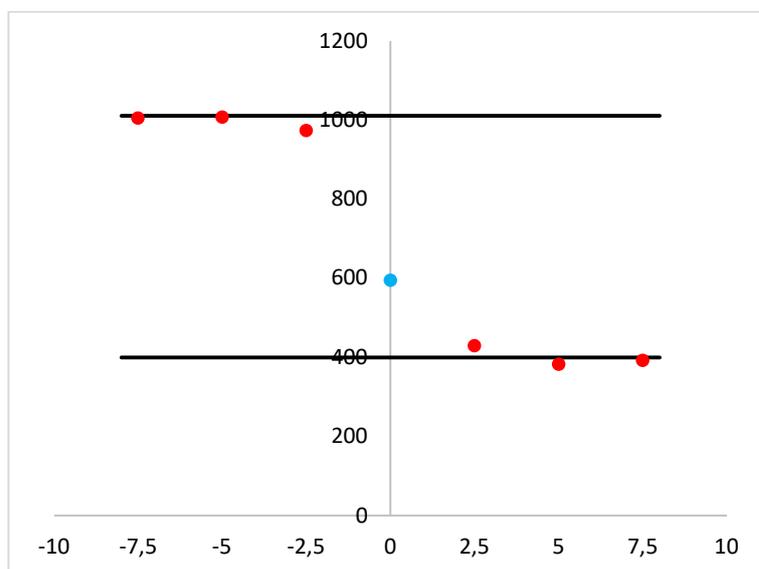


Figura 9 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície (50 L/min – Luz ambiente apagada)

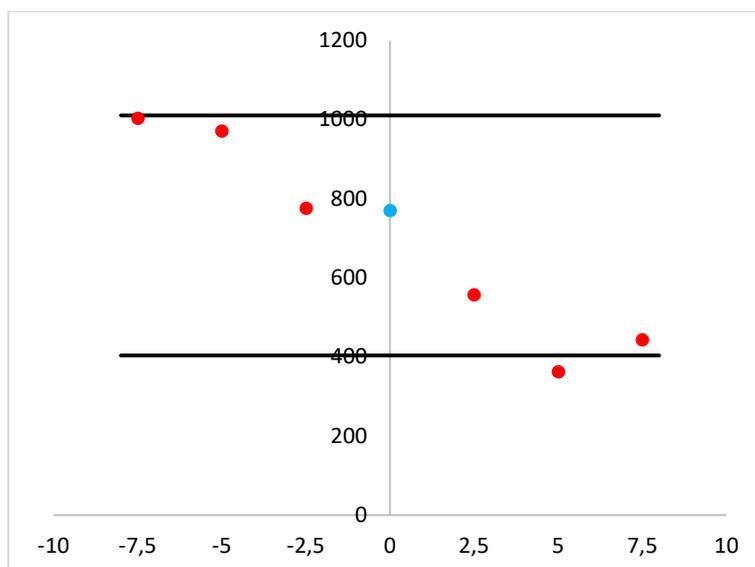


Figura 10 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície  
(70 L/min – Luz ambiente apagada)

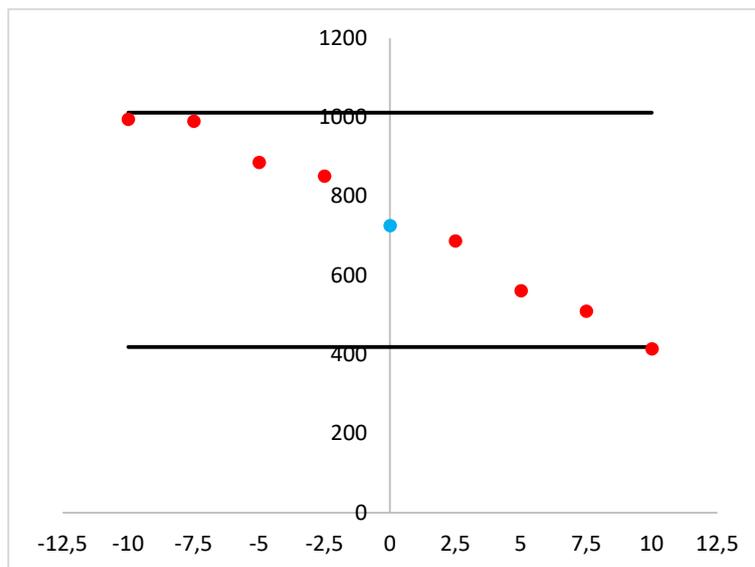


Figura 11 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície  
(30 L/min – Luz ambiente acesa)

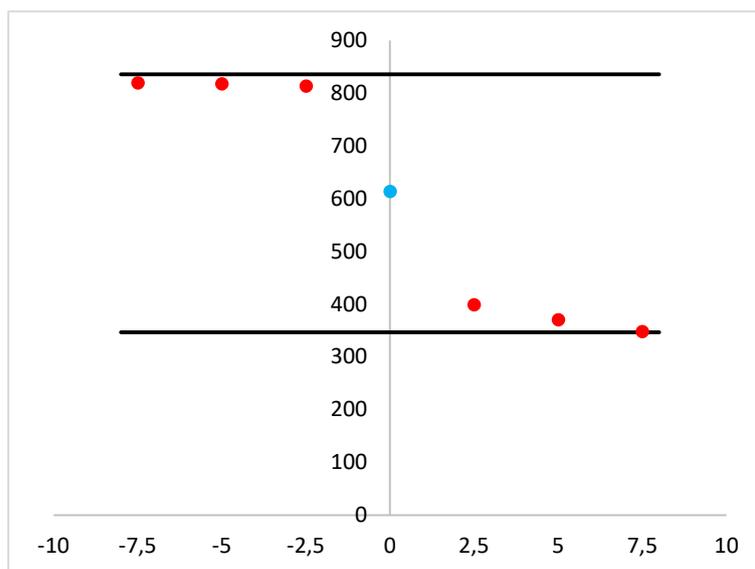


Figura 12 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície  
(50 L/min – Luz ambiente acesa)

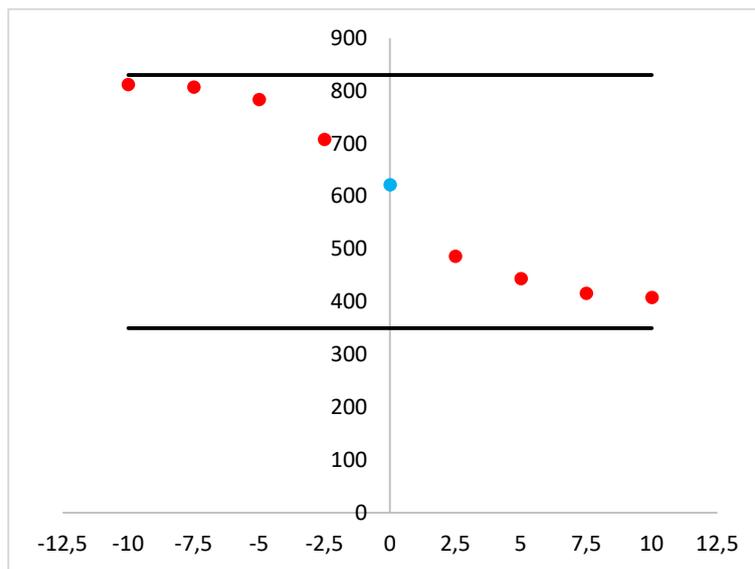
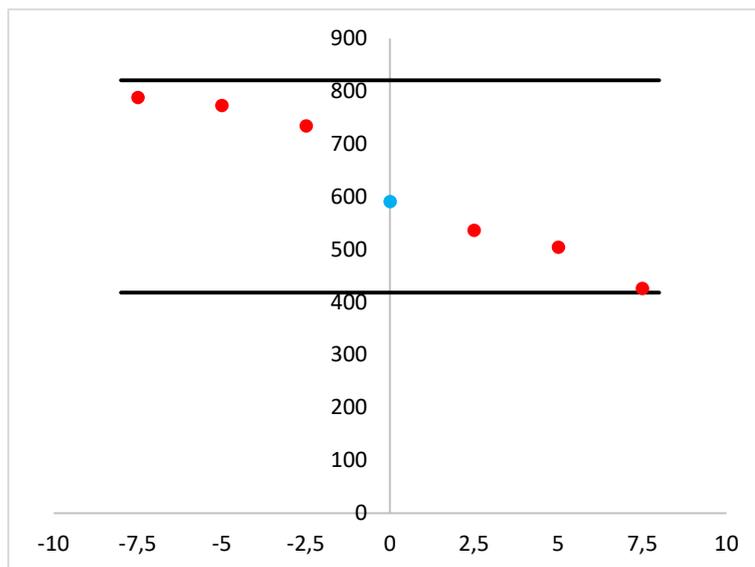


Figura 13 – Perfil de luminosidade ao redor da superfície  
(70 L/min – Luz ambiente acesa)



Analisando os gráficos, podemos ver que todos os perfis se assemelham à uma sigmoide, como esperado. Isso se deve ao fato de o laser atravessar livremente a coluna transparente na porção acima do leito, e ser bruscamente interrompido ao passar pela superfície em direção ao leito de partículas. Quanto

mais longe da superfície, mais as medidas se aproximaram das linhas em preto, que representam o limite do sinal a uma grande distância da superfície.

Em todos os casos, a diferença entre o valor na superfície e os valores a +- 5 mm foi maior que 10% do valor na superfície. Ainda, em quase todos os casos, a diferença até os valores a +- 2,5 mm foi maior que 10% do valor na superfície. Na execução do experimento, utilizando +- 10% da média entre os valores-limite, foi possível estabilizar a luz indicativa na altura da superfície do leito. Isso confirma que o valor percentual escolhido é adequado, e não compromete a precisão da medida. A luz ambiente não interferiu significativamente nestes resultados, desde que os valores-limite sejam utilizados corretamente para calibração.

#### 4.2 – Perfis de queda de pressão no leito (técnica do gradiente de pressão)

Para determinar a porosidade do leito fluidizado por meio do gradiente de pressão vertical, foram obtidos pontos de queda de pressão em função da altura. Os perfis de queda de pressão, obtidos com o sensor de pressão diferencial, são ilustrados nas Figuras 14 a 17. Os pontos coloridos representam a porção inferior da coluna, onde há partículas. O tracejado em cinza representa a parte da coluna acima do leito de partículas, onde há apenas água.

Figura 14 – Perfil de Pressão (Partículas de ABS)

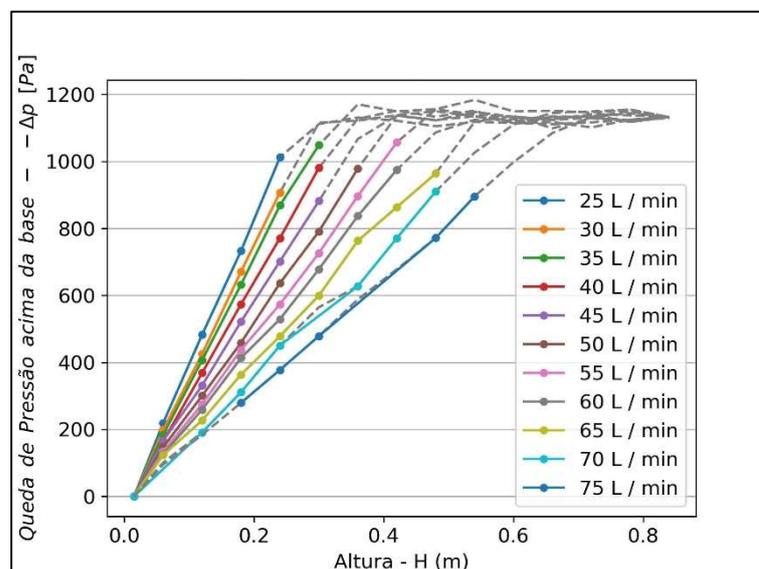


Figura 15 – Perfil de Pressão (Partículas de Alumina – Diâmetro maior)

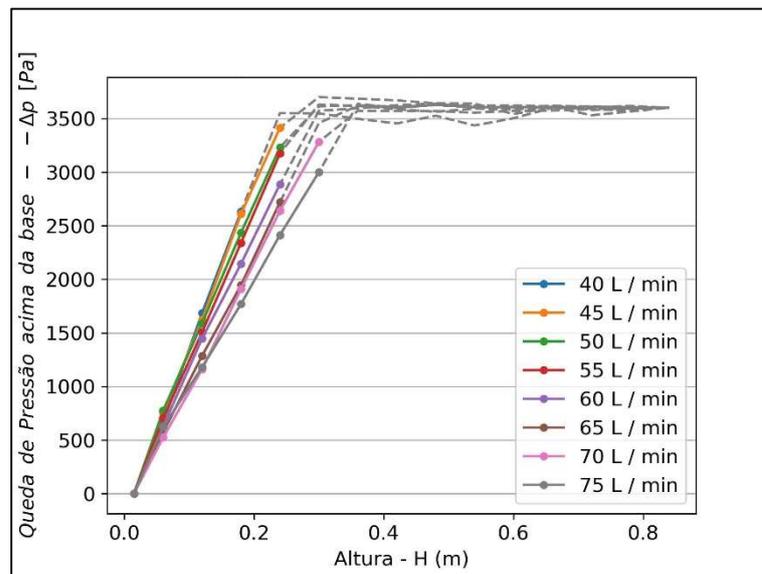


Figura 16 – Perfil de Pressão (Partículas de Alumina – Diâmetro menor)

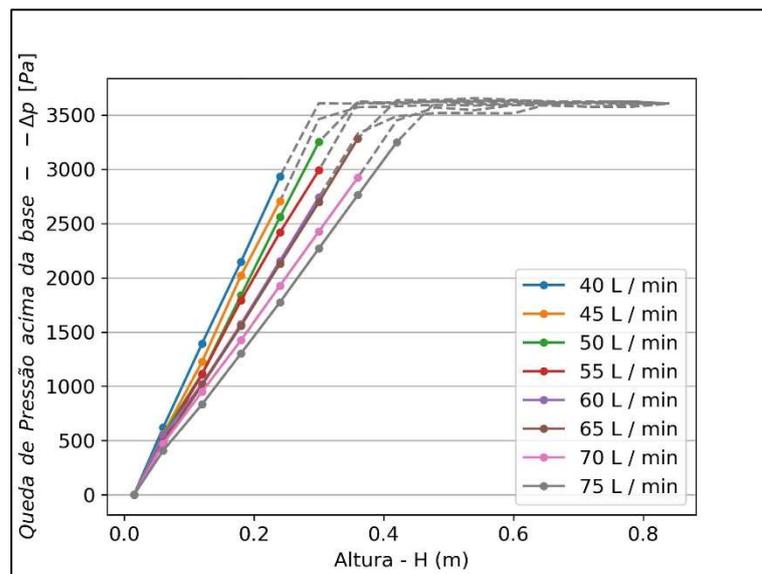
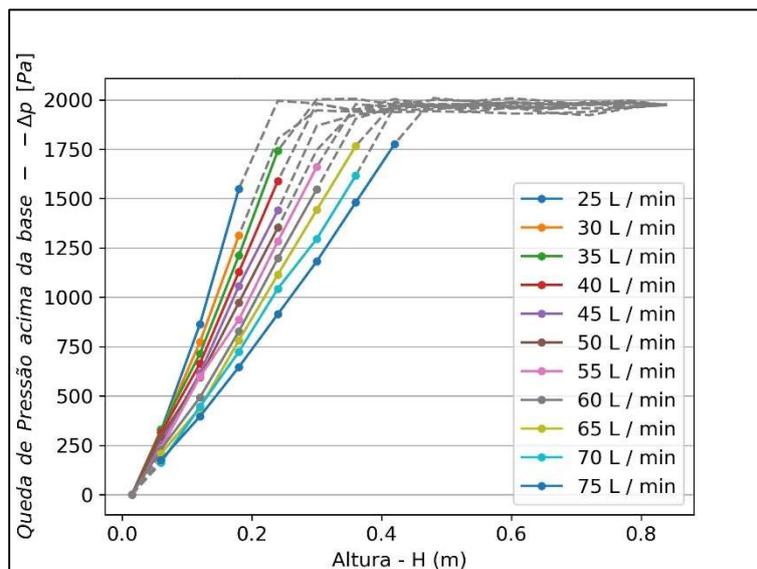


Figura 17 – Perfil de Pressão (Partículas de Porcelana)



Para todos os grupos de partículas, o perfil seguiu a tendência esperada. A queda de pressão cresceu linearmente com a altura até a superfície do leito. O coeficiente angular aproximadamente constante atesta a homogeneidade do leito durante a fluidização. A queda de pressão total foi praticamente a mesma para todas as vazões de cada grupo, mostrando que ela não depende da vazão de líquido, mas da massa total de partículas, que foi a mesma para todas as vazões. A inclinação da parte colorida do gráfico diminuiu com o aumento da vazão, mostrando que o leito se expande com um aumento da vazão.

Com a inclinação da parte colorida dos gráficos ( $dP/dz$ ), obtida por ajuste de uma reta pelo método dos mínimos quadrados, foi calculada a porosidade das partículas em cada vazão, por meio da Equação 1.

#### 4.3 – Comparação dos valores de porosidade obtidos pelas três técnicas

Os pontos experimentais de porosidade do leito em função da velocidade superficial do líquido, utilizando a técnica do sensor de pressão, a técnica de determinação visual da altura, e a técnica do aparato a laser, são mostrados nas Figuras 18 a 21. Os valores estão tabelados no Apêndice A.

Figura 18 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade  
(Partículas de ABS)

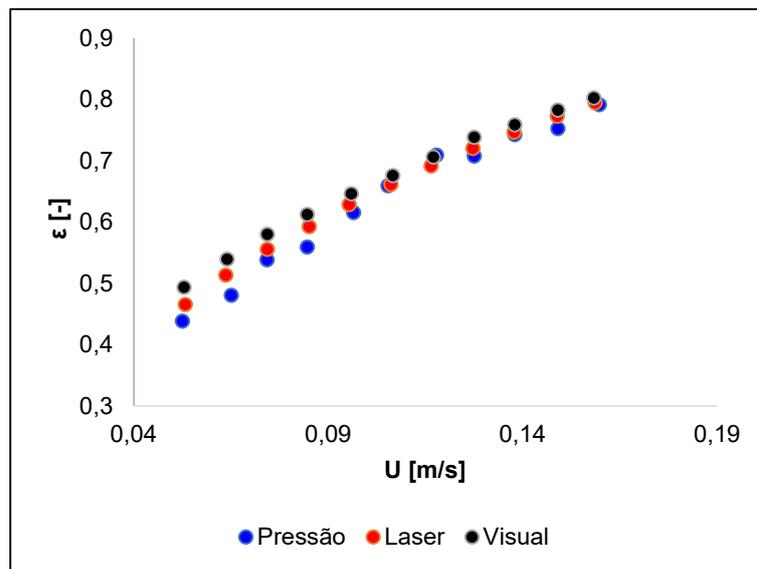


Figura 19 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade  
(Partículas de Alumina – diâmetro maior)

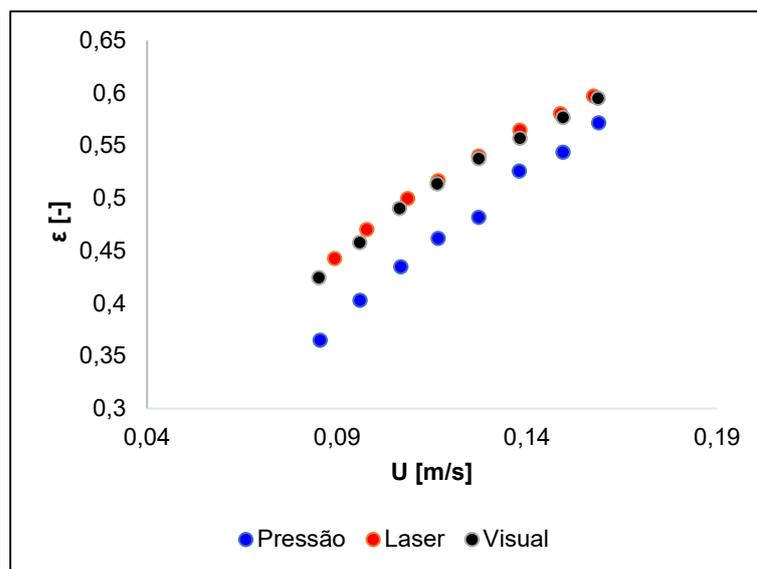


Figura 20 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade  
(Partículas de Alumina – diâmetro menor)

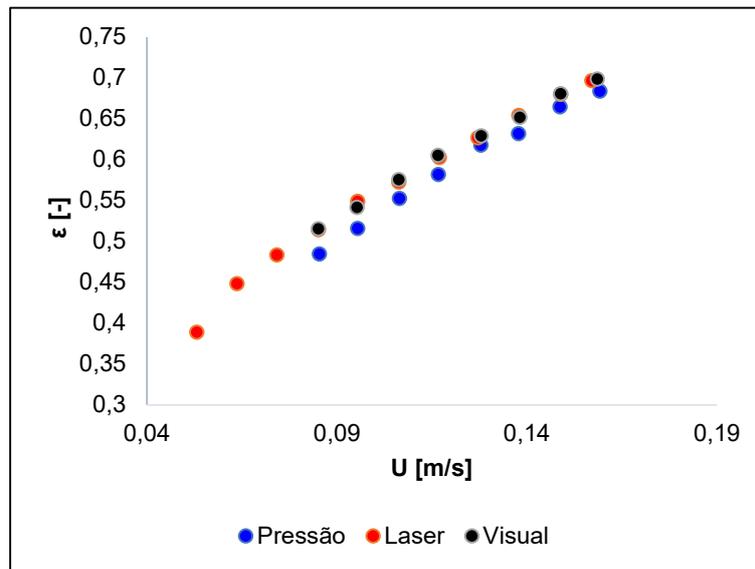
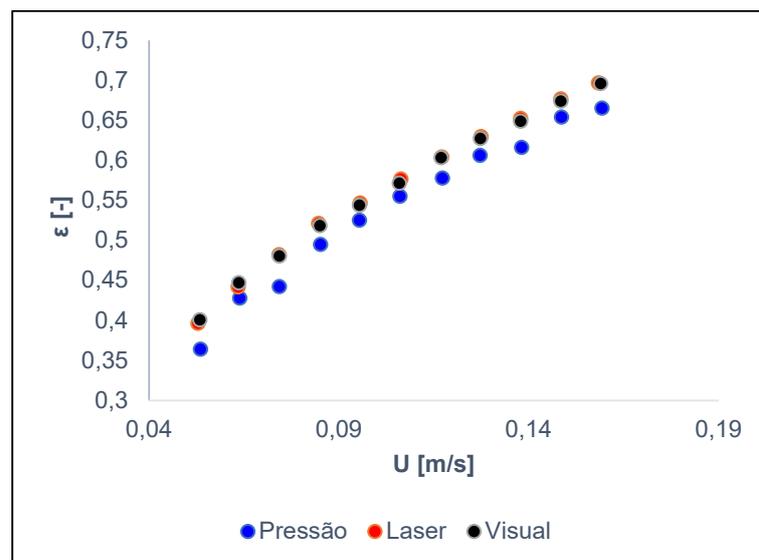


Figura 21 – Comparação dos métodos de determinação da porosidade  
(Partículas de Porcelana)



Todos os métodos experimentais produziram valores de porosidade crescentes com a velocidade superficial crescente, como esperado. Para todos os grupos de partícula, o método do sensor de pressão produziu pontos ligeiramente abaixo dos outros dois métodos, com a diferença sendo maior em velocidades superficiais menores. Os dois métodos baseados na determinação da altura do leito tiveram uma grande concordância. De maneira geral, não houve grande diferença entre os valores obtidos utilizando os três métodos. O grupo

em que houve maior distanciamento do método de pressão para os métodos de altura foi a Alumina maior. Este é o material mais denso, e o grupo de partículas com maior diâmetro. Para as partículas de Alumina com diâmetro menor, o método do sensor de pressão teve maior concordância com os outros métodos. Isso pode indicar que este método tende a subestimar a porosidade, principalmente com partículas maiores.

É possível analisar melhor as diferenças entre os três métodos por meio das diferenças percentuais entre pontos correspondentes. Nas Tabelas 3 a 6, são mostrados a vazão nominal de cada ponto experimental, os valores correspondentes de porosidade para o método de sensor de pressão, e as diferenças percentuais dos outros dois métodos em relação a ele.

Tabela 3 – Comparação percentual dos valores de porosidade  
(Partículas de ABS)

Vazão Nominal (L/min)	$\epsilon_{\text{pressão}}$	Diferença (Método Visual)	Diferença (Método do Laser)
25	0,439	12,6%	6,1%
30	0,481	12,3%	6,8%
35	0,539	7,8%	3,2%
40	0,560	9,4%	5,9%
45	0,616	5,0%	2,1%
50	0,660	2,5%	0,3%
55	0,710	-0,4%	-2,5%
60	0,708	4,4%	1,8%
65	0,743	2,2%	0,6%
70	0,753	4,0%	2,7%
75	0,792	1,4%	0,4%

Tabela 4 – Comparação percentual dos valores de porosidade  
(Partículas de Alumina – Diâmetro maior)

Vazão Nominal (L/min)	$\varepsilon_{Pressão}$	Diferença (Método Visual)	Diferença (Método do Laser)
40	0,365	16,4%	21,3%
45	0,403	13,6%	16,7%
50	0,435	12,8%	14,9%
55	0,462	11,3%	11,9%
60	0,482	11,6%	12,1%
65	0,526	5,9%	7,4%
70	0,544	6,1%	6,8%
75	0,572	4,1%	4,5%

Tabela 5 – Comparação percentual dos valores de porosidade  
(Partículas de Alumina – Diâmetro menor)

Vazão Nominal (L/min)	$\varepsilon_{Pressão}$	Diferença (Método Visual)	Diferença (Método do Laser)
40	0,485	6,4%	6,1%
45	0,516	5,0%	6,4%
50	0,553	4,2%	3,6%
55	0,582	4,0%	3,6%
60	0,618	1,9%	1,5%
65	0,632	3,2%	3,5%
70	0,665	2,4%	2,3%
75	0,684	2,2%	1,9%

Tabela 6 – Comparação percentual dos valores de porosidade  
(Partículas de Porcelana)

Vazão Nominal (L/min)	$\varepsilon_{Pressão}$	Diferença (Método Visual)	Diferença (Método do Laser)
25	0,364	10,1%	8,9%
30	0,428	4,4%	3,2%
35	0,442	8,7%	9,1%
40	0,495	4,7%	5,3%
45	0,525	3,6%	4,1%
50	0,555	3,0%	3,9%
55	0,578	4,4%	4,5%
60	0,606	3,5%	3,9%
65	0,616	5,3%	5,9%
70	0,654	3,1%	3,4%
75	0,665	4,7%	4,8%

Para todos os grupos de partícula, as maiores diferenças entre os três métodos foram observadas em velocidades superficiais menores. A maior diferença foi observada na Alumina maior, seguida pelas partículas de ABS. Estes são, respectivamente, o material mais denso e o menos denso entre as partículas utilizadas. Isso pode indicar que os métodos concordam mais para partículas com uma densidade intermediária, ou que a precisão do sensor é dependente da densidade do leito.

As diferenças percentuais chegaram a 21,3%. Este nível de imprecisão pode ser considerado adequado para algumas aplicações, e inadequado para outras. Na determinação da porosidade de leitos fluidizados sólido-líquido em estado de baixa porosidade, recomenda-se utilizar mais de um método. Os dois métodos baseados na determinação da altura do leito tiveram grande concordância. Para todos os grupos de partícula, a diferença entre eles ficou abaixo de 7%. No caso da Alumina menor e da Porcelana, a diferença entre os dois métodos não chegou a 2%. Isso demonstra que, no caso de não ser possível utilizar um método a laser, a inspeção visual produzirá resultados semelhantes.

#### 4.4 – Comparação entre as duas técnicas de medida de altura

Para investigar mais a fundo as diferenças entre os dois métodos de determinação da altura, foi produzida a Tabela 7. Ela mostra, para cada grupo de partículas, o desvio padrão da altura do leito entre as três réplicas do mesmo ponto experimental. O desvio considerado é a média dos desvios padrão de todas as velocidades superficiais de cada partícula. Também é mostrado o fator de redução do desvio padrão no método de laser, em relação ao método visual.

Tabela 7 – Comparação dos desvios padrão na determinação da altura pelos métodos Visual e de Laser.

Partícula	Média do desvio padrão da altura (Método Visual)	Média do desvio padrão da altura (Método de Laser)	Fator de redução
ABS	1,65	0,22	7,63
Alumina Maior	0,14	0,05	2,67
Alumina Menor	0,27	0,09	3,05
Porcelana	0,35	0,12	3,00

Em todos os grupos de partícula, o método de laser foi capaz de determinar a altura do leito com um desvio padrão significativamente melhor. O fator de redução ficou em cerca de 3 para as partículas de alumina e porcelana. No caso da partícula de ABS, o método de laser obteve um valor médio de desvio padrão 7 vezes menor que o método visual. Isto indica que, embora as diferenças nos valores médios de porosidade entre os dois métodos não sejam tão grandes, o método a laser possui uma precisão melhor, já que os desvios padrão observados foram consideravelmente menores.

#### 4.5 – Concordância das curvas experimentais com a equação de Richardson-Zaki

Os pontos experimentais, em escala logarítmica, são mostrados nas Figuras 22 a 25, assim como retas ajustadas a estes pontos pelo método dos mínimos quadrados. Quanto mais linear for a curva experimental, maior a concordância com o modelo de Richardson-Zaki.

Figura 22 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki  
(Partículas de ABS)

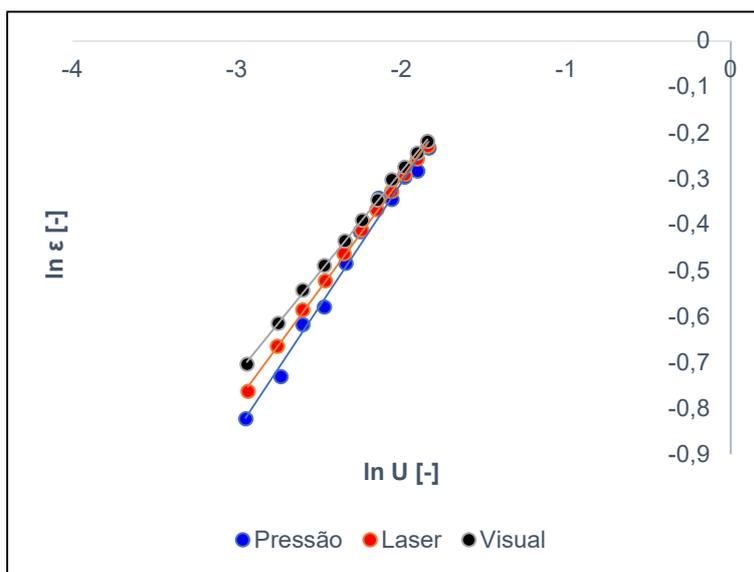


Figura 23 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki  
(Partículas de Alumina – Diâmetro Maior)

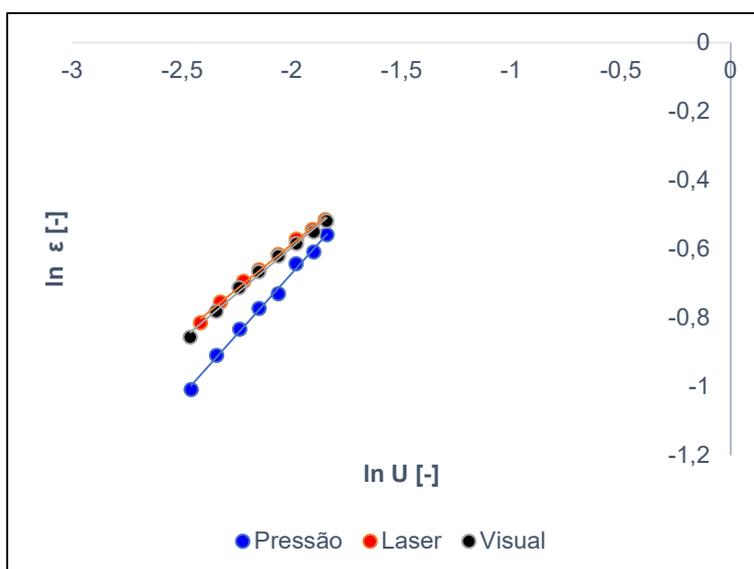


Figura 24 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki  
(Partículas de Alumina – Diâmetro Menor)

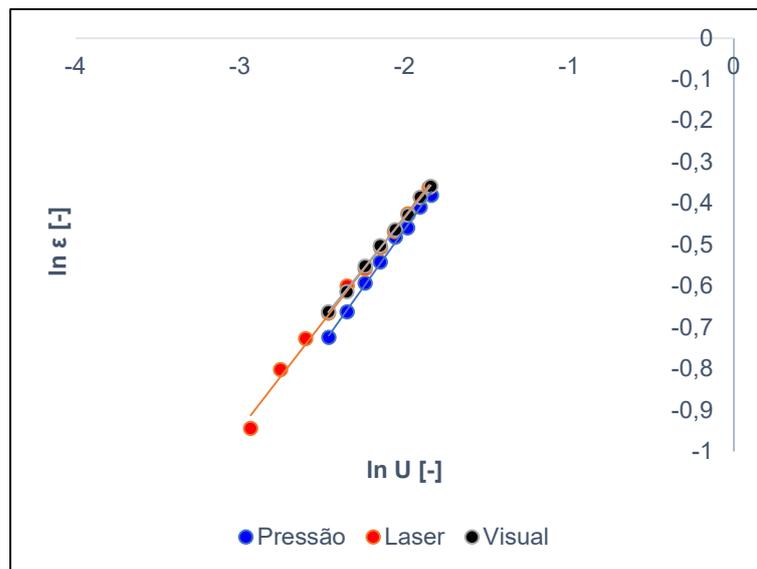
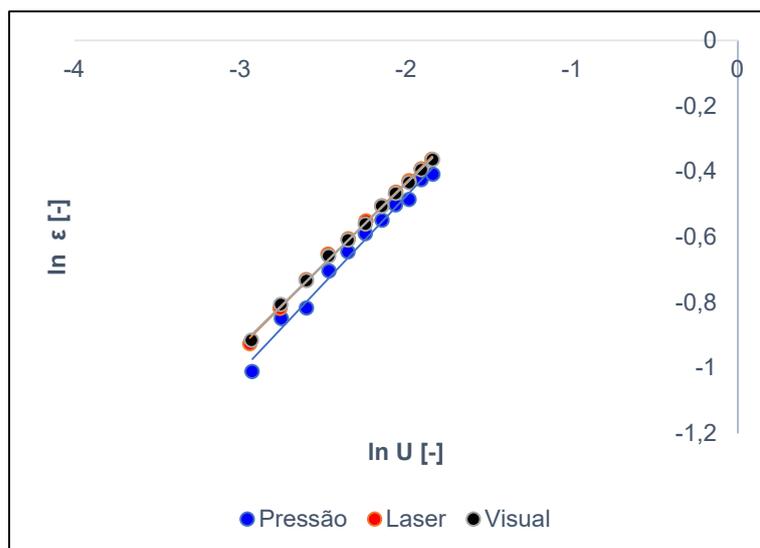


Figura 25 – Verificação da concordância com Richardson-Zaki  
(Partículas de Porcelana)



Pelos gráficos, podemos notar a grande proximidade dos pontos experimentais com as retas ajustadas. Isso mostra que a equação de Richardson-Zaki modela bem este conjunto de dados experimentais, e que a expansão do leito ocorreu de acordo com o esperado.

Para quantificar a proximidade entre os pontos experimentais e as retas ajustadas, foi calculado o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do ajuste. Os valores, para cada conjunto de dados, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo de Richardson-Zaki linearizado

Partícula	Método do Sensor de Pressão	Método Visual	Método do Laser
ABS	0,9875	0,9993	0,9991
Alumina Maior	0,9955	0,9934	0,9957
Alumina Menor	0,9967	0,9989	0,9950
Porcelana	0,9875	0,9984	0,9975

Todos os valores de  $R^2$  ficaram acima de 0,98. Isso mostra que a equação de Richardson-Zaki descreve bem a curva experimental para as três técnicas e as 4 partículas. Os métodos baseados na determinação da altura do leito obtiverem valores de  $R^2$  acima de 0,99 para todas as partículas. No caso do método do sensor de pressão, nem todos os valores chegaram a 0,99, sugerindo que os valores experimentais obtidos por este método se afastam um pouco mais do esperado do que os outros métodos.

Também foram calculados os valores de  $n$  e  $k$  pelas correlações propostas por Khan & Richardson (1989) (Equações 4 e 5). Estes valores foram comparados aos valores de  $n$  e  $k$  extraídos do ajuste do modelo de Richardson-Zaki aos pontos experimentais de cada técnica de determinação de porosidade. Os valores dados pelas correlações, e as diferenças percentuais dos valores obtidos pelo ajuste, são mostrados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Comparação entre valores do parâmetro  $n$  do modelo de Richardson-Zaki

Partícula	Correlação de Khan & Richardson (1989)	Ajuste ao método da pressão	Ajuste ao método visual	Ajuste ao método do Laser
ABS	2,412	-23,5%	-14,8%	-6,3%
Alumina Maior	2,406	-41,6%	-20,0%	-22,2%
Alumina Menor	2,420	-25,9%	-19,7%	-16,2%
Porcelana	2,409	-22,6%	-17,9%	-16,4%

Tabela 10 – Comparação entre valores do parâmetro  $k$  do modelo de Richardson-Zaki

Partícula	Correlação de Khan & Richardson (1989)	Ajuste ao método da pressão	Ajuste ao método visual	Ajuste ao método do Laser
ABS	0,79	-22,3%	-18,7%	-16,4%
Alumina Maior	0,78	-37,2%	-24,3%	-25,5%
Alumina Menor	0,86	-24,7%	-24,0%	-20,7%
Porcelana	0,78	-18,0%	-20,4%	-18,4%

As diferenças entre os valores dos parâmetros dados pelas correlações e os valores experimentais foram significativas, variando de cerca de 6 a 41 % para  $n$ , e de 16 a 37 % para  $k$ . Para quase todos os grupos de partícula, o método visual forneceu valores mais próximos dos valores esperados, dados pelas correlações. No caso da alumina maior, o método do laser ficou mais próximo dos valores dados pelas correlações. Em todos os grupos de partícula, o método da pressão foi o que ficou mais afastado dos valores esperados. Isso pode indicar que os métodos baseados na altura do leito concordam mais com os

valores reportados na literatura, a partir dos quais as correlações foram desenvolvidas.

## 5. CONCLUSÃO

Foi realizada a fluidização em água de quatro grupos de partículas com diferentes propriedades para observar a relação entre a velocidade superficial do líquido e a porosidade do leito. Foram avaliadas e comparadas três técnicas para determinação da porosidade.

A primeira técnica utilizou um sensor de pressão diferencial para obter o gradiente vertical de pressão e relacioná-lo à porosidade pelo balanço de forças. A segunda técnica utilizou uma fita métrica para obter a altura do leito e relacioná-la à porosidade por meio do volume do leito. A terceira técnica utilizou um sistema óptico montado em Arduíno para determinar a altura do leito com maior precisão e relacioná-la à porosidade do leito.

Os perfis de luminosidade ao redor da superfície do leito tomaram a forma de uma sigmoide, variando bruscamente na região da superfície, e atingindo valores-limite a uma grande distância acima ou abaixo dela.

O valor escolhido de  $\pm 10\%$  ao redor da média entre os valores-limite se mostrou válido, permitindo encontrar a superfície do leito com uma precisão de menos de 5 mm, sem comprometer a execução do experimento pela instabilidade da luz indicativa.

Os perfis de queda de pressão foram aproximadamente lineares, e seguiram a tendência esperada. Houve grande proximidade entre os valores obtidos de porosidade pelas três técnicas, principalmente entre as duas técnicas que utilizam a altura do leito. As maiores diferenças entre as três técnicas foram observadas para velocidades superficiais menores, indicando que os métodos concordam mais para leitos menos densos.

A diferença entre os valores de porosidade obtidos pelos dois métodos de determinação da altura ficou em menos de 7%. Porém, o método a laser foi significativamente mais preciso, fornecendo valores de desvio padrão até 7 vezes menores.

As curvas experimentais concordaram com o modelo de Richardson-Zaki. Todos os valores de coeficiente de determinação ficaram acima de 0,98,

indicando um ótimo ajuste, e mostrando que a fluidização ocorreu conforme o esperado.

Os valores dos parâmetros adimensionais  $n$  e  $k$  foram significativamente diferentes dos valores esperados pelas correlações empíricas, especialmente no método do gradiente de pressão. Isto pode indicar que os métodos baseados na altura do leito concordam mais com os valores reportados na literatura.

As três técnicas foram comparadas e suas diferenças foram analisadas, cumprindo o objetivo do trabalho. Foi mostrado que a técnica a laser pode ser implementada de forma simples, barata e eficiente, gerando resultados confiáveis de porosidade do leito, de forma não-invasiva e com baixo desvio padrão entre réplicas de experimentos.

Como sugestão de trabalhos futuros, poderíamos automatizar o movimento da plataforma utilizando motores, permitindo a detecção automática da superfície do leito. A precisão do método poderia ser refinada ao dispensar a fita métrica e medir o deslocamento da plataforma por meio das rotações do motor, ou por meio de um sensor de distância. O tratamento de dados também poderia ser automatizado por meio de códigos em microcontroladores, permitindo que o sistema forneça diretamente o valor da porosidade do leito, dispensando o uso de equações para cálculo posterior.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR CORONA, A ZENIT, R MASBERNAT, O 2011 Collisions in a liquid fluidized bed International Journal of Multiphase Flow, vol 37 pp 695 705
- 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.
- CARLOS, C R RICHARDSON, J F 1968 Solids movement in liquid fluidized beds I Particle velocity distribution Chemical Engineering Science, vol 23 pp 813 824
- 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.
- COCCO, R et al 2010 Particle Clusters in Fluidized Beds 13 th International Conference on Fluidization
- DANTEC DYNAMICS Measurement Principles of LDA Disponível em <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/measurement-principles-of-lda/>

- 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.
- ĐURIŠ et al 2013 Particle Velocities in quasi Two Dimensional Water Fluidized Beds of Spherical Particles *Powder Technology*, vol 246 pp 98 107
- ELLIS, N 2003 Hydrodynamics of Gas Solid Turbulent Fluidized Beds Tese de Doutorado University of British Columbia
- EPE. Balanço Energético Nacional – Relatório Síntese 2022, ano base 2021. 2022.
- Epstein, Norman. *Liquid-Solids Fluidization. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.* Edição: Wen-Ching Yang. Marcel Dekker, 2003.
- Ferreira, V. O.; Silva Junior, D.; Melo, K. R. B; Blais, B.; Lopes, G. C. 2023. Prediction of the bed expansion of a liquid fluidized bed bioreactor applied to wastewater treatment and biogas production. *Energy Conversion and Management*. V 290,117224
- FORESTI, Eugenio; ZAIAT, Marcelo; VALLERO, Marcus. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 5, n. 1, p. 3–19, 2006.
- 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.
- LEADBEATER, T PARKER, D GARGIULI, J 2011 Positron Imaging Systems for Studying Particulate, Granular and Multiphase Flows

- LIMTRAKUL et al 2005 Solids Motions and Holdup Profiles in Liquid Fluidized Beds *Chemical Engineering Science*, vol 60 pp 1889–1900
- 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.
- S.N. Naik; Vaibhav V. Goud; Prasant K. Rout; Ajay K. Dalai (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. , 14(2), 578–597. doi:10.1016/j.rser.2009.10.003
- 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.
- RAPAGNÀ, S. et al. Steady-state expansion characteristics of monosize spheres fluidized by liquids. *Chemical Engineering Communications* 79:131-140, 1989. <https://doi.org/10.1080/00986448908940031>
- 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.
- TEBIANIAN et al 2015 Investigation of Particle Velocity in FCC Gas Fluidized Beds Based on Different Measurement Techniques *Chemical Engineering Science*, vol 127 pp 310–322
- 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.

- VAN OMMEN, J R MUDDE, R F 2008 Measuring the Gas Solids Distribution in Fluidized Beds A Review International Journal of Chemical Reactor Engineering, vol 6
- XU et al 2018 Numerical and Experimental Comparison of Tracer Particle and Averaging Techniques for Particle Velocities in a Fluidized Bed Chemical Engineering Science, vol 195
- YUQIAO STORE, 2023. UNI-T Uni-trend UT665 Endoscope Industrial Endoscope HD Probe Handheld 2.4 Inch Endoscope IP67 Waterproof Video Inspection Camera. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/UNI-T-uni-trend-Industrial-Waterproof-Inspection/dp/B0CDRSJK93>
- ZHOU et al 1995 Particle Velocity Profiles in a Circulating Fluidized Bed Riser of Square Cross Section Chemical Engineering Science, vol 50 pp 237 244

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – PONTOS EXPERIMENTAIS DE POROSIDADE EM  
FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO LÍQUIDO**

Tabela A-1 – Pontos experimentais de porosidade (técnica do gradiente de pressão)

ABS		Alumina Maior		Alumina Menor		Porcelana	
$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$
0,0525	0,439	0,0855	0,365	0,0853	0,485	0,0535	0,364
0,0650	0,481	0,0960	0,403	0,0954	0,516	0,0638	0,428
0,0742	0,539	0,1067	0,435	0,1064	0,553	0,0742	0,442
0,0846	0,560	0,1165	0,462	0,1166	0,582	0,0851	0,495
0,0965	0,616	0,1272	0,482	0,1278	0,618	0,0953	0,525
0,1053	0,660	0,1379	0,526	0,1377	0,632	0,1060	0,555
0,1178	0,710	0,1494	0,544	0,1486	0,665	0,1172	0,578
0,1275	0,708	0,1588	0,572	0,1591	0,684	0,1271	0,606
0,1379	0,743	-	-	-	-	0,1380	0,616
0,1490	0,753	-	-	-	-	0,1485	0,654
0,1597	0,792	-	-	-	-	0,1592	0,665

Tabela A-2 – Pontos experimentais de porosidade (técnica de determinação visual da altura)

ABS		Alumina Maior		Alumina Menor		Porcelana	
$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$
0,0529	0,494	0,0852	0,425	0,0850	0,516	0,0533	0,401
0,0640	0,540	0,0959	0,458	0,0952	0,542	0,0635	0,447
0,0743	0,581	0,1064	0,491	0,1062	0,576	0,0743	0,481
0,0846	0,613	0,1163	0,514	0,1166	0,605	0,0849	0,518
0,0959	0,647	0,1272	0,538	0,1279	0,629	0,0953	0,544
0,1065	0,676	0,1381	0,557	0,1381	0,652	0,1058	0,571
0,1170	0,707	0,1494	0,577	0,1489	0,681	0,1169	0,603
0,1274	0,739	0,1586	0,595	0,1584	0,699	0,1272	0,627
0,1379	0,759	-	-	-	-	0,1378	0,649
0,1490	0,783	-	-	-	-	0,1484	0,674
0,1583	0,803	-	-	-	-	0,1589	0,696

Tabela A-3 – Pontos experimentais de porosidade (técnica de determinação da altura utilizando laser)

ABS		Alumina Maior		Alumina Menor		Porcelana	
$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$	$U$ (m/s)	$\varepsilon$
0,0532	0,466	0,0893	0,443	0,0530	0,389	0,0528	0,396
0,0637	0,514	0,0977	0,470	0,0637	0,448	0,0634	0,442
0,0743	0,556	0,1085	0,500	0,0741	0,483	0,0741	0,482
0,0850	0,593	0,1166	0,517	0,0850	0,514	0,0846	0,521
0,0953	0,629	0,1272	0,540	0,0953	0,549	0,0955	0,546
0,1061	0,662	0,1381	0,565	0,1062	0,573	0,1062	0,577
0,1164	0,692	0,1487	0,581	0,1168	0,603	0,1170	0,604
0,1272	0,720	0,1574	0,597	0,1270	0,627	0,1273	0,630
0,1378	0,747	-	-	0,1378	0,654	0,1378	0,652
0,1488	0,773	-	-	0,1488	0,680	0,1484	0,676
0,1586	0,795	-	-	0,1570	0,697	0,1583	0,696