



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

FERNANDO MANENTE PERRELLA BALESTIERI

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE NÍVEL DE MISTURA E MUDANÇA DE
ESCALA NA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSA-AREIA EM LEITO FLUIDIZADO
BORBULHANTE**

Guaratinguetá
2025

Fernando Manente Perrella Balestieri

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE NÍVEL DE MISTURA E MUDANÇA DE
ESCALA NA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSA-AREIA EM LEITO FLUIDIZADO
BORBULHANTE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
e Ciências do Câmpus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica na área de Energia.

Orientadora: Profª. Dra. Ivonete Ávila
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Manuel
Romero Luna

Guaratinguetá
2025

B184a	Balestieri, Fernando Manente Perrella Análise da relação entre nível de mistura e mudança de escala na fluidização de biomassa-areia em leito fluidizado borbulhante / Fernando Manente Perrella Balestieri - Guaratinguetá, 2025. 221 f : il. Bibliografia: f. 145-155 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientadora: Prof^a. Dr^a Ivonete Ávila Coorientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna 1. Fluidização. 2. Biomassa. 3. Biocombustíveis. 4. Farelo de arroz. 4. Taguchi, Métodos (Controle de qualidade). I. Título. CDU 66.096.5(043)
-------	---

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui significativamente para o avanço técnico e científico na área de Engenharia de Processos envolvendo sistemas de leito fluidizado, com foco em biomassa agrícola. O estudo apresenta impacto técnico e inovador ao projetar e construir seis reatores de diferentes escalas, além de desenvolver dispositivos inéditos, como um tubo de Venturi impresso em 3D otimizado para medição de vazão em leitos, um calador aplicável a leitos fluidizados e um sistema de aquisição de dados semiautomatizado voltado à análise de fluidização. Cientificamente, os resultados experimentais permitiram identificar lacunas em modelos clássicos de predição da velocidade mínima de fluidização, propondo a inclusão do fator “mudança de escala” e uma nova equação para o índice de mistura baseada na distribuição axial de sólidos. A pesquisa também apresenta forte potencial de aplicação regional e nacional, especialmente em setores ligados ao aproveitamento energético de resíduos agroindustriais, como a casca de arroz. Ao oferecer diretrizes para o projeto de reatores em maior escala, o trabalho favorece o desenvolvimento sustentável e a transição energética em contextos rurais e industriais. Por fim, a aplicabilidade dos resultados em diferentes escalas contribui para o fortalecimento da pesquisa brasileira em nível internacional, promovendo maior visibilidade e intercâmbio científico.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research makes a significant contribution to the technical and scientific advancement in the field of Process Engineering, specifically in fluidized bed systems using agricultural biomass. The study presents technical and innovative impact by designing and constructing six reactors of different scales, as well as developing novel devices such as a 3D-printed Venturi tube optimized for airflow measurement in fluidized beds, a custom sampling probe applicable to fluidized systems, and a semi-automated data acquisition system tailored for fluidization analysis. From a scientific standpoint, the experimental results revealed key gaps in classical models for predicting the minimum fluidization velocity, proposing the inclusion of the “scale-up” factor and a new equation for the mixing index based on the axial distribution of solids. The research also holds strong regional and national application potential, particularly in sectors focused on the energy recovery of agro-industrial residues such as rice husk. By providing guidelines for the design of larger-scale reactors, the work supports sustainable development and the energy transition in both rural and industrial contexts. Finally, the applicability of the results across different scales contributes to strengthening Brazilian research at the international level, promoting greater visibility and scientific exchange.

FERNANDO MANENTE PERRELLA BALESTIERI

**Análise da relação entre nível de mistura e mudança de escala na fluidização
de biomassa-areia em leito fluidizado borbulhante.**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia

Data da defesa: 07/08/2025

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
IVONETE AVILA
Data: 07/08/2025 15:30:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. IVONETE AVILA
Orientador - UNESP



Documento assinado digitalmente
GLAUBER CRUZ
Data: 07/08/2025 15:55:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GLAUBER CRUZ
Universidade Federal do Maranhão



Documento assinado digitalmente
WALDIR ANTONIO BIZZO
Data: 08/08/2025 15:03:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. WALDIR ANTONIO BIZZO
UNICAMP



Documento assinado digitalmente
NESTOR PROENZA PEREZ
Data: 08/08/2025 16:05:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
UNESP



Documento assinado digitalmente
MESSIAS BORGES SILVA
Data: 18/08/2025 16:07:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
UNESP

DADOS CURRICULARES

FERNANDO MANENTE PERRELLA BALESTIERI

NASCIMENTO	13/08/1992 - CORUMBÁ / MS
FILIAÇÃO	José Benedito Perrella Balestieri Fátima Cristina De Lazari Manente Balestieri
2007/2009	Ensino Médio Escola Franciscana Imaculada Conceição
2010/2016	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá UNESP, Universidade Estadual Paulista
2014/2015	Engenharia Mecânica (Intercâmbio) Swansea University
2017/2019	Curso de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá UNESP, Universidade Estadual Paulista
2020/2025	Curso de Doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá UNESP, Universidade Estadual Paulista

Dedico essa tese à Deus, à minha família e à
todas as pessoas importantes que fizeram
parte dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, porque sem Ele, esse doutorado não existiria. Em inúmeros momentos eu vi a mão Dele trabalhando em meu favor, mesmo quando parecia que tudo estava perdido.

Agradeço aos meus pais, Zézo e Cristina, pelo apoio que eles sempre me deram de inúmeras formas, além de contribuir ativamente para algumas partes do projeto desse doutorado.

Agradeço à Isa, meu amor, pelo seu apoio e força que ela sempre me dá, além de ter tornado esse último período do doutorado mais feliz, leve e tranquilo (dentro do possível).

Agradeço aos meus tios Toni e Ieda por me auxiliarem no projeto, ao apoio ao longo de todos esses anos em Guaratinguetá.

Agradeço à toda minha família pela força, que mesmo de longe, torcendo e orando por mim.

Agradeço aos meus orientadores pelo apoio e aos meus colegas do Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3) pelas eventuais ajudas durante o processo.

Agradeço à minha impressora 3D que possibilitou a execução de boa parte do meu trabalho de doutorado.

Agradeço a Campion Soluções em Acrílico e Policarbonato por ter fornecido seus serviços possibilitando a execução do projeto.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

Agradeço o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processos 315630/2021-3 e 406351/2023-6.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processos 315630/2021-3 e 406351/2023-6.

“Uma pessoa não é medida pelo tamanho da sua força, mas pela força de seu coração. No fim, não é o quanto você consegue bater, mas o quanto você consegue apanhar e continuar seguindo em frente. Mas o meu coração descansa no Senhor e sua força vem Dele.”

Fernando Balestieri

RESUMO

Nesta tese foi avaliada os efeitos da mudança de escala em sistemas de leito fluidizado borbulhante contendo misturas de areia e casca de arroz. Foram projetados e construídos seis reatores de diferentes tamanhos. O estudo combinou desenvolvimento de novos projetos - como o desenvolvimento de um tubo de Venturi por impressão 3D e um novo tipo de calador - com a aplicação da metodologia Taguchi (matriz L9) e análises de variância (ANOVA), investigando quatro fatores: diâmetro do reator, velocidade do gás, proporção de casca e altura inicial do leito. Os resultados mostraram que a mudança de escala do reator, exerce forte influência sobre variáveis críticas como a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}). Isso evidencia uma limitação importante em modelos clássicos de predição de U_{mf} , que não consideram o fator escala, reforçando a necessidade de incorporar essa variável em futuras equações. Também foi proposta uma nova equação para estimar o índice de mistura com base na distribuição axial dos sólidos, oferecendo maior sensibilidade na avaliação da homogeneidade interna. Com base nos experimentos realizados, foi possível propor uma configuração otimizada para reatores em maior escala voltados a processos termoquímicos com casca de arroz. A melhor combinação inclui reatores com diâmetro interno de 240 mm, altura inicial do leito de 360 mm ($H_0/D_{fb} = 1,5$), mistura contendo 5% de casca de arroz em massa e operação a uma velocidade superficial correspondente a 1,25 vezes a U_{mf} . Essa configuração mostrou-se eficiente para garantir boa homogeneidade da mistura, fluidização estável e controle adequado da expansão e do diâmetro das bolhas. Os resultados também evidenciam a necessidade de incluir o diâmetro do reator nas equações de predição de U_{mf} e introduzem uma nova proposta para o cálculo do índice de mistura, mais sensível à distribuição interna dos sólidos.

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade mínima de fluidização; Venturi; Taguchi; Casca de Arroz.

ABSTRACT

This work evaluated the effects of scale-up in bubbling fluidized bed systems containing mixtures of sand and rice husk. Six reactors of different sizes were designed and constructed. The study combined the development of new engineering solutions—such as a 3D-printed Venturi tube and a novel type of sampling probe—with the application of the Taguchi method (L9 matrix) and analysis of variance (ANOVA), investigating four factors: reactor diameter, gas velocity, husk-to-sand ratio, and initial bed height. The results showed that reactor scale has a strong influence on critical variables such as the minimum fluidization velocity (U_{mf}). This highlights a key limitation in classical U_{mf} prediction models, which often overlook geometric scale, reinforcing the need to incorporate this parameter into future equations. A new equation was also proposed to estimate the mixing index based on the axial distribution of solids, providing greater sensitivity in assessing internal homogeneity. Based on the experiments, an optimized configuration was proposed for large-scale reactors applied to thermochemical processes using rice husk. The best combination includes reactors with an internal diameter of 240 mm, an initial bed height of 360 mm ($H_0/D_{fb} = 1,5$), a mixture containing 5% rice husk by mass, and operation at a superficial gas velocity equal to 1,25 times the U_{mf} . This setup proved effective in ensuring good mixture homogeneity, stable fluidization, and appropriate control of bed expansion and bubble size. The findings reinforce the importance of considering reactor diameter in U_{mf} prediction models and introduce a new approach for calculating the mixing index based on solid-phase distribution.

KEYWORDS: Minimum fluidization velocity; Venturi; Taguchi; Rice Husk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução ao longo dos anos do número de artigos publicados de cada ano dividido pelo total de trabalhos para as etapas 2B e 2C da pesquisa.....	36
Figura 2 - Exemplo de leito fluidizado (a) Componentes básicos do reator (b) Material particulado sofrendo fluidização	40
Figura 3 - Exemplos de aplicações do leito fluidizado (a) Secagem de grãos (b) Queima de carvão.....	41
Figura 4 - Representação dos diferentes estágios de fluidização de um material particulado em um leito fluidizado	42
Figura 5 - Diagrama esquemático de um reator de leito fluidizado borbulhante	44
Figura 6 - Classificação dos tipos de placas distribuidoras	45
Figura 7 - Tipos de partículas classificadas em função do diâmetro médio d_p e da diferença de massas específicas do sólido ρ_s e do gás ρ_g	46
Figura 8 - Curva de Fluidização e Desfluidização para definir a velocidade mínima de fluidização	51
Figura 9 – Exemplo de Leito Fluidizado Bidimensional modular, com diferentes espessuras e distribuidores de ar.....	53
Figura 10 - Casca de Arroz Tingida para os experimentos	63
Figura 11 - Areia do IPT usada nos experimentos	64
Figura 12 - Régua com suporte utilizada para medir expansão do leito.....	70
Figura 13 - Calador utilizado na extração de amostras do leito para os 3 sistemas pequeno, médio e grande.....	71
Figura 14 - Foto ilustrativa do processo de captura dos parâmetros de diâmetro médio da bolha e comprimento de injeção	72
Figura 15 - Esquema geral do sistema de fluidização utilizado nos experimentos	79
Figura 16 - Modelos dos leitos fluidizados que foram usados nos experimentos (a) leito tridimensional (b) leito bidimensional.....	80

Figura 17 - Leitos fluidizados: (a) modelos tridimensionais em 3 escalas diferentes (b) modelos bidimensionais em 3 escalas diferentes	81
Figura 18 - Esquema geral com os componentes principais e materiais utilizados na sua construção (a) Leitos tridimensionais (b) Leitos Bidimensionais	83
Figura 19 - Leitos fluidizados tridimensionais e bidimensionais utilizados para os experimentos de mudança de escala	83
Figura 20 - Modelo das placas distribuidoras para os leitos tridimensionais (a) Pequeno (b) Médio (c) Grande.....	87
Figura 21 - Modelo das placas distribuidoras para os leitos bidimensionais (a) Pequeno (b) Médio (c) Grande.....	87
Figura 22 - Placas distribuidoras impressas para serem usadas nos leitos fluidizados	88
Figura 23 - Sensores do sistema de aquisição de dados (a) sensor de pressão BMP280 (b) sensor de Temperatura DS18B20	89
Figura 24 - Câmara de pressão para sensor BMP280.....	90
Figura 25 - Câmara de pressão montada com o sensor BMP280 instalado internamente....	91
Figura 26 - Esquema de geral conexão dos sensores (a) BMP280 (b) DS18B20 com as entradas digitais do Arduino Due	92
Figura 27 - Sistema de Aquisição de Dados montado com 6 sensores de pressão BMP280 e 1 sensor de temperatura DS18B20	93
Figura 28 - Relação de pressão entre os Sensores BMP280 e o Manômetro em U para diferentes níveis de pressão	93
Figura 29 - Relação de pressão entre o termômetro e o sensor DS18B20 para diferentes níveis de temperatura	95
Figura 30 - Modelo inicial 3D em corte do tubo de Venturi	96
Figura 31 - Perda de Pressão em relação a variação da razão dos diâmetros ($\beta=d/D$) para diferentes tipos de medidores de vazão que utilizam constrição de escoamento	97
Figura 32 - Relação entre as velocidades do ar nos leitos e o diferencial de pressão no Tubo de Venturi para os 3 diâmetros de leito fluidizado (70, 150 e 240 mm) com $d=10\text{mm}$	100

Figura 33 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito pequeno (70 mm) - $d = 2$ mm, 4 mm e 8 mm	101
Figura 34 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito médio (150 mm) - $d = 4$ mm, 8 mm e 17 mm	102
Figura 35 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito grande (240 mm) - $d = 8$ mm, 17 mm e 33 mm	102
Figura 36 - Tubo de Venturi com todas as especificações dimensionais necessárias de acordo com a norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003)	103
Figura 37 - Modelo tridimensional do Tubo de Venturi $d = 4$ mm utilizado para a Impressão 3D (a) Perspectiva Isométrica sem corte (b) Perspectiva Isométrica com corte	105
Figura 38 - Tubo de Venturi impresso e resinado instalado no sistema de fluidização juntamente com o sistema de aquisição de dados.....	106
Figura 39 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 33$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	107
Figura 40 – Esquema 3D simplificado da extração de amostras com o novo calador	108
Figura 41 – Procedimento para extração das amostras (a) Inserir o calador completo no leito (b) Remover a garra guia, a barra e o encaixe superior (c) Remover a câmara de acrílico	109
Figura 42 - Calador sendo utilizado para extração de amostras	110
Figura 43 - Caladores impressos e prontos para serem utilizados (a) Caladores montados (b) Calador parcialmente desmontado.....	110
Figura 44 – Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 1 ...	113
Figura 45 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a velocidade mínima de fluidização.....	115
Figura 46 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a Vazão volumétrica mínima de fluidização.....	118
Figura 47 - Exemplo de captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito	120

Figura 48 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a expansão do leito.....	121
Figura 49 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a expansão do leito.....	123
Figura 50 - Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento	126
Figura 51 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a diâmetro médio das bolhas.....	127
Figura 52 - Distribuição de Casca de Arroz em função de cada amostra/região do leito no Experimento 1 da matriz L9	130
Figura 53 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “maior é melhor” para a índice de Mistura.....	132
Figura 54 - Falha nos experimentos da Matriz L18.....	155
Figura 55 - Leito Fluidizado 2D Pequeno	157
Figura 56 - Leito Fluidizado 2D Médio	157
Figura 57 - Leito Fluidizado 2D Grande	158
Figura 58 - Leito Fluidizado 3D Pequeno	158
Figura 59 - Leito Fluidizado 3D Médio	159
Figura 60 - Leito Fluidizado 3D Grande	159
Figura 61 - Foto da Creality K1 MAX utilizada para imprimir as peças	160
Figura 62 - Captura de tela do programa Orca simulando a impressão 3D com os suportes em árvore (verde) para um dos tubos de Venturi (laranja), estimando tempo total de impressão de 22h36m	163
Figura 63 – Tubo de Venturi imediatamente após ser removido da impressora 3D com os suportes em árvore.....	164
Figura 64 - Tubo de Venturi em corte com $d = 2 \text{ mm}$	176
Figura 65 - Tubo de Venturi em corte com $d = 4 \text{ mm}$	176
Figura 66 - Tubo de Venturi em corte com $d = 8 \text{ mm}$	177

Figura 67 - Tubo de Venturi em corte com $d = 17$ mm.....	177
Figura 68 - Tubo de Venturi em corte com $d = 33$ mm.....	178
Figura 69 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 2$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	179
Figura 70 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 4$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	179
Figura 71 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 8$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	180
Figura 72 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 17$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	180
Figura 73 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 33$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande	181
Figura 74 - Calador para o leito 3D pequeno	182
Figura 75 - Calador para o leito 3D médio.....	183
Figura 76- Calador para o leito 3D grande	184
Figura 77 – Análise imediata da casca de arroz usada nos experimentos	186
Figura 78 - Diagrama de escolha das peneiras	189
Figura 79 - (a) Peneiras parcialmente empilhadas (b) Agitador mecânico vibratório.....	189
Figura 80 - Distribuição granulométrica da areia IPT	191
Figura 81 - Distribuição granulométrica com fração mássica acumulada da areia IPT com os valores de D definidos na curva.	192
Figura 82- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 1 ...	193
Figura 83- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 2 ...	194
Figura 84- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 2 Réplica 1 ...	194

- Figura 85- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 2 Réplica 2 ... 195
- Figura 86- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 3 Réplica 1 ... 195
- Figura 87- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 3 Réplica 2 ... 196
- Figura 88- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 4 Réplica 1 ... 196
- Figura 89- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 4 Réplica 2 ... 197
- Figura 90- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 5 Réplica 1 ... 197
- Figura 91- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 5 Réplica 2 ... 198
- Figura 92- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 6 Réplica 1 ... 198
- Figura 93- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 6 Réplica 2 ... 199
- Figura 94- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 7 Réplica 1 ... 199
- Figura 95- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 7 Réplica 2 ... 200
- Figura 96- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 8 Réplica 1 ... 200
- Figura 97- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 8 Réplica 2 ... 201
- Figura 98- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 9 Réplica 1 ... 201
- Figura 99- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 9 Réplica 2 ... 202

Figura 100- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 1 Réplica 1	203
Figura 101- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 1 Réplica 2	203
Figura 102- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 2 Réplica 1	204
Figura 103- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 2 Réplica 2	204
Figura 104- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 3 Réplica 1	205
Figura 105- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 3 Réplica 2	205
Figura 106- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 4 Réplica 1	206
Figura 107- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 4 Réplica 2	206
Figura 108- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 5 Réplica 1	207
Figura 109- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 5 Réplica 2	207
Figura 110- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 6 Réplica 1	208
Figura 111- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 6 Réplica 2	208
Figura 112- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 7 Réplica 1	209
Figura 113- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 7 Réplica 2	209
Figura 114- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 8 Réplica 1	210

Figura 115- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 8 Réplica 2	210
Figura 116- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 9 Réplica 1	211
Figura 117- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 9 Réplica 2	211
Figura 118- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 1 Réplica 1	212
Figura 119- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 1 Réplica 2	212
Figura 120- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 2 Réplica 1	213
Figura 121- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 2 Réplica 2	213
Figura 122- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 3 Réplica 1	214
Figura 123- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 3 Réplica 2	214
Figura 124- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 4 Réplica 1	215
Figura 125- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 4 Réplica 2	215
Figura 126- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 5 Réplica 1	216
Figura 127- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 5 Réplica 2	216
Figura 128- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 6 Réplica 1	217
Figura 129- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 6 Réplica 2	217

Figura 130- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 7 Réplica 1	218
Figura 131- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 7 Réplica 2	218
Figura 132- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 8 Réplica 1	219
Figura 133- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 8 Réplica 2	219
Figura 134- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 9 Réplica 1	220
Figura 135- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 9 Réplica 2	220

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Busca realizada no SCOPUS em 05/06/2025	34
Quadro 2 - Lista de alguns grupos adimensionais de diferentes autores.....	57
Quadro 3 - Resumo dos Resultados para os experimentos da matriz L9	135
Quadro 4 - Configuração recomendada para reatores de larga escala com casca de arroz	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de controle e seus respectivos níveis	67
Tabela 2 - Variáveis Respostas.....	67
Tabela 3 - Matriz codificada L9 de Taguchi	68
Tabela 4 - Dimensões dos modelos de leitos fluidizados projetados e construídos	81
Tabela 5 - Distribuidores possíveis para os Leitos Pequeno, Médio e Grande	86
Tabela 6 - Requisitos especificados pela Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) para a construção do Tubo de Venturi e valores utilizados nesse trabalho.....	104
Tabela 7 - Propriedade físicas dos materiais particulados utilizados na fluidização.....	111
Tabela 8 - Propriedades químicas da casca de arroz	112
Tabela 9 - Velocidades Mínima de Fluidização (U_{mf}) (m/s)	114
Tabela 10 - ANOVA para Velocidades Mínima de Fluidização (U_{mf}) - “menor é melhor”	116
Tabela 11 - ANOVA para Vazão volumétrica mínima de fluidização - “menor é melhor”	118
Tabela 12 - Expansão do leito (δ) (adimensional).....	120
Tabela 13 - ANOVA para expansão do leito - “menor é melhor”	121
Tabela 14 – Altura do leito fluidizado (H) (mm)	123
Tabela 15 - ANOVA para expansão do leito - “menor é melhor”	124
Tabela 16 - Diâmetros médios das bolhas (d_b) (mm)	126
Tabela 17 - ANOVA para Diâmetro médio das Bolhas - "menor é melhor"	127
Tabela 18 - Índices de Mistura (M) (%)	132
Tabela 19 - ANOVA para índice de mistura - “maior é melhor”	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
LFG-2D	Leito fluidizado grande bidimensional
LFG-3D	Leito fluidizado grande tridimensional
LFM-2D	Leito fluidizado médio bidimensional
LFM-3D	Leito fluidizado médio tridimensional
LFP-2D	Leito fluidizado pequeno bidimensional
LFP-3D	Leito fluidizado pequeno tridimensional
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCS	Poder Calorífico Superior

LISTA DE SÍMBOLOS

d_b	Diâmetro médio da bolha	(mm)
D_{fb}	Diâmetro interno do Leito fluidizado	(mm)
d_i	Diâmetro da faixa granulométrica	(μm)
d_p	Diâmetro médio	(μm)
H	Altura do leito no momento	(mm)
H_0	Altura do leito sem fluidização	(mm)
L_b	Comprimento do jato de injeção	(mm)
M	Índice de Mistura	(adm)
m_i	Massa total da amostra	(g)
m_p	Massa do material particulado	(kg)
P_E	Perímetro de um círculo perfeito	(mm)
P_P	Perímetro da projeção da partícula	(mm)
S_E	Área superficial de uma esfera perfeita	(mm^2)
S_P	Área superficial da partícula	(mm^2)
U_g	Velocidade do ar no leito	(m/s)
U_{mf}	Velocidade do gás de mínima fluidização	(m/s)
V_a	Volume aparente do material particulado	(m^3)
V_r	Volume real do material particulado	(m^3)
X	Fração mássica média	(%)
X_{ca}	Proporção mássica de casca de arroz	(%)
X_i	Fração mássica de um dos materiais para 1 amostra	(%)
x_i	Fração mássica	(%)
δ	Expansão do leito	(adm)
ΔP	Variação de Pressão	(Pa)
ε	Porosidade	(adm)

ρ_a	Massa específica aparente do material particulado	(kg/m ³)
ρ_p	Massa específica real do material particulado	(kg/m ³)
σ	Desvio padrão do leito	(adm)
σ_m	Desvio padrão do leito com completa mistura	(adm)
σ_s	Desvio padrão do leito com completa segregação	(adm)
ϕ	Esfericidade da partícula	(adm)
ϕ_{2D}	Esfericidade bidimensional da partícula	(adm)
Q_m	Vazão mássica	(kg/m ³)
β	Razão entre diâmetros (d/D) no Venturi	(adm)
C	Coefficiente de Descarga	(adm)
d	Diâmetro interno na seção menor (constrição) do Venturi	(mm)
D	Diâmetro interno na seção maior (entrada) do Venturi	(mm)
ρ_D	Massa específica do ar na entrada do Venturi	(kg/m ³)
ε	Fator de Expansão	(adm)
δ	Incerteza absoluta	(-)
τ	Razão entre pressões P_d/P_D no Venturi	(adm)
P_d	Pressão na seção menor (d) do Venturi	(Pa)
P_D	Pressão na seção maior (D) do Venturi	(Pa)
Q_v	Vazão volumétrica	(m ³ /s)
U_D	Velocidade na seção maior do Venturi	(m/s)
A_D	Área da seção maior do Venturi	(m/s)
Re_D	Número de Reynolds na seção maior (D) do Venturi	(adm)
R_a	Rugosidade da parede interna do tubo	(adm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	28
1.2	JUSTIFICATIVA	30
1.3	OBJETIVOS.....	32
1.4	CLASSIFICAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	32
1.5	CONTRIBUIÇÕES E INEDITISMO DA PESQUISA	33
1.5.1	Ineditismo da pesquisa	33
1.6	CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	37
1.6.1	Contribuições científicas da pesquisa	37
1.6.2	Contribuições da pesquisa com aderência às ODS's.....	38
2	FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE FLUIDIZAÇÃO	39
2.1.1	Definição de leito fluidizado	39
2.1.2	Aplicações do leito fluidizado	40
2.1.3	Estágios de fluidização	41
2.1.4	Principais componentes básicos e regiões em um leito fluidizado	43
2.1.5	Classificação de partículas para fluidização	45
2.1.6	Expansão do leito	47
2.1.7	Massa específica, massa específica aparente e porosidade do leito.....	48
2.1.8	Distribuição do tamanho de partícula e diâmetro médio de Sauter	49
2.1.9	Esfericidade de uma partícula.....	50
2.1.10	Velocidades de fluidização	51
2.2	EXPERIMENTOS “A FRIO” NO LEITO FLUIDIZADO.....	52
2.2.1	Nível de mistura em leitos fluidizados	53
2.3	MUDANÇA DE ESCALA EM LEITOS FLUIDIZADOS	55
2.3.1	Busca nas bases de dados	55
2.3.2	Mudança de escala e grupos de números adimensionais	56
2.3.3	Trabalhos com aplicação de mudança de escala	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1	MATERIAL PARTICULADO	63
3.1.1	Biomassa.....	63
3.1.2	Material inerte	63

3.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO	64
3.2.1	Caracterização Física	64
3.2.2	Caracterização Química	65
3.3	MÉTODOS.....	66
3.3.1	Planejamento Experimental	66
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	69
3.4.1	Velocidade mínima de fluidização	72
3.4.2	Expansão do leito e Índice de mistura	75
3.4.3	Diâmetro médio da bolha.....	77
4	PROJETOS DO SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO	79
4.1	ESQUEMA GERAL DO SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO	79
4.2	PROJETO DOS LEITOS FLUIDIZADOS.....	80
4.3	PROJETO DAS PLACAS DISTRIBUIDORAS	84
4.4	PROJETO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	88
4.4.1	Montagem do sistema de aquisição de dados.....	88
4.4.2	Aferimento e ajuste do sistema de aquisição de dados.....	93
4.5	PROJETO DO TUBO DE VENTURI	95
4.5.1	Medição de vazão e sua conformidade com normas padrão	95
4.5.2	Cálculos e definição dos parâmetros.....	98
4.5.3	Construção do tubo de Venturi.....	103
4.5.4	Aferimento e ajuste do tubo de Venturi	106
4.6	PROJETO DO CALADOR.....	107
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	111
5.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CASCA DE ARROZ	111
5.3	ESTUDO DA FLUIDIZAÇÃO.....	112
5.3.1	Velocidade mínima de fluidização (U_{mf} ou Y_1)	112
5.3.2	Expansão do Leito (δ ou Y_2)	119
5.3.3	Diâmetro médio da bolha (d_b ou Y_3).....	125
5.3.4	Índice de Mistura (M ou Y_4).....	129
5.4	DISCUSSÃO CONSOLIDADA DOS RESULTADOS	134
5.4.1	Velocidade mínima (U_{mf}) e Vazão volumétrica mínima (Q_{mf}).....	136
5.4.2	Altura total do leito fluidizado (H) e Expansão relativa ($\delta = H/H_0$)	137
5.4.3	Diâmetro médio das bolhas (d_b)	137

5.4.4	Índice de mistura (M).....	138
5.4.5	Resumo Geral para Projeto e Escala	139
6	CONCLUSÕES.....	141
6.1	CONCLUSÕES	141
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	143
	REFERÊNCIAS.....	145
	APÊNDICE A - Dificuldades Encontradas na Matriz L18	155
	APÊNDICE B - Detalhamento de Projetos dos Leitos Fluidizados	157
	APÊNDICE C - Manufatura Aditiva: Impressão 3D.....	160
	APÊNDICE F - Detalhamento dos Tubos de Venturi.....	176
	APÊNDICE G - Calibração dos Tubos de Venturi - Curvas e Equações	179
	APÊNDICE H - Detalhamento dos Caladores.....	182
	APÊNDICE i - Análise Imediata da Casca de Arroz	186
	APÊNDICE J - Caracterização Granulométrica da Areia.....	187
	APÊNDICE K - Curvas de Fluidização e Desfluidização para Obtenção da Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf}).....	193
	APÊNDICE L - Capturas se Tela para Obtenção das Alturas de Fluidização e Expansão Do Leito	203
	APÊNDICE M - Coletânea das imagens utilizadas para determinar Diâmetro de Bolha.....	212

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Novos acordos e conferências vêm sendo realizados por diversos países nos últimos anos impulsionando cada vez mais a redução de suas emissões de gases do efeito estufa, além de incentivar o investimento em energia renovável (ACEN *et al.*, 2024). Portanto, encontrar fontes alternativas de energia que possam substituir ou ajudar a reduzir o consumo dos combustíveis fósseis se torna uma medida importante. Isso fica mais evidente se considerado que depósitos fósseis demoram milhões de anos para se formar, mas são extraídos e consumidos rapidamente (HÖÖK; TANG, 2013). Além disso, a previsão de um crescimento na demanda de energia de mais de 25% até 2040 é mais um incentivo para a busca de outras fontes de energia (IEA, 2018).

A biomassa é uma das possíveis fontes renováveis de energia que pode ser explorada, sendo considerada uma das fontes com maior potencial de crescimento no futuro próximo (OLIVEIRA *et al.*, 2013). A biomassa pode ser definida como todo material proveniente de material biológico, excluindo aqueles vindos de formações geológicas e/ou transformadas em fóssil (KALTSCHMITT, 2019).

Pesquisas estão sendo feitas com o objetivo de tentar aproveitar energeticamente os resíduos sólidos dos cultivo de cana de açúcar, arroz, milho, café, entre outros (CALISKAN SARIKAYA *et al.*, 2019; PÉCORA *et al.*, 2014; PORCU *et al.*, 2019). Esses resíduos são classificados como biomassa e podem ser utilizados na combustão direta ou como fonte para produzir combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (pirólise e gaseificação) (QUISPE *et al.*, 2017).

Se esses resíduos de plantações não forem aproveitados, serão decompostos por organismos, transformando-os em metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), gases que causam efeito estufa e chuva ácida (DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013). Entretanto, o impacto ambiental do CH_4 relacionado ao efeito estufa pode ser de até 25 vezes mais potentes se comparado com o dióxido de carbono (CO_2), que é o principal componente resultante da combustão desses materiais, além da água (KRAPIVIN *et al.*, 2017; YVON-DUROCHER *et al.*, 2014).

Assim, a utilização desses resíduos como fonte de energia é vantajosa, pois se forem completamente queimados, isso reduziria a emissão de CH_4 na atmosfera e o CO_2 resultante da combustão seria praticamente todo reabsorvido no estágio de plantação e crescimento das lavouras (Energy production from biomass (part 1): overview of biomass MCKENDRY, 2002; Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, 2002).

Grandes quantidades de resíduos agrícolas são produzidas anualmente, principalmente nos países em desenvolvimento, entre eles, a casca de arroz. Segundo Tsamo *et al.* (2020), há uma produção mundial estimada de aproximadamente 120 milhões de toneladas de casca de arroz. No caso do Brasil, ele é considerado um dos maiores produtores do mundo, com 13 milhões de toneladas produzidas anualmente (NADALETI, 2019).

Essa grande quantidade de material é um possível problema, pois utilizar a casca de arroz para processos de compostagem ou como adubo para enriquecer o solo nas plantações não é vantajoso por ter baixo valor nutricional e demorar para decompor (TSAMO *et al.*, 2020). Utilizar a casca de arroz como fonte de energia se torna uma opção ainda mais interessante. Além disso, está surgindo a opção de aproveitar as cinzas resultantes da combustão da casca de arroz como base para produção de sílica, um componente usado para fabricação de diversos componentes no setor industrial (FAÉ GOMES *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2021; STEVEN *et al.*, 2021).

Embora existam diferentes sistemas que podem ser utilizados para aproveitar o potencial energético da biomassa, o leito fluidizado é particularmente flexível para aplicação em processos de conversão termoquímica (combustão, pirólise e gaseificação), permitindo aplicar materiais sólidos com diferentes geometrias e tamanhos mantendo uma eficiência relativamente alta, com perfil de temperatura homogêneo, alta taxa de transferência de calor e emissões reduzidas de SO_x e NO_x (CHÁVEZ, 2017; RÜDISÜLI *et al.*, 2012; SINGH; KUMAR, 2016).

Mesmo que o leito fluidizado possua diversas vantagens, as características físicas da casca de arroz, como geometria e massa específica, fazem com que seja difícil de utilizá-la em um leito sem nenhum material particulado adicional. Ela normalmente não fluidiza com facilidade, desenvolvendo canais preferenciais o que normalmente pode causar até mesmo a parada do sistema (BALESTIERI *et al.*, 2023). Assim, é comumente misturado um material quimicamente inerte, como a areia, que não apenas facilita a fluidização, mas também facilita a difusão de calor e homogeneidade no perfil de temperatura do leito (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Essa mistura é chamada de mistura binária, justamente por possuir 2 tipos de materiais particulados dentro do leito fluidizado.

Nessa mistura, diferentes fatores afetam a fluidização, como a proporção entre os dois particulados, massa específica, distribuição granulométrica, entre outros. Dessas variáveis, a mudança de escala é um dos desafios científicos a ser superado, uma vez que a relação entre o diâmetro do leito e os outros parâmetros não é direta, criando problemas ou incertezas no processo (RÜDISÜLI *et al.*, 2012).

A alteração na geometria de um reator de leito fluidizado, juntamente com o estudo da mudança de escala, desempenha um papel crucial ao lidar com diferentes tipos de materiais particulados, especialmente quando se busca antecipar o comportamento em uma escala industrial. A geometria do leito fluidizado e seu tamanho influenciam diretamente a distribuição e movimentação dos materiais no leito, impactando a eficiência do processo e o comportamento das partículas (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Nessa abordagem, algumas pesquisas que investigaram a mudança de escala (CHEW *et al.*, 2022; GLICKSMAN, L.R., 1984; GU *et al.*, 2020; HORIO *et al.*, 1986; ZHANG, J. *et al.*, 2012) foram documentadas. No entanto, ainda existem lacunas a serem respondidas, ao explorar a aplicação de diferentes geometrias e tamanhos de reatores no manuseio de misturas complexas de materiais particulados, buscando elucidar como as variações no projeto de reatores fluidizados influenciam o desempenho do processo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há na literatura diversos estudos que foram desenvolvidos para sistemas de fluidização considerando misturas binárias (ABDULLAH *et al.*, 2003; ÁVILA *et al.*, 2017; CUI; GRACE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PARK; CHOI, 2013; ZHANG, K. *et al.*, 2012). Entretanto, frequentemente são aplicados conceitos e métodos da fluidização de partículas convencionais, como carvão, nos projetos e operações que envolvem a aplicação de outros materiais. Assim, ocorre uma generalização do comportamento das partículas e faz com que parâmetros importantes sejam subestimados ou superestimados quando aplicados à biomassa (CUI; GRACE, 2007). Portanto, aprofundar sobre isso se torna importante para facilitar os processos de projeto, desenvolvimento e otimização de sistemas de fluidização.

As partículas dentro do sistema de fluidização possuem diferentes comportamentos dependendo do tipo de partícula e da velocidade do gás. Quando a faixa granulométrica é muito grande ou quando se tem mais de um tipo de material particulado no leito, com misturas binárias ou ternárias, existe uma tendência de ocorrer segregação entre os particulados (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Um nível de mistura minimamente homogêneo resulta em melhores condições para os processos de conversão termoquímica, melhorando a eficiência do sistema (LUNDBERG *et al.*, 2017; PÉCORA *et al.*, 2014). Além disso, esses estudos ajudaram a entender melhor a fluidodinâmica do leito e podem ser aplicados para melhorar a precisão dos programas de simulação.

Devido a esses motivos citados, existem diversos estudos (LV *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PÉCORA *et al.*, 2014; SHARMA *et al.*, 2015; XAVIER *et al.*, 2016) que avaliam o nível de mistura e segregação de um leito e como que os diferentes parâmetros (velocidade do gás de fluidização, faixa granulométrica do material particulado, tipo de distribuidor, proporção e tipo de biomassa, entre outros) influenciaram esse processo.

Tendo em vista esses conceitos, um estudo focado no nível de mistura e fluidodinâmica do material se torna importante para melhor compreender o funcionamento dos sistemas de fluidização. Portanto, esse será um dos fatores que esse trabalho irá explorar, avaliando como o nível de mistura de leitos fluidizados em uma mistura de casca de arroz e areia é afetado pela mudança de escala do sistema.

A mudança de escala de um leito fluidizado não é uma tarefa simples, principalmente quando envolve misturas de diferentes tipos de materiais particulados (RÜDISÜLI *et al.*, 2012). Uma mudança de escala mal executada pode causar diversos tipos de problemas, entre eles, redução de transferência de massa e calor entre partícula e gás, desfluidização parcial ou total, com geração de canais preferenciais, alto nível de segregação entre particulados, etc (RÜDISÜLI *et al.*, 2012).

Alguns trabalhos mais antigos tentaram solucionar esse problema por meio de análise dimensional, deduzindo grupos adimensionais para manter a mudança de escala de maneira proporcional (BROADHURST; BECKER, 1975; GLICKSMAN *et al.*, 1993; GLICKSMAN, Leon R., 1984; ROMERO; JOHANSON, 1962). Entretanto, mesmo utilizando esses conceitos, muitas vezes não é possível manter todos os aspectos da fluidização em uma mudança de escala e diversos trabalhos têm questionado a aplicabilidade desses números adimensionais conforme indicado na revisão feita por Rüdisüli *et al.* (2012).

Mesmo com todos os desafios apresentados, este assunto é de grande relevância. Um estudo fluidodinâmico a frio do leito fluidizado para mudanças de escala permitiria entender melhor essa dinâmica de mistura e segregação. Isso possibilitaria melhorar o entendimento e equacionamento de diversos processos termoquímicos, assim como aplicar os resultados de experimentos obtidos em escala laboratorial para situações no ambiente industrial.

Além disso, se a mudança de escala for melhor compreendida, isso tornaria possível encontrar configurações ótimas em sistemas de pequena escala, que são muito mais baratos de construir e, posteriormente, fazer a transição para uma escala maior. Como a homogeneidade da mistura binária afeta a eficiência do processo como um todo, é importante avaliar o efeito dessa

mudança de diâmetro do leito no nível de mistura das partículas.

Neste contexto, este estudo busca compreender a dinâmica de mistura e segregação em leitos fluidizados para aprimorar o entendimento e equacionamento de processos termoquímicos, proporcionando a possibilidade de aplicar resultados de experimentos em escalas laboratoriais em ambientes industriais. Com isso, pretende-se responder a seguinte questão: *Quais são as correlações entre o tamanho do reator e os parâmetros de fluidização, e como esses fatores influenciam o comportamento do leito fluidizado em sistemas que envolvem misturas binárias de areia e casca de arroz?*

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral dessa tese é correlacionar os efeitos na mudança de escala de reatores de leito fluidizado com os parâmetros de fluidização utilizando misturas binárias de areia e casca de arroz.

Para o cumprimento do objetivo geral, os objetivos específicos da presente tese são:

1. Projetar e construir leitos fluidizados borbulhantes em 3 diâmetros diferentes, suas versões tridimensionais e bidimensionais, fazendo ajustes necessários em função da variação da granulometria, altura inicial do leito e proporção de casca de arroz e areia, para proceder ensaios de fluidização de misturas de areia-biomassa a fim de compreender melhor o efeito da mudança de escala.
2. Determinar os parâmetros da fluidização, tais como velocidade de mínima fluidização, queda de pressão, expansão do leito, índice de mistura, proporção de biomassa/inerte a fim de avaliar o efeito do diâmetro do leito por meio da determinação do índice de mistura, expansão do leito, velocidade de mínima fluidização e rastreamento de partícula.
3. Reproduzir os ensaios experimentalmente a frio executados nos leitos tridimensionais, utilizando técnicas de extrações de amostra, a fim de extrapolar os resultados para escalas mais realistas.

1.4 CLASSIFICAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com o trabalho publicado por Turrioni e Mello (2012), o atual trabalho pode ser classificado da seguinte maneira:

Natureza: Aplicada. Este trabalho tenta expandir a fronteira do conhecimento com intenção de aplicar os resultados em problemas específicos na área industrial.

Objetivos: Exploratória. Tentar avaliar as determinadas situações que ainda não foram exploradas e/ou pouco estudadas.

Abordagem: Combinada. Apresenta uma abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa. Dados serão coletados e analisados para melhorar o entendimento do processo, embora alguns aspectos serão avaliados de maneira descritiva e observacional.

Método: Experimental. Algumas variáveis serão escolhidas e suas relações e influências serão estudadas por meio de experimentos práticos.

1.5 CONTRIBUIÇÕES E INEDITISMO DA PESQUISA

1.5.1 Ineditismo da pesquisa

Com o objetivo de melhor visualizar a atual situação sobre esse assunto no meio científico, foi realizada uma pesquisa nas bases de dados do Scopus na data de 05/06/2025 utilizando os termos de pesquisa: leito fluidizado (*fluidized bed, fluidization*), mudança de escala (*scale, scale-up, scaling, scaling-up*) e casca de arroz (*rice husk*).

Para fazer essa pesquisa, limitou-se o idioma para o inglês, as áreas de estudo para Engenharia Química, Engenharia, Química e Energia. Também foi limitado apenas para Artigos de pesquisa e Revisões, excluindo capítulos de livro, páginas de congresso, entre outros. Não foi feita nenhuma limitação com relação às datas de publicação. O resultado pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Busca realizada no SCOPUS em 05/06/2025

Etapas	Termos de Pesquisa	Limitações em "Language"	Limitações em "Subject area"	Limitações em "Document type"	Número de Resultados
1	TITLE,ABS,KEY: "fluidized bed" OR "fluidization"	English	Chemical Engineering; Engineering; Chemistry; Energy.	Articles Reviews	36729
2A	TITLE,ABS,KEY: "fluidized bed" OR "fluidization" AND TITLE,ABS,KEY: "scale" OR "scale-up" OR "scaling" OR "scaling-up"	English	Chemical Engineering; Engineering; Chemistry; Energy.	Articles Reviews	7046
2B	TITLE,ABS,KEY: "fluidized bed" OR "fluidization" AND TITLE,ABS,KEY: "Biomass"	English	Chemical Engineering; Engineering; Chemistry; Energy.	Articles Reviews	4247
2C	TITLE,ABS,KEY: "fluidized bed" OR "fluidization" AND TITLE,ABS,KEY: "Rice husk"	English	Chemical Engineering; Engineering; Chemistry; Energy.	Articles Reviews	242
3	TITLE,ABS,KEY: "fluidized bed" OR "fluidization" AND TITLE,ABS,KEY: "scale" OR "scale-up" OR "scaling" OR "scaling-up" AND TITLE,ABS,KEY: "Rice husk"	English	Chemical Engineering; Engineering; Chemistry; Energy.	Articles Reviews	52

Fonte: Autoria própria

A pesquisa foi realizada em 3 etapas. A primeira delas foi uma pesquisa mais generalizada, utilizando apenas os termos de busca relacionados ao leito fluidizado (*fluidized bed*, *fluidization*). O número de artigos encontrados foi de 3729, um número consideravelmente elevado, demonstrando a importância do assunto no meio acadêmico.

A segunda etapa foi dividida em três partes 2A, 2B e 2C. Na etapa 2A, além dos termos de fluidização (*fluidized bed*, *fluidization*), foram acrescentados os termos de mudança de escala (*scale*, *scale-up*, *scaling*, *scaling-up*). O resultado obtido foi de 7046 artigos publicados, ainda um valor elevado, o que ajuda reforçar a importância do assunto dentro da área de leitos fluidizados.

Na etapa 2B, juntou-se os termos de fluidização (*fluidized bed*, *fluidization*) com o termo para biomassa (*biomass*), obtendo um número de trabalhos ainda significativo, com um número de 4247.

Na etapa 2C, nota-se uma queda considerável do número de trabalhos, reduzindo para apenas 242 trabalhos quando é feita a combinação dos termos de fluidização (*fluidized bed*, *fluidization*) com casca de arroz (*rice husk*). Com base nesses resultados, fica evidente que o assunto de “mudança de escala” para leitos fluidizados é extremamente relevante. Tendo como base os números avaliados, esse assunto está presente de maneira significativa em aproximadamente 19% dos artigos envolvendo leito fluidizado ou fluidização. É utilizado o termo “significativa” porque a busca é feita para encontrar os termos buscados no título, no resumo e/ou nas palavras-chave de qualquer um desses artigos. Essas são seções nas quais se coloca apenas a essência do que está sendo estudado.

O mesmo pode ser dito sobre o termo “biomassa”, que embora não seja tão proeminente quanto “mudanças de escala”, está presente em aproximadamente 11,4% dos artigos sobre leito, também reforçando a importância desse tema.

Entretanto, uma queda relativamente grande ocorre no número de trabalhos quando a mudança é feita de “biomassa” para o termo “casca de arroz”, passando a equivaler a menos de 1% dos trabalhos sobre fluidização. Naturalmente, se a quantidade de artigos sobre casca de arroz e leito fluidizado é pequena, artigos que avaliem o efeito da mudança de escala nesse conjunto é menor ainda, conforme visto no Quadro 1.

Se o número de publicações ao longo dos anos for normalizado em função do total de trabalhos em cada etapa (Etapas 2B e 2C), é possível perceber uma possível tendência de

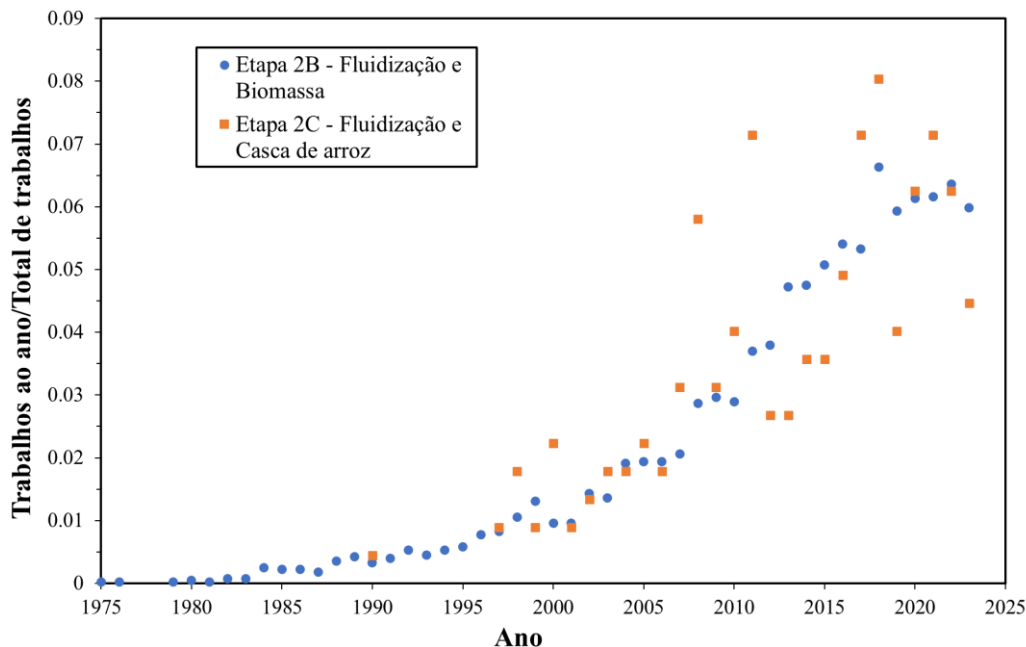
comportamento. Essa evolução no número de publicações pode ser vista na Figura 1.

Na Figura 1 é possível perceber que embora os valores absolutos de trabalhos sejam bem diferentes, ambos têm uma tendência muito similar. Perto do ano de 1995, o número de trabalhos relacionados à biomassa e casca de arroz começaram a crescer, muito provavelmente devido à mudança de foco de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis nas últimas décadas.

A única questão é que embora a biomassa como um todo seja bastante explorada, a casca de arroz não é tão estudada. Um dos possíveis motivos é a dificuldade que ela apresenta em sofrer fluidização. Por apresentar essa dificuldade extra em um sistema que é relativamente complexo, isso pode inibir o investimento nesse tema.

Independente do motivo, a casca de arroz é um material abundante e que precisa ser aproveitado, não apenas para otimizar o lucro no processo rural, mas também para minimizar seu impacto ambiental negativo.

Figura 1 - Evolução ao longo dos anos do número de artigos publicados de cada ano dividido pelo total de trabalhos para as etapas 2B e 2C da pesquisa



Fonte: Autoria própria

Resultados de outros pesquisadores mostram que a casca de arroz pode ser aplicada para a geração de energia em leito fluidizado (FAÉ GOMES *et al.*, 2016; KARMAKAR *et*

al., 2013; LI, Z. *et al.*, 2021; MANU *et al.*, 2023; PARK *et al.*, 2021; ZENG *et al.*, 2023), o que ajudaria a contornar todos os seus atuais problemas. Isso significa que pesquisas sobre o assunto, por estarem relativamente escassas, se tornam ainda mais importantes para obter melhores resultados.

Por fim, na terceira etapa, 3 tipos de termos foram utilizados: fluidização (*fluidized bed, fluidization*), mudança de escala (*scale, scale-up, scaling, scaling-up*) e casca de arroz (*rice husk*). O resultado retornou apenas 52 trabalhos publicados nos últimos 53 anos.

Avaliando cada um desses 52 trabalhos, não foi encontrado nenhum estudo “a frio” sobre casca de arroz voltado para mudança de escala. Portanto, esse será o foco de pesquisa do atual trabalho, com ênfase na mudança do diâmetro do reator e no nível de mistura entre os materiais particulados.

Assim, demonstra-se o ineditismo da pesquisa pela análise de publicações científicas relacionadas, evidenciando a crescente importância de estudos envolvendo biomassa, em particular, casca de arroz, sendo um tema que é relativamente escasso na literatura e com potencial para contribuições significativas, destacando-se a relevância da mudança de escala em reatores de leito fluidizado.

1.6 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

1.6.1 Contribuições científicas da pesquisa

Na presente tese, busca-se fornecer dados inéditos e relevantes, abordando, mas não se limitando a, questões relacionadas à aplicação de fontes alternativas de energia, alinhada com os objetivos do Acordo de Paris para a redução de emissões de gases de efeito estufa e a limitação do aumento da temperatura global.

Destaca-se a importância do aproveitamento de um resíduo agrícola abundante como fonte renovável de energia a fim de evitar emissões de metano e óxido nitroso, contribuindo significativamente para a mitigação do impacto ambiental.

É crucial também avaliar o uso de sistemas fluidizados na aplicação de diferentes materiais sólidos, incluindo misturas bifásicas, com destaque na importância da mudança de escala do reator de leito fluidizado. Propõe-se uma abordagem experimental para compreender o impacto dessas variáveis nos sistemas de fluidização.

Com os resultados obtidos, pretende-se preencher lacunas na compreensão dos processos termoquímicos envolvendo o uso da casca de arroz. As contribuições potenciais incluem avanços na utilização eficiente da casca de arroz como fonte de energia, proporcionando percepções para a otimização de sistemas em escalas mais realistas, como aplicações industriais.

1.6.2 Contribuições da pesquisa com aderência às ODS's

A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). São 17 objetivos que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no mundo, incluindo o Brasil.

Entende-se que essa pesquisa possui aderência com 7 dos 17 objetivos apresentados pela ONU, elencados na sequência:

ODS 2 - Fome zero e agricultura sustentável;

ODS 3 - Saúde e bem-estar;

ODS 7 - Energia limpa e acessível;

ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura;

ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis;

ODS 12 - Consumo e produção responsáveis;

ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima;

Parte do objetivo desse trabalho envolve o aproveitamento da casca de arroz em reatores de leito fluidizado. Assim, aproveitar a casca de arroz proveniente das plantações reduz a emissão de gases do efeito estufa e de componentes químicos que fazem mal à saúde, melhorando as condições de vida da região, reduzindo o impacto ambiental e lidando de maneira responsável com resíduos resultantes dos processos de consumo (ODS 2, ODS 3, ODS 11, ODS 12, ODS 13). Além disso, o aproveitamento da casca de arroz em um leito fluidizado tem como objetivo principal gerar energia (ODS 7) e a pesquisa sobre esse processo, que é o foco desse trabalho, ajuda a melhorar a tecnologia industrial (ODS 9).

2 FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE FLUIDIZAÇÃO

2.1.1 Definição de leito fluidizado

O leito fluidizado pode ser definido como um sistema que proporciona a fluidização de materiais sólidos particulados. Entretanto, isso levanta outras duas questões: o que é um material sólido particulado e o que seria a fluidização?

No caso da primeira questão, ele consiste de um material que está no estado sólido, porém dividido em uma enorme quantidade de partículas, geralmente irregulares, de diferentes formatos e tamanhos (SAMPAT *et al.*, 2018). Isso fornece algumas características únicas para esse tipo de material, como a capacidade de escoar, algo normalmente encontrado apenas em outros estados da matéria, como líquidos ou gases. Alguns exemplos de materiais particulados podem ser elencados: areia, conjunto de grãos (arroz, feijão, milho, etc), talco, entre outros.

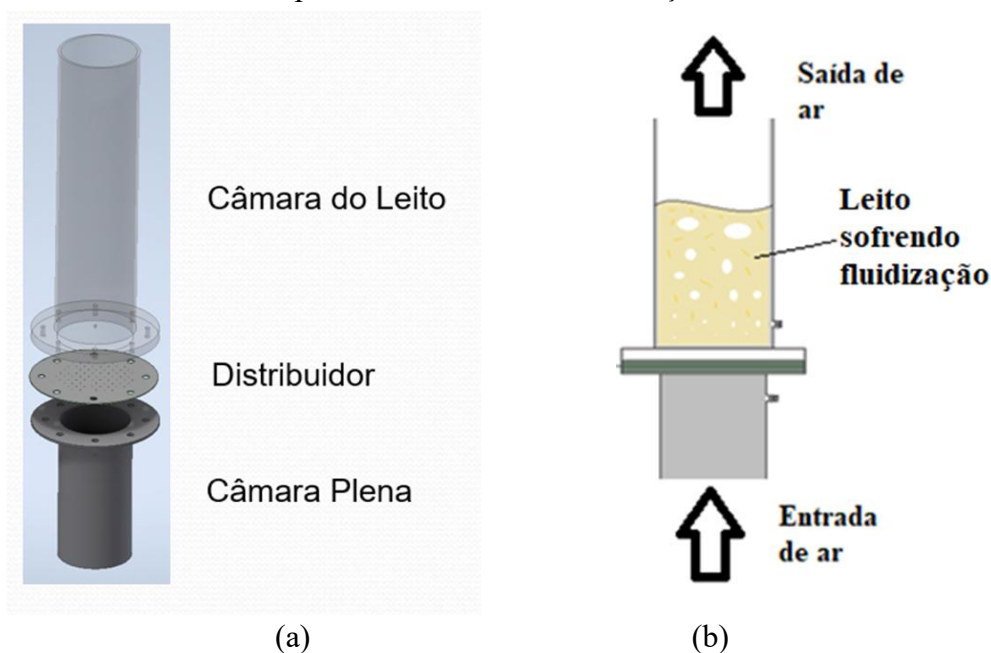
Tendo definido o conceito de material particulado, isso leva à segunda questão que se refere à fluidização. A fluidização é um fenômeno físico que consiste em escoar um fluido, no sentido contrário a gravidade, através desse conjunto de sólidos particulados. Quando a vazão desse fluido é muito baixa, o fluido consegue passar entre os interstícios do material granulado, mantendo o sólido em um regime estático. Entretanto, conforme a vazão do fluido é aumentada, as forças de arraste e gravidade se igualam, deixando os particulados em suspensão. Isso faz com que esse material tenha liberdade para se movimentar e causa um comportamento similar ao de um fluido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; PARK; CHOI, 2013; YATES; LETTIERI, 2016).

É importante salientar que para que o fenômeno de fluidização aconteça, é necessário ter um ambiente propício para isso. Portanto, o leito fluidizado é, na grande maioria das vezes, composto por uma coluna cilíndrica onde há a injeção de gás na parte inferior do sistema. Inclusive, o termo “leito” se refere justamente ao material particulado que sofre fluidização. O esquema simplificado do leito fluidizado é mostrado na Figura 2.

O gás é inserido no reator por um distribuidor, uma placa com furos ou bicos injetores sobre o qual fica depositado o sólido particulado que será fluidizado. Antes do distribuidor,

há uma câmara plena para homogeneização da pressão, podendo também ter um pré-distribuidor na entrada do gás de fluidização. A câmara do leito fica logo acima da placa distribuidora e é onde todo o material particulado, ou “leito”, está depositado (BEHZADI *et al.*, 2008; GLERUM; BOIES, 2023; KUNII; LEVENSPIEL, 1991; RAZZAQUE, 2016).

Figura 2 - Exemplo de leito fluidizado (a) Componentes básicos do reator (b) Material particulado sofrendo fluidização



Fonte: Autoria própria

2.1.2 Aplicações do leito fluidizado

Embora o conceito de leito fluidizado tenha sido explicado, ainda é necessário definir sua aplicação no meio industrial e como ele pode ser importante para realizar diferentes processos.

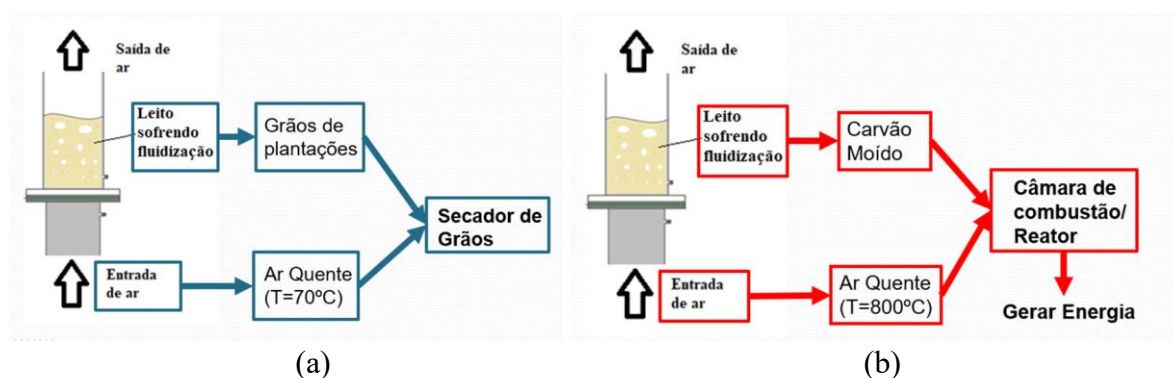
Dependendo do tipo de material particulado que é utilizado e das características físico-químicas do fluido injetado dentro do sistema, o leito fluidizado pode assumir diferentes funções, conforme mostrado na Figura 3.

Considere que um gás à uma temperatura de 70 °C é injetado em um leito composto por grãos de plantações, o leito fluidizado pode ser aplicado para secagem. Devido às suas características de escoamento, um sistema como esse é muito mais eficiente que um sistema de leito fixo, por exemplo, em que o material ficaria estático.

Se esse gás é trocado por um gás a uma temperatura mais alta (entre 500 °C e 800 °C) e o material particulado é substituído por carvão moído, o leito fluidizado se torna uma câmara de combustão para gerar energia térmica, podendo ser aplicado em um ciclo a vapor.

O leito fluidizado é particularmente flexível para aplicação em processos de conversão termoquímica (combustão, pirólise e gaseificação), permitindo utilizar materiais sólidos com diferentes geometrias e tamanhos mantendo uma eficiência relativamente alta, com perfil de temperatura homogêneo, alta taxa de transferência de calor e, se bem equipado, com emissões reduzidas de SO_x e NO_x (CHÁVEZ, 2017; RÜDISÜLI *et al.*, 2012; SINGH; KUMAR, 2016). Essas características o tornam uma opção interessante para aplicação de materiais mais complexos de trabalhar em um reator de leito fixo, como a biomassa.

Figura 3 - Exemplos de aplicações do leito fluidizado (a) Secagem de grãos (b) Queima de carvão



Fonte: Autoria própria

2.1.3 Estágios de fluidização

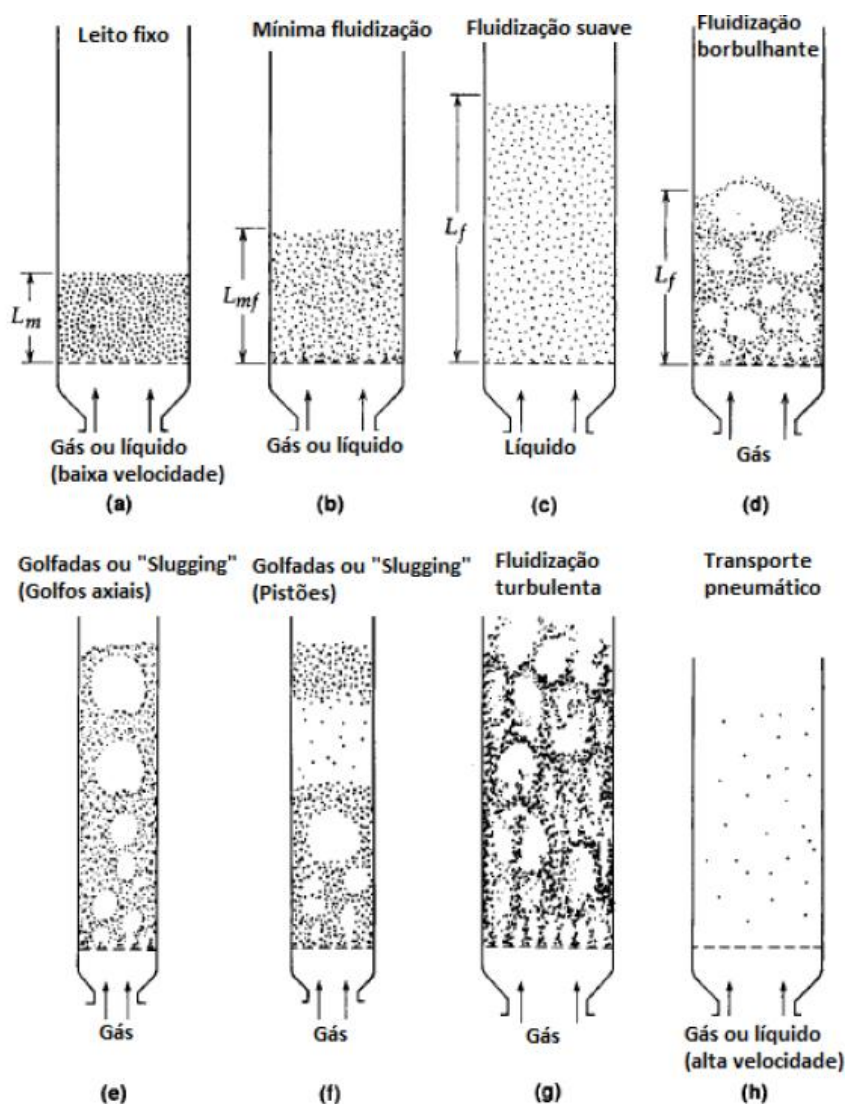
Conforme a vazão do fluido varia, isso afeta diretamente no que acontece dentro da câmara do leito. Se a vazão for muito baixa, o fluido passará pelos interstícios das partículas e o material ficará estático. Esse estado é conhecido como leito fixo. Entretanto, se a vazão for continuamente aumentada, o material particulado começa a passar por diferentes estágios de fluidização, partindo do regime borbulhante até o transporte pneumático (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Os diferentes estágios de fluidização podem ser observados na Figura 4. Após alcançar uma determinada vazão de fluido, o sistema atinge um regime de mínima fluidização no qual as forças entre a gravidade das partículas e da força de arraste causada pelo fluido

entram em equilíbrio, deixando o material “suspenso” (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Acima do ponto de mínima fluidização, o comportamento entre gases e líquidos se diferencia. Para os líquidos, normalmente ocorre uma fluidização suave, com o fluido e o material particulado se misturando de maneira homogênea e expandindo o volume do leito de maneira considerável. Essa expansão de volume resulta em uma expansão da altura do leito no estado de mínima fluidização L_{mf} para uma altura específica L_f que varia de acordo com a vazão do líquido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 4 - Representação dos diferentes estágios de fluidização de um material particulado em um leito fluidizado



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

Normalmente para os líquidos, ocorre uma transição direta do estágio de fluidização suave para o estágio de transporte pneumático, onde o material acaba sendo empurrado para fora do recipiente e deixa de ser um processo de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Por outro lado, no caso dos gases, que é o foco desse trabalho, há uma série de outros estágios intermediários entre o estado de mínima fluidização e o transporte pneumático. Com uma vazão superior ao do de mínima fluidização, pode acontecer uma fluidização suave ou ir direto para a fluidização borbulhante.

Na fluidização borbulhante, além de haver uma expansão do leito da mesma maneira que acontece na fluidização suave, há formação de bolhas, regiões onde se tem pouco material particulado e muito fluido.

Conforme a vazão do gás aumenta, o tamanho dessas bolhas também aumenta, criando bolhas que ocupam a maior parte da área do sistema. Assim, se o material particulado for mais “fino” (menor diâmetro de partícula), o material tende a escoar pelas laterais do sistema, conforme mostrado na Figura 4 (e). Entretanto, se for um material mais “grosso” (maior diâmetro de partícula), a bolha adquire um formato de pistão empurrando uma camada inteira de material para cima até ela se desfazer e cair, conforme mostra a Figura 4 (f) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Por fim, em altas vazões de gás, o sistema adquire um perfil de fluidização turbulento, com formação de regiões “vazias” de diferentes formatos e tamanhos, com um comportamento caótico das partículas (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

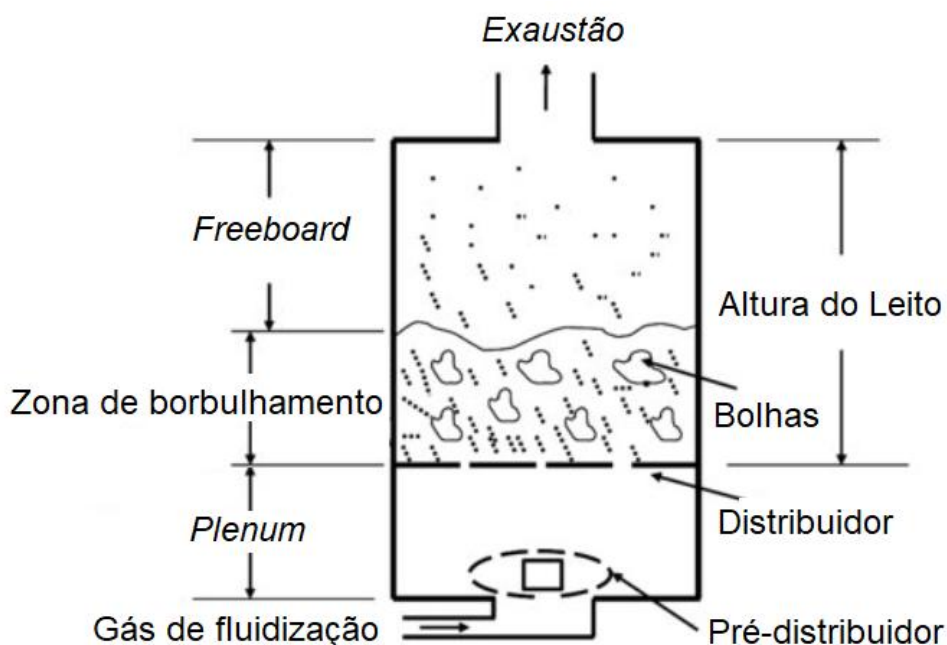
Em especial, o regime borbulhante apresenta maior eficiência em transferir calor, requer menor energia e apresenta menor abrasão se comparado com os leitos circulantes (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; PARK; CHOI, 2013; YATES; LETTIERI, 2016). Portanto, esse foi o estado de fluidização aplicado nos experimentos do atual trabalho.

2.1.4 Principais componentes básicos e regiões em um leito fluidizado

Conforme observado na Figura 2 e na Figura 5, os principais componentes de um leito fluidizado são o *plenum*, o distribuidor e câmara do leito. Em regime borbulhante, os particulados se distribuem em duas regiões dentro da câmara do leito: a zona de borbulhamento, região mais densa em que fica a maior parte do material e o *freeboard*, região pouco densa, constituído por partículas mais finas e leves. Em ambas regiões ocorrem reações

químicas, sendo que na zona de borbulhamento ocorrem principalmente as reações entre gás e sólido, enquanto que na região freeboard ocorrem reações complementares entre os gases e as partículas mais leves (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; RAZZAQUE, 2016).

Figura 5 - Diagrama esquemático de um reator de leito fluidizado borbulhante

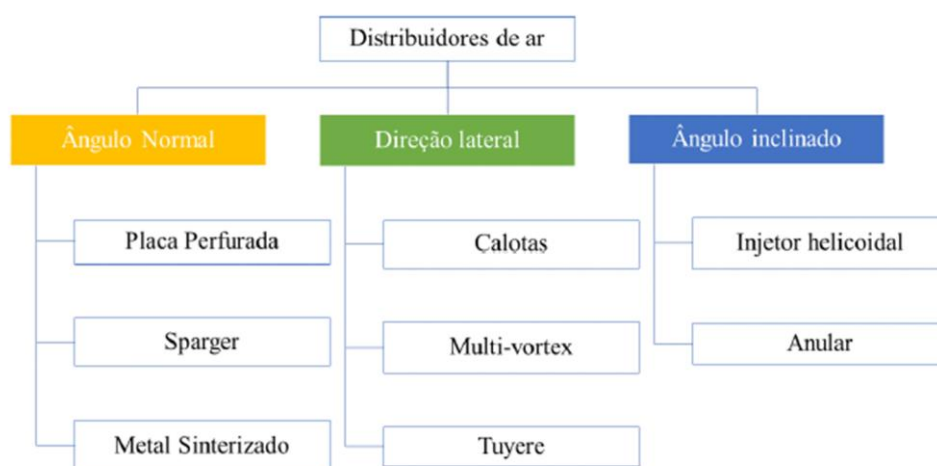


Fonte: Modificado de Razzaque (2016)

O *plenum*, ou câmara plena, é responsável por regularizar o fluxo do fluido antes de entrar no leito, diminuindo a turbulência ou a não-uniformidade do mesmo. O *plenum* pode ser projetado de diferentes formatos para melhorar a injeção do fluido no leito e evitar a formação de canais preferenciais. No entanto, se a razão entre a perda de carga do distribuidor e do leito for alta o suficiente (pelo menos 30%) (COCCO *et al.*, 2014; KUNII; LEVENSPIEL, 1991), o formato do *plenum* deixa de ter importância (YANG; WEN-CHING YANG, 2003).

O distribuidor ou placa distribuidora é responsável por inserir o fluido dentro do leito. Existem diferentes tipos de placas que podem ser classificadas em 3 tipos de acordo com a orientação da injeção do fluido: vertical, horizontal e inclinada (SHUKRIE *et al.*, 2016).

Figura 6 - Classificação dos tipos de placas distribuidoras



Fonte: Modificado de Shukrie *et al.* (2016)

Dentre os diversos tipos de distribuidores, um dos mais simples de serem fabricados, o que também contribuem para sua popularidade, é a placa perfurada. Ela consiste em uma placa com furos distribuídos em formação quadrada ou triangular.

2.1.5 Classificação de partículas para fluidização

Existem diferentes estágios de fluidização. Entretanto, nem todas as partículas passam pelos mesmos estágios, não apenas pela influência do tipo de fluido, mas também pelas características de cada partícula.

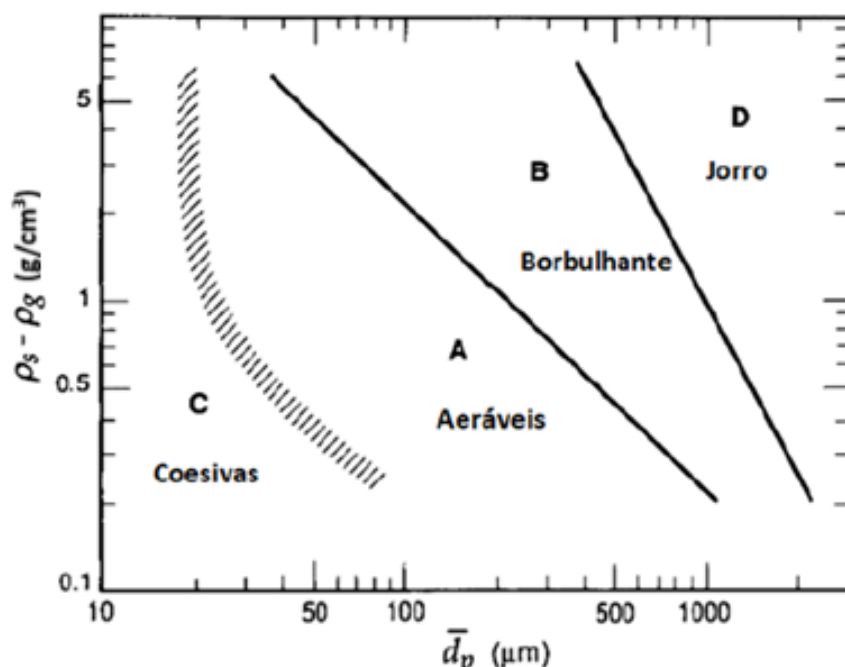
Geldart (1973) classificou 4 grupos de partículas de acordo com seus comportamentos em um leito, obtendo os diferentes comportamentos mostrados na Figura 7. Geldart (1973) conseguiu encontrar uma relação entre o diâmetro médio dessas partículas e a diferença entre as massas específicas delas e do gás injetado no leito.

As características de cada grupo são descritas a seguir de acordo com os trabalhos de Kunii e Levenspiel (1991) e Cocco *et al.* (2014):

Grupo A: as partículas têm a capacidade de serem aeradas e fluidizam facilmente. Por isso, a maioria das partículas usadas em leitos fluidizados são do Grupo A. Em um leito fluidizado, não há formação de bolhas grandes (até 20 cm). Em baixas velocidades de gás, ocorre uma considerável expansão na altura do leito sem a formação de bolhas. Sob alta pressão, essas partículas podem sofrer uma expansão do leito de 100% ou mais. Se um leito

fluidizado não for projetado para lidar com esse tipo de expansão, pode ocorrer uma perda significativa de massa para os equipamentos subsequentes.

Figura 7 - Tipos de partículas classificadas em função do diâmetro médio d_p e da diferença de massas específicas do sólido ρ_s e do gás ρ_g



Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

Grupo B: as partículas do Grupo B não costumam passar por uma fluidização suave, e bolhas se formam no início da fluidização. Portanto, a velocidade mínima de fluidização e a velocidade mínima de borbulhamento são semelhantes. Elas fluidizam facilmente e são utilizadas em uma ampla gama de operações unitárias fluidizadas com poucas dificuldades. O fenômeno conhecido como "slugging" ocorre quando as paredes do leito fluidizado estabilizam as bolhas, fazendo com que elas empurrem os sólidos para cima na unidade. As partículas do Grupo B tendem a permitir a formação de bolhas muito grandes (da ordem de metros em leitos altos), portanto, o "slugging" pode ocorrer até mesmo em algumas unidades grandes.

Grupo C: as partículas desse grupo geralmente são as mais difíceis de fluidizar. Elas são consideradas coesas e quase sempre apresentam uma formação de canais preferenciais, ou seja, a formação de um canal no meio do material por onde a maior parte do gás escoar durante a fluidização. Quando as partículas são pequenas tendem a se comportar mais como aglomerados de partículas do que como partículas únicas e independentes (COCCO *et al.*,

2010). Para limitar esse efeito, partículas do Grupo C são normalmente fluidizados com o auxílio de defletores, micro jatos, pulsos e/ou vibração mecânica. Às vezes, partículas maiores, como as do Grupo B, são adicionadas ao leito para promover uma fluidização mais suave.

Grupo D: formado por partículas grandes e normalmente densas. Os requisitos de gás para fluidizar partículas do Grupo D são elevados. Durante a fluidização de partículas do Grupo D, as bolhas formadas são enormes, e o fenômeno de "slugging" pode ser observado mesmo em leitos fluidizados de grandes dimensões. Essas partículas tendem a formar "jorros" ou jatos na superfície, criando diversos canais preferenciais no seu meio.

Segundo Varghese *et al.* (2024), existem poucos trabalhos experimentais que exploram as propriedades de fluidização de partículas pertencentes ao Grupo D. Isso significa que provavelmente trabalhos experimentais sobre misturas entre partículas do Grupo D com outros grupos também são escassos. Isso reforça ainda mais a necessidade de fazer experimentos com biomassas que estejam classificados dentro desse grupo, como é o caso da casca de arroz.

2.1.6 Expansão do leito

Conforme o gás é injetado dentro do sistema, dependendo do regime de fluidização e do tipo de partícula, há uma expansão do leito δ que é uma relação entre a altura atual do leito H e a altura inicial do leito antes de fluidizar H_0 . Essa relação é apresentada na equação (1).

$$\delta = \frac{H}{H_0} \quad (1)$$

A passagem do gás impulsiona as partículas para cima e aumenta o espaçamento entre elas, causando a expansão do material particulado. A expansão pode ser bem grande, dependendo da velocidade do gás, entre outras variáveis. Isso faz com que esse parâmetro seja importante para dimensionamento de um sistema de fluidização. Com isso, algumas outras propriedades também mudam com a expansão do leito. Se a altura do leito varia e o diâmetro do reator permanece constante, pode-se afirmar que o volume do leito V_b também irá variar de acordo com esse fenômeno.

Importante notar que o volume real do material sólido não muda, mas como esse material pode ter diferentes geometrias e tamanhos, espaços “vazios” ficam entre as partículas. Esse espaço aumenta quando o gás que está fluidizando empurra essas partículas para cima, aumentando o volume aparente do leito.

2.1.7 Massa específica, massa específica aparente e porosidade do leito

O material particulado tem parte do seu volume composto pelos espaços vazios entre as partículas. Se esses espaços vazios forem ignorados e o volume real das partículas (V_p) for calculado, é possível calcular uma razão direta entre a massa das partículas (m_p) e esse volume real, obtendo a massa específica “real” da partícula ρ_p dada pela equação (2).

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2)$$

No entanto, muitas vezes é medido o volume aparente (V_a) do material, que inclui no volume os espaços vazios entre as partículas, resultando em uma massa específica aparente (ρ_a), definida pela equação (3). Nesse caso, a massa específica aparente pode ser medida com o material sem fluidizar.

$$\rho_a = \frac{m_p}{V_a} \quad (3)$$

Considerando que o volume aparente irá mudar de acordo com a fluidização do sistema e o aumento dos espaços vazios entre as partículas, é possível definir uma outra propriedade do leito, que é a porosidade (ϵ). Isso não deve ser confundido com a porosidade da partícula. A definição de porosidade é representada na equação (4).

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \quad (4)$$

Importante notar que ϵ depende da variação do volume aparente. Isso significa que a porosidade do leito aumenta conforme ocorre uma expansão da altura do leito. Esse valor é equivalente à uma média dos vazios dentro do leito, levando em conta os pequenos espaços entre as partículas, mas também considerando os grandes espaços vazios formados pelas

bolhas no sistema. Isso significa que a porosidade do leito é uma propriedade não apenas do material particulado, mas como também uma propriedade do sistema de fluidização e que afeta diretamente os processos fluidodinâmicos e termoquímicos.

2.1.8 Distribuição do tamanho de partícula e diâmetro médio de Sauter

Outras propriedades que materiais particulados possuem e que são importantes durante a fluidização são o diâmetro da partícula e a distribuição do tamanho de partícula (DTP ou, em inglês, PSD). Ambas propriedades estão diretamente relacionadas.

O diâmetro da partícula indica um valor médio que represente todas as partículas de um determinado material. Entretanto, para obter um valor médio do diâmetro é importante saber a variação do tamanho das partículas (do menor ao maior diâmetro) e o valor percentual de quanto material existe para cada um dos diferentes diâmetros que compõem o particulado. Essa distribuição percentual de material em função das diferentes faixas de diâmetros de um material particulado é o DTP e o obter um diâmetro a partir disso é conhecido como diâmetro médio (d_p). As Equações (5), (6) e (7) são aplicadas para calcular, respectivamente, a fração mássica (x_i), diâmetro da faixa granulométrica (d_i) e diâmetro médio (d_p) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; WERTHER, 1987).

$$x_i = \frac{m_i}{m_t} \quad (5)$$

$$d_i = \frac{D_{pi} + D_{pi+1}}{2} \quad (6)$$

$$d_p = \left[\sum \left(\frac{x_i}{d_i} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

A fração mássica x_i é calculada dividindo a massa de uma determinada faixa granulométrica m_i pela massa total da amostra, conforme equação (5). O diâmetro da respectiva faixa granulométrica é calculado fazendo a média dos diâmetros da peneira maior e da menor, segundo (6). Por fim, o diâmetro médio é obtido pela equação (7), que utiliza os valores obtidos pelas outras duas equações.

2.1.9 Esfericidade de uma partícula

Uma outra propriedade que é importante para a fluidização é a esfericidade φ . A esfericidade é um valor adimensional que indica o quanto uma partícula se aproxima de uma esfera. Se ela for perfeitamente esférica, o valor é 1, mas conforme ela vai se afastando desse formato, o valor vai reduzindo.

Essa propriedade tem diversas maneiras de ser medida e calculada (RORATO *et al.*, 2019), no entanto, a esfericidade “real” foi proposta por Wadell (1932), que é dada pela equação (8). O termo S_E é a área superficial de uma esfera perfeita que tem o mesmo volume que a partícula que está sendo analisada e S_P é a área superficial da partícula.

$$\varphi = \frac{S_E}{S_P} \quad (8)$$

A limitação da equação (8) é que as vezes é difícil medir o volume real da partícula e, principalmente, medir a área superficial. Devido à essas dificuldades, outras definições de esfericidades foram propostas, sendo que uma lista mais extensa é dada por Rorato *et al.* (2019). Assim, é necessário definir uma outra forma de calcular a esfericidade que seja mais acessível e tenha valores razoavelmente próximos da esfericidade real. De acordo com o estudo feito por Rorato *et al.* (2019), dentre as diferentes formas de calcular a esfericidade, a que mais se aproxima da “real” é a esfericidade perimetral.

Ela basicamente é a versão “bidimensional” da esfericidade proposta por Wadell (1932). Essa esfericidade é definida pela equação (9), com P_E sendo o perímetro de um círculo que tenha a mesma área que a projeção da partícula e P_P sendo a perímetro real da partícula.

$$\varphi_{2D} = \frac{P_E}{P_P} \quad (9)$$

O único ponto que Rorato *et al.* (2019) destaca sobre essa equação (9) é que a área e o perímetro da partícula devem ser calculados com base na projeção que tenha as maiores dimensões. Um exemplo seria considerar uma partícula com comprimento $c = 10$ u.m., altura $a = 5$ u.m. e espessura $e = 2$ u.m. Nesse caso, a projeção que teria um resultado melhor seria a projeção com as dimensões c e a , ignorando a espessura.

2.1.10 Velocidades de fluidização

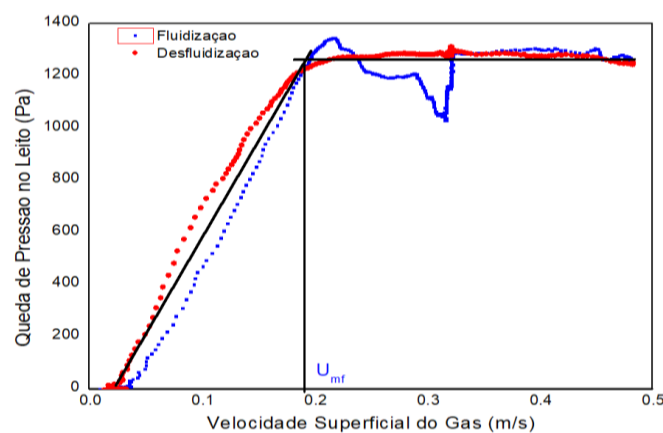
Conforme o gás passa por entre as partículas, há um balanço de forças contrárias. De um lado, existe a gravidade, empurrando as partículas para baixo enquanto a força de arraste causada pelo movimento do gás empurra as partículas para cima (COCCO *et al.*, 2014; KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Embora a força gravitacional permaneça constante por depender apenas da massa das partículas, a força de arraste depende, de forma simplificada, da velocidade do gás que está transitando entre o material (COCCO *et al.*, 2014; KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Portanto, a força de arraste cresce junto com a velocidade do gás. Da mesma maneira, a perda de pressão, ou perda de carga, causada pelo conjunto de partículas no leito cresce conforme a velocidade do gás é aumentada (COCCO *et al.*, 2014; KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Assim que a velocidade do gás atingir um determinado valor, as forças de arraste e gravitacionais se equilibram, causando o fenômeno de fluidização. Essa velocidade é conhecida como velocidade mínima de fluidização (U_{mf}). A partir desse ponto, a perda de carga se estabiliza e permanece relativamente constante com o aumento da vazão do gás (COCCO *et al.*, 2014; KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Se relacionar a perda de carga do leito e a velocidade do gás, é possível identificar o ponto de mínima fluidização conforme ilustrado na Figura 8. Determinar esse ponto é extremamente importante para o processo de fluidização.

Figura 8 - Curva de Fluidização e Desfluidização para definir a velocidade mínima de fluidização



Fonte: Adaptado de Balestieri *et al.* (2023)

Alguns autores (LV *et al.*, 2018; PÉCORA *et al.*, 2014) utilizam a curva de fluidização para determinar U_{mf} , enquanto outros autores usam a curva de desfluidização (QIAOQUN *et al.*, 2005; R. RAO; RAM. BHEEMARASETTI, 2001). A diferença consiste basicamente em iniciar o leito em estado estacionário e fluidizá-lo ou percorrer o caminho inverso. No caso de alguns materiais, a curva de fluidização pode apresentar variações mais drásticas, dificultando determinar U_{mf} , conforme observado na Figura 8.

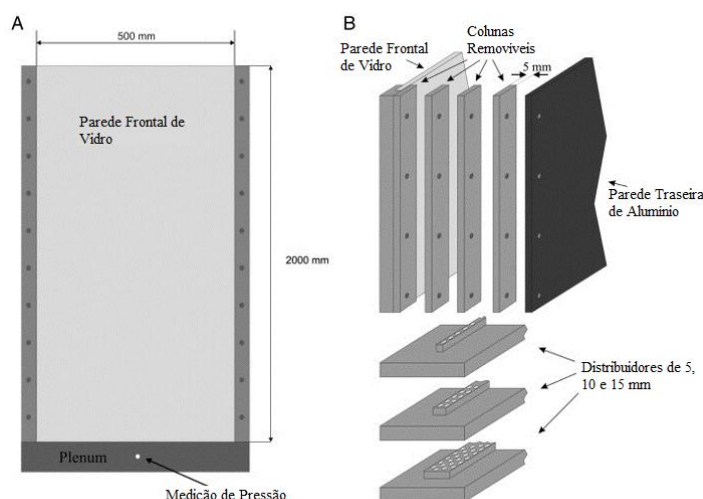
2.2 EXPERIMENTOS “A FRIO” NO LEITO FLUIDIZADO

Existem dois tipos de testes experimentais que são realizados em sistemas de fluidização: a frio e a quente. A diferença principal entre eles é o aspecto que está sendo analisado. Os testes a frio são normalmente feitos a temperatura ambiente, com enfoque na fluidodinâmica e escoamento dos particulados. Os estudos a quente envolvem tanto o aspecto físico quanto químico, acrescentando ao escoamento as reações existentes nos processos termoquímicos, aumentando o grau de complexidade dos experimentos.

Nos testes a frio, esses estudos são normalmente feitos em sistemas de acrílico ou outros materiais transparentes para facilitar a visualização do experimento.

Em alguns desses casos (ALMENDROS-IBÁÑEZ *et al.*, 2009; SÁNCHEZ-DELGADO *et al.*, 2011) os autores efetuam a fluidização em leitos bidimensionais (2D). Embora eles não sejam verdadeiramente bidimensionais, esta denominação refere-se ao perfil retangular de espessura estreita, simulando uma “fatia” do leito cilíndrico. Esses sistemas são montados por terem uma melhor facilidade de visualização, podendo ser aplicados para analisar formação de bolhas, mistura do material no leito e rastreamento de partículas (ALMENDROS-IBÁÑEZ *et al.*, 2009; SHEN *et al.*, 2004). Um esquema de leito bidimensional é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de Leito Fluidizado Bidimensional modular, com diferentes espessuras e distribuidores de ar



Fonte: Adaptado de Sánchez-delgado et al. (2011)

2.2.1 Nível de mistura em leitos fluidizados

Existem diferentes tipos de partículas e algumas delas têm um comportamento de fluidização que não é muito eficiente para processos termoquímicos. Esse é o caso da casca de arroz e de várias outras biomassas, que possuem uma geometria irregular e tamanhos muito grandes, caindo na categoria de partículas do Grupo D.

O Grupo D cria diversos canais preferenciais e pontos de estagnação no leito, o que inviabiliza sua utilização ou reduz severamente a eficiência do processo termoquímico. Assim, uma das soluções é misturar esse material do Grupo D com partículas provenientes de outros grupos, normalmente do tipo A ou B, que são fáceis de fluidizar.

Muitas vezes é escolhida a areia por ser um material barato e quimicamente inerte. Entretanto, o material particulado existente dentro do reator passa a ser uma mistura binária, com características provenientes de ambos os tipos de materiais. Isso introduz uma nova dificuldade no processo, assim como algumas novas variáveis importantes, como a proporção entre os dois materiais e o nível de mistura entre eles. Diversos trabalhos estudam o nível de mistura de um leito porque a segregação do material afeta diretamente na eficiência do processo.

Seddighi et al. (2018) afirmam que o estudo de segregação e mistura de material no leito é fundamental. Isso acontece porque os atuais equacionamentos cinéticos de reação e

de combustão falham em conseguir prever os perfis de emissão de gases do leito, tanto em escala laboratorial quanto em escala industrial. Associar nível de mistura de um reator com mudança de escala contribui para melhor compreender os diferentes processos termoquímicos e fluidodinâmica do leito.

O nível de mistura pode ser medido por meio de um índice chamado Índice de Mistura (M) que é regido por um equacionamento de Kramer (GYENIS, 1999; PARK; CHOI, 2013) que é demonstrado na equação (10).

$$M = \frac{\sigma_s^2 - \sigma^2}{\sigma_s^2 - \sigma_m^2} \quad (10)$$

No caso, σ_s é o desvio padrão da fração mássica quando há completa segregação e σ_m é o desvio padrão da fração mássica quando há completa mistura, com σ sendo o desvio padrão do leito dado pela equação (11), com X_i a fração mássica de um dos materiais, como a biomassa, na amostra i , $\bar{X}$ a média das amostras e n o número de amostras retiradas do leito.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (11)$$

O desvio padrão de completa segregação (σ_s) e o desvio padrão de completa mistura (σ_m) são definidos a partir das equações fornecidas por Wel (1999) que podem ser visualizadas nas equações (12) e (13).

$$\sigma_s^2 = X_c (1 - X_c) \quad (12)$$

Nas Equações (12) e (13), X_c é definido como a fração mássica real na mistura e N é dado como o número total de partículas da amostra.

$$\sigma_m^2 = \frac{X_c (1 - X_c)}{N} \quad (13)$$

O Índice de Mistura é usado por pesquisadores tanto na parte experimental (LI, H. *et al.*, 2021; SARBANHA *et al.*, 2023) quanto na parte de simulação numérica (MARKEEV *et*

al., 2023; TASHAKORI-ASFESTANI *et al.*, 2023; XU *et al.*, 2022).

Existem diversos métodos para avaliar segregação e mistura dentro de sistemas, não apenas de leito fluidizado, conforme listado por Huang e Kuo (2014). Dentro dessa lista, existem os métodos intrusivos e os não intrusivos. Dos não intrusivos, pode ser feito por meio de captura e análise de imagens, ressonância magnética, sensores capacitivos e rastreamento de partículas radioativas.

Nos métodos intrusivos, existem algumas maneiras diferentes de fazer essa análise. Uma das mais comuns é por meio de extração de amostras. Outra forma intrusiva seria o método da solidificação, onde o sistema é “congelado” utilizando alguma substância transparente, como polímeros, gelatinas ou soluções de agarose (agar-agar) para manter todas as partículas fixadas e depois o material é fatiado em camadas para análise (HUANG; KUO, 2014).

2.3 MUDANÇA DE ESCALA EM LEITOS FLUIDIZADOS

2.3.1 Busca nas bases de dados

Tendo como referência a análise feita na seção 1.5.1, apenas 52 trabalhos foram encontrados que tivessem os termos leito fluidizado, mudança de escala e casca de arroz citados no título, resumo ou palavras-chaves.

Avaliando cada um dos 52 trabalhos, notou-se que nenhum deles tinha como foco a mudança de escala. A palavra “*scale*” (escala, em inglês) era normalmente citada para indicar se era um sistema em escala piloto ou industrial (“*pilot scale*” ou “*industrial scale*”), enquanto que em outros trabalhos, ela era citada sob diferentes contextos, mas sem focar na mudança de dimensões do sistema. Isso significa que trabalhos com foco em mudança de escala para casca de arroz em leitos são, na melhor das hipóteses, escassos, se não inexistentes. Assim, torna-se necessário ampliar os termos de busca para obter um panorama melhor das informações que existem sobre mudança de escala para leitos fluidizados de uma maneira geral.

Para conseguir avaliar os trabalhos mais importantes relacionados ao assunto, foram colocados os termos leito fluidizado (*fluidized bed*, *fluidization*) e mudança de escala (*scale-up*, *scaling*, *scaling-up*) apenas para serem pesquisados no título e foram obtidos 223

trabalhos. Cada um foi avaliado e foram selecionados os que eram relevantes ou cujo o acesso era possível.

2.3.2 Mudança de escala e grupos de números adimensionais

A mudança de escala de um leito é compreendida como a transição de um sistema de determinadas dimensões para uma outra, seja maior ou menor. O objetivo da mudança de escala é poder mudar as dimensões mantendo todas as características importantes e necessárias ao processo que isso está sendo aplicado.

Entretanto, essa transição não é simples, e mesmo utilizando conceitos de análise dimensional, para um sistema complexo como o leito fluidizado, essa transição se torna difícil de ser feita na prática (RÜDISÜLI *et al.*, 2012). Seddighi *et al.* (2018) reforçaram a necessidade de mais testes sobre mudanças de escala e como ainda não existe tanto conhecimento dessa relação entre escala e mistura de material particulado.

Um dos maiores problemas do leito fluidizado é que muitos fatores importantes para a fluidização são dependentes da escala e das dimensões do reator, como as propriedades das partículas, transferência de massa e calor, propriedades das bolhas formadas no sistema, entre outras. Entre esses fatores, o nível de mistura de materiais também tem forte dependência do diâmetro do reator, assim como da relação entre altura e diâmetro do leito H/D (MATSEN, 1996; RÜDISÜLI *et al.*, 2012).

Glicksman (1982) conseguiu obter um conjunto completo de números adimensionais fazendo uma análise de adimensionalização das equações de movimento e conservação de massa, juntando com as equações de fases de partículas de Anderson e Jackson (1967) e as equações de Ergun (1952).

O resultado pode ser visto no Quadro 2 junto com diversos outros grupos de números adimensionais. Uma lista mais completa foi catalogada por Rüdisüli *et al.* (2012).

Quadro 2 - Lista de alguns grupos adimensionais de diferentes autores

Autores	Grupo de números adimensionais	Comentários
Romero e Johanson (1962)	$\left(\frac{u_{mf}\rho_g d_p}{\mu}\right), \left(\frac{u_{mf}^2}{gD}\right), \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right), \left(\frac{D}{d_p}\right)$	Não é recomendado para o uso de mudança de escala por ser incompleto.
Broadhurst e Becker (1975)	$\left(\frac{u_0\rho_g d_p}{\mu}\right), \left(\frac{u_0^2}{gD}\right), \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right), \left(\frac{D}{H}\right), \left(\frac{d_p}{D}\right), \varphi,$ DTP $\varepsilon_{mf}, \left(\frac{p_0}{\rho_n u_0^2}\right)$	Conjunto completo, mas difícil de ser aplicado na prática por ter poucos graus de liberdade.
Glicksman (1984) - Completo	$\left(\frac{u_0\rho_g d_p}{\mu}\right), \left(\frac{u_0^2}{gD}\right), \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right), \left(\frac{D}{H}\right), \left(\frac{d_p}{D}\right), \varphi,$ DTP	Forças de superfícies são ignoradas, ou seja, coeficientes de restituição e de fricção são omitidos. Entretanto, é um dos mais utilizados e referenciados nos trabalhos (RÜDISÜLI et al., 2012).
Glicksman et al. (1993) - Simplificado	$\left(\frac{u_0}{u_{mf}}\right), \left(\frac{u_0^2}{gD}\right), \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right), \left(\frac{D}{H}\right), \varphi,$ DTP	Versão simplificada de Glicksman (1984). Pode ser aplicada para todas as faixas de Reynolds, mas entre faixas de 10 à 2000, a incerteza cresce consideravelmente (até quase 31%)

Fonte: Adaptado de Rüdisüli *et al.* (2012).

Previamente ao trabalho de Glicksman (1982), Romero e Johanson (1962) e Broadhurst e Becker (1975) encontraram grupos adimensionais utilizando o teorema de Pi de Buckingham. Romero e Johanson (1962) obtiveram um grupo reduzido de variáveis, mas não levam em consideração esfericidade e nem Distribuição do Tamanho de Partícula (DTP) do material particulado. Por outro lado, Broadhurst e Becker (1975) deduziram um conjunto muito similar ao de Glicksman (1982), com dois números adimensionais a mais, um sendo relativo à variação de pressão no leito e o outro relativo à “porosidade” ou vazio do leito.

Enquanto que o conjunto de Romero e Johanson (1962) ignora algumas variáveis, o de Broadhurst e Becker (1975) dificulta muito a transição de escala por ter muitos números adimensionais. Até o conjunto obtido por Glicksman (1982), apesar de ser o mais usado, também dificulta a mudança de escala.

Um exemplo para ilustrar melhor o que está sendo dito seria ter como referência o

número adimensional d_p/D , que faz uma relação direta entre o diâmetro médio da partícula dentro do leito (d_p) e o diâmetro do leito (D). Se mudarmos a escala em 20 vezes, aumentando o tamanho do leito e seu diâmetro, seria necessário aumentar o diâmetro médio da partícula em 20 vezes. Isso se torna impraticável, principalmente em casos como o da casca de arroz *in natura*.

Por esse motivo, Glicksman; Hyre e Woloshun (1993) criaram conjuntos de números adimensionais simplificados para tentar amenizar o problema da solução anterior. Ambos conjuntos (original e simplificado) ainda são utilizados em trabalhos recentes para mudanças de escala em leitos fluidizados (CHÁVEZ, 2017; KRAFT *et al.*, 2017).

Ao longo dos anos, surgiram diversos outros métodos de redimensionamento e mudança de escala. Enquanto alguns tentaram complementar as equações originais propostas por Glicksman (1982) com números adimensionais extras (KELKAR; NG, 2002; SIERRA *et al.*, 2009), outros tentaram criar abordagens completamente diferentes com números adimensionais que consideram outras variáveis (GIBILARO, 2001; HORIO *et al.*, 1986; VAN DEN BLEEK *et al.*, 2002).

Bonniol *et al.* (2009) e Sierra *et al.* (2009) notaram que os conjuntos adimensionais de Glicksman (1982) não levaram em conta os distribuidores, responsáveis pela injeção de gás no leito, um fator extremamente importante no projeto. Sierra *et al.* (2009) constatou que para o conjunto adimensional simplificado de Glicksman; Hyre e Woloshun (1993), uma mudança geométrica proporcional simples dos distribuidores, similaridades fluidodinâmicas não permanecem.

Para manter a similaridade fluidodinâmica, seria necessário utilizar as leis completas de Glicksman (1982) ou alterar a razão entre as áreas de furos e área da placa, que manteria uma similaridade fluidodinâmica, mas alteraria outros fatores importantes, como o comprimento de penetração do jato de fluidização.

Dessa maneira, Bonniol *et al.* (2009) propôs mais dois parâmetros adimensionais complementares ao de Glicksman (1982), contabilizando o distribuidor e o plenum. No entanto, se o conjunto de Glicksman (1982) era criticado por ser restritivo, adicionar mais termos torna o processo ainda mais difícil de ser feito na prática.

Mantendo uma abordagem similar de tentar expandir o conjunto adimensional de Glicksman (1982), Kelkar e Ng (2002) propôs mais dois números adimensionais, tendo como foco as reações químicas. Um dos números é focada na taxa de reação enquanto o outro tem

como ênfase a transferência de massa. No entanto, o problema de expandir o conjunto original permanece o mesmo.

Horio *et al.* (1986) desenvolveram um grupo contendo apenas 2 números adimensionais, focando na coalescência de bolhas formadas no leito. Esse trabalho teve bons resultados para partículas do Grupo B em experimentos feitos a frio.

Schouten *et al.* (1996) e Van den bleek e Schouten (1993) criaram uma abordagem completamente diferente das utilizadas anteriormente, desenvolvendo uma relação das variáveis por meio de uma análise de “caos”, no qual a troca de informação entre dois reatores de escalas diferentes deve permanecer constante.

Com base nisso, foi obtido o grupo de entropia adimensional, no qual a entropia de Kolmogorov K deve permanecer constante para manter a similaridade entre os leitos. Avaliando esses grupos adimensionais, Van den bleek *et al.* (2002) constataram que se o número de Froude e a relação H/D permanecerem constantes, as características do leito conseguem se manter com uma certa similaridade.

Glicksman (1982) não incluiu nenhuma propriedade mais específica e inerente ao sistema de fluidização, como as propriedades relacionadas a formação de bolhas, nível de mistura do leito, entre outras variáveis. Dessa forma, mesmo que as propriedades fluidodinâmicas sejam teoricamente mantidas, outras características importantes podem não se manter iguais com a mudança de escala.

As características das bolhas é um fator dominante nos leitos fluidizados (CHEW *et al.*, 2022). Comportamentos “inadequados” das bolhas podem causar um baixo índice de mistura dos particulados, causando variações bruscas de temperatura no reator, baixa eficiência no reator e zonas de desfluidização (CHEW *et al.*, 2022).

Portanto, Gibilaro (2001) definiu dois parâmetros para mudança de escala, sendo um deles adimensional e o outro relativo ao tempo. Sua abordagem é mais focada na distribuição do gás no sistema e na formação de bolhas, saindo dos métodos mais convencionais que foram propostos. No entanto, devido as características dos seus parâmetros, sua aplicação fica, a princípio, reduzida para sistemas com particulados do tipo A e do tipo B.

Conforme constatado por Leckner *et al.* (2011) e Rüdisüli *et al.* (2012), a mudança de escala pode ser feita tendo como base os fatores fluidodinâmicos ou os fatores voltados para os processos termoquímicos que ocorrem no sistema. Realizar a mudança de escala

mantendo todos os fatores constantes é praticamente impossível, o que levanta a questão de quais fatores devem ser priorizados em uma mudança de escala.

Uma possibilidade seria focar nas variáveis fluidodinâmicas que mais afetam os processos termoquímicos do reator. Isso significaria que mesmo que todas as características do sistema não permanecessem iguais em uma mudança de escala, os parâmetros “mais importantes” permaneceriam inalterados.

Sabendo que o um sistema de leito fluidizado é normalmente aplicado para processos termoquímicos, fatores fluidodinâmicos que mais afetam a eficiência do processo se tornam os parâmetros mais importantes. Embora quais desses parâmetros são realmente os que mais afetam cada processo esteja aberto à discussão, não tem como negar que o nível de mistura é um fator extremamente importante nesse contexto.

Esse é um dos motivos do atual trabalho focar no nível de mistura entre materiais particulados e como isso é afetado pela mudança de escala. Embora esse fator tenha sido estudado por diversos trabalhos ao longo dos anos, ainda não foi muito explorado com relação à mudança de escala, principalmente para materiais particulados mais complexos, como a biomassa.

2.3.3 Trabalhos com aplicação de mudança de escala

Existem diversos trabalhos que tentaram aplicar ou testar as mudanças de escala e validar os grupos adimensionais comentados na seção 2.3.2. Alguns desses trabalhos são experimentais, enquanto outros tem uma abordagem de simulação numérica, utilizando técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC ou CFD, em inglês).

Os trabalhos de Biglari *et al.* (2016) e Couto *et al.* (2016) indicaram que a CFD é uma ferramenta promissora para mudança de escala de leitos fluidizados. No entanto, ambos os trabalhos também destacaram que a validação de modelos CFD com dados experimentais é essencial para garantir a precisão dos resultados. Couto *et al.* (2016) também destacaram que muitos trabalhos sobre mudança de escala aplicados para biomassa ainda precisam ser feitos.

O trabalho de Parker *et al.* (2013) também demonstrou que a CFD pode ser usada para entender e otimizar reatores fluidizados, embora alguns valores de expansão do leito tenham sido diferentes dos feitos experimentalmente, reforçando a necessidade de mais pesquisas experimentais e validação dos dados.

O trabalho de Thapa e Halvorsen (2014) explorou sobre o limite viscoso do conjunto de Glicksman (1982) por meio de simulações numéricas. Entretanto, eles descobriram que para valores do número de Reynolds acima de 15, os resultados estão discrepantes e o comportamento das bolhas não se mantem igual, mesmo usando as leis de Glicksman (1982).

O trabalho de Van ommen *et al.* (2006) destacou as limitações das leis de escala existentes, particularmente em baixas velocidades do gás. Eles compararam simulações de dois leitos fluidizados com diferença de tamanho de um fator de dois.

Van ommen *et al.* (2006) empregaram três conjuntos de regras de mudança de escala baseados em Glicksman (1982): simplificado, completo e estendido. Embora o tamanho médio das bolhas tenha mudado de escala seguindo os conjuntos estabelecidos de uma maneira geral, independentemente do conjunto usado, surgiram discrepâncias significativas no número de bolhas e na distribuição do tamanho das bolhas na metade da altura do leito. O conjunto estendido (conjunto completo com número adimensional de pressão adicionada) teve o melhor desempenho em baixas velocidades do gás, enquanto os conjuntos simplificado e estendido produziram resultados razoáveis em velocidades mais altas. Surpreendentemente, o conjunto completo teve um desempenho pior do que as opções mais simples.

Cardoso *et al.* (2018) criou modelos 2D em CFD e validou seus modelos matemáticos usando dois reatores reais de escalas diferentes. Comparando o processo de gaseificação real de biomassa com as simulações, foi possível prever as curvas de fluidização e a composição do gás de síntese, com desvios máximos em torno de 20% para o CH₄.

Após fazer essas análises e validar os modelos matemáticos, experimentos numéricos foram executados para explorar o nível de mistura entre biomassa e areia, entre elas, a casca de arroz. Cardoso *et al.* (2018) verificou que partículas maiores de biomassa tendem a segregar mais na parte superior do reator e que o nível de mistura entre partículas melhora conforme o tamanho do leito aumenta.

Cardoso *et al.* (2018) também percebeu que quanto maior a diferença entre as massas específicas dos materiais particulados, maior a tendência de segregação e que possivelmente o efeito da massa específica do material é maior do que o do tamanho da partícula. Além dessas propriedades, eles testaram a influência da velocidade do gás no índice de mistura e encontraram evidências de que maiores velocidades geram menos segregação, embora gaste mais energia para fluidizar.

Zhang *et al.* (2012) realizaram experimentos em leitos fluidizados 2D para avaliar o

nível de mistura entre areia e carvão, partículas pertencentes ao grupo B. Os autores encontraram similaridade no nível de mistura apenas quando as leis de Horio *et al.* (1986) eram satisfeitas.

Segundo Zhang *et al.* (2012), uma pequena variação nas propriedades do carvão causava uma grande queda no índice de mistura (de 0,88 para 0,42) para o leito pequeno e maiores velocidades tendem a diminuir a segregação de material. Esses resultados são bem similares aos encontrados por Cardoso *et al.* (2018). Entretanto, Zhang *et al.* (2012) destacam que se o leito for mantido em funcionamento por tempo suficiente, altas velocidades de gás reverteriam o estado de misturado para segregado.

Zaid *et al.* (2023) aplicaram técnicas avançadas de medição com sonda óptica gás-sólidos e transdutor de pressão para quantificar parâmetros fluidodinâmicos locais em dois leitos fluidizados de tamanhos diferentes.

Os resultados indicaram que os grupos adimensionais relatados não são adequados para alcançar similaridade entre os dois leitos fluidizados em termos de retenção de sólidos, retenção de gás, velocidade de partículas, fluxo de massa e flutuações de pressão, que são variáveis não consideradas pelo grupo de números adimensionais propostos por Glicksman (1982).

Com base nesses resultados, os autores defendem o desenvolvimento de uma metodologia mais confiável para a mudança de escala de leitos fluidizados, enfatizando a necessidade de considerar tanto aspectos fluidodinâmicos “globais”, explorados por Glicksman (1982), quanto aspectos mais “locais”, propriedades específicas do leito.

Briongos e Guardiola (2005) propuseram um novo método para mudar a escala utilizando uma combinação de leitos 2D e 3D e aplicando a análise entrópica proposta por Schouten *et al.* (1996) e Van den bleek e Schouten (1993). Entretanto, os autores reconheceram que existem algumas limitações na técnica aplicada.

Yan *et al.* (2005 e Yan e Zhu (2004) realizaram estudos de distribuição de sólidos em reatores circulantes, mostrando que velocidades maiores de fluidização resultam em perfis mais homogêneos e que reatores menores tendem a ter um perfil mais uniforme na distribuição do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL PARTICULADO

3.1.1 Biomassa

A biomassa que foi utilizada no leito fluidizado foi a casca de arroz apresentada na Figura 10. Ela foi fornecida por produtores da cidade de Guaratinguetá, localizada na região do Vale do Rio Paraíba do Sul, no estado de São Paulo. Ela foi utilizada sem nenhuma modificação (*in natura*), exceto pela sua cor, que foi modificada com corante para facilitar o seu contraste com a areia, que possui uma cor bege.

Figura 10 - Casca de Arroz Tingida para os experimentos



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Material inerte

Como material inerte foi utilizado areia obtida do Instituto de Pesquisa Tecnológico (IPT) que está apresentada na Figura 11. Essa areia foi peneirada e separada apenas para conter grãos dentro da faixa de 150 à 300 μm .

Figura 11 - Areia do IPT usada nos experimentos



Fonte: Autoria própria

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

3.2.1 Caracterização Física

A caracterização do material é um processo importante para melhor compreender como ele afeta os fenômenos de fluidização. É necessário calcular os seguintes parâmetros (previamente explicados na seção 2.1):

- Massa específica (ρ_p);
- Massa específica aparente (ρ_a);
- Porosidade (ϵ);
- Distribuição do tamanho de partícula;
- Diâmetro médio de Sauter da partícula (d_p);
- Esfericidade (ϕ);
- Classificação Geldart de tipo de partícula.

Esses parâmetros também podem ser aplicados em equações para determinar fatores importantes como a velocidade de mínima fluidização sem necessariamente recorrer à experimentos práticos.

O cálculo dos 3 primeiros parâmetros foram feitos tendo como base as equações (2), (3) e (4) da seção 2.1.7, medindo a massa e o volume com o auxílio de uma balança e recipientes gradados.

A distribuição do tamanho de partícula foi feita com uso de peneiras do tipo ASME, sendo que o material foi posteriormente pesado para cada faixa granulométrica. Tendo essa informação como base, o diâmetro médio foi calculado usando as equações (5), (6) e (7) da seção 2.1.8.

Para calcular a esfericidade, foi utilizada a equação (9), comentada na seção 2.1.9, que é uma versão bidimensional equivalente à esfericidade real. Para calcular a área e o perímetro das projeções de casca de arroz foi utilizado o ImageJ na versão 1.53.

A área e o perímetro de uma amostra contendo 987 unidades de cascas de arroz foram calculadas com base em fotos tiradas. Na sequência, calculou-se a média aritmética desses valores e obteve-se um valor de esfericidade representativo da amostra. O mesmo procedimento foi aplicado para as areias, com imagens tiradas em microscópios.

A partir do diagrama e as classificações desenvolvidas por Geldart (1973) fez-se a classificação de partículas para fluidização, conforme discutidos na seção 2.1.5.

3.2.2 Caracterização Química

Para o uso da biomassa como biocombustíveis, é necessário proceder as análises elementar, imediata e, bem como a determinação do Poder Calorífico Superior (PCS).

A determinação da análise elementar é fundamental para a caracterização de um biocombustível a fim de, principalmente, entender a sua capacidade de produzir energia. Nessa análise é determinada os elementos presentes no biocombustível, como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e outros. Com a composição elementar é também possível prever o poder calorífico do biocombustível, bem como avalia sua qualidade e a sua composição das emissões poluentes. Essa análise é executada em laboratório externo.

A análise imediata tem como objetivo determinar a quantidade de 4 componentes obtidos na queima de casca de arroz: umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Para a análise imediata é utilizado o sistema da TA Instruments (SDT Q600 TGA/DTA/DSC) localizado no LC₃ (Laboratório de Combustão e Captura de Carbono) do Departamento de Energia (DEN/FEG-Unesp). Utiliza-se a metodologia proposta para ensaios de TGA (KARATEPE; KÜÇÜKBAYRAK, 1993), adotando-se 5,04 mg de casca de arroz com granulometria média de 212 µm que é colocado no cadinho e inserido no forno do sistema. Inicia-se uma taxa de fluxo de 40 mL/min de N₂ e uma taxa de aquecimento de 20 °C/min de

30 °C até 110 °C. É mantida uma isoterma a 110 °C por 30 min para identificar a quantidade de umidade. Após isso, aumenta-se a razão de aquecimento para 40 °C/min e eleva-se a temperatura até 950 °C, mantendo em condições isotérmicas por 7 min para quantificar o material volátil. Após esse processo, abaixa-se a temperatura para 750 °C, com uma taxa de 20 °C/min, trocando a atmosfera para ar sintético e mantendo em isoterma por 30 min, o que possibilita determinar o teor de carbono fixo e de cinzas.

No processo para determinar o PCS, é utilizado o equipamento Calorímetro IKA C2000, disponível no LC₃. Coloca-se 0,5 g de casca de arroz moída no cadinho e foi inserida dentro de um vaso pressurizado com um fio padrão de algodão para dar início à ignição. Posteriormente, o sistema é fechado e oxigênio puro é injetado dentro do vaso, criando uma pressão entre 30 e 35 bar. A ignição é feita por um sistema elétrico, iniciando a combustão do fio de algodão que em contato com a casca de arroz, causa a combustão completa do material. A temperatura externa do vaso é controlada por um banho de água a 25 °C, que ajuda a manter todo o processo sob controle e a medir a quantidade total de calor que foi liberada no processo, determinando o PCS.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Planejamento Experimental

Existem diversos parâmetros que afetam a fluidização. Embora o principal objetivo seja avaliar a influência da mudança de escala, outros fatores serão testados em conjunto, uma vez que a literatura apresenta poucos artigos de leito fluidizado com ênfase em casca de arroz (242 artigos no SCOPUS em junho de 2025). Para isso será aplicado um planejamento experimental fatorial, o Arranjo Ortogonal L9 proposto por Taguchi.

O método de Taguchi permite diferentes combinações de níveis dos fatores de controle e suas respostas correspondentes. As variáveis são denominadas como fatores de controle e fatores resposta. Os fatores de controle são os parâmetros definidos pelo pesquisador, que podem ser mudados ou ajustados livremente durante o experimento, utilizados para otimizar ou melhorar o desempenho do sistema. Os fatores respostas referem-se às variáveis ou características do sistema que são observadas ou medidas em resposta às mudanças nos fatores de controle. São as variáveis de interesse que o pesquisador, que não podem ser manipuladas diretamente, mas são respostas influenciados pelos fatores de

controle.

A matriz L9 permite que, a partir de 9 testes, seja feita a análise de até 4 fatores de controle. Nessa pesquisa são considerados 4 fatores de controle (A, B, C, D) com 3 níveis (Baixo, Médio e Alto). Os níveis Baixo, Médio e Alto são codificados como 1, 2 e 3, respectivamente. Os fatores de controle e seus níveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de controle e seus respectivos níveis

Fatores de controle	Níveis		
	Baixo (1)	Médio (2)	Alto (3)
A - Diâmetro do leito fluidizado (D_{fb}) (mm)	70	150	240
B - Velocidade de fluidização (U_g/U_{mf}) (m/s)	1,0	1,25	1,5
C - Proporção em massa de casca de arroz (X_{ca}) (%)	1,0	2,5	5,0
D - Razão entre Altura e Diâmetro do leito (H_0/D_{fb}).	0,5	1,0	1,5

Fonte: Autoria própria

Importante notar que no projeto de pesquisa original, planejou-se fazer um L18, mas diversos problemas ocorreram, o que forçou a troca da matriz original por uma L9. Maiores detalhes são descritos no APÊNDICE A.

A partir das combinações entre os fatores de controle (A, B, C, D) nos 3 níveis avaliados são obtidos os fatores respostas. São consideradas 4 variáveis respostas (Y_1 , Y_2 , Y_3 e Y_4), conforme indicas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis Respostas

Respostas reais	Respostas Codificadas
Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) (m/s)	Y_1
Expansão do leito (δ) (adm)	Y_2
Diâmetro médio da bolha (d_b) (mm)	Y_3
Índice de Mistura (M) (adm) (%)	Y_4

Fonte: Autoria própria

As partir das diferentes combinações entre fatores de controle e seu nível, é possível

obter as respostas $Y_{i,j}$ em que i representa a resposta de interesse no teste j como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz codificada L9 de Taguchi

Experimento	Fatores de Controle				Variáveis Resposta			
	A	B	C	D	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	1	1	1	1	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$
2	1	2	2	2	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$
3	1	3	3	3	$Y_{1,3}$	$Y_{2,3}$	$Y_{3,3}$	$Y_{4,3}$
4	2	1	1	2	$Y_{1,4}$	$Y_{2,4}$	$Y_{3,4}$	$Y_{4,4}$
5	2	2	2	3	$Y_{1,5}$	$Y_{2,5}$	$Y_{3,5}$	$Y_{4,5}$
6	2	3	3	1	$Y_{1,6}$	$Y_{2,6}$	$Y_{3,6}$	$Y_{4,6}$
7	3	1	2	1	$Y_{1,7}$	$Y_{2,7}$	$Y_{3,7}$	$Y_{4,7}$
8	3	2	3	2	$Y_{1,8}$	$Y_{2,8}$	$Y_{3,8}$	$Y_{4,8}$
9	3	3	1	3	$Y_{1,9}$	$Y_{2,9}$	$Y_{3,9}$	$Y_{4,9}$

Fonte: Autoria própria

Após a execução dos 9 testes com duplicata, calcula-se o efeito dos fatores sobre a variável resposta, equação (14), sendo $M_{j,k}$ a média das variáveis resposta, Y_i variável resposta, j o fator (A, B, C, D), k o nível do fator (1, 2, 3) e n o número de repetições do nível k no fator j .

$$M_{j,k} = \frac{\sum(Y_i)}{n} \quad (14)$$

No método de Taguchi os fatores controlados são denominados de parâmetros e os fatores não controlados de ruídos, ou equação para sinal/ruído (S/N, do inglês Signal/Noise).

A equação S/R pode ser empregada em duas condições distintas: "maior é melhor" ou "menor é melhor". Na condição "maior é melhor", busca-se otimizar uma característica de qualidade em que um valor mais alto é preferível. Nesse contexto, o objetivo é maximizar a média da resposta. Por outro lado, na condição "menor é melhor", a equação S/R é aplicada quando um valor mais baixo da resposta é considerado mais vantajoso. Aqui, a meta pode ser minimizar a média da resposta ou maximizar, dependendo da variável resposta. A intenção inicial é minimizar Y_1 , Y_2 e Y_3 e maximizar Y_4 .

Para este estudo, foram aplicadas as equações (15) e (16), considerando a condição “maior é melhor” para a equação (15) e “menor é melhor” para a equação (16) na análise da influência dos fatores sobre a razão sinal/ruído, sendo y as variáveis respostas e n o número de réplicas. Neste caso, os testes são executados em duplicatas.

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (15)$$

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (16)$$

Ao final da aplicação do planejamento experimental fatorial é necessário executar a Análise de Variância (ANOVA) para identificar os fatores que apresentam influência significativa e otimizar os processos de fluidização com base nos resultados obtidos nos experimentos.

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir serão descritos os passos executados nas medições das variáveis descritas anteriormente e preencher a matriz modificada L9 de Taguchi na Tabela 3 da seção 3.3.1.

O processo para poder coletar as informações é dividida em três etapas:

1. -Determinar a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) para uma determinada condição (linha) da matriz L9 (Leitos bidimensional e tridimensional);
2. -Realizar o experimento no leito tridimensional da mesma condição (linha) da matriz L9 utilizando U_{mf} obtido no passo 1 para medir a expansão do leito e o índice de mistura.
3. Realizar o experimento no leito bidimensional com a mesma condição da matriz L9 (linha) utilizando U_{mf} obtido no passo 1 para medir o diâmetro médio da bolha.

É necessário medir a velocidade mínima de fluidização antes das outras variáveis, pois refere-se a um dos fatores de controle, sendo a velocidade de fluidização (U_g) diretamente dependente de U_{mf} . Assim, no ajuste de U_g , é necessário obter a curva de fluidização e de desfluidização (explicado na seção 2.1.10) para determinar U_{mf} . Portanto,

U_{mf} pode ser afetada pelos outros fatores de controle, porém não será afetada por U_g . Para determinar a velocidade mínima de fluidização, são ajustados os outros fatores da matriz L9 (A, C, D) e a velocidade do gás que é injetado no leito é variada para poder fazer as curvas de fluidização e desfluidização.

Essas duas curvas são feitas medindo a velocidade do gás antes de entrar no plenum e medindo a variação de pressão dentro do leito. Utiliza-se um tubo de Venturi e um sistema de aquisição de dados, com sensores de pressão e temperatura. O detalhamento desses dois equipamentos será feito nas próximas seções como parte dos projetos do sistema de fluidização.

Após determinar U_{mf} , é ajustado o valor de U_g para coletar as outras variáveis. Para medir a expansão do leito (δ) é utilizada uma régua posicionada ao lado do leito conforme mostrado na Figura 12 e são medidas a altura inicial (H_0) e a altura do leito em funcionamento (H).

Figura 12 - Régua com suporte utilizada para medir expansão do leito

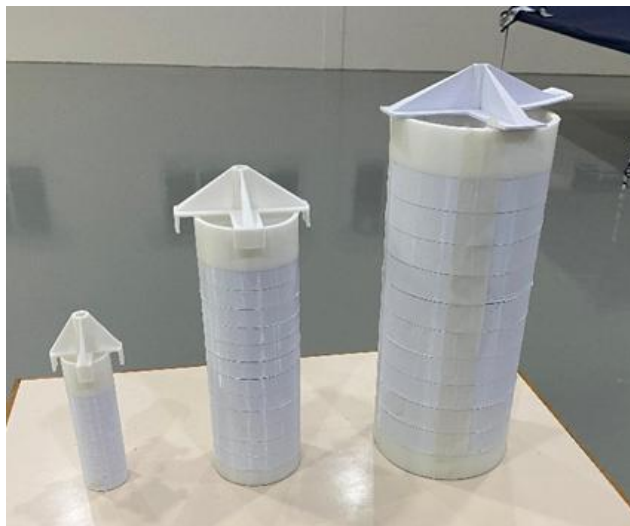


Fonte: Autoria própria

Para determinar o índice de mistura (M), é necessário fazer uma amostragem em diferentes alturas do leito. Para isso, será utilizado um calador, conforme mostrado na Figura 13. Essas amostras são peneiradas para separar a areia da casca de arroz e suas massas foram

medidas. Com isso, foi possível aplicar esses valores nas equações (10), (11), (12) e (13) da seção 2.2.1 para calcular M .

Figura 13 - Calador utilizado na extração de amostras do leito para os 3 sistemas pequeno, médio e grande



Fonte: Autoria própria

Ressalta-se, que δ e M são fatores medidos nos leitos tridimensionais. O d_b é medido nos leitos bidimensionais e o U_{mf} é medido em ambos os tipos de leitos.

Para medir o diâmetro médio da bolha (d_b) dentro do leito, faz-se uma filmagem do comportamento do material durante aproximadamente 30 s com uma captura de 240 fps (frames por segundo) para obter esses valores. Um detalhe importante nesse processo de medição é que é necessário garantir que o sistema esteja em um regime permanente, ou o mais próximo disso. Conforme constatado por Lv *et al.* (2018), uma mistura de dois materiais particulados no leito atinge um ponto de equilíbrio entre 2 e 5 minutos. Tendo essa informação como base, serão esperados 10 minutos antes de fazer as medições dos fatores resposta (δ , M , d_b , L_b), com exceção de U_{mf} que o procedimento deve ser diferente e o leito precisa estar passando por um processo transiente.

Antes de cada teste, o material é misturado para garantir a estabilidade do sistema, buscando maior consistência nos resultados. Esse processo reduz o impacto do estado inicial do leito, de acordo com os métodos de Pécora *et al.* (2014).

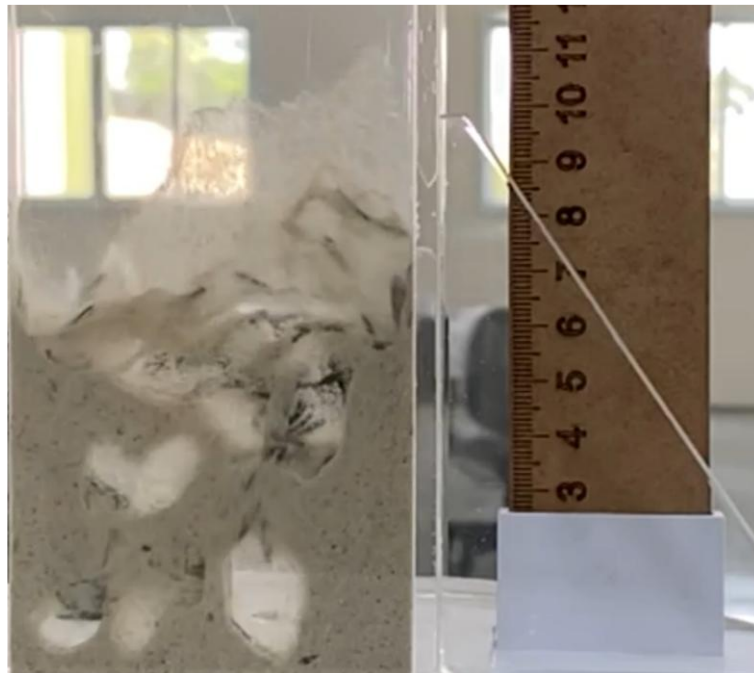
Figura 14 ilustra o processo e como essa captura será feita. Com base no vídeo, são

selecionadas 3 imagens em momentos diferentes para poder realizar as medições e obter valores médios dos dois parâmetros.

Um detalhe importante nesse processo de medição é que é necessário garantir que o sistema esteja em um regime permanente, ou o mais próximo disso. Conforme constatado por Lv *et al.* (2018), uma mistura de dois materiais particulados no leito atinge um ponto de equilíbrio entre 2 e 5 minutos. Tendo essa informação como base, serão esperados 10 minutos antes de fazer as medições dos fatores resposta (δ , M , d_b , L_b), com exceção de U_{mf} que o procedimento deve ser diferente e o leito precisa estar passando por um processo transiente.

Antes de cada teste, o material é misturado para garantir a estabilidade do sistema, buscando maior consistência nos resultados. Esse processo reduz o impacto do estado inicial do leito, de acordo com os métodos de Pécora *et al.* (2014).

Figura 14 - Foto ilustrativa do processo de captura dos parâmetros de diâmetro médio da bolha e comprimento de injeção



Fonte: Autoria própria

3.4.1 Velocidade mínima de fluidização

O procedimento experimental aplicado para a determinação da velocidade mínima de fluidização U_{mf} é executado de acordo com as seguintes etapas:

1. O leito fluidizado tridimensional é escolhido de acordo com seu diâmetro interno entre os valores de 70 mm, 150 mm e 240 mm, definindo o fator de Controle A (D_{fb});
2. O fator de Controle B (U_g/U_{mf}) não é definido nessa primeira etapa porque a velocidade de fluidização (U_g) é dependente da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), que é o que está sendo definido no momento;
3. A proporção de casca de arroz é selecionada entre os valores de 1%, 2,5% ou 5%, definindo o fator de Controle C (X_{ca});
4. A proporção altura/diâmetro do leito é selecionada entre os valores de 0,5, 1,0 e 1,5, definindo o fator de Controle D (H_0/D_{fb});
5. A quantidade de massa que deve existir dentro do reator é calculada de acordo com as massas específicas da areia e da casca de arroz, assim como a proporção selecionada de casca de arroz e a altura do leito. No entanto, esses valores calculados são apenas previsões aproximadas e eles são posteriormente ajustados para obter a altura e proporção exatas da matriz experimental.
6. As massas iniciais da casca de arroz e da areia são medidas em uma balança para obter a proporção X_{ca} e H_0/D_{fb} corretas.
7. Após serem medidas, as massas de casca de arroz e de areia são misturadas antes de serem inseridas no leito.
8. O leito tridimensional é montado, conectando o mesmo ao tubo de Venturi equivalente para a faixa de vazão que será medida e ao compressor radial;
9. Os sensores de pressão S1 e S2 e o sensor de temperatura DS18B20 são conectados no Venturi e na tubulação, respectivamente, para medir a vazão, sendo todo o sistema de aquisição de dados conectado ao computador;
10. O sensor de pressão S3 é conectado no ponto de pressão do leito localizado diretamente acima da placa distribuidora para medir a perda de carga do leito;
11. O compressor radial é iniciado utilizando o inversor de frequência, controlando a sua rotação em um valor bem baixo, entre 5 Hz e 10 Hz, dependendo do leito. Essa vazão é apenas para evitar a queda de material particulado por entre os furos da placa distribuidora;

12. A mistura de casca de arroz e areia é depositada dentro do leito fluidizado. Os valores de massa são ajustados, acrescentando mais material até obter a altura inicial (H_0) indicada pela matriz experimental, tendo o cuidado de manter a proporção correta entre casca de arroz e areia.
13. A régua com o suporte é posicionada no flange do leito para poder fazer as medições de altura do material particulado;
14. A mistura entre casca de arroz e areia dentro da câmara de acrílico é brevemente misturada e homogeneizada (por alguns segundos) aumentando a frequência do Inversor e, por consequência, a vazão de ar saindo do compressor radial, até que o material tenha um comportamento turbulento e rapidamente reduzido para 5 Hz novamente. Isso faz com que o material acrescentado no passo anterior seja igualmente misturado com o resto do material.
15. A câmera é posicionada na frente do leito com o auxílio de um suporte para poder filmar todo o processo de fluidização;
16. O *softbox* é posicionado atrás do leito que será fluidizado para poder criar um fundo de uma única cor e criar um melhor contraste nas filmagens;
17. O *software* montado em linguagem Python é iniciado no computador para começar as medições da velocidade do ar e queda de pressão do leito fluidizado;
18. A filmagem na câmera é iniciada com uma captura de 1080p e 30 fps.
19. A vazão e a velocidade do ar são progressivamente aumentadas com o aumento da rotação do motor por meio do inversor de frequência até um ponto no qual o leito apresente comportamento de escoamento turbulento (identificação visual). Isso significará que o ponto de mínima fluidização foi ultrapassado com uma boa faixa de segurança e os dados para a curva de fluidização foram coletados.
20. Para obter a curva de desfluidização, o processo inverso é feito, reduzindo gradativamente a vazão e velocidade do ar por meio do inversor de frequência até alcançar 5 Hz.
21. A filmagem da câmera e o *software* em Python são interrompidos, sendo os dados salvos para posteriormente serem processados com o objetivo de obter a velocidade mínima de fluidização.

22. Os passos 17 ao 21 são repetidos mais 2 vezes para poder ter os valores em duplicata.

3.4.2 Expansão do leito e Índice de mistura

Os seguintes passos para a determinação da expansão de leito δ e índice de mistura M são utilizados:

1. O leito fluidizado tridimensional é escolhido de acordo com seu diâmetro entre os valores de 70 mm, 150 mm e 240 mm, definindo o fator de Controle A (D_{fb});
2. A proporção de casca de arroz é selecionada entre os valores de 1%, 2,5% ou 5%, definindo o fator de Controle C (X_{ca});
3. A proporção altura/diâmetro do leito é selecionada entre os valores de 0,5, 1,0 e 1,5, definindo o fator de controle D (H_0/D_{fb});
4. As massas da casca de arroz e da areia são medidas em uma balança para obter a proporção X_{ca} e H_0/D_{fb} corretas. As massas utilizadas são as mesmas obtidas nas etapas de definição da velocidade mínima de fluidização.
5. O leito tridimensional é montado, conectando o mesmo ao tubo de Venturi equivalente para a faixa de vazão que será medida e ao compressor radial;
6. Os sensores de pressão S1 e S2 e o sensor de temperatura DS18B20 são conectados no Venturi e na tubulação, respectivamente, para medir a vazão, sendo todo o sistema de aquisição de dados conectado ao computador;
7. O sensor de pressão S3 é conectado no ponto de pressão do leito localizado diretamente acima da placa distribuidora para medir a perda de carga do leito;
8. A régua com o suporte é posicionada no flange do leito para poder fazer as medições de altura do material particulado;
9. O compressor radial é iniciado utilizando o inversor de frequência, controlando a sua rotação em um valor bem baixo, próximo de 5 Hz. Essa vazão é apenas para evitar a queda de material particulado por entre os furos da placa distribuidora;
10. A mistura de casca de arroz e areia é depositada dentro do leito fluidizado.
11. A mistura entre casca de arroz e areia dentro da câmara de acrílico é brevemente

misturada e homogeneizada por alguns segundos por meio do aumento da frequência do inversor e, por consequência, da vazão de ar saindo do compressor radial, até que o material tenha um comportamento turbulento e rapidamente reduzido para 5 Hz novamente. Isso faz com que o material acrescentado no passo anterior seja misturado com o resto do material.

12. A câmera é posicionada na frente do leito com o auxílio de um suporte para poder filmar todo o processo de fluidização;
13. O *softbox* é posicionado atrás do leito que será fluidizado para poder criar um fundo de uma única cor e criar um melhor contraste nas filmagens;
14. O *software* montado em linguagem Python é iniciado no computador para começar as medições da velocidade do ar e queda de pressão do leito fluidizado;
15. A velocidade do ar é ajustada com o auxílio do software em Python para ficar em um dos 3 níveis: $1 U_{mf}$, $1,25 U_{mf}$ ou $1,5 U_{mf}$, definindo o fator de Controle B (U_g);
16. O leito é mantido sem interferência externa por 15 minutos para poder entrar em um regime de equilíbrio, se aproximando de um estado em regime permanente;
17. Após os 15 minutos, inicia-se a filmagem com uma captura de 1080p 240 fps para obter a expansão do leito. Espera-se 30 segundos para a obtenção dos dados e a filmagem é interrompida.
18. A expansão do leito é medida com base nas filmagens que foram feitas nos 30 segundos após os 15 minutos, selecionando aleatoriamente 3 frames do vídeo e medindo as alturas com o auxílio do ImageJ.
19. Com base na expansão do leito que foi obtida das filmagens, é possível definir as 3 alturas das quais serão extraídas as 3 amostras, assim como o número total de câmaras do calador que serão utilizadas para cada amostra do cálculo do índice de mistura.
20. O calador é inserido no leito para realizar a extração de amostra em diferentes alturas do leito;
21. Após a extração da amostra, o compressor radial é reduzido para uma vazão baixa (frequência do inversor é ajustada entre 5 e 10 Hz, dependendo do experimento) apenas para evitar que o material particulado dentro da câmara do sistema passe

pelos furos da placa distribuidora, perdendo material no processo. No entanto, nessa vazão, o material não fluidiza;

22. O software montado em linguagem Python é interrompido e os dados de velocidade e pressão são salvos.
23. A mistura de material de cada amostra do leito é peneirada para separar a areia da casca de arroz e suas massas são medidas separadamente, obtendo a proporção mássica de cada um e calculando o índice de mistura;
24. O material que foi extraído é devolvido para o leito dentro da câmara de acrílico e a vazão de ar é aumentada para altos valores (fluidização turbulenta). O passo 24 é igual ao que é feito no passo 11.
25. A vazão é novamente aumentada para a velocidade pré-estabelecida do fator de Controle B ($1 U_{mf}$, $1,25 U_{mf}$ ou $1,5 U_{mf}$), mantendo nesse regime por 10 minutos;
26. Os passos 20 ao 25 são repetidos mais 1 vez para poder ter os valores em duplicata;

3.4.3 Diâmetro médio da bolha

O procedimento experimental aplicado para a determinação do diâmetro médio da bolha é executado de acordo com as seguintes etapas:

1. O leito fluidizado bidimensional é escolhido de acordo com seu diâmetro entre os valores de 70 mm, 150 mm e 240 mm, definindo o fator de Controle A (D_{fb});
2. A proporção de casca de arroz é selecionada entre os valores de 1%, 5% ou 10%, definindo o fator de Controle C (X_{ca});
3. A proporção altura/diâmetro do leito é selecionada entre os valores de 0,5, 1,0 e 1,5, definindo o fator de controle D (H_0/D_{fb});
4. A quantidade de massa que deve existir dentro do reator é calculada de acordo com as massas específicas da areia e da casca de arroz, assim como a proporção selecionada de casca de arroz e a altura do leito;
5. As massas da casca de arroz e da areia são medidas em uma balança para obter a proporção X_{ca} e H_0/D_{fb} corretas e previamente misturadas.
6. O leito bidimensional é montado, conectando o mesmo ao tubo de Venturi e o

compressor radial;

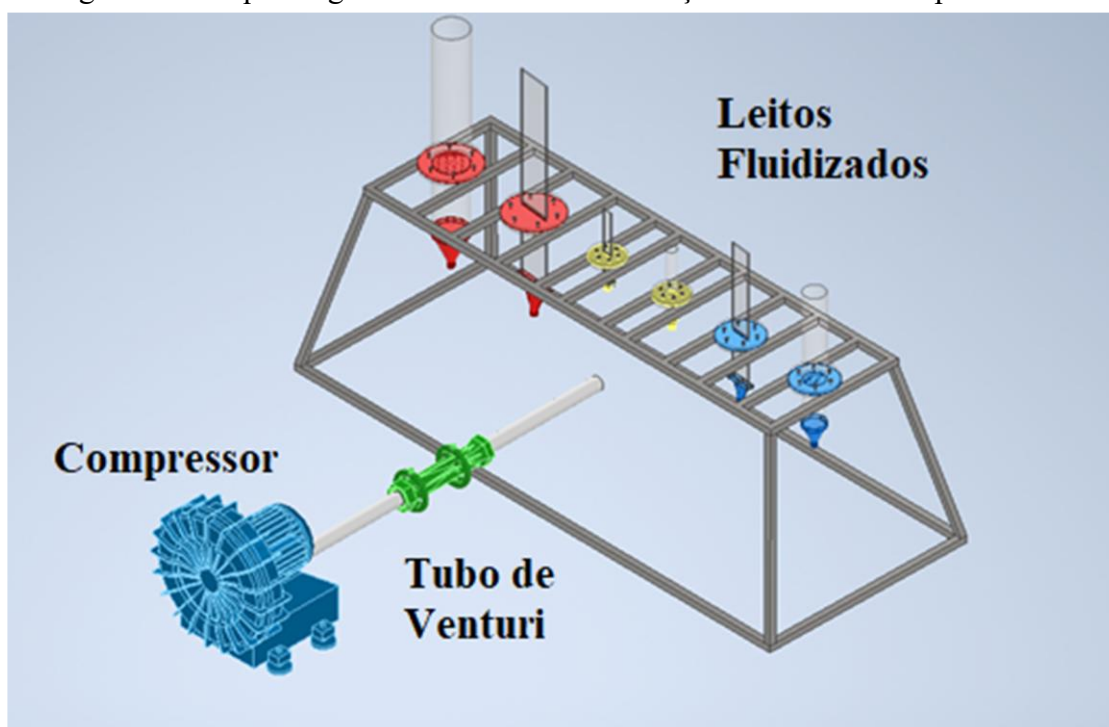
7. Os sensores de pressão S1 e S2 e o sensor de temperatura DS18B20 são conectados no Venturi e na tubulação, respectivamente, para medir a vazão, sendo todo o sistema de aquisição de dados conectado ao computador;
8. A câmera é posicionada na frente do leito com o auxílio de um suporte para poder filmar todo o processo de fluidização;
9. O *softbox* é posicionado atrás do leito para obter um maior contraste com o fundo e uma melhor visualização da fluidização.
10. O compressor radial é iniciado utilizando o inversor de frequência, controlando a sua rotação em um valor bem baixo, próximo de 5 Hz. Essa vazão é apenas para evitar a queda de material particulado por entre os furos da placa distribuidora;
11. A mistura de casca de arroz e areia é depositada dentro do leito fluidizado.
12. O software montado em linguagem Python é iniciado no computador para começar as medições da velocidade do ar e queda de pressão do leito fluidizado;
13. A velocidade do ar é ajustada com o auxílio do software em Python para ficar em um dos 3 níveis: $1 U_{mf}$, $1,25 U_{mf}$ ou $1,5 U_{mf}$, definindo o fator de Controle B (U_g);
14. A filmagem na câmera é iniciada com uma captura de 1080p 240 fps;
15. O leito é mantido sem interferência externa por 10 minutos para poder entrar em um regime de equilíbrio, se aproximando de um estado de regime permanente;
16. Após os 10 minutos, espera-se mais 30 segundos para a obtenção dos dados. As imagens capturadas nesses 30 segundos que serão utilizadas para medir o diâmetro de bolha e comprimento de injeção;
17. O compressor radial é desligado, juntamente com o sistema de aquisição de dados e a câmera que está realizando as filmagens.
18. O parâmetro é medido com base nas filmagens que foram feitas nos 30 segundos após os 10 minutos terem sido completados, selecionando aleatoriamente frames do vídeo e medindo os valores com o auxílio do ImageJ, um *software* para tratar dados.

4 PROJETOS DO SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO

4.1 ESQUEMA GERAL DO SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO

Os experimentos foram realizados em um sistema de fluidização esquematizado na Figura 15. O sistema é composto de um compressor radial de ar, um tubo de Venturi para medir as vazões, um sistema de aquisição de dados e leito fluidizado e diferentes leitos fluidizados. O compressor, o tubo de Venturi e as tubulações estão fora de escala para melhor visualização.

Figura 15 - Esquema geral do sistema de fluidização utilizado nos experimentos



Fonte: Autoria própria

A construção dos leitos é apresentada nas seções 4.2 e 4.3. Na seção 4.2 estão os detalhes da construção dos leitos fluidizados e a seção 4.3 foi separada para dar ênfase na construção dos distribuidores dos leitos.

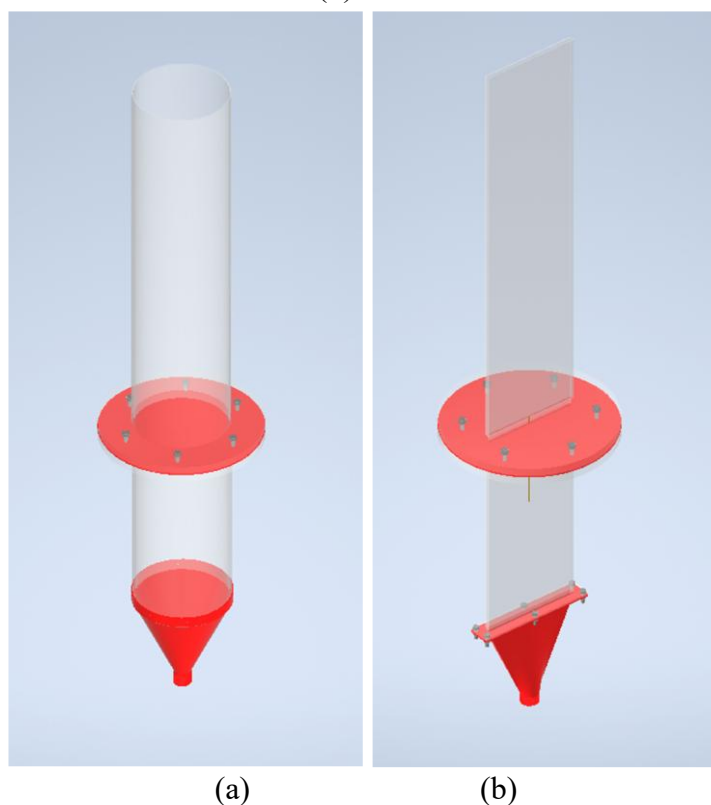
O compressor radial é um Ibram CR8 com potência de 7,5 cv com vazão máxima de 8 m³/min e pressão máxima de 4000 mmH₂O. O tubo de Venturi foi projetado e construído em uma impressora 3D especificamente para esse projeto, com os detalhes dessa construção sendo explorados na seção 4.5. Além disso, o sistema de aquisição de dados também foi

construído para esse projeto, com mais detalhes na seção 4.4.

4.2 PROJETO DOS LEITOS FLUIDIZADOS

Considerando que o objetivo principal desse trabalho é testar a mudança de escala, bem como seus efeitos na fluidização da casca de arroz, foi necessário construir 6 modelos diferentes de leito fluidizado em acrílico, sendo 3 leitos tridimensionais e 3 bidimensionais. O modelo tridimensional refere-se ao perfil circular e o bidimensional ao perfil retangular fino. Um exemplo dos modelos tridimensional e bidimensional é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Modelos dos leitos fluidizados que foram usados nos experimentos (a) leito tridimensional (b) leito bidimensional

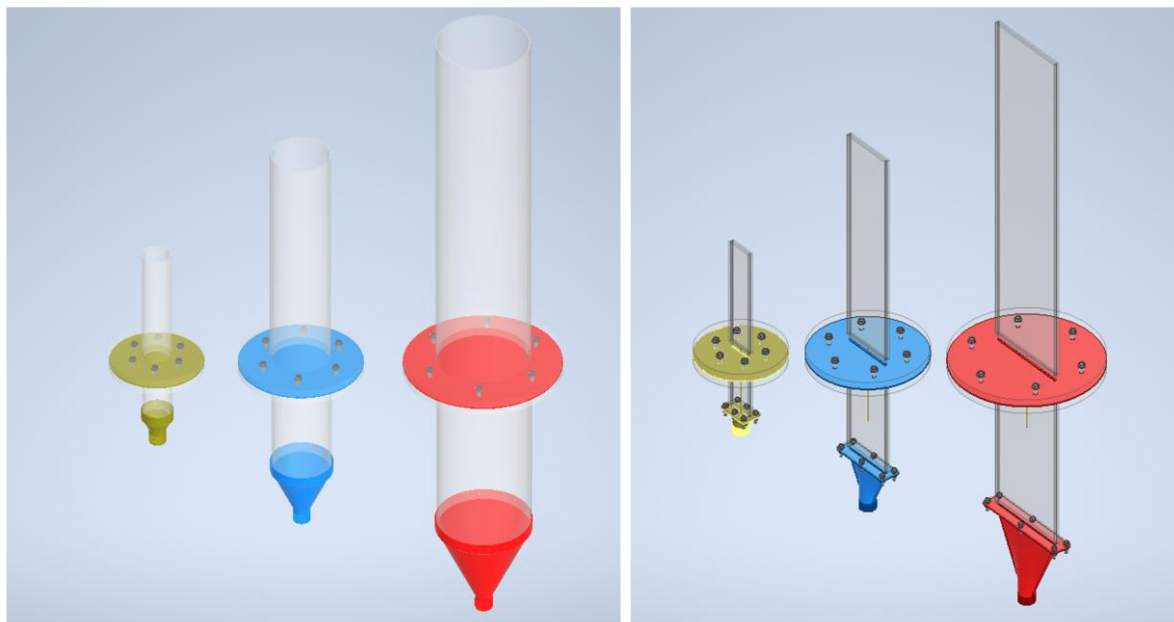


Fonte: Autoria própria

Os leitos tridimensionais foram construídos para poder medir a expansão do leito, índice de mistura e velocidade mínima de fluidização, sendo modificadas as dimensões do diâmetro interno (D_{fb}) e a altura da câmara do leito. Por outro lado, os leitos bidimensionais foram construídos para simular uma “fatia” dos leitos tridimensionais, sendo usados para medir o diâmetro de bolha e comprimento do jato de injeção. Na Figura 17 são mostrados

todos os modelos utilizados lado a lado, ou seja, 3 leitos tridimensionais (Figura 17a) e 3 leitos bidimensionais (Figura 17b), e as dimensões adotadas são apresentadas na Tabela 4.

Figura 17 - Leitos fluidizados: (a) modelos tridimensionais em 3 escalas diferentes (b) modelos bidimensionais em 3 escalas diferentes



Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Dimensões dos modelos de leitos fluidizados projetados e construídos

Sigla	Modelo	Dimensão
LFP-3D	Leito fluidizado pequeno tridimensional	$A \times D_{fb} = 320 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$
LFM-3D	Leito fluidizado médio tridimensional	$A \times D_{fb} = 640 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$
LFG-3D	Leito fluidizado grande tridimensional	$A \times D_{fb} = 960 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$
LFP-2D	Leito fluidizado pequeno bidimensional	$A \times C \times E = 320 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$
LFM-2D	Leito fluidizado médio bidimensional	$A \times C \times E = 640 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$
LFG-2D	Leito fluidizado grande bidimensional	$A \times C \times E = 960 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$

Fonte: Autoria própria

Observa-se na Tabela 4 que os 3 leitos bidimensionais possuem dimensões dos comprimentos (C) exatamente iguais aos 3 diâmetros internos dos leitos tridimensionais (D_{fb}), assim como as alturas que também são iguais entre os modelos bidimensionais e tridimensionais. No caso da espessura (E), o valor é o mesmo para os 3 leitos bidimensionais, com $E = 5 \text{ mm}$. Esse valor pequeno é para tentar criar um perfil dos leitos grandes, como se tivesse cortado uma fatia fina do leito tridimensional.

Embora os leitos bidimensionais não sejam verdadeiramente bidimensionais, pois possuem 3 dimensões, eles são referenciados assim por terem uma dimensão muito menor (E) em comparação com as outras duas. Eles também podem ser chamados de leitos pseudo-bidimensionais

Com relação aos valores dos diâmetros D_{fb} , foram escolhidos valores para tentar realizar uma mudança de escala como se os leitos estivessem dobrando de tamanho. Na prática isso não ocorre, pois a proporção entre o leito médio e o leito pequeno é de LFM-3D/LFP-3D=2,14, enquanto que entre o leito médio e o leito grande é de LFG-3D/LFM-3D = 1,6. A proporção entre o grande e o pequeno fica em um valor próximo de LFG-3D/LFP-3D = 3,43.

O que impediu que essa proporção fosse igual a 2 nas mudanças de escala foi o material utilizado na construção do corpo do reator, tubos e chapas de acrílico, com o objetivo de poder visualizar a fluidização do leito. Os diâmetros dos tubos de acrílico disponíveis no mercado possuem dimensões pré-estabelecidas, impossibilitando manter a razão igual a 2. Além disso, optou-se por selecionar os maiores e menores valores de D_{fb} disponíveis no mercado para poder aumentar o efeito de mudança de escala nos sistemas testados.

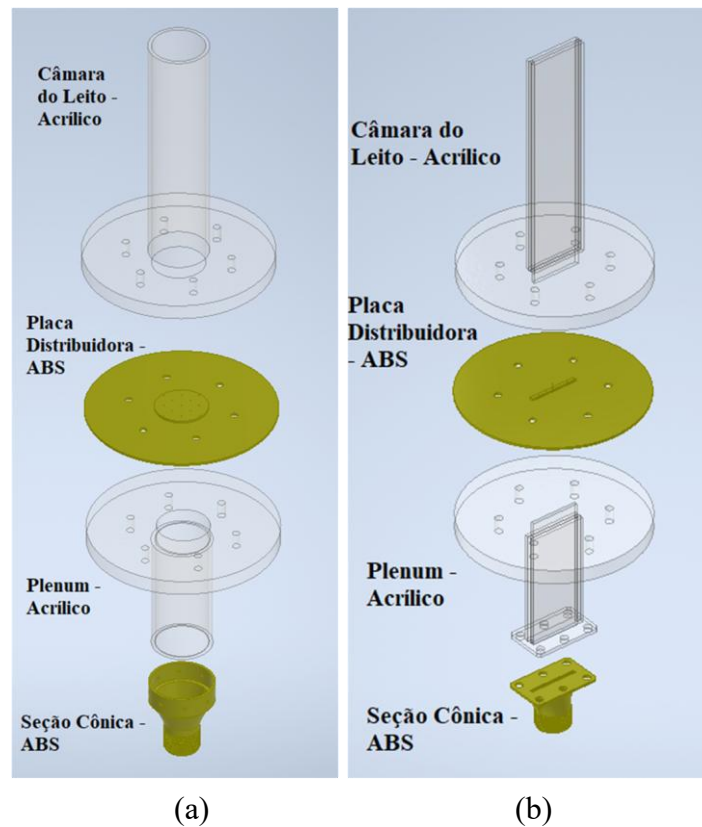
Quase todas as outras dimensões do leito estão em função do diâmetro e foram dimensionadas de acordo com essa referência por ser uma das dimensões que mais afeta a fluidização. Assim, como exemplo, o comprimento da câmara do leito foi dimensionado como sendo 4 vezes o diâmetro externo do leito, ou seja, se o diâmetro mudar, essa dimensão mudará de forma proporcional.

Quase todo o leito é feito com acrílico e, por questão de praticidade, a conexão cônica na parte inferior do *plenum* foi fabricada em impressora 3D com o polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno, ou do inglês, *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS). Além disso, as placas distribuidoras também foram feitas em ABS, por ser mais fácil, além de suficientemente resistente e barato.

Após todos os leitos serem construídos, eles foram colocados em um suporte metálico para facilitar o manuseio e a realização dos experimentos.

Um esquema geral indicando as peças e seu material para os dois tipos de leito (3D e 2D) é mostrado na Figura 18 e resultado dos leitos montados no local de experimentos é mostrado na Figura 19. Um maior detalhamento dos projetos dos Leitos está descrito no APÊNDICE B.

Figura 18 - Esquema geral com os componentes principais e materiais utilizados na sua construção (a) Leitos tridimensionais (b) Leitos Bidimensionais



Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Leitos fluidizados tridimensionais e bidimensionais utilizados para os experimentos de mudança de escala



Fonte: Autoria própria

4.3 PROJETO DAS PLACAS DISTRIBUIDORAS

O projeto das placas distribuidoras foi feito com base nas equações e exemplos dados por livros que abordam a fluidização (KARRI; KNOWLTON, 1999; KUNII; LEVENSPIEL, 1991). São necessárias 6 placas distribuidoras, embora as versões bidimensionais seguem os mesmos parâmetros das suas equivalentes tridimensionais. Dessa maneira, é necessário calcular os parâmetros das placas distribuidoras para os 3 tipos de diâmetros de leito (70 mm, 150 mm e 240 mm) utilizados.

Existem diversos tipos de placa distribuidora, sendo escolhida a placa do tipo perfurada para a atual pesquisa, considerando a sua menor complexidade. Na placa perfurada, os principais parâmetros que devem ser calculados são o diâmetro do furo da placa distribuidora (d_h) e o número de furos existentes na placa (N_h). Esses dois parâmetros são dependentes da variação de pressão no leito (ΔP_b), que é proporcional à quantidade de material dentro do reator, mais especificamente a altura da coluna de material particulado (H_0). Essa relação é dada pela equação (17), sendo g a aceleração da gravidade e ρ_b a massa específica do material particulado.

$$\Delta P_b = gH_0\rho_b \quad (17)$$

Para fazer um cálculo inicial, foi estimado que a altura H_0 igual ao diâmetro interno do leito ($DI = 70 \text{ mm}$, 150 mm e 240 mm) e massa específica de $\rho_b = 2500 \text{ kg/m}^3$, que é um valor médio para areia e uma boa estimativa a mistura de areia e casca de arroz que será usada nesse trabalho.

Para obter uma boa fluidização, é recomendado que a perda de pressão na placa distribuidora ΔP_d seja entre 20% e 40% da perda de pressão causada pelo material particulado. Assim, o valor de ΔP_d é calculado pela equação (18), assumindo o valor de k entre 0,2 e 0,4. Foi estimado um valor médio de $k=0,3$.

$$\Delta P_d = k\Delta P_b \quad (18)$$

Após esses passos, foi calculada a vazão volumétrica Q dentro do leito em função da área de cada leito (A_b) e da velocidade média do gás dentro do reator (U_g), dada pela equação (19). Com base em dados obtidos em trabalhos anteriores (BALESTIERI *et al.*, 2023), U_g

mínimo foi aproximadamente igual a 0,15 m/s, que é a velocidade em que a mistura de casca de arroz com areia começa a fluidizar.

$$Q = U_g A_b \quad (19)$$

Também foi necessário calcular a velocidade do gás no furo da placa distribuidora (U_h) com a equação (20), sendo ρ_g a massa específica do gás de fluidização, que nesse caso é o ar e C_d é um fator de correção. Esse fator varia em função da relação entre a espessura (t) da placa distribuidora e o diâmetro do furo (d_h) na placa ($r=t/d_h$). Entretanto, se $r \geq 2$ o valor de C_d pode ser estimado como próximo de 0,77. Caso C_d não se aproxime desse valor, é necessário recorrer à um método iterativo para obter uma resposta aproximada.

$$U_h = C_d \sqrt{\frac{2\Delta P_d}{\rho_g}} \quad (20)$$

Tendo realizado os passos anteriores, é possível estimar os valores d_h e N_h utilizando a equação (21), na qual é possível perceber que os fatores são dependentes entre si.

$$N_h = \frac{Q}{U_h} \frac{1}{\left(\frac{\pi d_h^2}{4}\right)} \quad (21)$$

Assim, é necessário supor diferentes valores de diâmetro para obter os números de furos equivalentes necessários. Importante notar que ambos os resultados, d_h e N_h , precisam ser arredondados pela limitação de tamanho de brocas disponíveis para fazer os furos e pela necessidade de serem números inteiros para N_h .

Além dessas variáveis, também é necessário calcular a distância entre os furos L_h , que é dado pelas equações (22) e (23).

$$N_d = \frac{N_h}{A_b} \quad (22)$$

$$L_h = \frac{1}{\sqrt{N_d}} \quad (23)$$

Diferentes valores de d_h foram aplicados, variando de 0,3 até 1,4 mm de diâmetro para os 3 tamanhos de leitos e apresentados na Tabela 5. É possível perceber que para valores muito baixos de d_h , a distância e o número de furos se tornam impraticável na construção.

Foi escolhida a opção número 8, com $d_h = 1,0$ mm. Valores muito altos de N_h dificulta a manufatura das placas e valores muito grandes de d_h pode causar uma fluidização não tão uniforme, além de facilitar o vazamento do material na placa distribuidora.

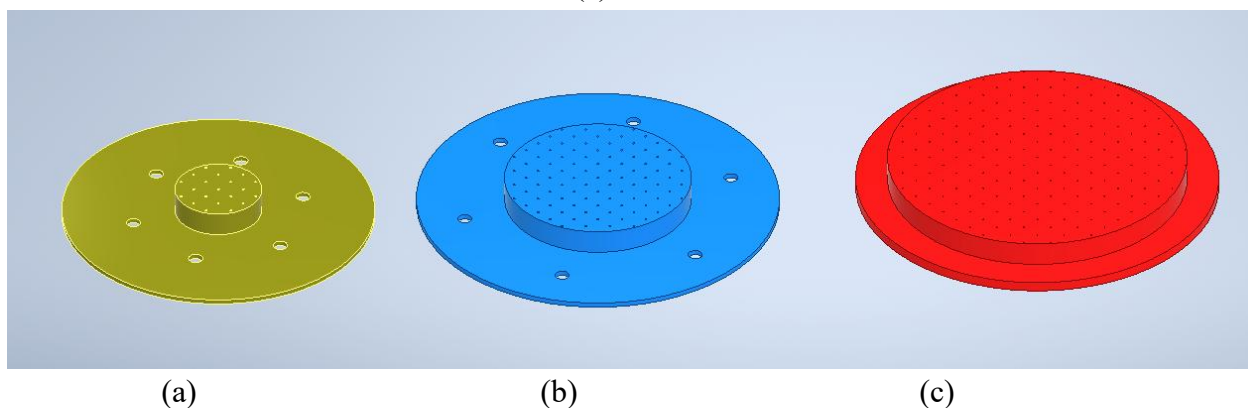
Na Figura 20 são apresentados os modelos das placas distribuidoras para os leitos tridimensionais e na Figura 21 para os leitos bidimensionais.

Tabela 5 - Distribuidores possíveis para os Leitos Pequeno, Médio e Grande

Opção	d_h (mm)	Leito Pequeno (DI = 70 mm)		Leito Médio (DI = 150 mm)		Leito Grande (DI = 240 mm)	
		N_h	L_h	N_h	L_h	N_h	L_h
		(adm)	(mm)	(adm)	(mm)	(adm)	(mm)
1	0.3	343	3.3	1077	4.1	2180	4.6
2	0.4	193	4.5	606	5.4	1226	6.1
3	0.5	124	5.6	388	6.8	785	7.6
4	0.6	86	6.7	269	8.1	545	9.1
5	0.7	63	7.8	198	9.5	400	10.6
6	0.8	48	8.9	151	10.8	307	12.1
7	0.9	38	10.0	120	12.2	242	13.7
8	1	31	11.2	97	13.5	196	15.2
9	1.1	26	12.3	80	14.9	162	16.7
10	1.2	21	13.4	67	16.2	136	18.2
11	1.3	18	14.5	57	17.6	116	19.7
12	1.4	16	15.6	49	18.9	100	21.3
13	1.5	14	16.7	43	20.3	87	22.8
14	1.6	12	17.9	38	21.6	77	24.3
15	1.7	11	19.0	34	23.0	68	25.8
16	1.8	10	20.1	30	24.3	61	27.3
17	1.9	9	21.2	27	25.7	54	28.9
18	2	8	22.3	24	27.0	49	30.4

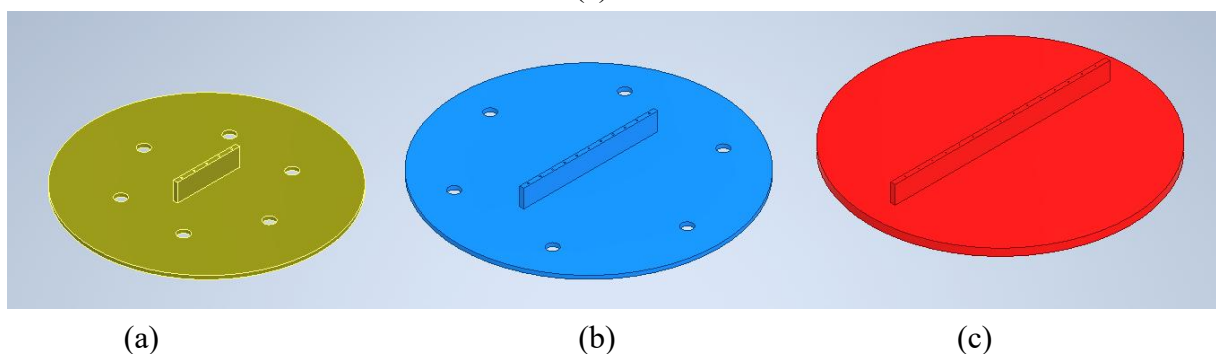
Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Modelo das placas distribuidoras para os leitos tridimensionais (a) Pequeno (b) Médio (c) Grande



Fonte: Autoria própria

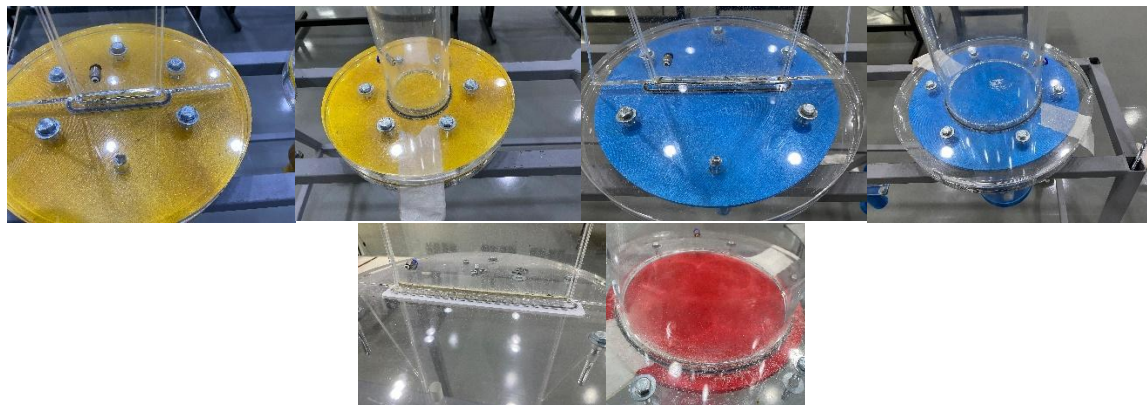
Figura 21 - Modelo das placas distribuidoras para os leitos bidimensionais (a) Pequeno (b) Médio (c) Grande



Fonte: Autoria própria

Na Figura 22 estão algumas das placas distribuidoras feitas em impressora 3D Creality K1 Max com material do tipo ABS para serem usadas nos processos de fluidização. As placas são para os leitos pequenos bidimensional e tridimensional e para o leito médio tridimensional, respectivamente, da esquerda para a direita. Um detalhamento melhor do processo de impressão 3D (modelagem, programas utilizados, etc) utilizado em diversas construções do atual trabalho está no APÊNDICE C.

Figura 22 - Placas distribuidoras impressas para serem usadas nos leitos fluidizados



Fonte: Autoria própria

4.4 PROJETO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

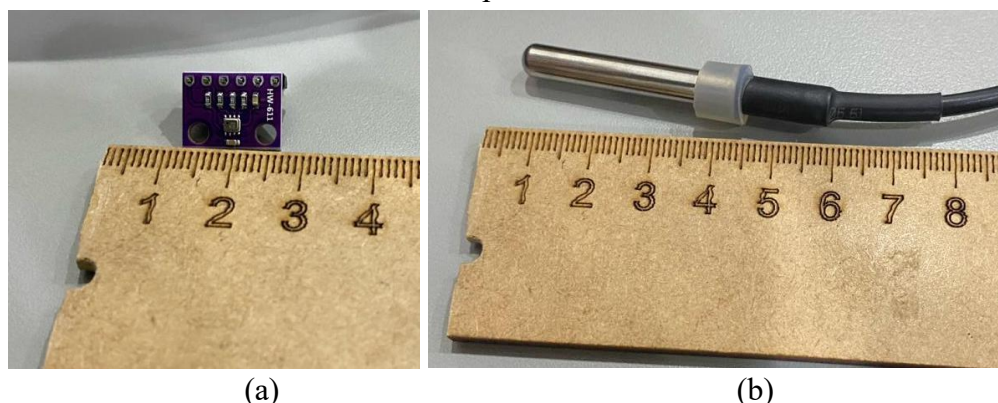
O sistema de aquisição foi idealizado em pesquisa anterior (BALESTIERI *et al*, 2018), sendo aperfeiçoado para os objetivo geral proposto para esta tese. Foi acrescentado um número maior de sensores, contemplando um sensor específico de temperatura, integrando esse sistema à um *software* mais robusto e incluindo sensores de pressão no projeto das câmaras de pressurização. Além das medidas de variações de pressão no leito fluidizado, é também medidas as pressões no tubo de Venturi, utilizado para calcular a velocidade e a vazão de escoamento do ar que está sendo injetado no sistema de fluidização.

4.4.1 Montagem do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por 6 sensores de pressão e 1 sensor de temperatura conectados à uma placa de aquisição de dados, responsável por comandar cada um dos sensores e enviar as informações para um computador.

Foram escolhidos os sensores da Bosch de modelo BMP280 para realizar as medições de pressão, apresentados na Figura 23a. O sensor escolhido para medir a temperatura é o sensor DS18B20, mostrado na Figura 23b. Eles são pequenos, de baixo custo e possuem a capacidade de medir a pressão absoluta e a temperatura do ambiente ao qual estão confinados. Além disso, possuem alto grau de precisão por serem aplicados para medir variações de altitude em celulares e componentes móveis.

Figura 23 - Sensores do sistema de aquisição de dados (a) sensor de pressão BMP280 (b) sensor de Temperatura DS18B20



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria

Esses sensores possuem uma faixa de operação entre 30 e 110 kPa, podendo ultrapassar o valor superior, chegando a medir valores de até 130 kPa. O erro inerente ao sensor para a pressão absoluta é de $\pm 0,1$ kPa, mas para valores de pressão relativos é de ± 12 Pa, além de uma precisão de $\pm 0,01$ °C para a temperatura.

Os sensores possuem interface digital do tipo Serial Protocolo de Interface Periférica (SPI) com 10 MHz, com um modo de Ultra Resolução no qual a sensibilidade e precisão do sensor são melhoradas ainda mais por meio de uma média de 16 amostras coletadas. Esses sensores possuem outros tipos de interface, mas o SPI foi selecionado pela maior taxa de aquisição e facilidade de conectar diversos sensores ao mesmo tempo.

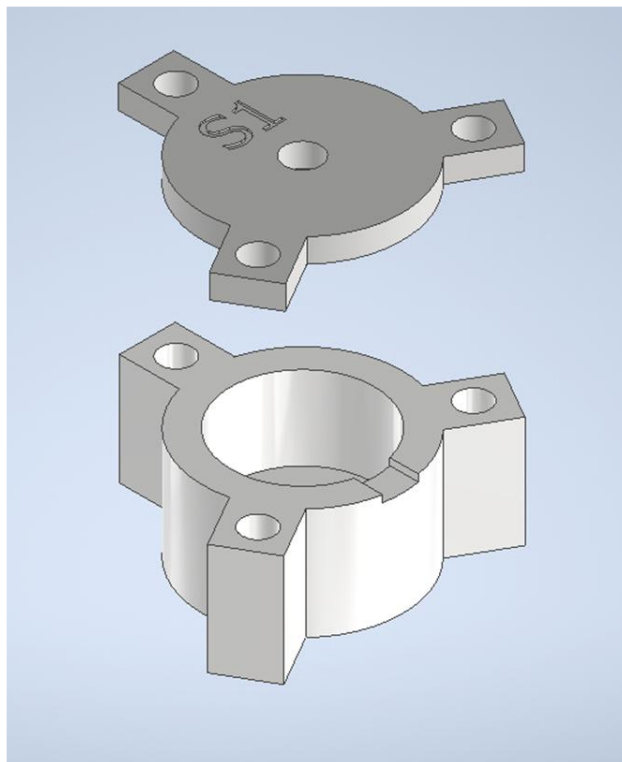
Os sensores BMP280 só fazem medições de pressão e temperatura atmosféricas, ou seja, medem os valores do ambiente em que eles estão localizados. Assim é necessário realizar modificações para que eles sejam aplicados aos experimentos de leito fluidizado.

Para transformar esses sensores atmosféricos em sensores capazes de fazer leituras de pressão dentro de um leito, é necessário criar uma câmara de pressão em torno de cada um deles para isolá-los do ambiente externo. Se essa câmara for conectada ao local onde é necessário realizar a medida de pressão, ela ficará com a mesma pressão do local em que se quer medir e o sensor fará a leitura correta.

Foram projetadas no Inventor 2024, câmaras de pressão para colocar os sensores BMP280, conforme mostrado na Figura 24, sendo compostas de um corpo principal, uma tampa com uma saída para o conector pneumático, um anel de vedação, além de parafusos e porcas para fixação. Posteriormente, essas câmaras foram impressas em uma impressora 3D

Creality K1Max com material polimérico Ácido Polilático, ou do inglês, *Polylactic Acid* (PLA).

Figura 24 - Câmara de pressão para sensor BMP280

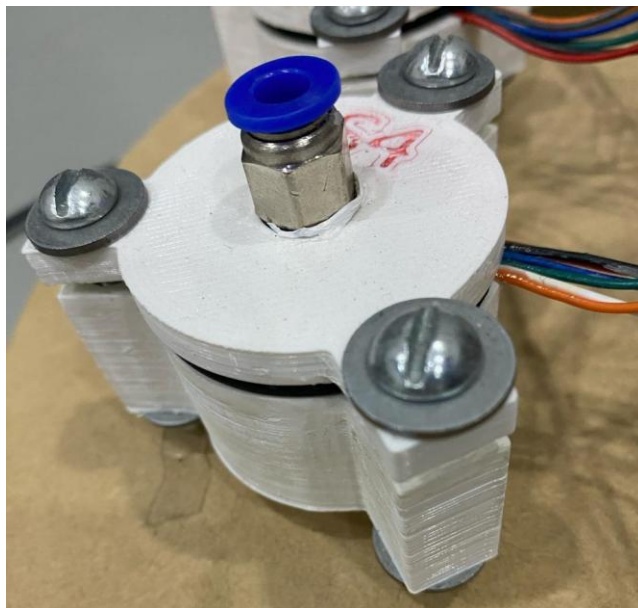


Fonte: Autoria própria

Para evitar vazamentos, as câmaras de pressão foram revestidas com resina epóxi, além de serem acrescentados anéis de vedação (oring) entre a tampa e o corpo delas. A fixação das tampas com o corpo é feita com uma combinação de parafusos e porcas.

Importante notar que os sensores devem ficar dentro da câmara, isolados do meio externo, mas eles também precisam se conectar com a placa de aquisição de dados. Assim, é necessário que saiam fios de cobre de dentro da câmara de pressão que conectam os sensores à placa no lado externo. Foi acrescentada resina epóxi na saída dos fios para vedar completamente qualquer espaço existente entre eles e eliminar qualquer tipo de vazamento, embora isso tenha fixado os fios de cobre à câmara de pressão de maneira definitiva. A câmara de pressão montada com o sensor BMP280 dentro está ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Câmara de pressão montada com o sensor BMP280 instalado internamente

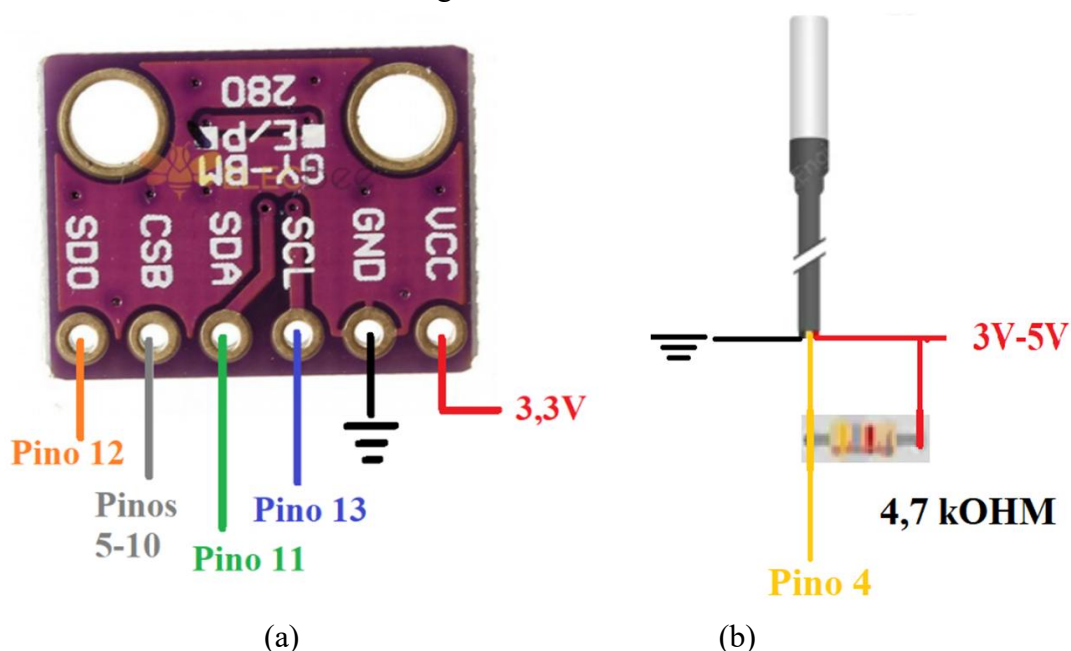


Fonte: Autoria própria

O esquema para a conexão realizada entre os 6 sensores BMP280 e o Arduino Due está ilustrada na Figura 26a. Todos os sensores devem ser conectados à uma fonte de 3,3V (saída em vermelho) e com o fio terra (saída em preto). Todos os sensores têm as mesmas saídas para os pinos SCL, DAS e SDO, no entanto, a saída CSB varia para cada sensor, pois seria o equivalente ao número “identificador”. Assim, o Sensor 1 conectaria a saída CSB com o Pino 5 do Arduino Due, o Sensor 2 com o Pino 6, e assim sucessivamente para os demais sensores.

Além dos sensores de pressão, foi conectado à placa de aquisição um sensor de temperatura do modelo DS18B20, a prova d’água, com faixas de alimentação de 3V a 5V, faixa de medição de temperaturas de -55°C a 125°C e precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Esse sensor precisa de um resistor de 4,7 k Ω ligando o fio amarelo de dados ao fio de alimentação vermelho. O esquema de conexão está ilustrado na Figura 26 (b).

Figura 26 - Esquema de geral conexão dos sensores (a) BMP280 (b) DS18B20 com as entradas digitais do Arduino Due



Fonte: Autoria própria

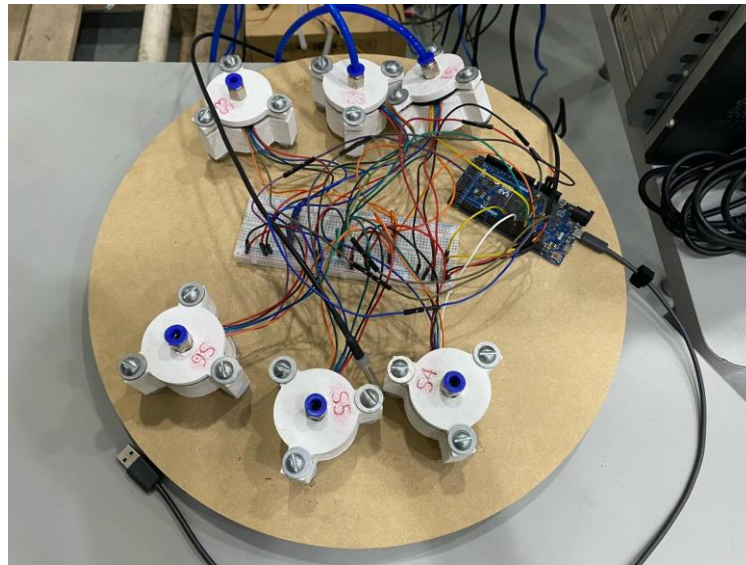
Com relação à placa de aquisição de dados, a que é utilizada é o Arduino Due, com um microcontrolador de 32 bits, Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, 54 I/O digitais, 12 entradas analógicas e 512 kB de memória.

Para realizar a coleta de dados, foi criado um programa para o Arduino que inicializa os sensores e fica em estado de “espera” por um comando do usuário. Para cada vez que o usuário der um comando, ele irá obter as informações de cada um dos sensores conectados à placa e voltar ao estado de espera. Um modelo geral do programa colocado no Arduino está no APÊNDICE D.

Juntamente com esse programa em linguagem de Arduino, foi criado um programa em linguagem Python que fica em funcionamento no computador ao qual o Arduino está conectado. O programa em Python é responsável por coletar os dados e armazená-los, além de realizar cálculos com base nos dados recebidos e mostrá-los em tempo real na tela do computador. Diversas variações desse programa foram usadas, mas um modelo mais completo e robusto está disponível no APÊNDICE E.

O sistema final de aquisição de dados com os sensores de pressão, o sensor de temperatura e a placa de aquisição são mostrados na Figura 27.

Figura 27 - Sistema de Aquisição de Dados montado com 6 sensores de pressão BMP280 e 1 sensor de temperatura DS18B20

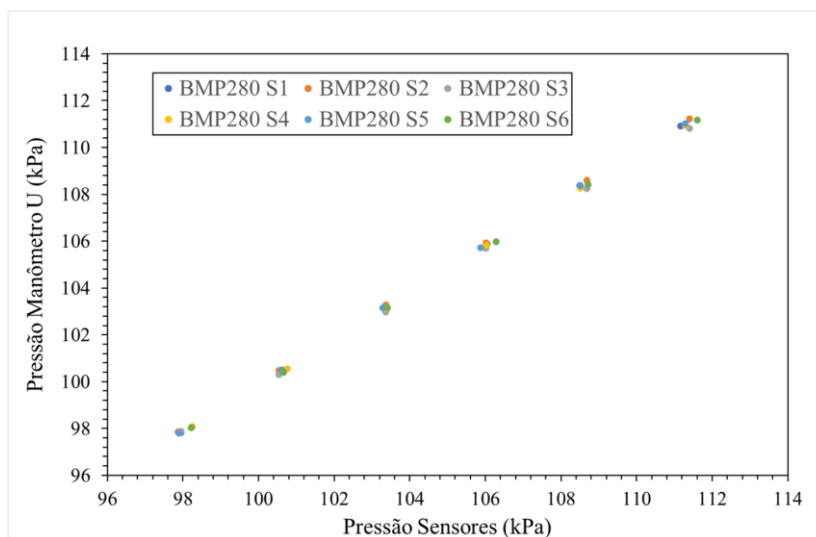


Fonte: Autoria própria

4.4.2 Aferimento e ajuste do sistema de aquisição de dados

Para calibrar os sensores de pressão BMP280, eles foram conectados à uma seringa e à um manômetro em U de 2 m preenchido com água. Diversos valores de deslocamento foram feitos na seringa para poder gerar diferentes níveis de pressão. Os valores de pressão dos sensores e do manômetro em U foram obtidos. O resultado é mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Relação de pressão entre os Sensores BMP280 e o Manômetro em U para diferentes níveis de pressão



Fonte: Autoria própria

Com base na Figura 28, foram obtidas as equações de correção para cada um dos 6 sensores de pressão, equações de (24) à (29), em ordem crescente, do S1 ao S6. Essas equações foram adicionadas ao programa base de Arduino com o objetivo de calibrar e aumentar a precisão dos valores.

$$P_u = 0,994 S_1 - 442,6 \quad (24)$$

$$P_u = 0,991 S_2 - 789,31 \quad (25)$$

$$P_u = 0,966 S_3 - 3152,9 \quad (26)$$

$$P_u = 0,988 S_4 - 1017,4 \quad (27)$$

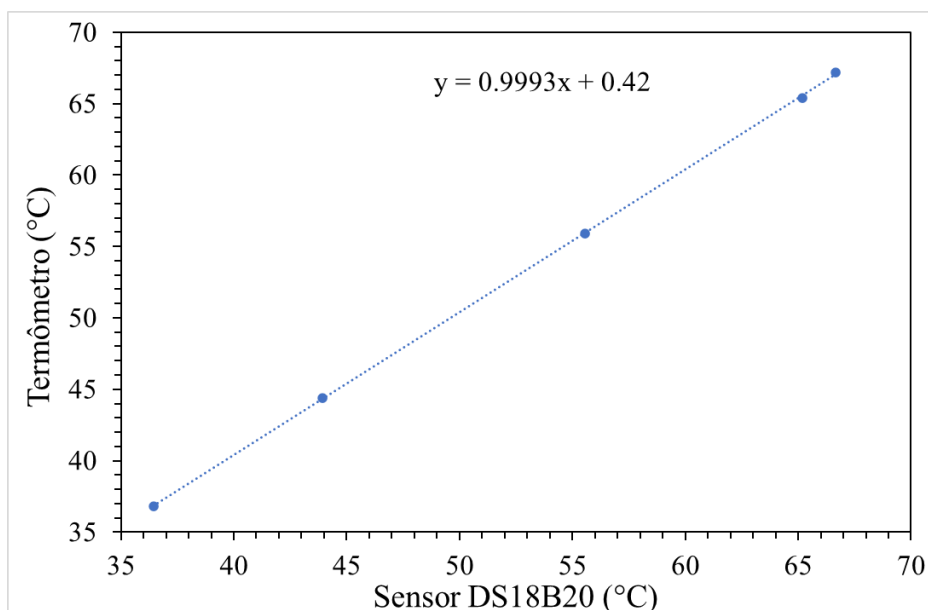
$$P_u = 0,989 S_5 - 998,8 \quad (28)$$

$$P_u = 0,985 S_6 - 1203,3 \quad (29)$$

Ressalta-se que o manômetro em U está dividido em uma escala de milímetros e preenchido com água. Isso significa que a incerteza da medição é de ± 10 Pa. Em consequência, a incerteza da pressão absoluta dos sensores BMP280 foi reduzida de ± 100 Pa para ± 10 Pa. Sabendo que a incerteza da pressão relativa é de ± 12 Pa, esse maior valor foi usado como base para os cálculos de incerteza posteriormente.

Um procedimento similar de calibração e aferimento aplicado aos sensores de pressão foi utilizado para o sensor de temperatura DS18B20. No caso, vários valores de temperatura foram medidos utilizando um termômetro calibrado de fábrica e o sensor DS18B20. O resultado é mostrado na Figura 29 e na equação (30).

Figura 29 - Relação de pressão entre o termômetro e o sensor DS18B20 para diferentes níveis de temperatura



Fonte: Autoria própria

Na equação (30), T é a temperatura do termômetro e DS é a temperatura do sensor usado no sistema de aquisição de dados. Essa equação também foi acrescentada no programa do Arduino para a calibração do sistema.

$$T = 0,9993 DS - 0,42 \quad (30)$$

4.5 PROJETO DO TUBO DE VENTURI

4.5.1 Medição de vazão e sua conformidade com normas padrão

Definir a vazão de ar no leito fluidizado é importante para poder realizar as análises propostas por esse trabalho. Por consequência, foi calculado, projetado e manufaturado um tubo de Venturi especificamente com esse objetivo em mente.

A placa de orifício, o bocal de vazão e o tubo de Venturi são sistemas que utilizam constrição no escoamento para definir a vazão do fluido, aplicando o Princípio de Bernoulli (MANDAL, 2009) em que a soma das energias cinéticas, gravitacionais e de pressão devem sempre ser constantes.

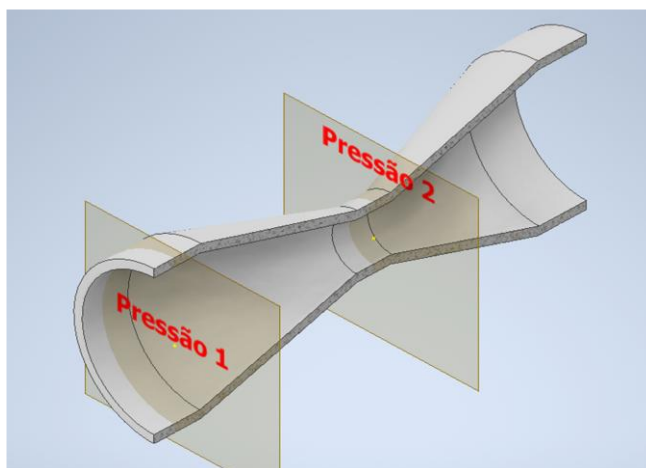
Considerando que não existe variação de altura ao longo da tubulação (variação de energia gravitacional é zero), no local onde ocorre a constrição de área da seção do tubo, há um aumento na velocidade do escoamento para manter a conservação de massa. Consequentemente, isso causa um aumento na energia cinética e gera uma queda de pressão. Sabendo que quantidade de massa, variação de velocidade e pressão estão interligados, se forem medidas as pressões antes e depois da constrição, é possível calcular a vazão do escoamento.

Dentre os sistemas citados acima, o tubo de Venturi se destaca por gerar uma perda de energia consideravelmente menor se comparado com os outros. Ele consiste em uma tubulação que sofre constrição no escoamento, ou seja, redução de um diâmetro maior D para um diâmetro menor d . Entretanto, diferente dos outros meios que utilizam esse mesmo princípio, a transição entre os dois diâmetros é mais suave. O diâmetro maior é conectado com o menor por meio de seções cônicas, o que reduz consideravelmente geração de vórtices e perda de energia, como pode ser visto na Figura 30.

A diferença das perdas de energia entre os diferentes meios de medição que utilizam esse mesmo princípio pode ser visualizada na Figura 31 (HMA INSTRUMENTATION, 2018). Em casos extremos, há uma redução em até aproximadamente 70% da perda de pressão, como quando há substituição da placa de orifício por um tubo de Venturi.

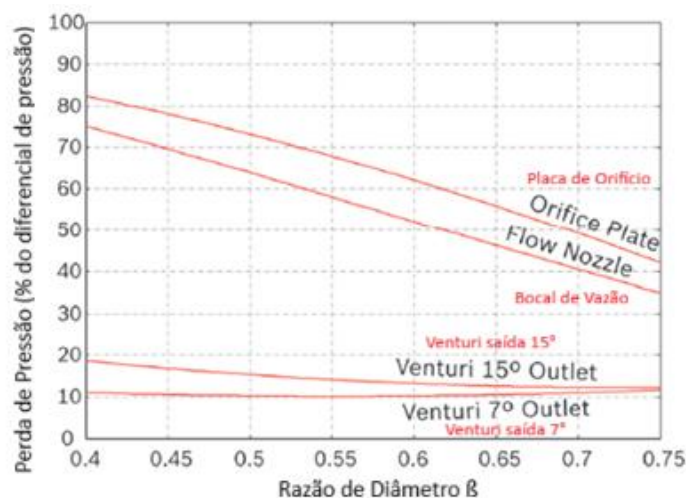
Essa energia que está sendo conservada ajudará a explorar uma maior faixa de vazão nos experimentos de leito fluidizado, aumentar a quantidade de material particulado utilizado nos experimentos e testar leitos de diâmetro maior, que é o foco desse trabalho.

Figura 30 - Modelo inicial 3D em corte do tubo de Venturi



Fonte: Autoria própria

Figura 31 - Perda de Pressão em relação a variação da razão dos diâmetros ($\beta=d/D$) para diferentes tipos de medidores de vazão que utilizam constrição de escoamento



Fonte: HMA Instrumentation (2018)

Embora existam outros meios de medição de vazão, principalmente que não se baseiam em constrição de escoamento, eles normalmente estão fora do grau de precisão necessária para este trabalho ou atingem valores de custo muito altos.

A norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) é responsável por definir todos procedimentos e requisitos que devem ser atendidos em um projeto do tubo de Venturi, garantindo uma medição precisa. Nessa norma são citadas 3 maneiras padrões ou comuns de fabricar um tubo de Venturi, sendo eles: fundição, usinagem e soldagem de chapas. No entanto, não é considerada a possibilidade de usar uma impressora 3D para o processo de fabricação.

A impressão 3D é uma forma de manufatura aditiva extremamente versátil e capaz de produzir geometrias complexas com uma facilidade muito maior do que os meios padrões e, por causa disso, a impressão 3D ajuda a contornar um dos maiores problemas do tubo de Venturi, que é o seu custo de produção.

Por esse motivo, a impressão 3D foi o método escolhido para a manufatura do tubo de Venturi. Entretanto, como esse meio de manufatura não é citado pela norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003), é necessário garantir que todos os parâmetros que afetam as medições de vazão sejam atendidos para garantir uma medição mais precisa.

A medição de vazão fora dos valores especificados na norma não significa que as medidas estarão erradas, mas que pode haver um erro maior nas leituras. O valor desses erros

será mais bem explicado nas próximas seções.

4.5.2 Cálculos e definição dos parâmetros

Foram utilizadas as equações definidas de acordo com a Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003), que são baseadas no Princípio de Bernoulli e Lei de Conservação de Massa, com alguns fatores para modificar e melhorar a precisão dos cálculos. Para o cálculo de vazão mássica é aplicada a equação (31) e o erro é dado pela equação (32).

$$Q_m = \frac{C}{1 - \beta^4} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta P \rho_D} \quad (31)$$

$$\frac{\delta Q_m}{Q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1 - \beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 - \beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_D}{\rho_D}\right)^2} \quad (32)$$

Q_m é a vazão mássica, C é o coeficiente de descarga, β é a razão entre o diâmetro da seção menor d e o diâmetro da seção maior D ($\beta = d/D$), ρ_D é a massa específica do fluido na seção maior, ΔP é a diferença de pressão entre a seção maior (diâmetro D) e a seção menor (diâmetro d) do Tubo de Venturi, ε é o fator de expansão dado pela equação (33) e seu erro pela equação (34).

$$\varepsilon = \left(\frac{k\tau^{2/k}}{k-1}\right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{2/k}}\right) \left(\frac{1 - \tau^{k-1/k}}{1 - \tau}\right) \quad (33)$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = (4 + 100\beta^8) \frac{\Delta P}{100 P_D} \quad (34)$$

Para a equação (34), o δ significa a faixa de erro de um determinado parâmetro. Por exemplo, se o diâmetro $D = 49,8$ mm foi medido com um paquímetro cujo erro seja de $\pm 0,1$ mm, o $\delta D = 0,2$ e $(\delta D/D) = 0,004016$ ou 0,4%. O mesmo princípio é utilizado para cada uma das variáveis.

No cálculo do fator de expansão ε é utilizado o coeficiente de expansão isentrópico k , a razão β e a razão τ entre as pressões das duas seções $\tau = P_d/P_D$, sendo P_d a pressão na seção de diâmetro d e P_D a pressão na seção de diâmetro D .

Para calcular a vazão volumétrica Q_v e a velocidade U_D no tubo de diâmetro D , são utilizadas as equações (35) e (36).

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho_D} \quad (35)$$

$$U_D = \frac{Q_v}{A_D} \quad (36)$$

A_D é a área do tubo de diâmetro D . Utilizando o princípio da equação (36) é possível calcular a velocidade média de qualquer tubulação. Nesse caso é aplicado tanto para calcular a velocidade na tubulação que conecta o Tubo de Venturi, mas também para calcular as velocidades médias nos leitos fluidizados de diferentes diâmetros.

Tendo como base as equações de (31) a (36), por meio do método iterativo foi feito uma estimativa de qual valor para d e para β deveriam ser utilizados. Para isso foi necessário estipular um valor mínimo e máximo, tanto de vazão volumétrica Q_v , quanto de diferencial de pressão ΔP .

Tendo como base os valores obtidos em trabalho anterior (BALESTIERI *et al.*, 2023), estima-se que os valores de velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) dentro de um leito variem entre 0,1 e 0,8 m/s para as misturas de areia e casca de arroz. No entanto, as alturas do leito serão bem maiores, o que poderia aumentar esses valores. Portanto, para obter uma maior segurança, será assumido uma faixa de velocidades de 0,05 até 3,0 m/s. Sabendo os diâmetros dos 3 leitos fluidizados que serão construídos, é possível estimar as respectivas faixas de vazão.

Com relação ao diferencial de pressão, é importante garantir que os valores sejam grandes o suficiente para que o erro inerente aos sistemas de mediação de pressão e de vazão sejam pequenos. Foi adotado que os erros de pressão devem ser próximos ou menores que 5%. Assim, o diferencial de pressão mínimo tem que ser de 500 Pa, se for considerado o erro relativo do sensor BMP280 de 12 Pa, resultando em um erro máximo de pressão de 4,8%. Ressalta-se que o erro inicia próximo de 5%, mas logo reduz para valores bem menores conforme a vazão aumenta.

Valores muito grandes de ΔP se tornam complicados por causarem uma perda de carga muito grande, reduzindo a energia disponível para os reatores de leito fluidizado. Além

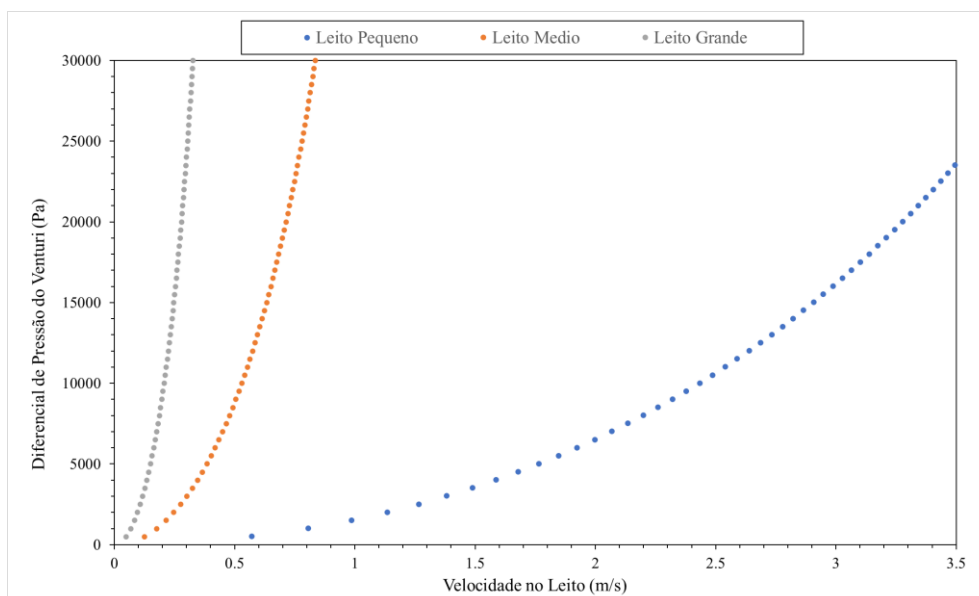
disso, os sensores de pressão possuem um fundo de escala que não deve ser ultrapassado. Dessa maneira, foi definido um valor máximo de $\Delta P = 25 \text{ kPa}$.

Assim, é necessário encontrar um valor do diâmetro (d) menor que atenda todas as faixas de vazão e que fiquem dentro dos valores de pressão estipulados. Neste caso, é necessário utilizar mais de um tubo de Venturi para aplicar diferentes faixas de vazão, dependendo do diâmetro do leito fluidizado e do material particulado. Essa limitação pode ser melhor observada na Figura 32, em que é possível visualizar as diferenciais de pressão em função das velocidades do ar nos leitos com os 3 diâmetros diferentes (70, 150 e 240 mm) com um $\beta = 0,2$ e $d = 10 \text{ mm}$.

Se considerarmos o leito pequeno (70 mm), o Venturi de diâmetro $d = 8 \text{ mm}$ atende uma faixa de velocidades entre 0,55 e 3,5 m/s para os valores de ΔP mencionados anteriormente. Ou seja, ele consegue medir boa parte da faixa de velocidades propostas, mas não consegue alcançar valores menores.

Conforme o tamanho do leito aumenta, o Venturi começa a alcançar valores menores, mas a sua faixa de medição é severamente reduzida. O leito médio possui uma faixa de leitura intermediária, pegando valores próximos de 0,1, quase alcançando o valor inferior de 0,05 m/s, mas deixando um intervalo considerável de valores maiores sem serem medidos.

Figura 32 - Relação entre as velocidades do ar nos leitos e o diferencial de pressão no Tubo de Venturi para os 3 diâmetros de leito fluidizado (70, 150 e 240 mm) com $d=10\text{mm}$



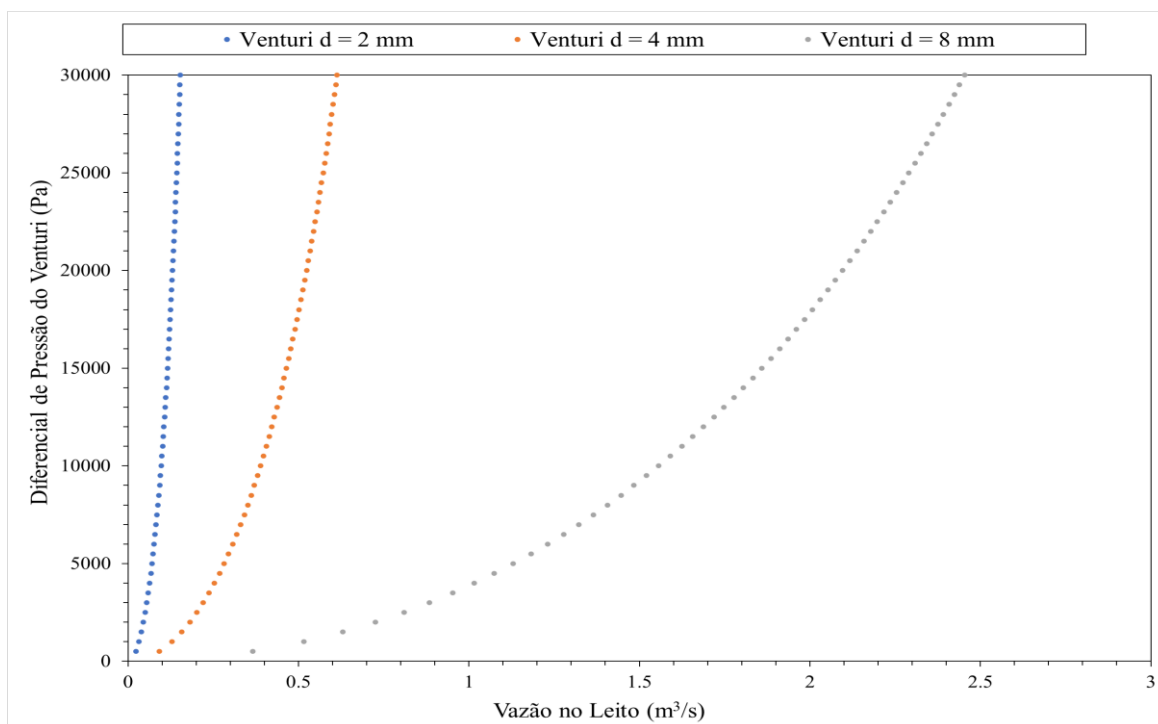
Fonte: Autoria própria

No caso do leito grande, esse efeito é amplificado, pegando valores pequenos de velocidade, mas para uma faixa de medição muito pequena (entre 0,05 e 0,3 m/s). Isso significa que para poder atender todas as especificações consideradas nesse projeto, seria necessário usar pelo menos mais de um Tubo de Venturi para cada leito.

Assim, foram estabelecidos diferentes valores para o Venturi. Esses valores foram calculados de tal maneira que fosse possível cobrir toda a faixa de vazão para todos os leitos.

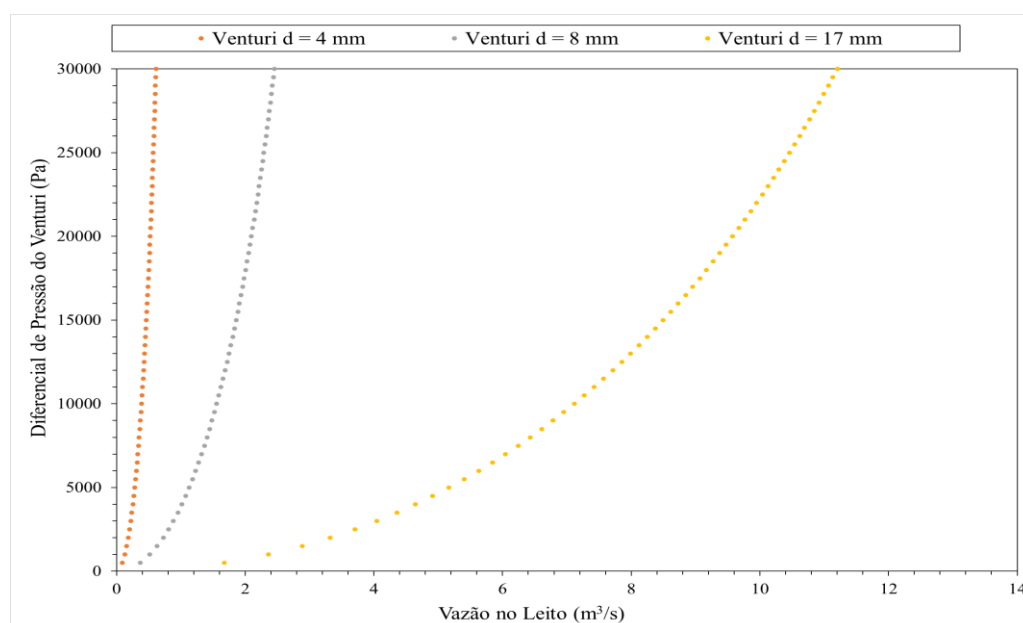
Sendo assim, é possível observar na Figura 33, Figura 34 e Figura 35 os tubos de Venturi que serão utilizados para os leitos fluidizados pequeno, médio e grande, respectivamente.

Figura 33 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito pequeno (70 mm) - $d = 2$ mm, 4 mm e 8 mm



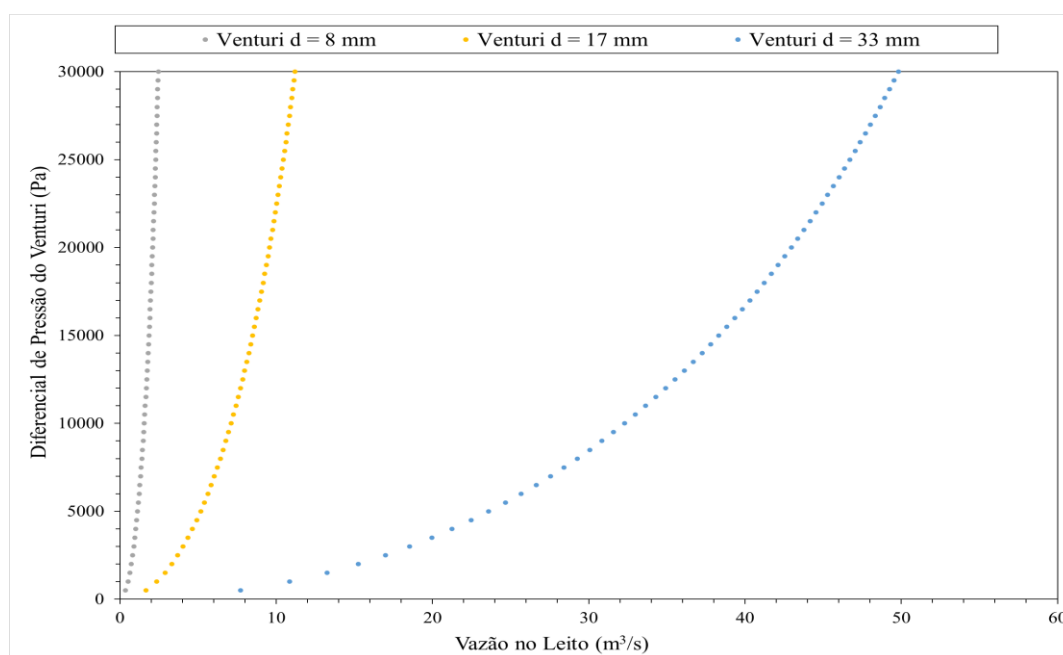
Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito médio (150 mm) - $d = 4$ mm, 8 mm e 17 mm



Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Tubos de Venturi que serão utilizados para o leito grande (240 mm) - $d = 8$ mm, 17 mm e 33 mm



Fonte: Autoria própria

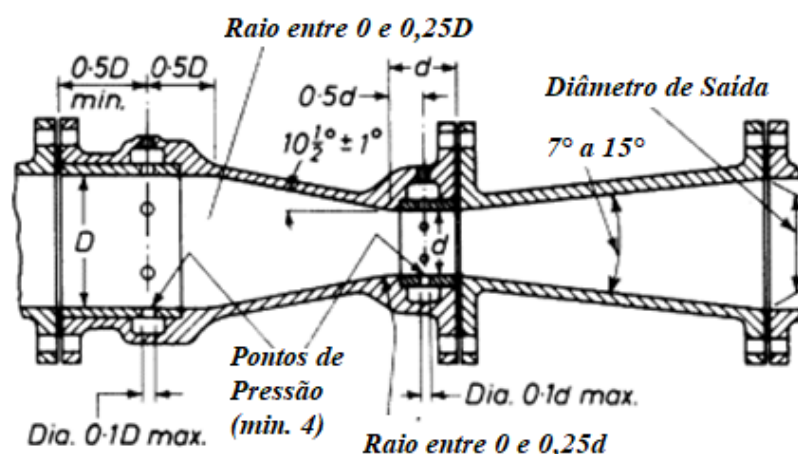
Observando Figura 33, Figura 34, Figura 35, é possível perceber que será necessário utilizar 3 tubos de Venturi diferentes para cada leito fluidizado para poder cobrir toda a faixa

de vazão proposta. Entretanto, alguns desses tubos de Venturi serão utilizados em mais de um sistema, resultando em um total de 5 tubos de Venturi que devem ser construídos, com os diâmetros $d = 2 \text{ mm}$, 4 mm , 8 mm , 17 mm e 33 mm .

4.5.3 Construção do tubo de Venturi

Na Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) são citados diversos parâmetros que devem ser atendidos para garantir a precisão das medições. As especificações dimensionais necessárias estão explicitadas na Figura 36, enquanto todas as outras estão na Tabela 6.

Figura 36 - Tubo de Venturi com todas as especificações dimensionais necessárias de acordo com a norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003)



Fonte: Modificado de 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) e Fowles e Boyes (2010)

O único parâmetro dimensional que não está especificado na Figura 36 são as dimensões necessárias para os pontos de pressão, nos quais é feita a leitura das pressões nas seções de diâmetro d e D para calcular a vazão. Esse parâmetro e seus requerimentos são especificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Requisitos especificados pela Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) para a construção do Tubo de Venturi e valores utilizados nesse trabalho

Requisito	Valor especificado na Norma	Valores utilizados no Projeto
Velocidade máxima do escoamento	Subsônico	Subsônico
Diâmetro do tubo - D (mm)	$50 < D < 250$	50
Razão de diâmetros - $\beta = d/D$	$0,4 < \beta < 0,75$	0,06-0,1-0,2-0,4-0,6
Diâmetro da constrição para D=50 mm - d (mm)	$20 < d < 37,5$	3-5-10-20-30
Rugosidade da parede interna - R_a	$R_a < 10^{-4}d$	Não medido
Número de Reynolds em D - Re_D	$2 \times 10^5 < Re_D < 2 \times 10^6$	-
Diâmetro dos pontos de pressão em D - d_{pD} (mm)	Se $d < 33,3$; $0,1d < d_{pD} < 0,1D$	0,13 d
Comprimento dos pontos de pressão em D - L_{pD} (mm)	$L_{pD} \geq 2,5 d_{pD}$	10 d_{pD}
Área da Câmara anelar em D - A_{caD} (mm ²)	$A_{caD} \geq [A_{pD} = \Sigma(\pi d_{pD}^2/4)]$	4 A_{pD}
Diâmetro dos pontos de pressão em d - d_{pd} (mm)	Se $d < 33,3$; $0,1d < d_{pd} < 0,13d$	0,13 d
Comprimento dos pontos de pressão em d - L_{pd} (mm)	$L_{pd} \geq 2,5 d_{pd}$	10 d_{pd}
Área da Câmara anelar em d - A_{cad} (mm ²)	$A_{cad} \geq [A_{pd} = \Sigma(\pi d_{pd}^2/4)]$	4 A_{pd}
Comprimento da tubulação montante (mm)	Mínimo 8D	2000 (40D)
Comprimento da tubulação jusante para medir temperatura (mm)	Entre 5D e 15D	500 (10D)

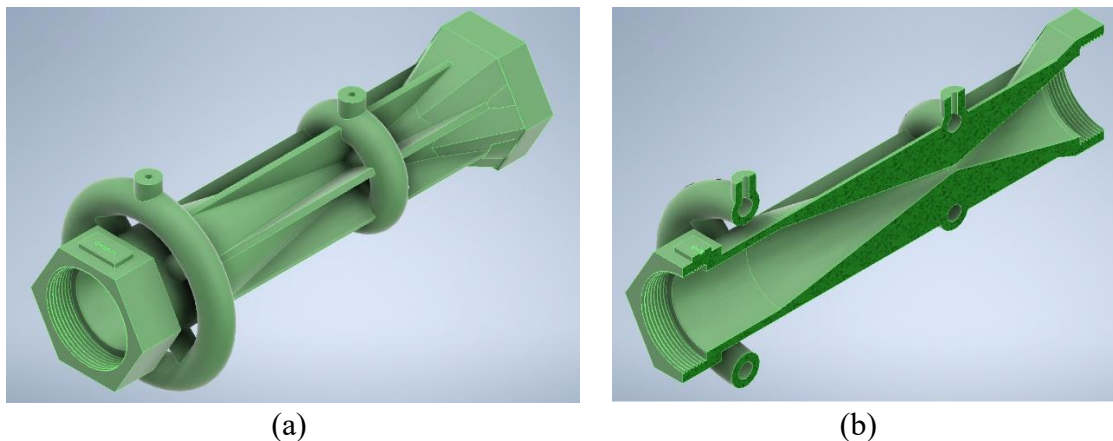
Fonte: Modificado de Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003; ISO 5167-12003)

Os pontos de pressão foram conectados à uma câmara de pressão anelar por meio de tubulações cilíndricas cujo comprimento deve ser igual ou superior à 2,5 vezes o diâmetro interno do ponto de pressão d_p . A área dessa câmara anelar tem que ser maior ou igual a soma das áreas de todos os pontos de pressão conectados à câmara anelar.

Se todas as especificações da Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003) não forem atendidas, haverá um aumento nos erros das medições, principalmente porque o coeficiente de descarga C irá variar. Maiores detalhes das incertezas inerentes às variações fora da norma estão no anexo B da Norma 5167 (ISO 5167-4ISO, 2003).

Com base nos valores da Tabela 6 os tubos de Venturi foram desenhados no Inventor 2024 para posteriormente ser impresso na impressora 3D Crealty K1 Max. Um exemplo do modelo tridimensional projetado é mostrado na Figura 37. Há variações das dimensões devido aos diferentes diâmetros d , mas o formato geral do Venturi irá permanecer o mesmo. Maiores detalhes são mostrados no APÊNDICE F, com as dimensões exatas de cada modelo dos tubos de Venturi.

Figura 37 - Modelo tridimensional do Tubo de Venturi $d = 4$ mm utilizado para a Impressão 3D (a) Perspectiva Isométrica sem corte (b) Perspectiva Isométrica com corte



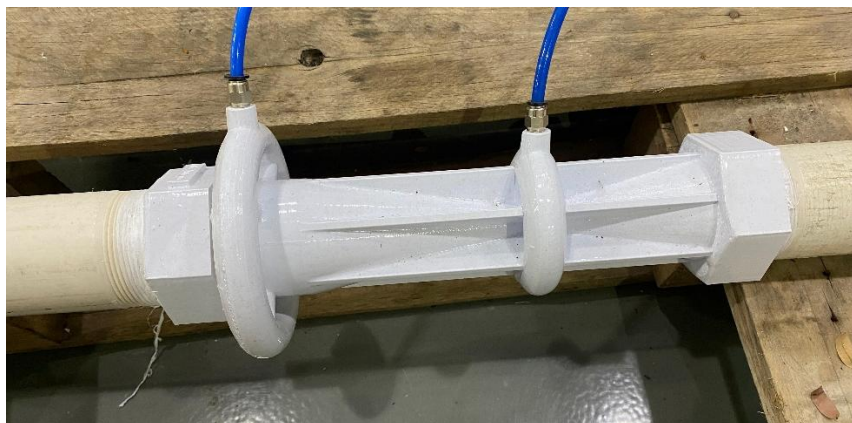
Fonte: Autoria própria

Para a impressão 3D, foi utilizado o polímero ABS, que é mecanicamente resistente e a temperatura de transição vítrea é próxima de 110°C , o que garante que o Tubo de Venturi não irá deformar em condições mais extremas de vazão e de perda de carga.

Após a impressão, foi aplicada uma camada na parte externa de resina epóxi para evitar vazamento de ar, tendo executados vários testes de estanqueidade antes e após a

aplicação da resina. O Tubo de Venturi impresso é mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Tubo de Venturi impresso e resinado instalado no sistema de fluidização juntamente com o sistema de aquisição de dados



Fonte: Autoria própria

No caso do sistema de aquisição, os sensores 1 e 2 foram conectados, respectivamente, às seções de maior e de menor diâmetro. Além disso, o sensor de temperatura DS18B20 foi conectado após ao tubo de Venturi à uma distância de 500 mm (10D), conforme especificado pela Norma 5167 (ISO 5167-1ISO, 2003), para poder medir a temperatura e realizar os cálculos de vazão do tubo de Venturi de maneira mais precisa.

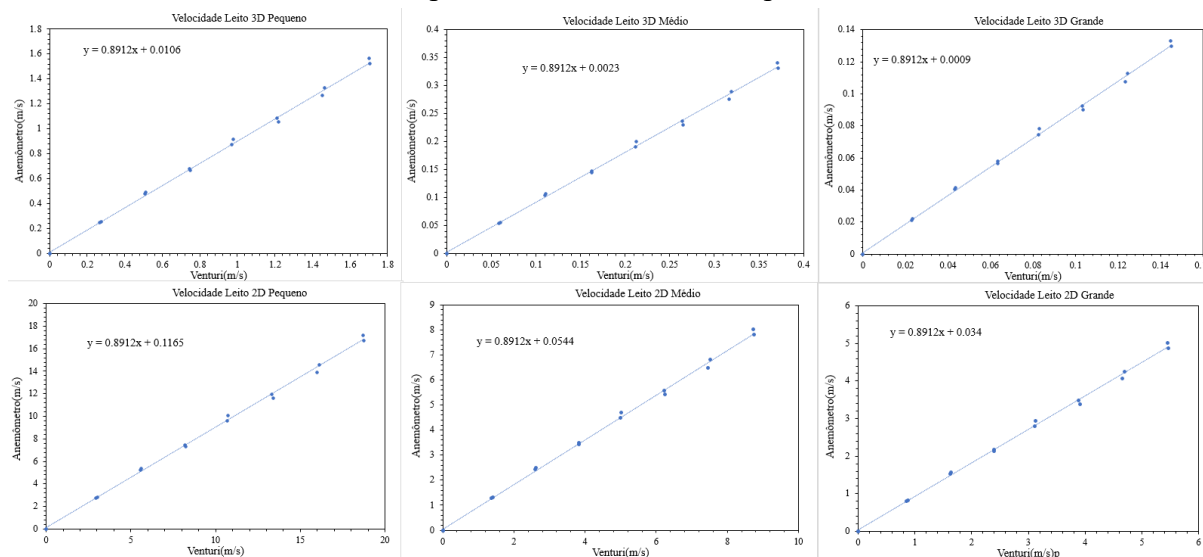
4.5.4 Aferimento e ajuste do tubo de Venturi

Com o objetivo de aferir as medidas do tubo de Venturi, foram medidos os valores de pressão utilizando os sensores do sistema de aquisição de dados da seção 4.4. Esses valores foram utilizados nas equações (31) à (36) para calcular a vazão e a velocidade dentro de um leito fluidizado.

Para deixar o fluxo de ar mais uniforme, a placa distribuidora e o material particulado foram removidos do leito. Posteriormente, as velocidades de saída do leito foram medidas com um anemômetro de fio quente na saída da tubulação em diferentes posições para poder obter um valor médio de escoamento. Uma das relações de valores entre o anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi podem ser visualizados na Figura 39. Os valores foram adaptados especificamente para cada tipo de leito (tridimensional ou bidimensional e também pequeno, médio ou grande). As relações vistas na Figura 39 são apenas um exemplo. Todos

as curvas de calibração e suas respectivas equações podem ser encontradas no APÊNDICE G.

Figura 39 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 33$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande



Fonte: Autoria própria

Com base no comportamento da Figura 39 foram obtidas uma coletânea de 30 equações que foram acrescentadas ao programa em Python do sistema de aquisição de dados para poder calibrar os resultados obtidos e obter uma maior precisão dos dados.

Com relação aos erros inerentes ao sistema de medição do Venturi, os valores obtidos com base nas equações (32) e (34), no geral, ficaram em torno de 5% de erro, com o valor máximo chegando em torno de 10% em situações muito extremas (vazão muito baixa com Venturi de $d=2\text{mm}$).

4.6 PROJETO DO CALADOR

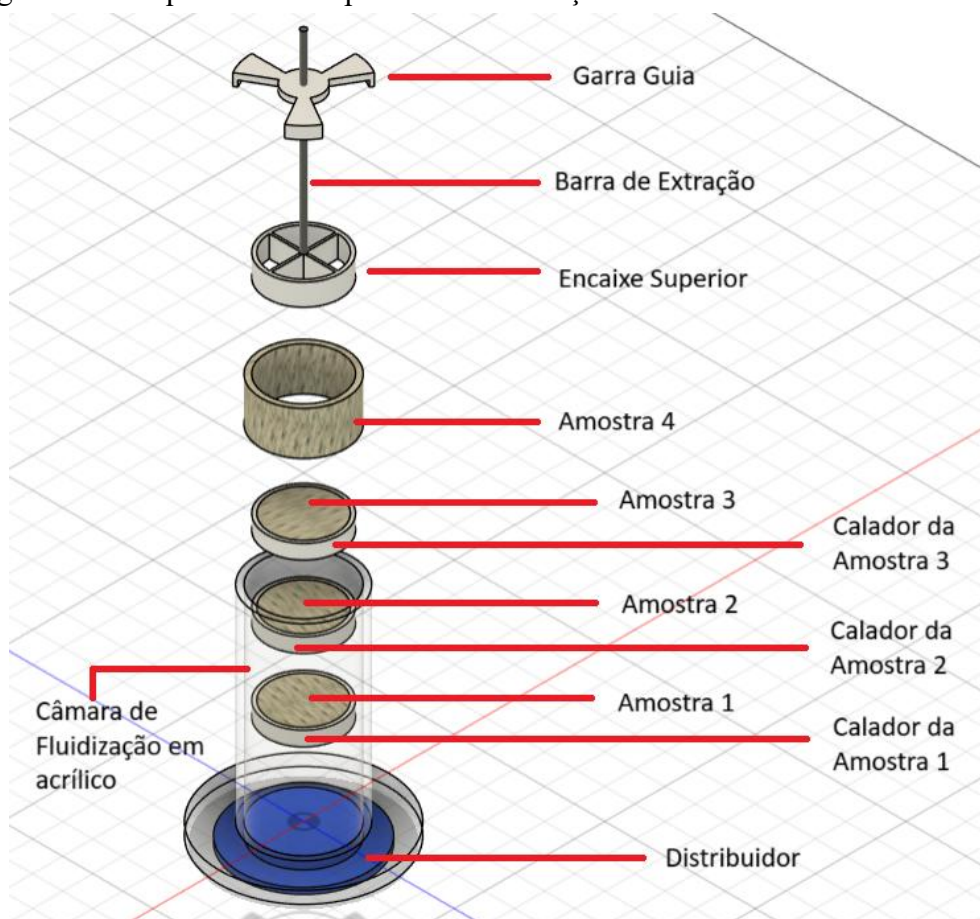
O calador, utilizado para a extração de amostras, é necessário para os experimentos propostos por razão do cálculo do índice de mistura (M). De acordo com as equações (10)-(13), são necessárias pelo menos algumas amostras para poder calcular o índice de mistura.

Portanto, tornou-se necessário desenvolver, projetar e montar um novo tipo de calador para poder obter o valor do índice de mistura, assim como entender melhor a distribuição de casca de arroz ao longo do leito, juntando informações obtidas de forma

qualitativa (visualização por meio do acrílico transparente) e quantitativa (valores de distribuição obtidos por meio de amostras).

O calador é composto de diversos anéis de diâmetro ligeiramente menores que o leito fluidizado no qual ele vai ser inserido. Esses anéis podem ser encaixados um em cima do outro para poder obter a altura aproximada que se precisa para os experimentos. O calador é dividido em 4 partes, sendo eles 3 divisões internas, classificadas como as partes inferior (amostra 1), média (amostra 2) e superior (amostra 3) e uma quarta parte sendo a parte externa ao calador (amostra 4), que fica entre a parede interna de acrílico da câmara de fluidização e a parede externa do calador, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 – Esquema 3D simplificado da extração de amostras com o novo calador

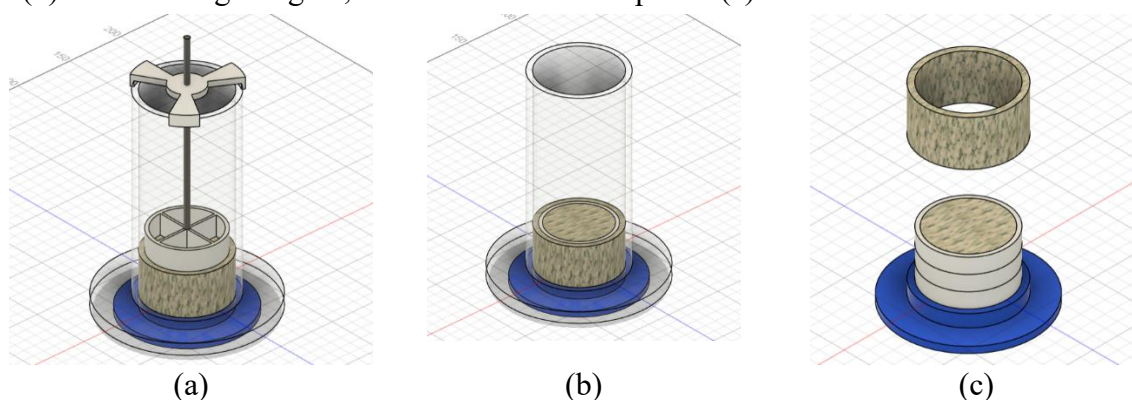


Fonte: Autoria própria

O procedimento para a extração de amostras dentro da câmara de fluidização está exemplificado na Figura 41. Primeiramente, o calador é inserido dentro do leito enquanto ele é fluidizado com auxílio da Garra Guia e do Encaixe Superior. Após isso, a vazão do sistema

é cortada e a parte superior do leito é removida juntamente com a placa distribuidora servindo como uma tampa para manter o material em posição. Após isso, o tubo de acrílico da câmara de fluidização é removido juntamente com a Barra, a Garra e o Encaixe Superior, deixando o material particulado entre as paredes do calador e da câmara de fluidização escoar, sendo esse material a amostra 4. Posteriormente, os anéis do calador vão sendo removidos para coletar as amostras 3, 2 e 1, nessa sequência, começando por cima e descendo até chegar na placa distribuidora.

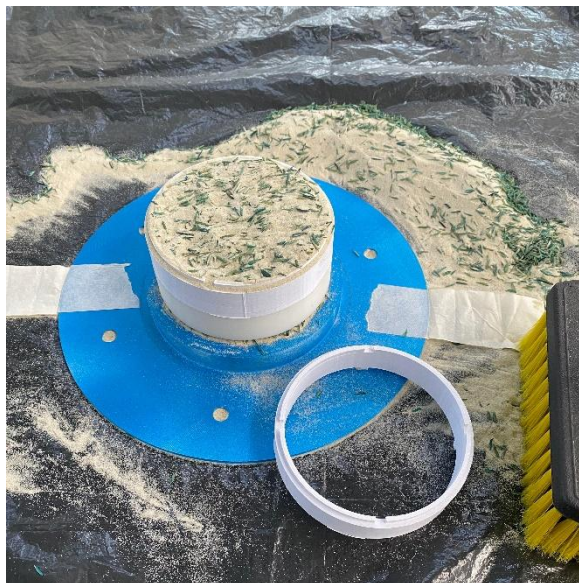
Figura 41 – Procedimento para extração das amostras (a) Inserir o calador completo no leito (b) Remover a garra guia, a barra e o encaixe superior (c) Remover a câmara de acrílico



Fonte: Autoria própria

O calador havia sido projetado para ter um encaixe “justo” dentro da câmara de fluidização, não deixando espaço entre a parede interna de acrílico e a parede externa do calador. No entanto, isso se provou inviável, pois o atrito era muito grande devido a parte da areia que ficava exprimida entre as paredes. Sendo assim, optou-se por diminuir o diâmetro, dando espaço para o material particulado conseguir se movimentar entre as duas paredes. Isso também possibilitou criar uma quarta amostra referente ao material particulado acumulado na parede. Um exemplo do calador sendo usado está exibido na Figura 42. Um detalhamento maior das dimensões do calador são dadas no APÊNDICE H.

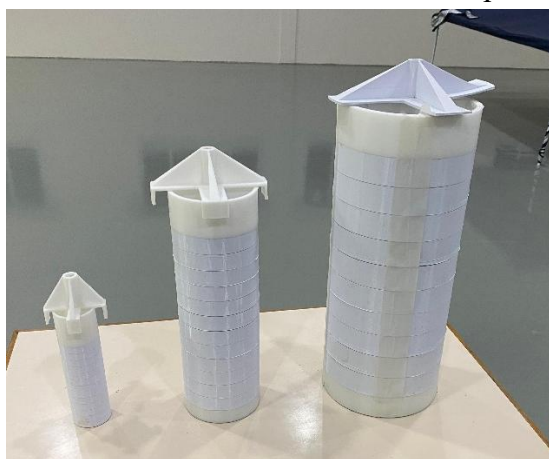
Figura 42 - Calador sendo utilizado para extração de amostras



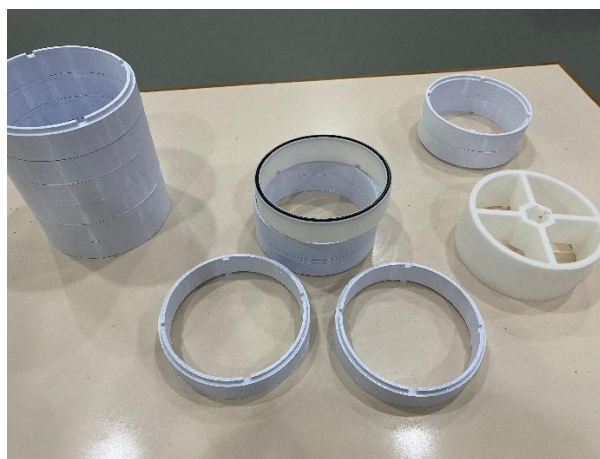
Fonte: Autoria própria

Na Figura 43 estão exibidos os caladores pronto para serem utilizados com suas respectivas Garras Guias e Encaixes Superiores.

Figura 43 - Caladores impressos e prontos para serem utilizados (a) Caladores montados (b) Calador parcialmente desmontado



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS PARTICULADOS

As propriedades físicas dos materiais particulados foram obtidas e estão representadas na Tabela 7. O detalhamento de como alguns desses valores foram obtidos, assim como informações adicionais da areia estão disponíveis nos APÊNDICE I e APÊNDICE J.

Tabela 7 - Propriedade físicas dos materiais particulados utilizados na fluidização

Parâmetros	Casca de arroz (<i>in natura</i>)	Areia Fina 150 - 300 μm
Massa específica (kg/m^3)	500	2817
Massa específica aparente (kg/m^3)	106	1401
Porosidade ε (adm)	0,79	0,52
Diâmetro médio (μm)	1500	209,56
Esfericidade ϕ (adm)	0,64	0,84
Classificação Geldart	D	B

Fonte: Autoria própria

5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CASCA DE ARROZ

Algumas das propriedades químicas dos materiais particulados foram obtidas e estão descritas na Tabela 8. No caso das análises elementar, imediata e Poder Calorífico Superior (PCS), foi colocado um valor retirado do trabalho de Vieira *et al.* (2020), que pertence ao mesmo grupo de pesquisa e a casca de arroz utilizada para ambos trabalhos é a mesma, o que significa que os valores que serão obtidos serão muito próximos.

Com descrito anteriormente, os testes de fluidização apresentados referem-se em condições "a frio", onde a caracterização apresentada na Tabela 8 não será relevante. No entanto, é crucial compreender as características químicas dos materiais que podem ser empregados como biocombustíveis, que é o objetivo central desta pesquisa. Ao obter a caracterização química da casca de arroz utilizada, pode-se antecipar seu desempenho em sistemas de fluidização sob condições de combustão.

Tabela 8 - Propriedades químicas da casca de arroz

Caracterização Química	Valores
<i>Análise Imediata (% massa)</i>	
Umidade	3,027
Material Volátil	70,76
Carbono Fixo	14,15
Cinzas	8,272
<i>Análise Elementar (%massa - base seca)</i>	
Carbono (C)	31,39±0,001
Hidrogênio (H)	3,39±0,001
Nitrogênio (N)	0,35±0,001
Oxigênio (O)	43,4±0,001
PCS (MJ/kg - base seca)*	17,23

Fonte: Vieira et al. (2020)

5.3 ESTUDO DA FLUIDIZAÇÃO

Uma parte considerável da pesquisa foi dedicada ao projeto e construção dos sistemas de fluidização, conforme detalhado na seção 4.

Os resultados a seguir foram obtidos no processo de fluidização, testando os 4 fatores de controle (A, B; C e D) da matriz L9 de Taguchi descritos na Tabela 1 para o estudo das 4 variáveis respostas descritas na Tabela 2.

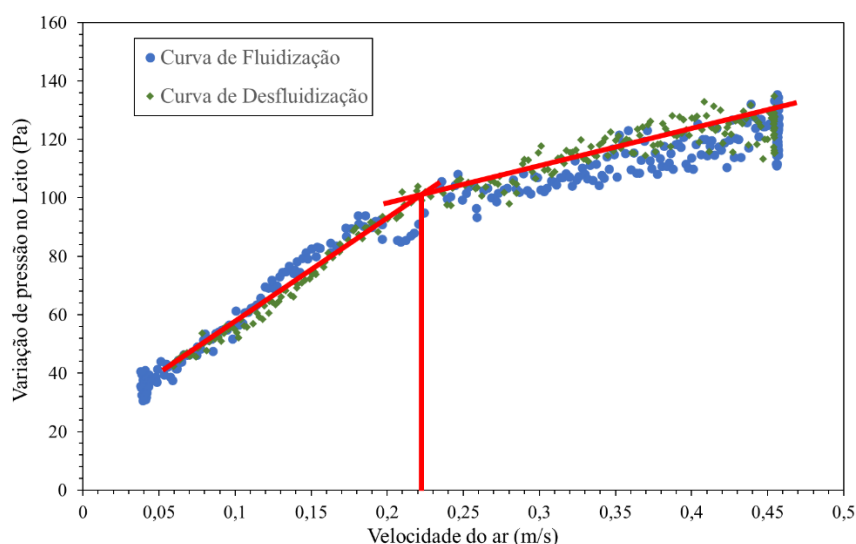
Os resultados da fluidização foram divididos em 4 partes, sendo cada parte focada em uma das variáveis resposta.

5.3.1 Velocidade mínima de fluidização (U_{mf} ou Y_1)

Para obter a velocidade mínima de fluidização, foi necessário construir curvas da perda de pressão no leito em função da velocidade do ar injetado dentro da câmara do leito conforme mostrado na seção 2.1.10 Velocidades de fluidização na Figura 8. Sendo assim, foram obtidas 18 curvas (9 experimentos da matriz com duplicata) com curvas de fluidização e desfluidização para cada uma das configurações da matriz. A partir de cada uma dessas curvas, foram obtidos os valores de U_{mf} e esse foram utilizados para fazer a análise de Taguchi e ANOVA. Um exemplo de uma dessas 18 curvas está mostrado abaixo na Figura

44. As demais curvas, embora essenciais para a realização das análises propostas, tiveram um comportamento relativamente similar para todos os experimentos, mudando apenas os valores de U_{mf} obtidos, como mostrado no APÊNDICE K.

Figura 44 – Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 1



Fonte: Autoria própria

A curva de desfluidização foi utilizada para determinar U_{mf} , conforme mostrado na Figura 44. Esse processo é o mesmo usado para cada um dos experimentos. A curva de desfluidização foi preferida para ser usada como referência por ser uma curva mais estável. A curva de fluidização possui flutuações maiores pelo material estar parado. Para o ar conseguir “romper” a conexão entre as partículas, ele acaba precisando alcançar uma maior velocidade. Isso acontece devido ao fato de que o fator de atrito estático é maior que o fator de atrito dinâmico.

Além disso, esse efeito é ainda mais ampliado quando se utiliza casca de arroz, que atua como uma “rede” dentro da areia. Seria algo similar ao que é observado em materiais compósitos, no qual a combinação de dois materiais diferentes resulta em uma estrutura mais forte. Para piorar esse efeito, a disposição espacial da casca de arroz, assim como a sua quantidade dentro do sistema causa uma flutuação nesse ponto de rompimento do leito. Portanto, para padronizar a análise, optou-se por selecionar a curva de desfluidização para obter o valor de U_{mf} , conforme feito nos trabalhos RAO e BHEEMARASETTI (2001) e

QIAOQUN *et al.* (2005).

Todos os valores obtidos de U_{mf} estão dispostos na Tabela 9, com os valores em duplicata e a média.

Tabela 9 - Velocidades Mínima de Fluidização (U_{mf}) (m/s)

Teste	A	B	C	D	Réplicas Y_1 (m/s)		Y_1 (m/s) (Média)
					(1)	(2)	
1	70	1	1,00%	0,5	0,220	0,217	0,219
2	70	1,25	2,50%	1,00	0,255	0,281	0,268
3	70	1,5	5,00%	1,50	0,320	0,310	0,315
4	150	1	2,50%	1,50	0,105	0,115	0,110
5	150	1,25	5,00%	0,50	0,168	0,187	0,178
6	150	1,5	1,00%	1,00	0,105	0,110	0,108
7	240	1	5,00%	1,00	0,091	0,084	0,088
8	240	1,25	1,00%	1,50	0,070	0,075	0,073
9	240	1,5	2,50%	0,50	0,082	0,083	0,083

Fonte: Autoria Própria

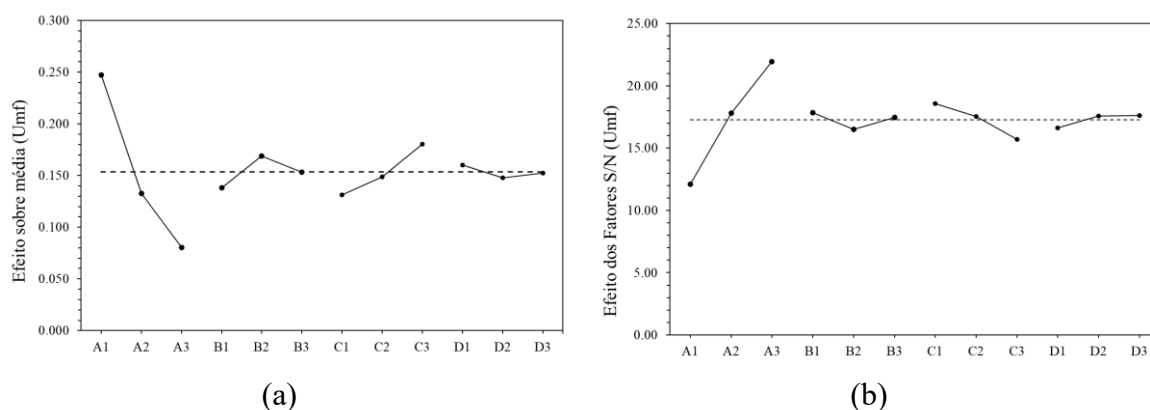
Para poder avaliar esses resultados, foi feita uma análise de Taguchi e ANOVA. No caso de Taguchi, foi aplicada a situação “menor é melhor”, uma vez que uma velocidade menor resultaria em menor gasto energético para manter o sistema funcionando, aumentando a eficiência do processo. O resultado obtido para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 45.

Os resultados para cada combinação de níveis foram utilizados para compor as curvas efeitos sobre as médias e razão sinal-ruído (S/N) do tipo “menor é melhor”, com o intuito de identificar as configurações que promovem menor velocidade mínima de fluidização. A análise de variância (ANOVA) foi conduzida com nível de confiança de 95%, sendo o valor crítico de F estabelecido em 19.

A análise dos resultados obtidos para a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) evidencia diferenças significativas na influência de cada fator experimental avaliado. O fator A, correspondente ao diâmetro interno do reator, demonstrou ser o parâmetro com maior impacto sobre a variável-resposta. Tanto a curva de efeitos sobre a média quanto a curva de razão sinal-ruído (S/N) indicaram uma tendência clara de redução da U_{mf} com o aumento do

diâmetro do reator. Esse comportamento pode ser atribuído à atenuação dos efeitos de parede em reatores com maior seção transversal. Em diâmetros menores, a interação entre o escoamento ascendente de gás e as paredes do reator intensifica as forças de arraste e aumenta a resistência ao início da fluidização, exigindo maior velocidade para a mobilização das partículas. Com o aumento do diâmetro, a influência das paredes torna-se menos significativa, favorecendo uma fluidização mais homogênea e energeticamente mais eficiente.

Figura 45 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a velocidade mínima de fluidização



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra a Tabela 10. Nessa tabela, são exibidos os valores de F_0 (calculado) e o F crítico com grau de confiabilidade de 95% que é tabelado.

Se F_0 for próximo de 1, significa que as variações entre os grupos comparados (Quadrado Médio dos Fatores) são similares as variações dentro dos grupos (Quadrado Médio do Erro), podendo ser possível deduzir que aquele fator não afeta o processo como um todo. Quanto maior o for o F , maior será a probabilidade daquele fator estar realmente causando as variações do grupo avaliado, ou seja, ter impacto real no sistema.

Sendo assim, o F_0 é comparado com o um F crítico com 95% de confiabilidade. Se F_0 de um fator for maior que o F crítico de 95%, isso significa que existe 95% de chance daquele fator estar realmente afetando o sistema. Portanto, na Tabela 10, foram usados dois termos diferentes: Significância e Relevância. Se o fator é considerado “Significativo” ($F_0 > F$ crítico), existe uma alta probabilidade desse fator ter influência sobre o processo. Se o fator é considerado apenas “Relevante” (F crítico $> F_0 > 2$), a probabilidade desse fator estar afetando

o processo não é tão alta, mas ele pode ainda estar afetando o sistema de alguma maneira.

Tabela 10 - ANOVA para Velocidades Mínima de Fluidização (U_{mf}) - “menor é melhor”

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Delta de S/N
A	30,88	19	Significativo	Relevante	9,84
B	-	-	-	-	1,36
C	2,63	19	Não Significativo	Relevante	2,85
D	0,16	19	Não Significativo	Irrelevante	1,03

Fonte: Autoria Própria

A velocidade do ar (fator B) foi excluído da análise estatística por apresentar contribuição desprezível na variabilidade da U_{mf} . Embora essa exclusão possa parecer contraintuitiva à primeira vista, considerando que a U_{mf} é ela própria uma velocidade, essa ausência de influência é justificada pelo fato de que a U_{mf} corresponde a um ponto crítico específico, característico da interação entre o fluido e as partículas sólidas no leito. Nesse contexto, a variação da velocidade superficial imposta durante os testes não interfere no valor da velocidade mínima em si, mas apenas define o patamar de operação. Dessa forma, dentro da faixa de variação estudada, a velocidade do gás não constitui um fator determinante para o valor de U_{mf} , validando sua exclusão da análise de efeitos estatísticos.

A proporção mássica de casca (fator C) também demonstrou influência relevante, embora menos expressiva do que o diâmetro do leito (fator A). A partir dos gráficos de efeitos e do comportamento da razão S/N, observou-se que o aumento da fração de casca de arroz na mistura tende a elevar os valores de U_{mf} . Este efeito pode ser explicado pelas propriedades físicas distintas dos materiais presentes: enquanto a areia apresenta elevada densidade e geometria aproximadamente esférica, a casca de arroz é leve e irregular. A introdução crescente de casca de arroz à mistura compromete a uniformidade do leito, reduz o empacotamento das partículas e favorece o surgimento de caminhos preferenciais para o escoamento do gás. Em função disso, torna-se necessário um maior esforço do fluido para superar a resistência ao escoamento e iniciar a mobilização das partículas, o que se reflete no aumento da U_{mf} . Além disso, a heterogeneidade estrutural do leito pode causar instabilidades no início da fluidização, conforme sugerido pela oscilação nos valores de S/N no nível intermediário.

Em contrapartida, a razão entre altura e diâmetro (fator D) apresentou impacto mínimo sobre a U_{mf} . A variação entre os níveis testados resultou em alterações praticamente nulas tanto nas médias quanto na razão S/N. Tal comportamento indica que, na faixa de alturas analisada, a quantidade de material presente no leito não interfere de forma significativa na velocidade mínima necessária para a fluidização. Isso é coerente com o entendimento de que a U_{mf} depende predominantemente das características locais de interação entre partícula e fluido - como densidade, tamanho, formato e distribuição granulométrica, ao passo que a altura do leito influencia majoritariamente o regime de escoamento em estágios posteriores à fluidização, como o padrão de formação de bolhas e a expansão do leito.

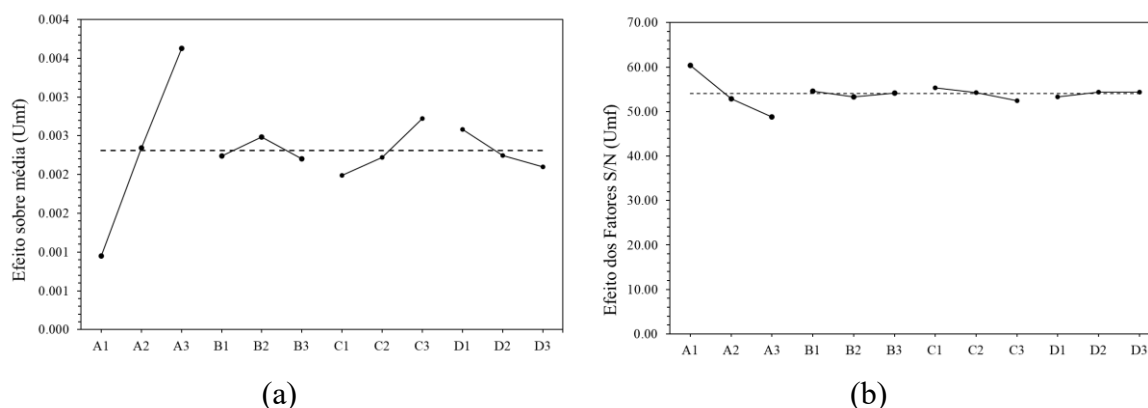
Diante dos resultados obtidos, a princípio, a configuração experimental mais favorável para a obtenção de menores valores de U_{mf} é aquela que combina o maior diâmetro de reator (nível 3 do fator A), a menor proporção de casca de arroz na mistura (nível 1 do fator C) e qualquer nível do fator D, dada sua influência estatisticamente irrelevante.

Com base nos resultados obtidos, um questionamento pode ser levantado: considerando a lei da conservação de massa e o princípio de Bernoulli, se houver uma mudança de diâmetro da câmara de fluidização, não haveria uma mudança na velocidade, incluindo a velocidade mínima de fluidização? A resposta seria sim, mas não apenas isso, uma vez que U_{mf} é uma propriedade que depende de diversas características físicas do material particulado e embora a mudança de área possa afetar o resultado de alguma maneira, não seria o único fator a ser considerado.

Entretanto, é necessário entender melhor o quanto a mudança de área realmente afeta essa variável. Sendo assim, as velocidades U_{mf} obtidas nos resultados foram multiplicadas pela área dos seus respectivos reatores, resultando em uma vazão volumétrica mínima de fluidização Q_{mf} . As análises estatísticas foram repetidas e a curva obtida para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 46.

Os resultados indicam que algumas coisas mudaram quando se considera a vazão volumétrica ao invés da velocidade. O fator A, que seria o diâmetro da câmara, afeta de forma inversa a vazão se comparado com a velocidade. Enquanto a velocidade mínima de fluidização diminui com o aumento de escala, a vazão aumenta. Isso significa que o aumento do diâmetro do reator realmente afeta os resultados, mas os efeitos se opõem por causa da mudança de área.

Figura 46 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a Vazão volumétrica mínima de fluidização



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - ANOVA para Vazão volumétrica mínima de fluidização - “menor é melhor”

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Delta de S/ N
A	76,60	19	Significativo	Relevante	11,56
B	-	-	-	-	1,36
C	6,05	19	Não Significativo	Relevante	2,85
D	2,65	19	Não Significativo	Relevante	1,03

Fonte: Autoria Própria

Entretanto, a ordem e impacto dos fatores permanece inalterada. A escala do sistema continua sendo o fator mais crucial e impactante, seja na velocidade, seja na vazão mínima de fluidização.

Sendo assim, isso mostra um fator que pode ter sido negligenciado quando se trata de equações de predição de velocidade mínima de fluidização. Alghamdi *et al.* (2021) fez um artigo de revisão tabelando todas as principais equações usadas nas últimas décadas para calcular a velocidade mínima de fluidização de materiais particulados. O fator crucial encontrado nesse artigo de revisão é que nenhuma dessas equações considera o diâmetro do reator no qual o material é fluidizado como uma variável importante para prever U_{mf} . Embora

algumas dessas equações possam ter sido deduzidas e considerem esse fator de forma indireta, esse é um termo que deve ser incluído de forma ativa.

Se os resultados obtidos no atual trabalho estiverem corretos, ignorar o diâmetro do reator afetaria os resultados, o que faria com que as equações de predição seriam apenas “situacionais” e com a possibilidade de acarretar grandes erros em cálculos aplicados para escalas maiores.

Importante salientar que uma das principais aplicações dessas equações de predição é a possibilidade de usá-las para poder estabelecer as faixas de velocidade necessárias durante a fase de projeto de um reator de leito fluidizado. Entretanto, se essas equações desconsideram justamente o fator de maior impacto (ou, pelo menos, um dos de maior impacto, conforme indicam os resultados), as faixas estabelecidas em fase de projeto podem sair muito erradas. Isso justifica o porquê que muitas empresas, quando decidem projetar um sistema de fluidização, normalmente testam os mesmos em reatores menores ou protótipos.

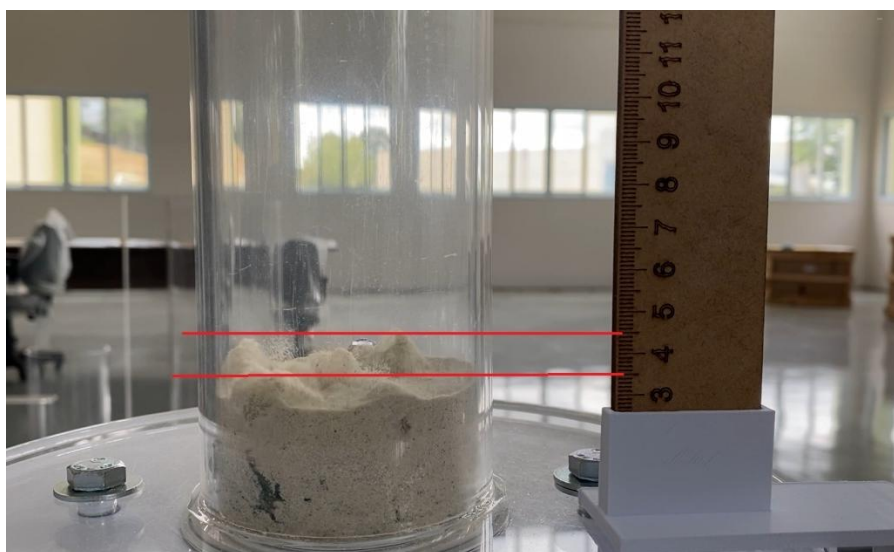
Entretanto, é válido destacar que mesmo com testes em reatores miniaturizados, a mudança de escala poder afetar consideravelmente as velocidades mínimas de fluidização da casca de arroz e, possivelmente, de outros materiais, o que poderia resultar em projetos finais defeituosos ou superdimensionados, gerando um investimento maior que o necessário.

Mais testes com outros materiais particulados e misturas dos mesmos devem ser feitos para estipular o quanto essa influência de mudança de escala afeta U_{mf} no geral. Investimentos futuros nessa parte podem resultar em equações mais precisas, reduzindo custos e facilitando a fase de projetos do reator, viabilizando o investimento nesses tipos de sistema.

5.3.2 Expansão do Leito (δ ou Y_2)

A Expansão do leito foi medida com base nos vídeos de fluidização, com o uso de captura de tela, conforme mostrado na Figura 47. Portanto, foram coletadas 18 capturas de tela (9 experimentos com duplicata). Todas as capturas de telas estão disponíveis no APÊNDICE L.

Figura 47 - Exemplo de captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito



Fonte: Autoria própria

Todos os valores obtidos da expansão $\delta = H_{fb}/H_0$ estão dispostos na Tabela 12, com os valores em duplicata e a média.

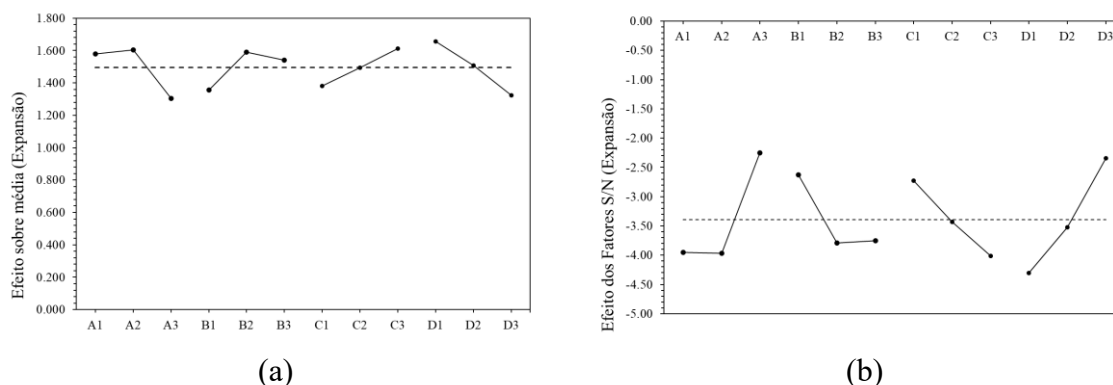
Tabela 12 - Expansão do leito (δ) (adimensional)

Teste	A	B	C	D	Réplicas Y ₂ (adm)		Y ₂ (adm) (média)
					(1)	(2)	
1	70	1	1,00%	0,5	1,44	1,53	1,49
2	70	1,25	2,50%	1,00	1,67	1,70	1,68
3	70	1,5	5,00%	1,50	1,57	1,56	1,57
4	150	1	2,50%	1,50	1,28	1,30	1,29
5	150	1,25	5,00%	0,50	1,87	2,08	1,97
6	150	1,5	1,00%	1,00	1,60	1,49	1,55
7	240	1	5,00%	1,00	1,35	1,23	1,29
8	240	1,25	1,00%	1,50	1,13	1,10	1,11
9	240	1,5	2,50%	0,50	1,47	1,54	1,51

Fonte: Autoria Própria

Para poder avaliar esses resultados, foi feita uma análise de Taguchi e ANOVA. No caso de Taguchi, foi aplicada a situação “menor é melhor”, pois uma expansão menor resultaria em um menor reator, criando um sistema mais enxuto e compacto. A curva obtida para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a expansão do leito



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - ANOVA para expansão do leito - “menor é melhor”

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Amplitude do efeito S/N
A	2,12	19	Não Significativo	Relevante	1,71
B	1,20	19	Não Significativo	Irrelevante	1,17
C	-	-	-	-	1,29
D	2,17	19	Não Significativo	Relevante	1,96

Fonte: Autoria Própria

Os resultados indicaram que nenhum dos fatores alcançou significância estatística, com todos os valores de F calculado abaixo do limiar crítico. No entanto, os fatores A (diâmetro interno do reator) e D (altura do leito) apresentaram F calculado próximo de 2, o que, embora insuficiente para significância formal, aponta para uma relevância na resposta.

O diâmetro do leito demonstrou ter influência considerável na média de expansão observada. O nível A3, correspondente ao maior diâmetro testado, promoveu a menor média de expansão do leito, ao passo que o nível A2 apresentou a maior expansão. Essa tendência pode ser interpretada com base na fluidodinâmica dos leitos fluidizados: em colunas mais estreitas, a formação e o coalescimento de bolhas tendem a ser mais restritos, resultando em

menores elevações da altura do leito. Por outro lado, em diâmetros intermediários, a competição entre o arraste do gás e a mobilidade das partículas pode favorecer a instabilidade do leito e, conseqüentemente, sua maior expansão.

A razão entre altura e diâmetro (fator D) também apresentou variações importantes na resposta. O nível D3 (maior altura) foi o que resultou em menor expansão relativa do leito. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que leitos mais altos exigem maior energia para expandir em proporção, além de possuírem uma maior resistência fluidodinâmica ao avanço das frentes de bolhas. Assim, mesmo que a pressão de gás seja mantida constante, a expansão percentual tende a ser menor.

A velocidade do ar (fator B) apresentou o menor valor de F e um efeito praticamente nulo sobre a expansão. Isso pode ser atribuído à faixa estreita de variação adotada para a velocidade do gás, a qual pode ter sido insuficiente para induzir transições significativas de regime ou mudanças marcantes na formação de bolhas. Em outras palavras, o leito permaneceu em um mesmo regime de fluidização (borbulhante) durante todos os ensaios, o que explicaria a baixa sensibilidade da expansão à velocidade na faixa testada. Valores maiores de velocidade não foram testados devido a limitação do sistema, conforme comentado anteriormente e no APÊNDICE A.

Por fim, a proporção mássica de casca (fator C) mostrou-se estatisticamente e praticamente irrelevante para a expansão do leito. Esperava-se que a introdução de um material de menor densidade e maior tamanho de partícula - como a casca de arroz - aumentasse a tendência de expansão, devido à sua menor tendência de sedimentação e maior suscetibilidade ao arraste pelo gás. Entretanto, os resultados sugerem que, nas proporções utilizadas, a influência da casca sobre a estrutura global do leito foi mínima.

Com base nos gráficos de efeito médio e S/N, a combinação de níveis que promoveu a menor expansão do leito foi A3-B1-C1-D3, ou seja: diâmetro interno menor, menor velocidade do gás, menor proporção de casca e maior altura de leito.

No entanto, essa relação de expansão do leito ($\delta = H/H_0$) torna o valor adimensional e independente (de uma certa forma) de alguns valores testados previamente. Sendo assim, os cálculos foram repetidos para a altura do leito durante a fluidização H , sem relacionar com a altura inicial do leito H_0 .

Todos os valores obtidos da altura do leito fluidizado (H) estão dispostos na Tabela 14, com os valores em duplicata e a média.

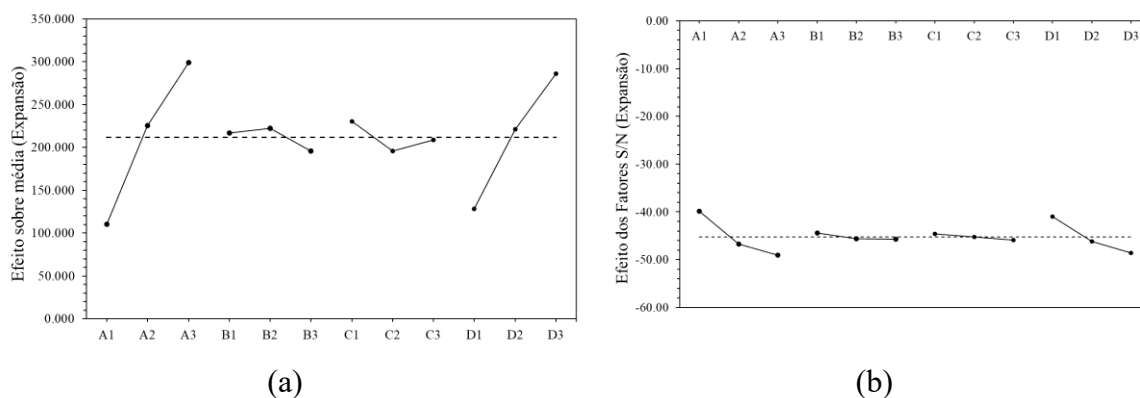
Tabela 14 – Altura do leito fluidizado (H) (mm)

Teste	A	B	C	D	Réplicas Y ₂ (mm)		Y ₂ (mm) (média)
					(1)	(2)	
1	70	1	1,00%	0,5	49	52	50.5
2	70	1,25	2,50%	1,00	115	114	114.5
3	70	1,5	5,00%	1,50	165	167	166.0
4	150	1	2,50%	1,50	287	291	289.0
5	150	1,25	5,00%	0,50	140	160	150.0
6	150	1,5	1,00%	1,00	245	230	237.5
7	240	1	5,00%	1,00	325	297	311.0
8	240	1,25	1,00%	1,50	405	400	402.5
9	240	1,5	2,50%	0,50	178	190	184.0

Fonte: Autoria Própria

Para poder avaliar esses resultados, foi feita uma análise de Taguchi e ANOVA. No caso de Taguchi, foi aplicada a situação “menor é melhor”, partindo do mesmo princípio utilizado para expansão do leito. A curva obtida para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a expansão do leito



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra a Tabela 15.

A avaliação da altura absoluta do leito fluidizado (H) revelou diferenças significativas em relação ao comportamento observado na análise da expansão (adimensional). Os fatores

A e D apresentaram os maiores valores de F calculado, sendo classificados como estatisticamente significativos na ANOVA ($F_0 = 46,31$ e $32,11$, respectivamente), com influência prática relevante. Os fatores C e B, por outro lado, mostraram efeitos desprezíveis, com F_0 muito abaixo do limiar de significância.

Tabela 15 - ANOVA para expansão do leito - “menor é melhor”

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Amplitude do efeito S/N
A	46.31	19	Significativo	Relevante	9.20
B	-	-	-	-	1.36
C	1.53	19	Não Significativo	Irrelevante	1.37
D	32.11	19	Significativo	Relevante	7.60

Fonte: Autoria Própria

Do ponto de vista dos gráficos de efeito médio e de S/N, o fator A3 (maior diâmetro) e o fator D3 (maior altura inicial) resultaram nas maiores alturas finais do leito. Em contraste, o fator B (velocidade do gás) mostrou impacto praticamente nulo sobre a altura final, o que reforça a hipótese de que a faixa de velocidades utilizada não foi suficiente para alterar significativamente o regime de escoamento. Isso significa que para um projeto de reator de leito fluidizado, se o objetivo for manter o sistema em regime borbulhante, variar a vazão do ar não causará muita variação na altura em que o material irá alcançar, desde que o regime permaneça o mesmo.

Ao se comparar com os resultados da expansão do leito (δ), observa-se que, embora os mesmos fatores A e D também tenham se destacado, a ordem e a magnitude dos efeitos são distintas. No caso de δ , o diâmetro do leito (fator A) e a proporção entre altura e diâmetro (fator D) resultaram em menor expansão relativa com seu aumento, mas tiveram o efeito oposto em valores absolutos de altura do leito resultando em maiores valores com o aumento dos fatores.

Isso significa que os valores absolutos de H vão subir com o aumento das dimensões do sistema e da altura inicial do leito, o que é relativamente intuitivo. Maior sistema, normalmente resulta em maior vazão de ar e maior altura resulta em maior quantidade de material. Outro fator importante é que o aumento desses fatores também causa um aumento geral do diâmetro das bolhas e, por consequência, maiores eclosões na superfície do reator.

Entretanto, no caso da expansão, que é uma variável relativa, a tendência é oposta. Um aumento nos fatores A e D tendem a diminuir o valor da variável. Isso significa que em valores maiores de ambos os fatores, o reator tende a ficar mais estável e as eclosões de bolhas na superfície, embora aumentem, não são suficientes para compensar o aumento da altura inicial.

Essa diferença destaca a importância de analisar ambas as variáveis de forma complementar. A altura final do leito está mais associada ao volume total de material expandido, útil para dimensionamento físico do reator, enquanto a expansão relativa reflete a capacidade de fluidização proporcional, sendo possivelmente um indicativo mais direto da eficiência do leito. Portanto, para fins de projeto e mudança de escala, recomenda-se considerar conjuntamente as duas métricas, a fim de garantir tanto o espaço físico necessário quanto a manutenção do regime desejado.

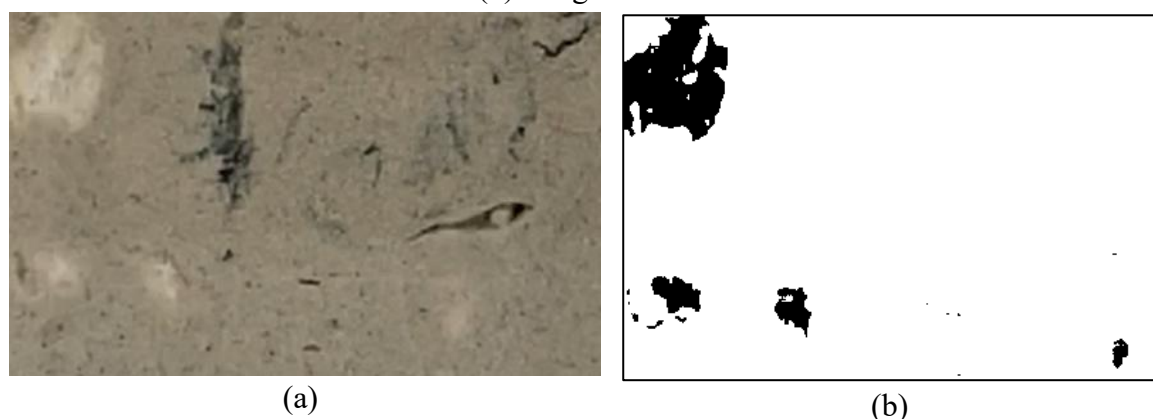
5.3.3 Diâmetro médio da bolha (d_b ou Y_3)

O diâmetro médio de bolha foi obtido por meio de capturas de tela dos vídeos de fluidização. Uma das imagens obtidas dos vídeos para realizar a análise está mostrada na Figura 50 (a). O diâmetro médio foi calculado com base na área das bolhas em preto na Figura 50 (b), que é a imagem tratada utilizando o software ImageJ. Com o auxílio desse software, foi possível numerar e calcular a área (região preta) de cada uma das bolhas.

Posteriormente, o diâmetro de cada uma das bolhas foi obtido usando a área calculada pelo *software*, supondo que cada uma das bolhas fosse uma circunferência perfeita, obtendo uma versão “idealizada” de cada uma das bolhas. Com isso, foi possível obter um diâmetro médio geral das bolhas para cada experimento. Importante notar que essa captura de imagens das bolhas só é possível no leito bidimensional, mostrando a relevância na construção do mesmo.

A Figura 50 é apenas um exemplo obtido nos experimentos. A coletânea de imagens tratadas, similares à essa, das quais foram tirados os dados para o atual trabalho está disposta no APÊNDICE M.

Figura 50 - Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento



Fonte: Autoria própria

Todos os valores obtidos para os diâmetros médios das bolhas estão dispostos na Tabela 16, com os valores em duplicata e a média.

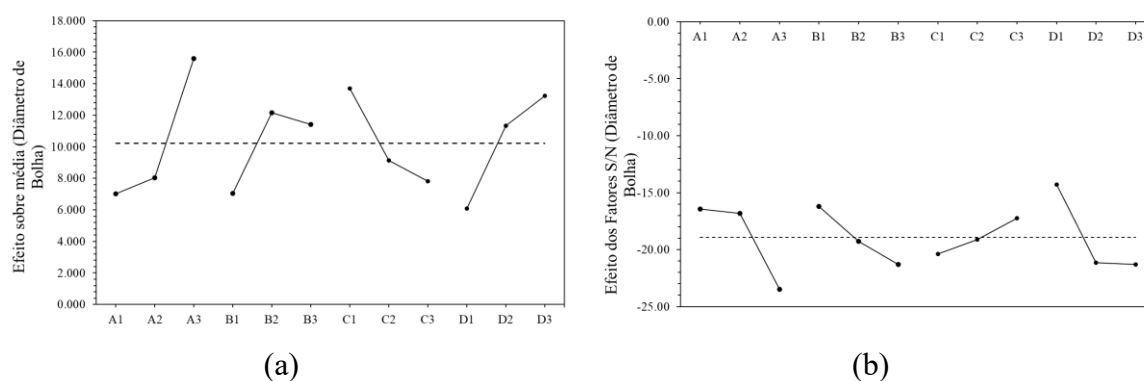
Tabela 16 - Diâmetros médios das bolhas (d_b) (mm)

Teste	A	B	C	D	Réplicas Y ₃ (mm)		Y ₃ (mm) (Média)
					(1)	(2)	
1	70	1	1,00%	0,5	2,18	4,24	3,21
2	70	1,25	2,50%	1,00	7,03	10,91	8,97
3	70	1,5	5,00%	1,50	12,28	5,40	8,84
4	150	1	2,50%	1,50	6,35	7,25	6,80
5	150	1,25	5,00%	0,50	3,98	2,93	3,46
6	150	1,5	1,00%	1,00	15,07	12,63	13,85
7	240	1	5,00%	1,00	7,71	14,60	11,16
8	240	1,25	1,00%	1,50	20,77	27,34	24,06
9	240	1,5	2,50%	0,50	9,37	13,83	11,60

Fonte: Autoria Própria

Para poder avaliar esses resultados, foi feita uma análise de Taguchi e ANOVA. No caso de Taguchi, foi aplicada a situação “menor é melhor”, pois bolhas de menor tamanho resultariam em maior área de contato entre o material particulado do leite e o ar que está passando, o que poderia aumentar a eficiência dos processos termoquímicos que ocorreriam dentro do sistema, além de possivelmente reduzir a segregação. A curva obtida para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 51.

Figura 51 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “menor é melhor” para a diâmetro médio das bolhas



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra na Tabela 17.

Tabela 17 - ANOVA para Diâmetro médio das Bolhas - "menor é melhor"

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Amplitude do efeito S/N
A	2,90	19	Não Significativo	Relevante	7,05
B	-	-	-	-	5,09
C	1,25	19	Não Significativo	Irrelevante	3,12
D	1,80	19	Não Significativo	Irrelevante	7,01

Fonte: Autoria Própria

Nota-se que o diâmetro do leito (fator A) apresentou variações expressivas entre os níveis testados, destacando-se como o fator com maior impacto sobre o crescimento das bolhas. Em especial, o nível A3 resultou nos maiores diâmetros médios, chegando a ultrapassar 16 mm, enquanto o nível A1 promoveu a formação de bolhas menores, com médias em torno de 7 mm. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento do espaço disponível para o crescimento das bolhas em reatores de maior diâmetro, o que favorece coalescência e menor resistência ao crescimento das bolhas de gás.

A velocidade do ar (fator B) apresentou um comportamento relativamente plano, com variações discretas entre os níveis B1, B2 e B3. Apesar da expectativa teórica de que o aumento da velocidade do gás intensificaria o crescimento das bolhas por aumento da taxa de formação e coalescência, esse efeito não foi observado de forma significativa nos ensaios

realizados. Isso pode indicar uma saturação do efeito da velocidade em faixas mais elevadas ou uma predominância do efeito de escala (fator A) sobre o comportamento das bolhas.

Quanto a proporção mássica de casca (fator C), nota-se uma tendência à redução do diâmetro médio das bolhas à medida que a proporção de casca aumenta. Essa redução pode estar relacionada à menor densidade e maior resistência à ascensão do gás na presença de partículas de baixa massa específica, que contribuem para uma dispersão mais eficaz do fluxo de ar. Contudo, a variação entre os níveis é pouco acentuada, o que se reflete na análise estatística como baixa relevância.

Além disso, essa diminuição de d_b pode ser relacionada a como o processo de tratamento de dados foi realizado. As imagens são tratadas pelo programa ImageJ, destacando as áreas onde a luz que fica atrás do leito bidimensional consegue passar, o que normalmente seria exatamente onde as bolhas estão localizadas.

Entretanto, ao longo do processo, foi observado que em algumas regiões do leito havia acúmulo de casca de arroz, causando canais preferenciais. Isso fez com que a imagem capturada tivesse regiões claras (iluminadas pela luz atrás do reator) devidos aos espaços vazios criados na rede de casca de arroz que era formado. Por causa disso, pequenas “bolhas” eram formadas nas imagens finais, mesmo que tecnicamente não fossem bolhas. Por outro lado, essas “bolhas” eram espaços vazios de material particulado de qualquer forma, o que poderiam ser interpretados como regiões de comportamento similar ao de bolhas.

A razão entre altura e diâmetro (fator D) também apresentou variação limitada nos efeitos médios sobre o diâmetro das bolhas. Embora se observe um leve crescimento entre os níveis D1 e D3, esse efeito não foi suficiente para torná-lo estatisticamente relevante, indicando que dentro da faixa testada a altura do leito não influenciou de maneira significativa a formação de bolhas maiores ou menores.

Essa interpretação é corroborada pela análise de variância (ANOVA), na qual apenas o diâmetro do leito (fator A) apresentou um valor de F calculado (2,89) superior aos dos demais fatores. Apesar de não ultrapassar o valor crítico de F ($F_{0,95} = 19$), o diâmetro do leito foi classificado como "relevante, porém não significativo", segundo os critérios adotados, o que sugere que ele exerce influência prática sobre o fenômeno, mesmo que não tenha alcançado significância estatística no nível de 95% de confiança. Os fatores B, C e D, por outro lado, foram consideradas não significativos e irrelevantes, com valores de F muito abaixo do limiar crítico, reforçando a ideia de que suas variações não alteram

substancialmente o diâmetro médio das bolhas.

Dessa forma, a interpretação conjunta dos gráficos e da ANOVA sugere que o diâmetro interno do reator (fator A) é o parâmetro mais influente na formação de bolhas no leito fluidizado. O controle adequado dessa variável pode ser uma estratégia eficaz para mitigar a coalescência excessiva de bolhas, promovendo uma fluidização mais uniforme e eficiente, especialmente em misturas heterogêneas.

Importante notar que a amplitude do efeito S/N é relativamente grande para vários fatores, mas praticamente nenhum componente foi considerado significativo ou relevante pela ANOVA, o que pode significar que o ruído dos dados está grande. Isso indica que para fazer uma análise aprofundada, seria imperativo capturar mais dados e fazer uma média com base em uma amostragem maior de dados. Devido as limitações de tempo do trabalho atual, não foi possível executar essa tarefa, mas ficaria como recomendação para análises futuras.

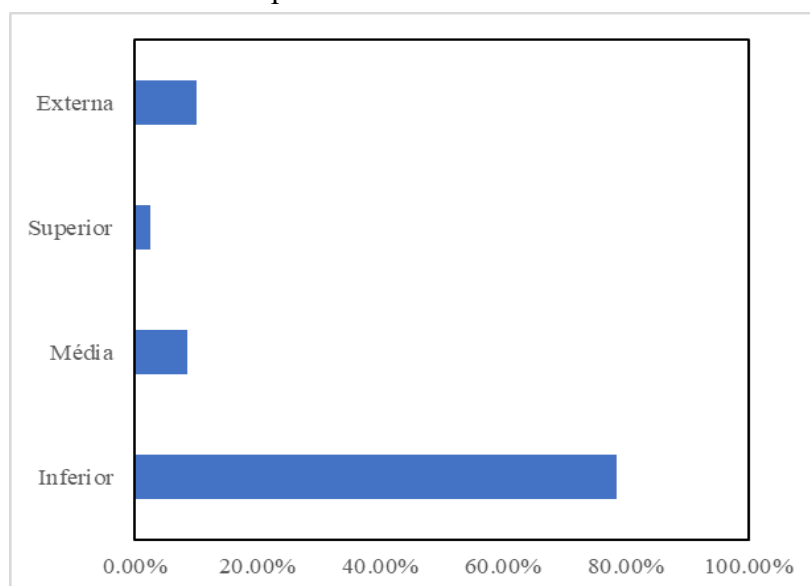
O que pode ser feito no momento, no entanto, seria considerar os valores da amplitude de efeito S/N para ter um direcionamento sobre quais fatores podem afetar mais ou não o diâmetro da bolha.

5.3.4 Índice de Mistura (M ou Y_4)

O índice de Mistura foi calculado tendo como base a extração de amostras que foram feitas com o calador projetado e mostrado na seção 4.6. Com base nas massas coletadas, foi calculado um índice de mistura conforme dado na seção 2.2.1 pelas equações (10), (11), (12) e (13), conhecido como índice de mistura de Kramer, utilizado em diversos experimentos de leito fluidizado (LI, H. *et al.*, 2021; MARKEEV *et al.*, 2023; SARBANHA *et al.*, 2023; TASHAKORI-ASFESTANI *et al.*, 2023).

Entretanto, antes de aplicar as análises de Taguchi e ANOVA, notou-se um problema com esse índice. Os resultados obtidos para os índices de mistura variavam muito pouco, o que poderia causar problemas na análise estatística, mas não apenas isso, eles estavam incoerentes com a realidade do leito. Na Figura 52 é possível ver claramente um acúmulo de casca de arroz na região inferior do leito (próximo da placa distribuidora), com quase 80% da massa de casca de arroz acumulada apenas em uma seção do leito. No entanto, calculando o índice de mistura de Kramer resultou em um valor de 98,5%, indicando que o material estava praticamente todo bem misturado.

Figura 52 - Distribuição de Casca de Arroz em função de cada amostra/região do leito no Experimento 1 da matriz L9



Fonte: Autoria Própria

Com esses resultados incoerentes, foi criado um índice de mistura próprio para o caso, tentando avaliar melhor a distribuição do material dentro do leito para poder possibilitar a análise estatística proposta por esse atual trabalho. O índice de Mistura proposto é uma versão modificada do índice de Kramer. O índice M seria calculado usando as mesmas variáveis conforme mostrado na equação (37). Percebe-se que é exatamente a mesma equação proposta por Kramer e discutida na seção 2.2.1. Entretanto, a diferença está em como essas variâncias da amostra (σ^2), de segregação (σ_s^2) e de mistura (σ_m^2) são calculados.

$$M = \frac{\sigma_s^2 - \sigma^2}{\sigma_s^2 - \sigma_m^2} \quad (37)$$

No caso da variância da amostra em si, ao invés de usar proporção mássica da casca de arroz X_{ca} , que tem como referência a massa total do sistema (casca de arroz e areia), será utilizada apenas a massa total da casca de arroz, calculando $P_{ca} = m_{ca}/m_{tca}$, com m_{ca} sendo a massa na amostra coletada e m_{tca} a massa total de casca de arroz dentro do leito. Isso resulta em uma variância ligeiramente diferente para a amostra conforme a equação (38).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (38)$$

No cálculo da variância de mistura e de segregação, é apenas calcular a variância do leito, reaplicando a equação (38), mudando apenas o valor de P. No caso da variância de mistura, aplicou-se os valores de P como se ele estivesse 100% misturado. Como o leito foi dividido em 4 partes relativamente iguais, supôs-se que 25% do material estava em cada amostra, o que resulta em uma variância de 0.

Para o caso da variância de segregação, o processo pode tornar-se mais complicado. O método adotado foi supor que todo o material da casca de arroz está acumulado em apenas uma amostra, resultando em uma variância de mistura de 0,25 em todos os casos. No entanto, foi necessário estimar o volume do total de casca de arroz e aferir se 100% do material consegue ser retido em apenas uma das quatro seções da amostra, o que no caso dos experimentos realizados no atual trabalho, se tornou verdade para todos os pontos da matriz L9 de Taguchi.

Interessante notar que usando exatamente os mesmos dados mostrados na Figura 52, enquanto o índice de mistura de Kramer original deu $M_k=98,5\%$, o novo índice de mistura proposto resultou em um valor muito mais coerente com o que se vê na curva com o valor de $M = 48,7\%$.

Sendo assim, o novo índice proposto é o que foi utilizado para as análises estatísticas desse trabalho. Todos os valores obtidos para os Índices de Mistura estão dispostos na Tabela 18, com os valores em duplicata e a média.

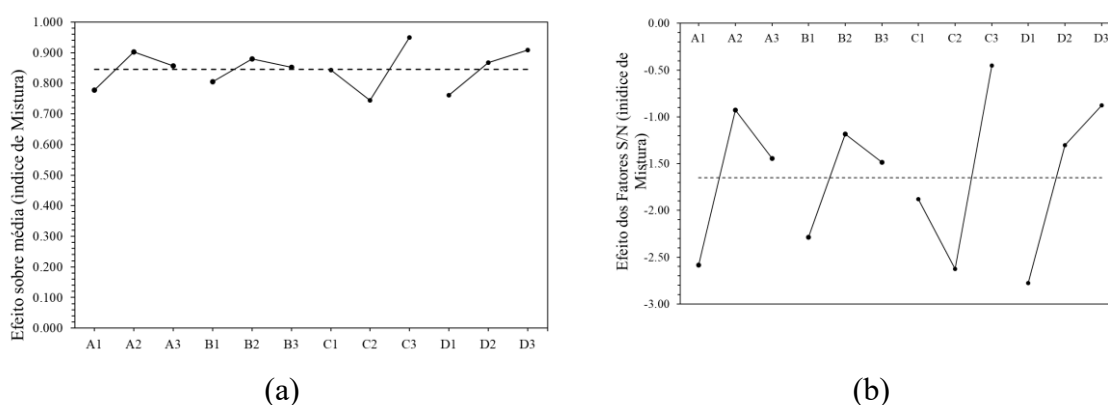
Para poder avaliar esses resultados, foi feita uma análise de Taguchi e ANOVA. No caso de Taguchi, foi aplicada a situação “maior é melhor”, que é diferente dos outros casos, pois uma maior mistura resultaria em maior eficiência energética, maior homogeneidade térmica e diminuiria a chance de parada do sistema por segregação. A curva obtida para o efeito sobre médias e sobre os fatores S/N está mostrado na Figura 53.

Tabela 18 - Índices de Mistura (M) (%)

Teste	A	B	C	D	Réplicas Y ₄ (%)		Y ₄ (%) (média)
					1	2	
1	70	1	1,00	0,5	49	81	65
2	70	1,25	2,50	1,0	76	70	73
3	70	1,5	5,00	1,5	96	94	95
4	150	1	2,50	1,5	89	76	82
5	150	1,25	5,00	0,5	96	95	96
6	150	1,5	1,00	1,0	92	94	93
7	240	1	5,00	1,0	94	94	94
8	240	1,25	1,00	1,5	95	96	95
9	240	1,5	2,50	0,5	68	68	68

Fonte: Autoria Própria

Figura 53 - Resultados dos (a) Efeitos sobre médias e (b) Efeitos dos Fatores S/N de Taguchi “maior é melhor” para a índice de Mistura



Fonte: Autoria Própria

Também foi feita a ANOVA dos fatores para a variável resposta conforme mostra na Tabela 19.

A proporção mássica de casca (fator C) apresentou a maior amplitude de efeito S/N ($\Delta = 2,17$), sendo o fator que mais influenciou o índice de mistura entre os sólidos, apesar de não ter atingido significância estatística. O nível C3, correspondente à maior proporção de casca, resultou nos maiores valores médios de mistura, próximos de 0,95. A diferença de densidade entre os materiais facilita a recirculação e a redistribuição espacial das partículas, promovendo uma mistura mais homogênea. No entanto, esse efeito pode depender da faixa de operação e da homogeneidade da fluidização. É importante salientar que apesar de

melhorar o índice de mistura como um todo comparando os 4 setores do leito, maiores valores de casca também têm tendência de causar maiores pontos de estagnação.

Tabela 19 - ANOVA para índice de mistura - “maior é melhor”

Fator	F0	F com 95%	Significância (>19)	Relevância (>2)	Amplitude do efeito S/N
A	2,79	19	Não Significativo	Relevante	1.66
B	-	-	-	-	1.10
C	7,25	19	Não Significativo	Relevante	2.17
D	3,96	19	Não Significativo	Relevante	1.90

Fonte: Autoria Própria

A razão entre altura e diâmetro (fator D) também demonstrou influência considerável sobre a resposta, com amplitude S/N de 1,90. O nível D3 resultou em índices de mistura superiores, enquanto o nível D1 foi associado a valores mais baixos. Esse efeito pode ser interpretado pelo fato de que leitos mais altos oferecem maior espaço para circulação vertical das partículas, favorecendo a troca entre regiões e evitando a segregação em camadas fixas. Além disso, em colunas mais altas, a maior perda de carga pode favorecer um regime mais instável e dinâmico, promovendo maior dispersão das partículas mais leves.

O diâmetro do leito (fator A) apresentou efeito moderado ($\Delta = 1,66$), com o nível A2 resultando em melhores índices de mistura em comparação com A1 e A3. A ausência de uma tendência clara sugere que há um equilíbrio entre espaço disponível para circulação e formação de zonas mortas. Diâmetros pequenos limitam o movimento das partículas, enquanto diâmetros muito grandes podem favorecer a formação de canais preferenciais ou regiões com baixa agitação. Assim, é possível que exista uma dimensão ótima para maximizar a homogeneidade em sistemas binários com grande diferença de densidade.

A velocidade do ar (fator B) apresentou efeito praticamente nulo ($\Delta = 1,10$), com valores de F igual a zero na ANOVA. O gráfico médio mostra uma linha praticamente plana, sem variações significativas entre os níveis. Essa constância pode ser explicada por dois motivos: a faixa de velocidades utilizada pode ter sido insuficiente para alterar significativamente o regime de mistura, ou o comportamento da mistura é mais fortemente influenciado pela natureza e propriedades das partículas sólidas do que pelo arraste do fluido, principalmente em velocidades próximas da mínima de fluidização.

Com base nas análises realizadas, a combinação de níveis que apresentou o melhor desempenho para o índice de mistura foi: A2-B2-C3-D3. Essa condição propicia um ambiente fluidodinâmico com maior dispersão e interação entre os sólidos, otimizando a homogeneidade da mistura no leito.

5.4 DISCUSSÃO CONSOLIDADA DOS RESULTADOS

Considerando que o resultado do trabalho também envolve a parte de projetos, alguns dos resultados significativos na parte de projetos foram:

- i. projeto e construção de 6 sistemas de fluidização a frio;
- ii. desenvolvimento e aprimoramento de um sistema parcialmente automatizado para a coleta de dados focado em leitos fluidizados, especialmente vazão do ar e pressão interna do leito;
- iii. desenvolvimento e aprimoramento de tubo de Venturi manufaturado por meio de impressão 3D;
- iv. desenvolvimento de um novo tipo de calador para extrair amostras de reatores em leito fluidizado e que podem ser aplicados em leitos opacos (sem ser de acrílico).

O projeto e a construção dos reatores foram etapas fundamentais para o avanço da pesquisa, uma vez que permitiram a condução de experimentos específicos para o estudo, especialmente no contexto da mudança de escala em sistemas de leito fluidizado. A concepção dos reatores viabilizou a implementação de diferentes configurações experimentais, o que foi decisivo para a avaliação dos efeitos dos quatro fatores estudados sobre as variáveis resposta.

Além do desenvolvimento dos sistemas e dispositivos mencionados, foram obtidos resultados na parte experimental em leitos fluidizados, com foco em mudança de escala. Todos os resultados de fluidização estão resumidos no Quadro 3 juntamente com o conjunto de melhor configuração dos 4 fatores para cada variável resposta.

Quadro 3 - Resumo dos Resultados para os experimentos da matriz L9

Variável Resposta	Fator (organizado por ordem de importância)	Amplitude	F_0	$F_0 > 19$	$F_0 > 2$	Melhor Condição
Velocidade Mínima de Fluidização (m/s)	Diâmetro (Escala)	9,84	30,88	sim	sim	A3
	Proporção Casca/Areia	2,85	2,63	não	sim	C1
	Velocidade do Gás	0,00	0,00	não	não	B1
	Altura Inicial do Leito	1,03	0,16	não	não	D2
Vazão volumétrica Mínima de Fluidização (m^3/s)	Diâmetro (Escala)	11,56	76,58	sim	sim	A1
	Proporção Casca/Areia	2,85	6,05	não	sim	C1
	Velocidade do Gás	0,00	0,00	não	não	B3
	Altura Inicial do Leito	1,03	2,65	não	sim	D3
Expansão do leito (adm)	Altura Inicial do Leito	1,96	2,17	não	sim	D3
	Diâmetro (Escala)	1,71	2,12	não	sim	A3
	Proporção Casca/Areia	1,29	0,00	não	não	C1
	Velocidade do Gás	1,17	1,20	não	não	B1
Altura do Leito Fluidizado (mm)	Diâmetro (Escala)	9,20	46,31	sim	sim	A1
	Altura Inicial do Leito	7,60	32,11	sim	sim	D1
	Proporção Casca/Areia	1,37	1,53	não	não	C2
	Velocidade do Gás	1,36	0,00	não	não	B3
Diâmetro das bolhas (mm)	Diâmetro (Escala)	7,05	2,89	não	sim	A1
	Altura Inicial do Leito	7,01	1,79	não	não	D1
	Velocidade do Gás	5,09	0,00	não	não	B1
	Proporção Casca/Areia	3,12	1,25	não	não	C3
Índice de mistura (%)	Proporção Casca/Areia	2,13	7,25	não	sim	C3
	Altura Inicial do Leito	1,57	3,96	não	sim	D3
	Diâmetro (Escala)	1,31	2,79	não	sim	A2
	Velocidade do Gás	0,72	0,00	não	não	B2

Fonte: Autoria Própria

Considerando as colunas $F_0 > 19$ e $F_0 > 2$, elas representam o nível de significância e de relevância dos fatores, respectivamente. Se o valor em ambas as colunas for “sim”, ele deve ser considerado no projeto. Se ambas forem “não”, o fator tem pouca influência e pode ser ignorado. Se apenas a coluna $F_0 > 2$ for “sim”, ele pode ser considerado ou não no processo, dependendo se o engenheiro tiver uma abordagem mais abrangente ou não.

5.4.1 Velocidade mínima (U_{mf}) e Vazão volumétrica mínima (Q_{mf})

Essas duas variáveis representam aspectos distintos, mas interdependentes, da fluidização: a velocidade do gás na condição de mínima fluidização e a vazão total necessária para promovê-la, considerando a área da seção transversal. O diâmetro do leito (fator A) foi o mais relevante e significativo em ambos os casos, confirmando que a geometria do sistema é o principal determinante do ponto de fluidização.

A proporção mássica de casca (fator C) também demonstrou relevância prática para a U_{mf} , indicando que a menor densidade média do leito altera o regime de escoamento necessário para fluidização. No entanto, sua influência sobre a Q_{mf} é menos pronunciada.

A razão entre altura e diâmetro (fator D) teve influência marginal sobre a U_{mf} , mas atingiu nível relevante na Q_{mf} , o que sugere que o volume total de material influencia diretamente a vazão exigida. A velocidade do ar (fator B), embora fundamental como variável de operação, não influenciou estatisticamente os resultados, uma vez que a U_{mf} é uma propriedade do sistema e não controlável a partir da própria velocidade de escoamento.

Se quiser minimizar U_{mf} , a recomendação é focar apenas nos fatores com as seguintes configurações:

- Maximizar Diâmetro (Escala) - A3;
- Minimizar Proporção Casca/Areia - C1.

Outro fator importante notado nos experimentos é que muitas das equações de predição de U_{mf} usadas para auxiliar na fase de projetos de reatores de leito fluidizado (entre outras aplicações), não consideram o fator escala, que é essencial para uma predição mais exata.

Isso torna necessário fazer experimentos com outros materiais particulados (biomassa e granulometrias diferentes de areia), englobando diversas propriedades diferentes, o que possibilitaria em uma equação robusta de predição de U_{mf} , acrescentando o fator de diâmetro interno do reator.

5.4.2 Altura total do leito fluidizado (H) e Expansão relativa ($\delta = H/H_0$)

Essas variáveis refletem a resposta física do leito ao regime de fluidização, em termos absolutos (altura final) e relativos (grau de expansão). A análise conjunta mostra que o diâmetro da câmara (fator A) e a altura inicial do leito (fator D) foram fatores relevantes nos dois casos, embora com tendências opostas nas duas variáveis: enquanto o aumento de A e D eleva a altura absoluta do leito, ele reduz a expansão relativa (δ).

A proporção de casca teve efeito pequeno ou irrelevante nas duas variáveis, indicando que, apesar de alterar a densidade média, não teve força suficiente para modificar significativamente o comportamento expansivo do leito. A velocidade do gás novamente mostrou influência desprezível.

Se quiser minimizar H, a recomendação é focar apenas nos fatores com as seguintes configurações:

- Minimizar Diâmetro (Escala) - A1;
- Minimizar Altura inicial do Leito - D1.

Outra consideração a ser feita é que se for utilizar dados de experimentos feitos em reatores de menor escala para projetar reatores de escala industrial, a relação entre altura de fluidização H e a escala não é direta, havendo uma redução na expansão do leito.

5.4.3 Diâmetro médio das bolhas (d_b)

Embora não tenha sido estatisticamente significativo, o diâmetro da câmara apresentou relevância prática sobre o crescimento das bolhas: ambientes mais largos favorecem coalescência e crescimento de bolhas. A altura do leito teve efeito moderado, possivelmente por afetar o tempo de residência e a taxa de colisões.

A proporção de casca e a velocidade do gás não apresentaram influência clara, apesar da expectativa teórica. Isso pode indicar que, na faixa de operação adotada, o crescimento das bolhas foi mais sensível à geometria do que ao regime de escoamento ou à composição do leito.

Se quiser minimizar d_b , a recomendação é focar principalmente no seguinte fator:

- Minimizar Diâmetro (Escala) – A1;

Esse resultado vai em oposição a necessidade de normalmente ampliar a escala dentro da engenharia e não reduzi-la. Portanto, isso se torna um problema quando o objetivo é aplicar um reator de leito fluidizado em escala industrial.

Contudo, dois destaques são importantes: talvez seja necessário fazer uma análise com maior número de amostras e com um processo de tratamento de imagens mais refinado para chegar a um resultado mais confiável; outros fatores não considerados no atual trabalho podem afetar bastante o diâmetro das bolhas, como algumas características da placa distribuidora. Inclusive, mudar as configurações da placa distribuidora, reduzindo área livre (área total dos furos), sem precisar necessariamente diminuir a escala de todo o sistema pode ser uma forma de contornar esse problema e modificar o diâmetro médio das bolhas.

5.4.4 Índice de mistura (M)

A proporção de casca foi o fator mais relevante sobre a mistura, o que é esperado, uma vez que a introdução de partículas leves favorece a movimentação relativa e a homogeneização. A altura inicial e o diâmetro da câmara também influenciaram de forma significativa, sugerindo que o espaço disponível para a circulação interna das partículas é determinante para o grau de mistura.

A velocidade do gás, mais uma vez, mostrou efeito desprezível, reforçando que, nesse sistema, a mistura é controlada mais por características do leito e dos sólidos do que por parâmetros operacionais.

Se quiser maximizar M, a recomendação é focar apenas nos fatores com as seguintes configurações:

- Maximizar Proporção Casca/Areia - C3;
- Maximizar Altura Inicial - D3;
- Ajustar Diâmetro (Escala) - A2.

Importante notar que a maximizar a proporção mássica de casca (fator C) deve ser feito com parcimônia, considerando que isso pode acarretar em pontos de estagnação da casca.

Além disso, também foram propostas novas equações para medir o índice de Mistura (Equações (37) e (38)), conseguindo capturar melhor o estado interno dos particulados no

reator.

5.4.5 Resumo Geral para Projeto e Escala

As seguintes diretrizes podem ser usadas como regra geral para os casos estudados no auxílio de projetos de reatores de leito fluidizado:

- i. Diâmetro da câmara (A): fator mais crítico. Deve ser considerado central no dimensionamento de todos os parâmetros.
- ii. Altura inicial do leito (D): relevante para altura final, expansão e mistura. Essencial para estimativas de desempenho dinâmico.
- iii. Proporção de casca (C): deve ser ajustada com base no tipo de resposta desejada (mistura ou estabilidade).
- iv. Velocidade do gás (B): teve pouca influência nas respostas medidas. Deve ser usada como variável de controle operacional, e não como parâmetro de projeto (considerando apenas o regime borbulhante e casca de arroz).

Com base nos resultados experimentais obtidos e na análise estatística conduzida neste trabalho, é possível propor uma configuração recomendada para reatores de maior escala voltados a processos termoquímicos com biomassa, como a combustão de casca de arroz. O Quadro 4 a seguir apresenta os níveis dos fatores avaliados, suas respectivas traduções para valores reais e uma justificativa técnica para a escolha de cada condição.

A escolha de reatores com diâmetro interno de 240 mm é sustentada pelos resultados obtidos para U_{mf} , Q_{mf} e diâmetro de bolhas, indicando que o aumento da escala reduz a velocidade mínima necessária para fluidização, mesmo com maior vazão total, além de reduzir a expansão do leito.

A altura inicial de 1,5 vezes o diâmetro ($H_0 = 360$ mm) demonstrou ser benéfica para a mistura e a estabilidade do leito, aumentando a homogeneidade entre as fases sólidas sem comprometer a expansão total. O uso de 5% de casca de arroz na mistura com areia gerou os melhores índices de mistura, apesar do risco de formação de canais preferenciais, o qual pode ser minimizado com uma placa distribuidora bem projetada.

Quadro 4 - Configuração recomendada para reatores de larga escala com casca de arroz

Fator	Nível Recomendado	Valor Real	Justificativa resumida
Diâmetro do Reator (D_{fb})	Maior (A3)	240 mm	Reduz U_{mf} , aumenta mistura e favorece regime borbulhante estável
Altura Inicial (H_0)	Maior (D3)	360 mm	Maximiza mistura e tempo de residência
Proporção Casca/Areia (X_{ca})	Maior (C3)	5%	Promove melhor homogeneização e dispersão da biomassa
Velocidade do Gás (U_g/U_{mf})	Intermediária (B2)	1,25	Garante fluidização eficiente sem formar bolhas excessivas

Fonte: Autoria Própria

Por fim, a velocidade superficial do gás ajustada para aproximadamente $U_g/U_{mf} = 1,25$ mostrou-se suficiente para garantir uma boa fluidização sem promover instabilidades indesejadas como coalescência excessiva de bolhas. Em conjunto, essa configuração representa uma base sólida para o projeto de reatores em escala piloto ou industrial voltados ao aproveitamento energético da casca de arroz.

Entretanto, maiores aprofundamentos desses resultados são necessários com sua aplicação em casos que envolvem processo termoquímicos. Sistemas com essa camada extra de complexidade podem dificultar a análise, mas são realmente os processos que ocorrem na indústria quando a tecnologia é aplicada de forma prática. Portanto, essas variáveis a mais podem afetar os resultados obtidos no experimento a frio, embora esses valores possam servir como uma boa base de referência.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram projetados, construídos e testados experimentalmente seis reatores de leito fluidizado borbulhante em diferentes escalas, com o objetivo de investigar a influência da mudança de escala sobre variáveis-chave da fluidização em sistemas contendo misturas de areia e casca de arroz. A pesquisa envolveu tanto o desenvolvimento de dispositivos específicos quanto a execução de experimentos sistemáticos com base na metodologia Taguchi (matriz L9) e análises complementares de ANOVA.

Do ponto de vista de projeto, destacam-se como principais contribuições:

- a construção de 6 sistemas completos de fluidização a frio com diferentes geometrias;
- o desenvolvimento de um tubo de Venturi por manufatura aditiva, dimensionado segundo a norma ISO 5167, com impacto direto na confiabilidade da medição de vazão;
- o aprimoramento de um sistema parcialmente automatizado para aquisição de dados de pressão e vazão;
- a criação de um novo tipo de calador, aplicável a diferentes tipos de leito (não apenas os de acrílico), capaz de extrair amostras sem comprometer o comportamento do leito.

Nos experimentos, quatro fatores de controle foram analisados: diâmetro interno da câmara (A), velocidade do gás (B), proporção de casca de arroz (C) e altura inicial do leito (D). Os resultados permitiram identificar, para cada variável resposta, os fatores mais relevantes e as melhores condições de operação, conforme resumido abaixo:

Para minimizar a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}): o fator mais significativo foi o diâmetro da câmara (A), sendo a melhor condição o nível A3 (maior diâmetro). A menor U_{mf} foi obtida com A3C1, evidenciando que sistemas maiores e com menor proporção de casca demandam menor velocidade para iniciar a fluidização.

Para minimizar a vazão mínima (Q_{mf}): a melhor condição foi A1C1D3, destacando que reatores mais estreitos, com menos casca e leitos mais altos requerem menor vazão em

termos absolutos.

Para maximizar a expansão do leito (δ): a melhor configuração foi A3D3, mas com destaque para a influência relativa da altura inicial. A expansão foi maior em sistemas com leitos mais baixos e menores diâmetros.

Para minimizar o diâmetro médio das bolhas (d_b): o diâmetro do leito (fator A) foi novamente o mais relevante, sendo A1 a melhor condição. Bolhas menores foram observadas em sistemas de menor diâmetro, com valores médios de 7 a 8 mm, enquanto sistemas maiores apresentaram bolhas acima de 16 mm.

Para maximizar a mistura (M): a configuração ideal foi C3D3A2, revelando que maiores proporções de casca de arroz, leitos mais altos e dimensões intermediárias da câmara favorecem a homogeneização. O índice de mistura atingiu valores superiores a 0,9 nas melhores condições.

Esses resultados demonstram que o diâmetro do reator (escala) é o fator mais crítico para o projeto de sistemas de leito fluidizado, impactando significativamente tanto o ponto de fluidização quanto a formação de bolhas e o comportamento expansivo do leito. A proporção de casca de arroz, por sua vez, é fundamental para promover mistura, mas deve ser utilizada com cautela para evitar zonas de estagnação. A altura inicial do leito tem papel determinante na altura final e na eficiência da mistura interna, sendo especialmente relevante em aplicações térmicas e de secagem.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que modelos tradicionais de predição de U_{mf} não são suficientes para projetos em múltiplas escalas, pois ignoram a influência geométrica do sistema. Assim, uma contribuição direta desta tese é evidenciar a necessidade de incluir o fator "escala" (diâmetro interno) nas equações de predição de U_{mf} e Q_{mf} para aplicações industriais.

Dessa forma, para projetar um sistema em escala piloto ou industrial com as condições analisadas, recomenda-se:

- Utilizar reatores de maior diâmetro para minimizar U_{mf} ;
- Ajustar a altura do leito e a proporção de casca conforme a prioridade entre mistura e estabilidade;
- Evitar confiar apenas na velocidade do gás como variável de projeto, uma vez que esta se mostrou estatisticamente irrelevante para a maioria das variáveis estudadas

no regime borbulhante com biomassa leve.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento desta pesquisa, sugere-se:

A realização de experimentos com diferentes tipos de biomassa e faixas granulométricas para ampliar a aplicabilidade dos modelos;

A proposta de novas equações empíricas de predição de U_{mf} e Q_{mf} incorporando variáveis de escala;

A aplicação da metodologia desenvolvida em leitos com reações térmicas ou catalíticas, validando os efeitos observados em sistemas reativos;

O uso de técnicas de processamento de imagem mais refinadas para análise da dinâmica das bolhas.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M. Z.; HUSAIN, Z.; YIN PONG, S. L. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 24, n. 6, p. 487-494, 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953402001502>. Acesso em: 5 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. São Paulo: ABNT, 2003. Disponível em: www.abnt.org.br. Acesso em: 25 nov. 2024.
- ACEN, C.; BAMISILE, O.; CAI, D.; UKWUOMA, C. C.; OBIORA, S.; HUANG, Q.; UZUN OZSAHIN, D.; ADUN, H. The complementary role of carbon dioxide removal: A catalyst for advancing the COP28 pledges towards the 1.5 C Paris Agreement target. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 947, p. 174302, 2024.
- ALGHAMDI, Y. A.; PENG, Z.; ALMUTAIRI, Z.; ALIBRAHIM, H.; AL-ALWEET, F. M.; MOGHTADERI, B.; DOROODCHI, E. Assessment of correlations for minimum fluidization velocity of binary mixtures of particles in gas fluidized beds. **Powder Technology**, Lausanne, v. 394, p. 1231-1239, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591021008287>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- ALMENDROS-IBÁÑEZ, J. A.; SÁNCHEZ-DELGADO, S.; SOBRINO, C.; SANTANA, D. Experimental observations on the different mechanisms for solid ejection in gas-fluidized beds. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 48, n. 3, p. 734-744, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0255270108001840>. Acesso em: 8 nov. 2024
- ANDERSON, T. B.; JACKSON, R. Fluid mechanical description of fluidized beds: Equations of Motion. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, Washington, v. 6, n. 4, p. 527-539, 1967.
- ÁVILA, I.; CRNKOVIC, P. M.; LUNA, C. M. R.; MILIOLI, F. E. Use of a fluidized bed combustor and thermogravimetric analyzer for the study of coal ignition temperature. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 114, p. 984-992, 2017. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116335980>. Acesso em: 10 nov. 2024
- BALESTIERI, F. M. P.; LUNA, C. M. R.; ÁVILA, I. Investigating the influence of distributor type, particle size and rice husk percentage on fluidized beds through cold fluidization experiments. **Energies**, Basel, v. 16, n. 22, p. 7574, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/22/7574>. Acesso em: 1 jun. 2025
- BALESTIERI, F. M. P. **Influência do tipo de distribuidor na fluidodinâmica de uma mistura biomassa-areia em leito fluidizado**. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/183623/balestieri_fmp_me_guara.pdf?sequence=5. Acesso em: 3 jun. 2024

BEHZADI, S.; TOEGEL, S.; VIERNSTEIN, H. Innovations in coating technology. **Recent Patents on Drug Delivery and Formulation**, Sharjah, v. 2, n. 3, p. 209-230, 2008.

Disponível em:

<http://www.eurekaselect.com/openurl/content.php?genre=article&issn=1872-2113&volume=2&issue=3&spage=209>. Acesso em: 1 jun. 2025

BIGLARI, M.; LIU, H.; ELKAMEL, A.; LOHI, A. Application of scaling-law and CFD modeling to hydrodynamics of circulating biomass fluidized bed gasifier. **Energies**, Basel, v. 9, n. 7, 2016.

BONNIOL, F.; SIERRA, C.; OCCELLI, R.; TADRIST, L. Similarity in dense gas-solid fluidized bed, influence of the distributor and the air-plenum. **Powder Technology**, Lausanne, v. 189, n. 1, p. 14-24, 2009.

BRIONGOS, J. V.; GUARDIOLA, J. New methodology for scaling hydrodynamic data from a 2D-fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 60, n. 18, p. 5151-5163, 2005.

BROADHURST, T. E.; BECKER, H. A. Onset of fluidization and slugging in beds of uniform particles. **AIChE Journal**, New York, v. 21, n. 2, p. 238-247, 1975.

CALISKAN SARIKAYA, A.; HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S. Effects of pretreatment outside of torrefaction range on combustion characteristics of chars from lignocellulosic biomass. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, New York, v. 11, n. 5, p. 1, 2019. Disponível em:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/thermalscienceapplication/article/doi/10.1115/1.4042589/727783/Effects-of-Pretreatment-Outside-of-Torrefaction>. Acesso em: 5 maio 2025

CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D.; BRITO, P.; HALL, M. J.; TARELHO, L. Comparative scaling analysis of two different sized pilot-scale fluidized bed reactors operating with biomass substrates. **Energy**, Basel, v. 151, p. 520-535, 2018.

CHÁVEZ, J. G. V. **Modelagem de um Leito Fluidizado Borbulhante de Grande Escala para Combustão de Biomassa**. 2017. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

CHEW, J. W.; LAMARCHE, W. C. Q.; COCCO, R. A. 100 years of scaling up fluidized bed and circulating fluidized bed reactors. **Powder Technology**, Heyden, v. 409, p. 117813, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117813>. Acesso em: 5 maio 2025

COCCO, R.; KARRI, S. B. R.; KNOWLTON, T. **Introduction to fluidization**. Aiche, New York, 2014. Disponível em:

<https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20141121.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025

COCCO, R.; SHAFFER, F.; HAYS, R.; REDDY KARRI, S. B.; KNOWLTON, T. Particle clusters in and above fluidized beds. **Powder Technology**, Heyden, v. 203, n. 1, p. 3-11, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591010001518>. Acesso em: 18 mar. 2025.

COUTO, N.; SILVA, V. B.; BISPO, C.; ROUBOA, A. From laboratorial to pilot fluidized bed reactors: Analysis of the scale-up phenomenon. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 119, p. 177-186, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.085>. Acesso em: 1 jun. 2025

CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 62, n. 1-2, p. 45-55, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250906004842>. Acesso em: 9 de ago. 2024

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, G. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 48, p. 75-89, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.11.005>. Acesso em: 18 mar. 2025

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, New York, v. 48, p. 89-94, 1952.

FAÉ GOMES, G. M.; PHILIPSEN, C.; BARD, E. K.; ZEN, L. D.; SOUZA, G. Rice husk bubbling fluidized bed combustion for amorphous silica synthesis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 2278-2290, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343716301282>. Acesso em: 1 jun. 2025

FLORES, C. G.; SCHNEIDER, H.; DORNELLES, J. S.; GOMES, L. B.; MARCILIO, N. R.; MELO, P. J. Synthesis of potassium zeolite from rice husk ash as a silicon source. **Cleaner Engineering and Technology**, Oxford, v. 4, p. 100201, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100201>. Acesso em: 1 jun. 2025

FOWLES, G.; BOYES, W. H. **Instrumentation reference book**. 4 ed. Burlington: Elsevier, 2010.

GELDART, D. Types of fluidization. **Powder Technology**, Lausanne, v. 7, p. 285-292, 1973. Disponível em: <http://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000 CE/PDF/Pow Tec7, 285.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2024

GIBILARO, L. G. **Fluidization-dynamics**: the formulation and applications of a predictive theory for the fluidized state. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

GLERUM, M. W. J.; BOIES, A. M. Reactor processes for value added carbon synthesis and turquoise hydrogen. **Advances in Chemical Engineering**. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065237723000029>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GLICKSMAN, L.R. Scaling relationships for fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 39, n. 9, p. 1373-1379, 1984.

GLICKSMAN, L. R. Scaling relationships for fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 39, n. 9, p. 1373-1379, 1984. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250984800706>. Acesso em: 18 mar. 2025

GLICKSMAN, L. R.; HYRE, M.; WOLOSHUN, K. Simplified scaling relationships for fluidized beds. **Powder Technology**, Lausanne, v. 77, n. 2, p. 177-199, 1993. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003259109380055F>. Acesso em: 1 jun. 2025

GU, J.; LIU, Q.; ZHONG, W.; YU, A. Study on scale-up characteristics of oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation. **Advanced Powder Technology**, Durnten, v.31, n.5, p.2136-2151, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.03.007>. Acesso em: 1 jun. 2025

GYENIS, J. Assessment of mixing mechanism on the basis of concentration pattern. **Chemical Engineering and Processing**, Lausanne, v. 38, p. 665-674, 1999.

HMA INSTRUMENTATION. **Venturi tubes and venturi nozzles**. Nova Gales do Sul: HMA, 2018. Disponível em: http://hmagrp.com/wp-content/uploads/2018/03/INS-DS-0049-Venturi-Tubes-_Venturi-Nozzles.pdf. Acesso em: 24 jan. 2023.

HÖÖK, M.; TANG, X. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change: A review. **Energy Policy**, Guildford, v. 52, p. 797-809, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512009275>. Acesso em: 24 mar. 2025

HORIO, M.; NONAKA, A.; SAWA, Y.; MUCHI, I. A new similarity rule for fluidized bed scale-up. **AIChE Journal**, New York, v. 32, n. 9, p. 1466-1482, 1986. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690320908>. Acesso em: 6 dez. 2023.

HUANG, A. N.; KUO, H. P. Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems - A review. **Advanced Powder Technology**, Kyoto, v. 25, n. 1, p. 163-173, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2013.10.007>. Acesso em: 16 nov. 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2018**. Paris: IEA, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5167-1**: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1: General principles and requirements, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5167-4**: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full- Part 4: Venturi Tubes, 2003.

KALTSCHMITT, M. Biomass as renewable source of energy: possible conversion routes. *In* p. 353-389. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-7813-7_244. Acesso em: 24 mar. 2025

KARATEPE, N.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Proximate analysis of some turkish lignites by thermogravimetry. **Thermochimica Acta**, New York, v. 213, p. 147-150, 1993. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004060319380012Y>. Acesso em: 1 jun. 2025.

KARMAKAR, M. K.; MANDAL, J.; HALDAR, S.; CHATTERJEE, P. K. Investigation of fuel gas generation in a pilot scale fluidized bed autothermal gasifier using rice husk. **Fuel**, Guildford, v. 111, p. 584-591, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.045>. Acesso em: 1 jun. 2025

KARRI, S. B. R.; KNOWLTON, T. M. Gas distributor and plenum design in fluidized beds. **Fluidization, solids handling, and processing**. [S. l.], p. 209-235, 1999. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780815514275500065>. Acesso em: 16 nov. 2024

KELKAR, V. V.; NG, K. M. Development of fluidized catalytic reactors: screening and scale-up. **AIChE Journal**, New York, v. 48, n. 7, p. 1498-1518, 2002.

KRAFT, S.; KIRNBAUER, F.; HOFBAUER, H. Investigations using a cold flow model of char mixing in the gasification reactor of a dual fluidized bed gasification plant. **Powder Technology**, Lausanne, v. 316, p. 687-696, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.032>. Acesso em: 24 mar. 2025.

KRAPIVIN, V. F.; VAROTSOS, C. A.; SOLDATOV, V. Y. Simulation results from a coupled model of carbon dioxide and methane global cycles. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 359, p. 69-79, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.023>. Acesso em: 1 jun. 2025.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2.nd. ed. Fukui: Elsevier, 1991. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090241900>. Acesso em: 16 nov. 2024.

LECKNER, B.; SZENTANNAI, P.; WINTER, F. Scale-up of fluidized-bed combustion-a review. **Fuel**, Guilford, v. 90, n. 10, p. 2951-2964, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.04.038>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LI, H.; HUANG, J.; LIU, Z.; LV, M.; JI, C. Experimental quantification of the lateral mixing of binary solids in bubbling fluidized beds. **Energies**, Basel, v. 14, n. 22, 2021.

LI, Z.; ZHONG, Z.; ZHANG, B.; WANG, W.; ZHAO, H.; BEN, H. Parametric study of the catalytic fast pyrolysis of rice husk over hierarchical micro-mesoporous composite catalyst in a microwave-heated fluidized bed. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 157, p. 105210, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237021001960>. Acesso em: 24 maio 2022.

LUNDBERG, L.; SORIA-VERDUGO, A.; PALLARÈS, D.; JOHANSSON, R.; THUNMAN, H. The role of fuel mixing on char conversion in a fluidized bed. **Powder Technology**, Lausanne, v. 316, p. 677-686, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.060>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LV, B.; LUO, Z.; ZHANG, B.; QIN, X. Particle mixing and separation performance of gas-solid separation fluidized beds containing binary mixtures. **Fuel**, Guildford, v. 226, p. 462-471, 2018. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236118306616>. Acesso em: 16 set. 2024

MANDAL, N. G. Measurement of volume and flow in gases. **Anaesthesia and Intensive Care Medicine**, Abingdon, v. 10, n. 1, p. 52-56, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.11.011> Acesso em: 1 jun. 2025

MANU, J.; KAILAS, T. G.; MADAV, V. Exploring the synergetic effects of rice husk, cashew shell, and cashew husk biomass blends on fluidized bed gasification for enhanced hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 419, p. 137991, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652623021492>. Acesso em: 16 set. 2024

MARKEEV, V. B.; BLYNSKAYA, E. V.; TISHKOV, S. V.; ALEKSEEV, K. V.; ALEKSEEV, V. K. Application of mixing indices in modeling processes in pharmaceutical production. **Pharmaceutical Chemistry Journal**, New York, v. 57, n. 3, p. 430-440, 2023.

MATSEN, J. M. Scale-up of fluidized bed processes: principle and practice. **Powder Technology**, Lausanne, v. 88, n. 3, p. 237-244, 1996.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, London, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12058829>. Acesso em: 16 set. 2024.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, London, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852401001195>. Acesso em: 1 jun. 2025.

NADALETI, W. C. Utilization of residues from rice parboiling industries in southern Brazil for biogas and hydrogen-syngas generation: Heat, electricity and energy planning. **Renewable Energy**, Oxford, v. 131, p. 55-72, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118307997>. Acesso em: 1 jun. 2025.

OLIVEIRA, T. J. P.; CARDOSO, C. R.; ATAÍDE, C. H. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 72, p. 113-121, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2013.06.010>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PARK, H. C.; CHOI, H. S. The segregation characteristics of char in a fluidized bed with varying column shapes. **Powder Technology**, Lausanne, v. 246, p. 561-571, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.06.019>. Acesso em: 16 set. 2024.

PARK, S. J.; SON, S. H.; KOOK, J. W.; RA, H. W.; YOON, S. J. S. M.; MUN, T.-Y. Y.; MOON, J. H.; YOON, S. J. S. M.; KIM, J. H.; KIM, Y. K.; LEE, J. G.; LEE, D.-Y. Y.; SEO, M. W. Gasification operational characteristics of 20-tons-per-day rice husk fluidized-bed reactor. **Renewable Energy**, Oxford, v. 169, p. 788-798, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148121000513>. Acesso em: 12 maio 2022.

PARKER, J.; LAMARCHE, K.; CHEN, W.; WILLIAMS, K.; STAMATO, H.; THIBAULT, S. CFD simulations for prediction of scaling effects in pharmaceutical

fluidized bed processors at three scales. **Powder Technology**, Lausanne, v. 235, p. 115-120, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.021>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PÉCORA, A. A. B.; ÁVILA, I.; LIRA, C. S.; CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical-chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 124, p. 188-197, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.003>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PORCU, A.; SOLLAI, S.; MAROTTO, D.; MUREDDU, M.; FERRARA, F.; PETTINAU, A. Techno-economic analysis of a small-scale biomass-to-energy BFB gasification-based system. **Energies**, Basel, v. 12, n. 3, p. 494, 2019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/494>. Acesso em: 1 jun. 2025.

QIAOQUN, S.; HUILIN, L.; WENTIE, L.; YURONG, H.; LIDAN, Y.; GIDASPOW, D. Simulation and experiment of segregating/mixing of rice husk-sand mixture in a bubbling fluidized bed. **Fuel**, Guilford, v. 84, n. 14-15, p. 1739-1748, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236104003278>. Acesso em: 16 set. 2024.

QUISPE, I.; NAVIA, R.; KAHHAT, R. Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. **Waste Management**, London, v. 59, p. 200-210, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.001>. Acesso em: 1 jun. 2025.

RAO, T. R.; RAM. BHEEMARASETTI, J.V. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands. **Energy**, Basel, v. 26, n. 6, p. 633-644, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544201000147>. Acesso em: 1 jun. 2025.

RAZZAQUE, M. A. **Development and assessment of a fast pyrolysis reactor for bio-oil, syngas and bio-char production from biomass residues**. 2016. 215 f.. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Nottingham, Nottingham, 2016.

ROMERO, J. B.; JOHANSON, L. N. Factors affecting fluidized bed quality. **Chemical Engineering Progres Symposium Series**, New York, p. 28-37, 1962.

RORATO, R.; ARROYO, M.; ANDÒ, E.; GENS, A. Sphericity measures of sand grains. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 254, p. 43-53, 2019.

RÜDISÜLI, M.; SCHILDHAUER, T. J.; BIOLLAZ, S. M. A. A.; VAN OMMEN, J. R. Scale-up of bubbling fluidized bed reactors - a review. **Powder Technology**, Lausanne, 217, p. 21-38, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.004>. Acesso em: 16 set. 2024.

SAMPAT, C.; BARANWAL, Y.; PARASKEVAKOS, I.; JHA, S.; IERAPETRITOU, M.; RAMACHANDRAN, R. HPC enabled parallel, multi-scale and mechanistic model for high shear granulation using a coupled DEM-PBM framework. **Computer Aided Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 44, p. 1459-1464, 2018.

SÁNCHEZ-DELGADO, S.; ALMENDROS-IBÁÑEZ, J. A.; GARCÍA-HERNANDO, N.;

SANTANA, D. On the minimum fluidization velocity in 2D fluidized beds. **Powder Technology**, Lausanne, v. 207, n. 1-3, p. 145-153, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591010005553>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SARBANHA, A. A.; LARACHI, F.; TAGHAVI, S. M. Solids mixing in marinized bubbling fluidized beds: gas distribution study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Texas, 2023.

SCHOUTEN, J. C.; VANDER STAPPEN, M. L. M.; VAN DEN BLEEK, C. M. Scale-up of chaotic fluidized bed hydrodynamics. **Chemical Engineering Science**, London, v. 51, n. 10, p. 1991-2000, 1996. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030131403&partnerID=40&md5=5b7875d4b6f94e12391325d067d8d139>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SEDDIGHI, S.; CLOUGH, P. T.; ANTHONY, E. J.; HUGHES, R. W.; LU, P. Scale-up challenges and opportunities for carbon capture by oxy-fuel circulating fluidized beds. **Applied Energy**, London, v. 232, p. 527-542, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.167>. Acesso em: 23 ago. 2024.

SHARMA, R. K.; MAGOO, A.; SINGH, G.; VERMA, N.; VERMA, A. Fluidization study of rice husk, wheat straw and cotton stalk in a cold fluidized bed. **Journal of Basic and Applied Engineering Research**, Nova Deli, v. 2, n. 16, p. 1330-1333, 2015.

SHEN, L.; JOHNSON, F.; LECKNER, B. Digital image analysis of hydrodynamics two-dimensional bubbling fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, London, v. 59, n. 13, p. 2607-2617, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250904001551>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SHUKRIE, A.; ANUAR, S.; OUMER, A. N. Air distributor designs for fluidized bed combustors: a review. **Engineering, Technology and Applied Science Research**, Patras, v. 6, n. 3, p. 1029-1034, 2016.

SIERRA, C.; BONNIOL, F.; OCCELLI, R.; TADRIST, L. Practical scaling considerations for dense gas fluidized beds interacting with the air-supply system. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 64, n. 16, p. 3717-3720, 2009.

SINGH, R. I.; KUMAR, R. Current status and experimental investigation of oxy-fired fluidized bed. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 61, p. 398-420, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.021>. Acesso em: 1 jun. 2025.

STEVEN, S.; RESTIAWATY, E.; BINDAR, Y. Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 149, p. 111329, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111329>. Acesso em: 24 jan. 2022.

TASHAKORI-ASFESTANI, F.; KAZEMI, S.; ZARGHAMI, R.; MOSTOUFI, N. Effect of inter-particle forces on solids mixing in fluidized beds. **Powder Technology**, Lausanne, v. 415, 2022, p. 118098, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118098>. Acesso em: 23 ago. 2024.

THAPA, R. K.; HALVORSEN, B. M. Scaling of bubbling fluidized bed reactors with Glicksman's viscous limit set and CFD simulation. **International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements**, Southampton, v. 2, n. 2, p. 135-144, 2014.

TSAMO, C.; KIDWANG, G. D.; DAHAINA, D. C. Removal of rhodamine B from aqueous solution using silica extracted from rice husk. **SN Applied Sciences**, Berlin, v. 2, n. 2, p. 256, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s42452-020-2057-0>. Acesso em: 19 dez. 2024.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. 2012. 191 p.

VAN DEN BLEEK, C. M.; COPPENS, M.-O.; SCHOUTEN, J. C. Application of chaos analysis to multiphase reactors. **Chemical Engineering Science**, London, v. 57, n. 22-23, p. 4763-4778, 2002.

VAN DEN BLEEK, C. M.; SCHOUTEN, J. C. Can deterministic chaos create order in fluidized-bed scale-up?. **Chemical Engineering Science**, London, v. 48, n. 13, p. 2367-2373, 1993.

VAN OMMEN, J. R.; TEULING, M.; NIJENHUIS, J.; VAN WACHEM, B. G. M. Computational validation of the scaling rules for fluidized beds. **Powder Technology**, Lausanne, v. 163, n. 1-2, p. 32-40, 2006.

VARGHESE, M. M.; DEVAN, C. P.; MASRAM, S. M.; VAKAMALLA, T. R. Experimental investigation of the behavior of non-spherical particles in a small-scale gas-solid fluidized bed. **Flow Measurement and Instrumentation**, Guilford, v. 95, 2023, p. 102493, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102493>. Acesso em: 1 jun. 2025.

VIEIRA, F. R. **Estudo experimental da pirólise da casca de arroz em reator de leito fixo**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

VIEIRA, F. R.; ROMERO LUNA, C. M.; ARCE, G. L. A. F.; ÁVILA, I. Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 132, 2020.

WADELL, H. Volume, shape, and roundness of rock particles. **The Journal of Geology**, Illinois, v. 40, n. 5, p. 443-451, 1932. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/623964>. Acesso em: 1 jun. 2025.

WEL, P. V. D. Powder mixing. **Powder Handling Processing**, Clausthal-Zellerfeld, v. 11, p. 83-86, 1999.

WERTHER, J. D. Geldart: gas fluidization technology, **Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie**, Weinheim, v. 91, n. 6, p. 678-679, 1987. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/bbpc.19870910624>. Acesso em: 19 dez. 2024.

XAVIER, T. P.; LIBARDI, B. P.; LIRA, T. S.; BARROZO, M. A. S. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. **Powder Technology**, Lausanne, v. 299, p. 210-216, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.034>. Acesso em: 1 jun. 2025.

XU, H.; SHEN, S.; WANG, W.; MA, C.; ZHANG, H.; ZHANG, M. Numerical simulation study on mixing characteristics of binary Geldart-D particles in a pressurized fluidized bed. **Powder Technology**, Lausanne, v. 410, p. 117838, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117838>. Acesso em: 1 jun. 2025.

YAN, A.; BALL, J.; ZHU, J. Scale-up effect of riser reactors (3) axial and radial solids flux distribution and flow development. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 109, n. 1, p. 97-106, 2005.

YAN, A.; ZHU, J. Scale-up effect of riser reactors (1): Axial and radial solids concentration distribution and flow development. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 43, n. 18, p. 5810-5819, 2004.

YANG, W.C. **Handbook of Fluidization and Fluid-particle Systems**. New York: Marcel Dekker Inc, 2003.

YATES, J. G.; LETTIERI, P. **Fluidized-Bed Reactors: Processes and Operating Conditions**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Particle Technology Series). v. 26. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-39593-7>. Acesso em: 19 dez. 2024.

YVON-DUROCHER, G.; ALLEN, A. P.; BASTVIKEN, D.; CONRAD, R.; GUDASZ, C.; ST-PIERRE, A.; THANH-DUC, N.; DEL GIORGIO, P. A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. **Nature**, London, v. 507, n. 7493, p. 488-491, 2014. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/nature13164>. Acesso em: 26 fev. 2025

ZAID, F. M.; AL-RUBAYE, H.; ALJUWAYA, T. M.; AL-DAHMAN, M. H. Assessment of the dimensionless groups-based scale-up of gas-solid fluidized beds. **Processes**, Basel, v. 11, n. 1, 2023.

ZENG, X.; FANG, M.; SHAN, Y.; LV, T.; CEN, J.; WANG, Q.; WANG, K. Enhanced hydrogen production via staged catalytic gasification of rice husk using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ adsorbent and $\text{Ce-Ni}/\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst in a fluidized bed. **International Journal of Hydrogen Energy**, United Kingdom, v. 48, n. 44, p. 16630-16648, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031992205933X>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ZHANG, J.; GAO, W.; ZHAO, Z.; LIU, Z.; NARUKAWA, M.; SUDA, T.; XU, G. Adaptability verification of scaling law to solid mixing and segregation behavior in bubbling fluidized bed. **Powder Technology**, Lausanne, v. 228, p. 206-209, 2012.

ZHANG, K.; YU, B.; CHANG, J.; WU, G.; WANG, T.; WEN, D. Hydrodynamics of a fluidized bed co-combustor for tobacco waste and coal. **Bioresource Technology**, London,

v. 119, p. 339-348, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.132>. Acesso em: 1 jun. 2025.

APÊNDICE A - Dificuldades Encontradas na Matriz L18

Originalmente planejava-se fazer uma matriz L18 com 5 fatores de controle, sendo eles os 4 fatores atualmente usados nesse trabalho, além de incluir a granulometria da areia. Definiu-se que seriam usados 3 tipos de areia que foram adquiridas do instituto IPT, sendo elas areia fina (150-300 μ m), média (300-600 μ m) e grossa (600-1200 μ m).

O problema encontrado com essas faixas granulométricas é que o sistema utilizado nos experimentos não possuía potência suficiente para conseguir fluidizar a areia grossa e só conseguia fluidizar a areia média em poucas quantidades.

Outro problema encontrado com a matriz original é que haviam sido selecionadas faixas maiores de teste, como velocidades de gás $U_g/U_{mf} = 3$ ou Proporção Mássica de Casca de arroz $X_{ca} = 10\%$. O problema com esses valores é que o sistema até conseguia fluidizar, dependendo do caso, mas alcançava temperaturas mais altas do que o esperado (acima de 90°C). Isso causou o “amolecimento” dos tubos de PVC usados para conectar o compressor radial ao Venturi e ao leito, pois em uma temperatura próxima dessa, o PVC ultrapassa a temperatura de transição vítrea do material. Com isso, o tubo envervou e causou a quebra de um dos Tubos de Venturi. O resultado está exibido na Figura 54.

Figura 54 - Falha nos experimentos da Matriz L18



Fonte: Autoria Própria

Tendo em vista a limitação de tempo, se tornou mais complicado trocar o tubo de

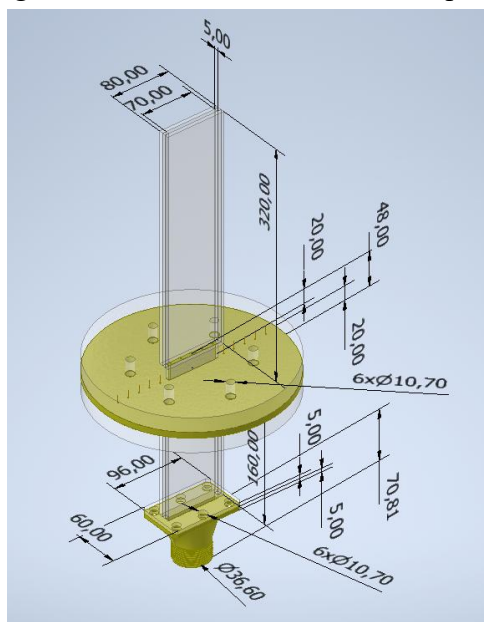
PVC por um tubo de metal (o que resolveria parte dos problemas com a maior temperatura), considerando que isso acarretaria em uma recalibração total dos tubos de Venturi, consumindo ainda mais tempo.

Além disso, alguns pontos da matriz original L18 tornaram praticamente impossível de executar os experimentos, principalmente os que envolviam as areias grossas, devido aos problemas relatados anteriormente.

APÊNDICE B - Detalhamento de Projetos dos Leitos Fluidizados

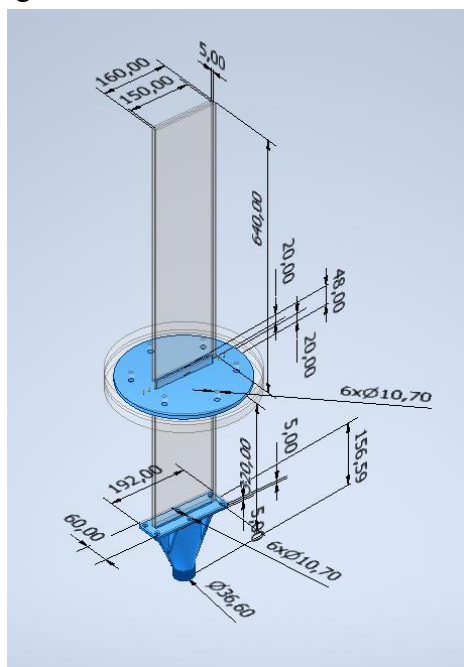
Na Figura 55 a Figura 60 são mostrados os modelos dos Leitos Fluidizados, com as respectivas dimensões.

Figura 55 - Leito Fluidizado 2D Pequeno



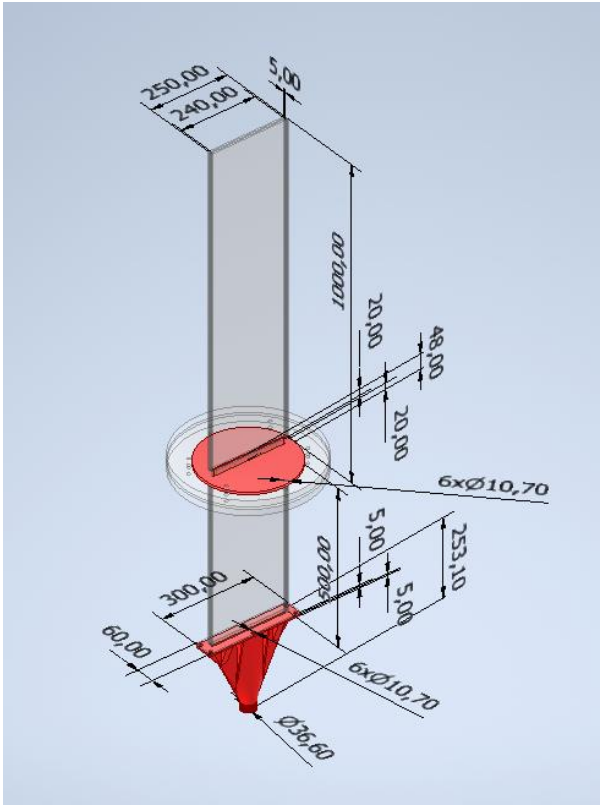
Fonte: Autoria própria

Figura 56 - Leito Fluidizado 2D Médio



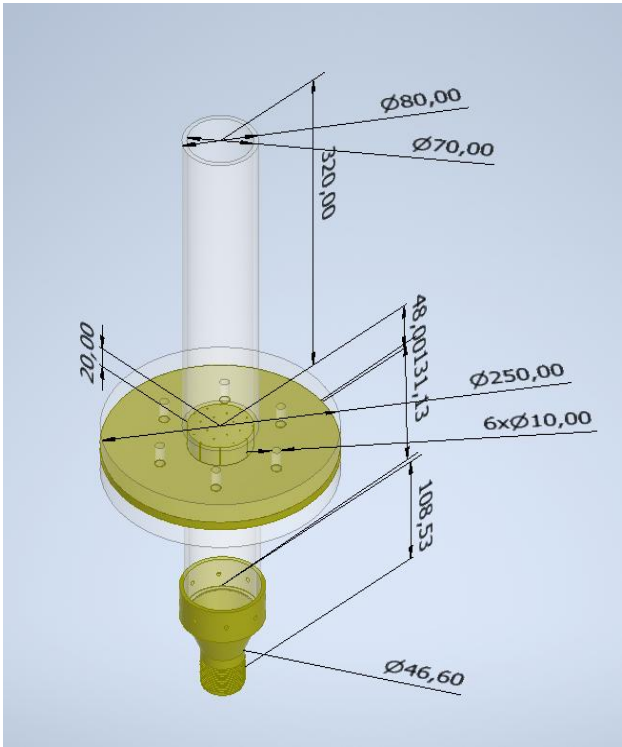
Fonte: Autoria própria

Figura 57 - Leito Fluidizado 2D Grande



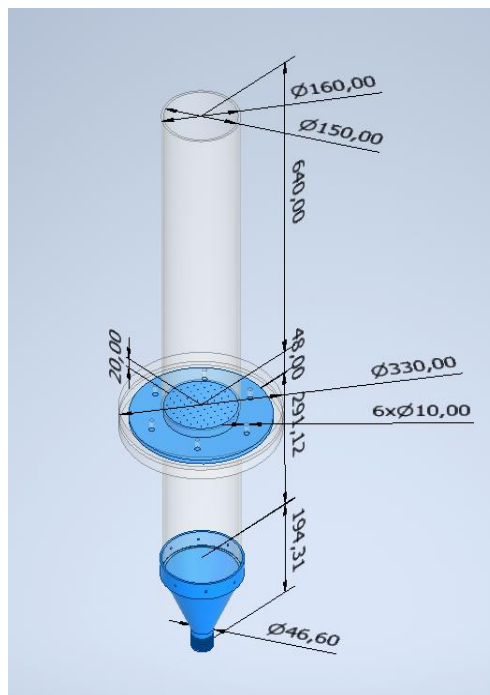
Fonte: Autoria própria

Figura 58 - Leito Fluidizado 3D Pequeno



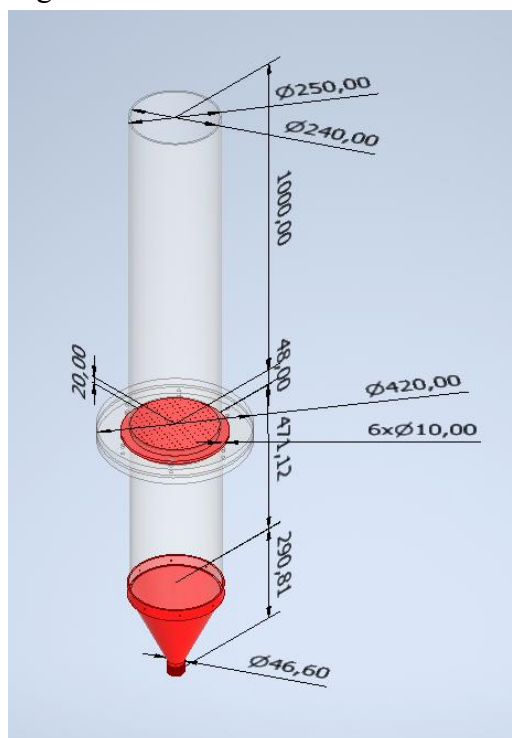
Fonte: Autoria própria

Figura 59 - Leito Fluidizado 3D Médio



Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Leito Fluidizado 3D Grande



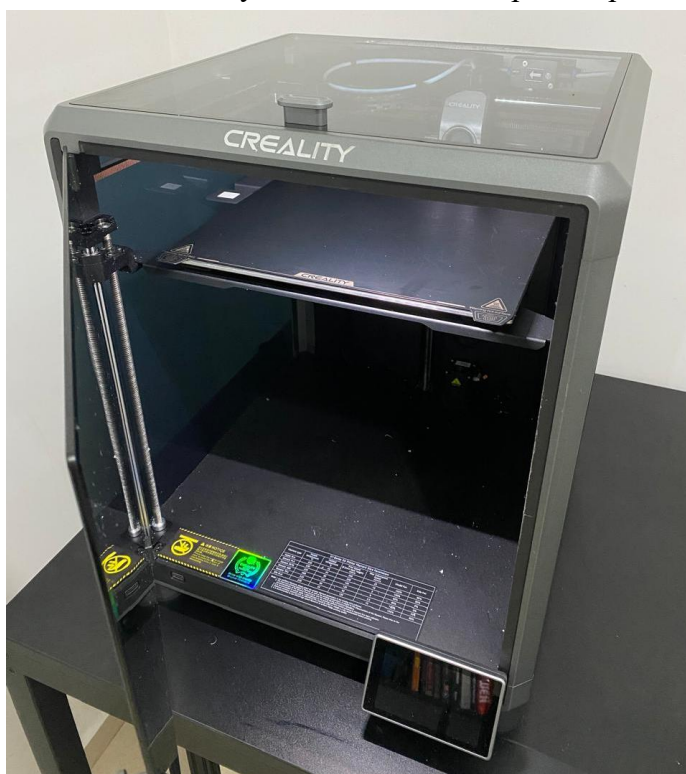
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C - Manufatura Aditiva: Impressão 3D

Uma parte considerável do projeto desse trabalho foi realizada em uma impressora 3D. Embora esse não seja exatamente o foco da pesquisa, a manufatura aditiva foi uma peça fundamental na construção e execução de diversas partes desse doutorado. Portanto, serão apresentados alguns detalhes e problemas encontrados ao longo do processo.

A impressora 3D que foi utilizada para a construção das peças usadas nesse trabalho foi a Creality K1 MAX. Ela é uma impressora 3D de Modelagem por Deposição Fundida, do inglês, *Fused Deposition Modeling* (FDM) e possui um volume de impressão de 300 mm x 300 mm x 300 mm. A velocidade de impressão pode chegar até 600 mm/s, com um bico de impressão de diâmetro interno de 0,4 mm. O sistema de aquecimento do bico alcança uma temperatura de 300°C e a temperatura da mesa de impressão pode chegar até 110°C. Uma foto da impressora 3D pode ser vista na Figura 61.

Figura 61 - Foto da Creality K1 MAX utilizada para imprimir as peças



Fonte: Autoria própria

Diversos materiais podem ser aplicados para o processo de impressão, no entanto, os materiais testados foram:

- Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) ou Acrilonitrila Butadieno Estireno;
- Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) ou Polietileno Tereftalato Glicol;
- Polylactic Acid* (PLA) ou Ácido Polilático.

Importante notar que embora os 3 tenham sido testados, optou-se por fazer a maior parte das peças em ABS por apresentar uma temperatura de transição vítrea maior. Isso foi particularmente importante na manufatura dos Tubos de Venturi, que fica localizado próximo da saída do compressor radial. Dependendo das condições do experimento, o ar que sai do compressor pode estar em temperaturas que ultrapassam os 70 °C (valor estipulado, pois não foi diretamente aferido).

Diversas peças foram projetadas na impressora 3D, entre elas:

- Placas Perfuradas para cada uma das câmaras de fluidização;
- 5 Tubos de Venturi;
- 6 seções cônicas de diferentes dimensões para cada um dos Plenums;
- 6 câmaras de pressurização para os sensores de pressão BMP280.

Além disso, outras peças foram impressas, considerando que diversas tentativas foram necessárias para ajustar cada um dos componentes acima e encontrar as configurações corretas para cada caso. Peças para pequenas funções ou ajustes também foram produzidas, mas que não são relevantes o suficiente para serem enumeradas aqui, como pequenos adaptadores para brocas ou similares.

O processo para produzir cada uma das peças é o seguinte:

- Projetar a peça em modelo tridimensional em um CAD (Inventor, SolidWorks, Fusion 360);
- Exportar a peça em um formato de malha, como o stl, que é um formato de arquivo aceito na maioria dos programas de impressão 3D;
- Importar o arquivo stl para o programa fatiador de impressão 3D (Cura, Orca, Creality, etc), que será responsável por transformar a malha da peça em uma sequência de comandos que a impressora 3D possa ler, interpretar e executar as ordens para imprimir a

peça;

- Exportar o arquivo para a impressora e executar a impressão.

O processo descrito acima é uma ideia geral de como funciona o processo, no entanto, existem diversos detalhes que devem ser considerados, principalmente quando estiver utilizando o fatiador para a impressão 3D (no caso desse trabalho, foi utilizado o Orca).

Existem muitas variáveis que devem ser consideradas e que podem afetar a qualidade da impressão. Abaixo estão citadas algumas das variáveis principais e os seus valores utilizados na impressão do atual trabalho:

- Altura da camada - 0,2 mm;
- Número de perímetros - 3;
- Número de camadas de topo e base - 3;
- Densidade de preenchimento - Entre 50% e 100%;
- Padrão de preenchimento - Retilíneo;
- Ativação de suporte - Sim, na maioria dos casos;
- Tipo de Suporte - Árvore
- Temperatura do bico de extrusão - Considerando ABS, 260°C;
- Temperatura da mesa de impressão - 100°C;
- Temperatura do bico na primeira camada - 265°C;
- Temperatura da mesa na primeira camada - 100°C;
- Comprimento de retração - 0,8 mm;
- Velocidade de resfriamento - 80% da velocidade máxima.

Importante destacar que houveram variações aplicadas caso a caso para cada uma das peças, mas essa é uma boa referência de como as peças foram produzidas no geral.

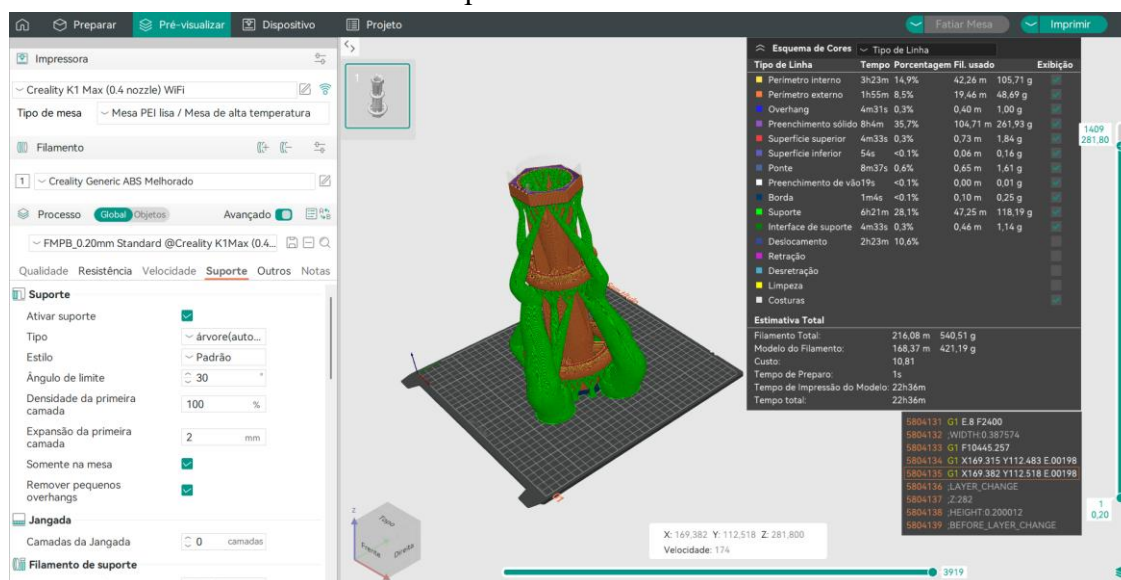
Existem diversas outras variáveis, mas o controle principal pode ser feito utilizando as variáveis acima. Ainda existem outros fatores a serem considerados que estão relacionados as características da impressora 3D, como diâmetro interno do bico de extrusão e nivelamento da mesa.

Nesse trabalho, a impressora foi nivelada reduzindo o desnível máximo de

aproximadamente 0,7 mm para 0,43 mm. Embora 0,43 mm ainda possa causar alguns problemas, na maior parte dos casos, o sistema automático de compensação de nível da impressora foi o suficiente para suprimir esse problema. No caso do diâmetro interno do bico extrusor, o valor utilizado foi o padrão de 0,4 mm.

Na Figura 62, está o fatiador Orca que transformou a malha feita em Inventor em um arquivo executável pela impressora 3D, além de simular a construção, estimando tempo de impressão (22h36m), material gasto (540g de ABS), entre outros fatores.

Figura 62 - Captura de tela do programa Orca simulando a impressão 3D com os suportes em árvore (verde) para um dos tubos de Venturi (laranja), estimando tempo total de impressão de 22h36m



Fonte: Autoria própria

Na Figura 63 está o exemplo de como o modelo da Figura 62 ficou após ser exportado para a impressora 3D e ser impresso por ela. Os suportes do tipo árvore mostrados na imagem precisam ser removidos com auxílio de um alicate ou alguma outra ferramenta. Entretanto, eles são necessários durante o processo de impressão, considerando que a impressora precisa depositar o material em cima de uma base sólida para que a peça não saia deformada. Sendo assim, os suportes são aplicados nas regiões que estariam “flutuando” na peça.

Figura 63 – Tubo de Venturi imediatamente após ser removido da impressora 3D com os suportes em árvore



Fonte: Autoria própria

APÊNDICE D - Programa para Arduino do Sistema de Aquisição de Dados

```
//OUTPUT: 6 Pressões dos Sensores BMP280 e Temperatura do sensor DS18B20
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define BMP_SCL 13
#define BMP_SDO 12
#define BMP_SDA 11
#define BMP_CSB1 10
#define BMP_CSB2 9
#define BMP_CSB3 8
#define BMP_CSB4 7
#define BMP_CSB5 6
#define BMP_CSB6 5
Adafruit_BMP280 bmp1(BMP_CSB1, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
Adafruit_BMP280 bmp2(BMP_CSB2, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
Adafruit_BMP280 bmp3(BMP_CSB3, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
Adafruit_BMP280 bmp4(BMP_CSB4, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
Adafruit_BMP280 bmp5(BMP_CSB5, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
Adafruit_BMP280 bmp6(BMP_CSB6, BMP_SDA, BMP_SDO, BMP_SCL);
// Data wire is connctec to the Arduino digital pin 4
const int oneWireBus = 4;
// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices
OneWire oneWire(oneWireBus);
// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature sensor
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float soma = 0;
char userInput;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  bmp1.begin();
  bmp2.begin();
  bmp3.begin();
  bmp4.begin();
  bmp5.begin();
  bmp6.begin();
  sensors.begin();
  delay(2000);
}
void loop() {
  if(Serial.available() > 0){
    userInput = Serial.read();          // read user input
    if(userInput == 'g'){                // if we get expected value
      //Numero de Amostras
      int n_amostras = 100;
      //Media de amostras do Sensor 1
      soma = 0;
      for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
      {
        soma = float (bmp1.readPressure()) + soma;
      }
      float pressure1 = (soma/n_amostras);
      //Media de amostras do Sensor 2
      soma = 0;
      for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
      {
        soma = float (bmp2.readPressure()) + soma;
      }
      float pressure2 = (soma/n_amostras);
      //Media de amostras do Sensor 3
      soma = 0;
```

```

for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
{
    soma = float (bmp3.readPressure()) + soma;
}
float pressure3 = (soma/n_amostras);
//Media de amostras do Sensor 4
soma = 0;
for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
{
    soma = float (bmp4.readPressure()) + soma;
}
float pressure4 = (soma/n_amostras);
//Media de amostras do Sensor 5
soma = 0;
for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
{
    soma = float (bmp5.readPressure()) + soma;
}
float pressure5 = (soma/n_amostras);
//Media de amostras do Sensor 6
soma = 0;
for (int i = 0; i < n_amostras; i++)
{
    soma = float (bmp6.readPressure()) + soma;
}
float pressure6 = (soma/n_amostras);
//DS18B20 Temperature Sensor
sensors.requestTemperatures();
float DS18B20 = sensors.getTempCByIndex(0);
//Adjust the values of pressure and temperature
//pressure1 = (0.9942*pressure1) + 442.6;
//pressure2 = (0.9917*pressure2) + 789.31;
pressure3 = (0.9666*pressure3) + 3152.9;
pressure4 = (0.988*pressure4) + 1017.4;
pressure5 = (0.989*pressure5) + 998.82;
pressure6 = (0.9858*pressure6) + 1203.3;
//pressure1 = (1.0267*pressure1) + 2595.1;
//pressure2 = (1.0275*pressure2) + 2562.3;
//pressure3 = (1.0304*pressure3) + 2888.4;
//pressure4 = (1.0302*pressure4) + 2945.6;
//pressure5 = (1.0319*pressure5) + 3024.3;
//pressure6 = (1.0317*pressure6) + 3078.8;
pressure1 = (0.9776*pressure1) + 2099.8;
pressure2 = (1.0038*pressure2) - 313.97;
DS18B20 = (0.9993*DS18B20) + 0.42;
//Printing Data
Serial.print(pressure1);
Serial.print(" , ");
Serial.print(pressure2);
Serial.print(" , ");
Serial.print(pressure3);
Serial.print(" , ");
Serial.print(pressure4);
Serial.print(" , ");
Serial.print(pressure5);
Serial.print(" , ");
Serial.print(pressure6);
Serial.print(" , ");
Serial.println(DS18B20);
delay(10);
}
}
}

```

APÊNDICE E- Programa em Python do Sistema de Aquisição de Dados

```
##### Biblioteca #####
#Bibliotecas usadas pelo programa
import serial      #Biblioteca Nome real: pyserial
import keyboard
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time
import os
import openpyxl
import pyromat as pm      #Termodinâmica
import pyfluids as fd     #Fluidos
import math
from math import sqrt
import tkinter as tk
import winsound
#Configurando unidades no pyromat library (Termodinâmica)
pm.config['unit_pressure'] = 'Pa'
pm.config['unit_temperature'] = 'C'
pm.config['unit_energy'] = 'kJ'
pm.config['unit_force'] = 'N'
pm.config['unit_length'] = 'm'
pm.config['unit_mass'] = 'kg'
pm.config['unit_matter'] = 'kg'
pm.config['unit_molar'] = 'kmol'
pm.config['unit_time'] = 's'
pm.config['unit_volume'] = 'm3'
air_pm = pm.get('ig.air')
##### Pastas e Caminhos para salvar arquivos #####
#Creating a relative path that works for any Folder/file
THIS_FOLDER = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
name_of_experiment = input("Escreva o nome do Experimento:")
name_of_folder = name_of_experiment
#path of the folder that will be created for the specific experiment
savepath = os.path.join(THIS_FOLDER, name_of_folder)
#creating folder with the name of the experiment if it doesn't exist
if not os.path.exists(savepath):
    os.makedirs(savepath)
#Paths of the Data files
excel_path = os.path.join(savepath, 'Sensors Data.xlsx')
#Paths of the Plots generated
BMP280_pressure_path = os.path.join(savepath, 'BMP280 Pressure Sensors Plot.png')
DS18B20_temperature_path = os.path.join(savepath, 'DS18B20 Temperature Sensor Plot.png')
Venturi_velocity_path = os.path.join(savepath, 'Velocity Plot.png')
Umf_path = os.path.join(savepath, 'Minimum Fluidization Plot.png')
##### Variáveis dos Sensores #####
#number_BMP280_sensors_active = int(input("How many BMP280 sensors are being used?"))
number_BMP280_sensors_active = 6
number_BMP280_sensors = 6
#answer1 = input("Is the DS18B20 temperature sensor being used? (y/n)")
answer1 = 'y'
if answer1 == 'y':
    DS18B20_sensor = 1
else:
    DS18B20_sensor = 0
iter = 1
number_all_sensors = number_BMP280_sensors + DS18B20_sensor
BMP280_pressure_S1 = []
BMP280_pressure_S2 = []
BMP280_pressure_S3 = []
BMP280_pressure_S4 = []
BMP280_pressure_S5 = []
BMP280_pressure_S6 = []
```

```

DS18B20_Temperature = []
##### Variáveis do Venturi #####
#Diâmetro do Tubo (mm)
D = 49.5
D = D/1000
d = float(input('Qual o diâmetro da constrição do Venturi (d= 2, 4, 8, 17 ou 33 mm)?'))
d = d/1000
#Discharge Coefficient
C = 0.995
#Razão do Diâmetro (Beta)
B = (d/D)
pi = math.pi
area_D = (pi*(1/4)*(D**2))
area_d = (pi*(1/4)*(d**2))
cte1 = (C/((1-(B**4))**(1/2)))
#Creating lists for Venturi Variables
#Lists and Arrays are different and take different times to work
iteration = [] #i
delta_time = [] #dt
upstream_pressure = [] #Pu
downstream_preasure = [] #Pd
upstream_temperature = [] #Tu
density_air = [] #rho
dynamic_viscosity_air = [] #u
pressure_ratio_tau = [] #tau
isoentropic_expasion_k = [] #k
expansibility_factor_epsilon = [] #epsilon
delta_pressure = [] #dP
error_absolute_deltaPressure = []
mass_flow = [] #qm
volumetric_flow = [] #qv
velocity_D = [] #Vd
Reynolds_D = [] #ReD
dt = 0
##### Variáveis do Leito Fluidizado #####
pressure_after_distributor = []
fluidized_bed_diameter = float(input('Qual o diâmetro interno do Leito fluidizado (Dfb = 70, 150 ou 240 mm)?'))
fluidized_bed_type = (input('Qual o tipo de Leito Fluidizado (2D ou 3D)?'))
fluidized_bed_diameter = fluidized_bed_diameter/1000
if fluidized_bed_type == "3D":
    area_fluidized_bed = (pi*(1/4)*(fluidized_bed_diameter**2))
if fluidized_bed_type == "2D":
    area_fluidized_bed = ((5/1000)*(fluidized_bed_diameter))
e_area_fb = ((0.1/fluidized_bed_diameter)**2 + (0.1/fluidized_bed_diameter)**2)**(1/2)
fluidizedBed_velocity = []
error_absolute_fluidizedBed = []
delta_pressure_fluidizedBed = []
##### Selecionar a equação de calibração de vazão de acordo com o Venturi utilizado #####
##### Equação base: velocity = (a*velocity) + b
a = 0
b = 0

#Leito 3D
if fluidized_bed_type == "3D":
    #Leito Pequeno
    if fluidized_bed_diameter == (70/1000):
        if d == (2/1000):
            a = 2.0322
            b = 0.0258
        if d == (4/1000):
            a = 1.4968
            b = 0.0358
        if d == (8/1000):
            a = 0.9311
            b = 0.3135
        if d == (17/1000):

```

```

    a = 0.9413
    b = 0.2277
    if d == (33/1000):
        a = 0.8912
        b = 0.108
#Leito Médio
if fluidized_bed_diameter == (150/1000):
    if d == (2/1000):
        a = 2.0322
        b = 0.0056
    if d == (4/1000):
        a = 1.4968
        b = 0.0078
    if d == (8/1000):
        a = 0.9311
        b = 0.0683
    if d == (17/1000):
        a = 0.9413
        b = 0.0496
    if d == (33/1000):
        a = 0.8912
        b = 0.0235
#Leito Grande
if fluidized_bed_diameter == (240/1000):
    if d == (2/1000):
        a = 2.0322
        b = 0.0022
    if d == (4/1000):
        a = 1.4968
        b = 0.003
    if d == (8/1000):
        a = 0.9311
        b = 0.0267
    if d == (17/1000):
        a = 0.9413
        b = 0.0194
    if d == (33/1000):
        a = 0.8912
        b = 0.0092
#Leito 2D
if fluidized_bed_type == "2D":
    #Leito Pequeno
    if fluidized_bed_diameter == (70/1000):
        if d == (2/1000):
            a = 2.0322
            b = 0.2837
        if d == (4/1000):
            a = 1.4968
            b = 0.3938
        if d == (8/1000):
            a = 0.9311
            b = 0.3380
        if d == (17/1000):
            a = 0.9413
            b = 0.2455
        if d == (33/1000):
            a = 0.8912
            b = 0.1165
    #Leito Médio
    if fluidized_bed_diameter == (150/1000):
        if d == (2/1000):
            a = 2.0322
            b = 0.1324
        if d == (4/1000):
            a = 1.4968
            b = 0.1838

```

```

    if d == (8/1000):
        a = 0.9311
        b = 0.1577
    if d == (17/1000):
        a = 0.9413
        b = 0.1146
    if d == (33/1000):
        a = 0.8912
        b = 0.0544
#Leito Grande
if fluidized_bed_diameter == (240/1000):
    if d == (2/1000):
        a = 2.0322
        b = 0.0827
    if d == (4/1000):
        a = 1.4968
        b = 0.1149
    if d == (8/1000):
        a = 0.9311
        b = 0.0986
    if d == (17/1000):
        a = 0.9413
        b = 0.0716
    if d == (33/1000):
        a = 0.8912
        b = 0.0340
print(a)
print(b)
##### Inicialização do Gráfico #####
#Plot variables
legend_label = []
plot_color = ['red','blue','black','green','yellow','orange']
for i in range(number_BMP280_sensors):
    legend_label.append('Sensor '+ str(i+1))
#Initializing Graph
plt.ion()
#fig,(ax1,ax2) = plt.subplots(2,1)
#fig,((ax1,ax2),(ax3,ax4)) = plt.subplots(2,2)
#Defining the size of the image
#fig.set_size_inches(13, 9)
#Defining the Title
#fig.suptitle('Experimental Data', fontsize=30, fontweight='bold')
##### Inicialização da Interface #####
# Criar a janela da interface gráfica
root = tk.Tk()
root.title("Monitoramento de Sensores")
# Definir o tamanho da janela
largura_janela = 800
altura_janela = 400
root.geometry(f'{largura_janela}x{altura_janela}')
# Criar rótulos para os valores de pressão, temperatura e velocidade
tamanho_fonte = 55
label_iteracao = tk.Label(root, text="Número de dados coletados: -- ", font=("Arial", tamanho_fonte))
label_iteracao.pack()
label_pressao = tk.Label(root, text="Pressão S1: -- Pa", font=("Arial", tamanho_fonte))
label_pressao.pack()
label_delta_pressao = tk.Label(root, text="Delta de Pressão (Venturi): -- Pa", font=("Arial", tamanho_fonte))
label_delta_pressao.pack()
label_temperatura = tk.Label(root, text="Temperatura: -- °C", font=("Arial", tamanho_fonte))
label_temperatura.pack()
label_velocidade = tk.Label(root, text="Velocidade no Leito: -- m/s", font=("Arial", tamanho_fonte))
label_velocidade.pack()
#Criação da função de botão
def on_button_press():
    global button_pressed
    button_pressed = True

```

```

# Criação do botão
# Configuração da fonte do botão
button_font = ("Helvetica", 20)
# Criação do botão com tamanho maior
button = tk.Button(root, text="Interromper e Salvar Dados", command=on_button_press, width=30, height=3,
font=button_font)
button.pack(pady=20)
button_pressed = False
##### Inicialização do Arduino #####
arduino_command = 'g'
arduino_command = arduino_command.encode()
ser = serial.Serial("COM3", 9600) # Establish Serial object with COM port and BAUD rate to match Arduino
Port/rate
time.sleep(5) # Time delay for Arduino Serial initialization
while True:
##### Collecting Data from Arduino #####
#Counting time
time_start = time.perf_counter()
#Interrupts the loop if 'asterisk' is pressed
#if keyboard.is_pressed('asterisk'):
#break
#Interrompe se apertar o botão, saindo do loop
if button_pressed == True:
break
# Transmit the char 'g' to receive the Arduino data point
ser.write(arduino_command)
# Decode receive Arduino data as a formatted string
arduinoData_string = ser.readline().decode()
#split the string of numbers at the commas and add to array
dataArray = arduinoData_string.split(',')
for i in range(number_BMP280_sensors_active):
dataArray[i] = float(dataArray[i])
BMP280_pressure_S1.append(dataArray[0])
BMP280_pressure_S2.append(dataArray[1])
BMP280_pressure_S3.append(dataArray[2])
BMP280_pressure_S4.append(dataArray[3])
BMP280_pressure_S5.append(dataArray[4])
BMP280_pressure_S6.append(dataArray[5])
if DS18B20_sensor == 1:
dataArray[(number_BMP280_sensors)] = float(dataArray[(number_BMP280_sensors)])
DS18B20_Temperature.append(dataArray[(number_BMP280_sensors)])
iteration.append(iter)
upstream_pressure.append(dataArray[0]) #inlet pressure
downstream_preassure.append(dataArray[1]) #throat pressure
upstream_temperature.append(dataArray[6]) #inlet temperature
pressure_after_distributor.append(dataArray[2])
dP_fb = dataArray[2] - dataArray[3]
delta_pressure_fluidizedBed.append(dP_fb)
if dataArray[6] > 33:
winsound.Beep(1000,500)
##### Venturi Calculations #####
Pu = dataArray[0]
Pd = dataArray[1]
Tu = dataArray[6]
print("Pressao 1 = ", Pu)
print("Pressao 2 = ", Pd)
#Obtendo a massa específica, calor específico e constante do gás do ar para P e T em pyromat
rho = float(air_pm.d(Tu,Pu))
cp_air = float(air_pm.cp(Tu,Pu))
R_air = float(air_pm.R(Tu,Pu))
#cv_air = float(air.cv(temperature,pressure1))
#specific_volume = float(air.v(temperature,pressure1))
density_air.append(rho)
#Selecionando o tipo de fluido com T e P em pyfluids
air_pf = fd.Fluid(fd.FluidsList.Air).with_state(fd.Input.pressure(Pu), fd.Input.temperature(Tu))
#Calculando viscosidade dinâmica

```

```

u = air_pf.dynamic_viscosity          #Pa s
dynamic_viscosity_air.append(u)
#kinematic_viscosity_air = air.kinematic_viscosity    #m2/s
#Calculando dieferencial de pressão (delta P)
dP = Pu - Pd
if dP < 0:
    dP = dP * (-1)
if dP == 0:
    dP = 1
delta_pressure.append(dP)
print("Delta de Pressao = ", dP)
#Calculando o Coeficiente de Expansão Isentrópico do ar (k)
k = (cp_air/(cp_air - R_air))
isoentropic_expasion_k.append(k)
#Calculando relação de pressão (Tau) no qual tau > 0.75
tau = Pd/Pu
pressure_ratio_tau.append(tau)
#Calculando Fator de Expansão (Epsilon E)
epsilon = ((k*(tau**(2/k))/(k-1))*((1-(B**4))/(1-((B**4)*tau**(2/k))))*((1-(tau**((k-1)/k)))/(1-tau))))**(1/2)
expansibility_factor_epsilon.append(epsilon)
print("Epsilon = ", epsilon)
#Calculando Vazão Mássica
qm = cte1*epsilon*area_d*((2*dP*rho)**(0.5))
mass_flow.append(qm)
print("Vazao massica = ", qm)
#Calculando Vazão Volumétrica
qv = qm/rho
volumetric_flow.append(qv)
#Calculando Velocidade no Tubo
VD = qv/area_D
#Corrigindo valor de acordo com a equação de calibração selecionada
VD = (a*VD)+b
velocity_D.append(VD)
#Calculando Reynolds em D no qual  $2 \cdot 10^5 < ReD < 10^6$ 
ReD = (VD*D*rho)/u
Reynolds_D.append(ReD)
#Calculando Velocidade no Leito
Vfb = qv/area_fluidized_bed
#Corrigindo valor de acordo com a equação de calibração selecionada
Vfb = (a*Vfb)+b
fluidizedBed_velocity.append(Vfb)
print("Velocidade no Leito = ", Vfb)
iter = iter + 1
#####    Calculo dos erros    #####
e_C = 0.03
e_epsilon = float(((4+(100*(B**8)))*(dP/Pu/100))
e_D = 0.0001/D
e_d = 0.0001/d
e_dP = 24/dP
e_abs_dP = e_dP*dP
e_rho = 0.001
e_qm = float((((e_C)**(2)+(e_epsilon)**(2)+((B**4)*2/(1-(B**4))))**2)*(e_D)**(2)+(2/(1-(B**4))))**2*(e_d)**(2)+(e_dP)**(2)+(e_rho)**(2))**(1/2)
e_qv = ((qm*e_qm)**2 + e_rho**2)**(1/2)
e_Vfb = (e_area_fb**2 + e_qv**2)**(1/2)
e_abs_Vfb = e_Vfb*Vfb
error_absolute_deltaPressure.append(e_abs_dP)
error_absolute_fluidizedBed.append(e_abs_Vfb)
#plt.show()
#plt.pause(0.05)
# Formatar os números com dois dígitos após a vírgula
iteracao_formatada = "{:.0f}".format(iter)
pressao_formatada = "{:.2f}".format(Pu)
delta_pressao_formatada = "{:.2f}".format(dP)
temperatura_formatada = "{:.1f}".format(Tu)
velocidade_formatada = "{:.3f}".format(Vfb)

```

```

label_iteracao.config(text=f"Número de dados coletados: {iteracao_formatada}")
label_pressao.config(text=f"Pressão S1 (Venturi): {pressao_formatada} Pa")
label_delta_pressao.config(text=f"Delta de Pressão (Venturi): {delta_pressao_formatada} Pa")
label_temperatura.config(text=f"Temperatura: {temperatura_formatada} °C")
label_velocidade.config(text=f"Velocidade no Leito: {velocidade_formatada} m/s")

root.update()
print('Data collected')
time_stop = time.perf_counter()
delta_time.append(time_stop-time_start)
#Closing communication with Arduino and Graphs
plt.close()
ser.close()
##### Exporting all data in Figure files #####
figPressure = plt.figure()
axP = figPressure.add_subplot(111)
axP.set_xlabel('Iteration', fontsize = 11)
axP.set_ylabel('Pressure', fontsize = 11)
axP.set_title('BMP280 Pressure', fontsize = 15)
axP.plot(BMP280_pressure_S1[1:], label=legend_label[0], color=plot_color[0],marker='.', linestyle='dashed')
axP.plot(BMP280_pressure_S2[1:], label=legend_label[1], color=plot_color[1],marker='.', linestyle='dashed')
axP.plot(BMP280_pressure_S3[1:], label=legend_label[2], color=plot_color[2],marker='.', linestyle='dashed')
axP.plot(BMP280_pressure_S4[1:], label=legend_label[3], color=plot_color[3],marker='.', linestyle='dashed')
axP.plot(BMP280_pressure_S5[1:], label=legend_label[4], color=plot_color[4],marker='.', linestyle='dashed')
axP.plot(BMP280_pressure_S6[1:], label=legend_label[5], color=plot_color[5],marker='.', linestyle='dashed')
figPressure.savefig(BMP280_pressure_path)
print("BMP280 Pressure graph saved")
figTemperature2 = plt.figure()
axT = figTemperature2.add_subplot(111)
axT.set_xlabel('Iteration', fontsize = 11)
axT.set_ylabel('Temperature', fontsize = 11)
axT.set_title('DS18B20 Temperature', fontsize = 15)
axT.plot(DS18B20_Temperature[1:], label=legend_label[0], color=plot_color[0],marker='.', linestyle='dashed')
figTemperature2.savefig(DS18B20_temperature_path)
print("DS18B20 Temperature graph saved")
figVelocity = plt.figure()
axV = figVelocity.add_subplot(111)
axV.set_xlabel('Iteration', fontsize = 11)
axV.set_ylabel('Velocity', fontsize = 11)
axV.set_title('Venturi Velocity', fontsize = 15)
axV.plot(fluidizedBed_velocity[1:], label=legend_label[0], color=plot_color[0],marker='.', linestyle='dashed')
figVelocity.savefig(Venturi_velocity_path)
print("Velocity graph saved")
figUmf = plt.figure()
axU = figUmf.add_subplot(111)
axU.set_xlabel('Velocidade no Leito (m/s)', fontsize = 11)
axU.set_ylabel('Diferencial de Pressão do Leito (Pa)', fontsize = 11)
axU.set_title('Velocidade mínima de Fluidização', fontsize = 15)
axU.plot(fluidizedBed_velocity[1:], delta_pressure_fluidizedBed[1:], label=legend_label[0], color=plot_color[0],
marker='.', linestyle='dashed')
figUmf.savefig(Umf_path)
print("Minimum fluidization velocity graph saved")
##### Exporting all Data to an Excel File #####
workbook = openpyxl.Workbook()
workbook.save(excel_path)
sheet1 = workbook.active
sheet1.title = "BMP280_Pres" #i=0
#Create a second sheet
sheet2 = workbook.create_sheet(title="BMP280_Temp") #i=1
#Create a third sheet
sheet3 = workbook.create_sheet(title="DS18B20_Temp") #i=2
#Create a fourth sheet
sheet4 = workbook.create_sheet(title="Venturi") #i=3
#Create a fifth sheet
sheet5 = workbook.create_sheet(title="Minima Fluidização") #i=4
workbook.save(excel_path)

```

```

##### BMP280 Pressures Data #####
#Pressure1
if number_BMP280_sensors_active > 0 :
    sheet1['A'+str(1)] = "Iteração"
    sheet1['B'+str(1)] = "Tempo (s)"
    sheet1['C'+str(1)] = "Pressão Sensor 1 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S1)):
        sheet1['A' + str(row+2)] = float(iteration[row])
        sheet1['B'+ str(row+2)] = float(delta_time[row])
        sheet1['C' + str(row+2)] = float(BMP280_pressure_S1[row])
#Pressure2
if number_BMP280_sensors_active > 1 :
    sheet1['D'+str(1)] = "Pressão Sensor 2 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S2)):
        sheet1['D' + str(row+2)] = BMP280_pressure_S2[row]
#Pressure3
if number_BMP280_sensors_active > 2 :
    sheet1['E'+str(1)] = "Pressão Sensor 3 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S3)):
        sheet1['E' + str(row+2)] = BMP280_pressure_S3[row]
#Pressure4
if number_BMP280_sensors_active > 3 :
    sheet1['F'+str(1)] = "Pressão Sensor 4 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S4)):
        sheet1['F' + str(row+2)] = BMP280_pressure_S4[row]
#Pressure5
if number_BMP280_sensors_active > 4 :
    sheet1['G'+str(1)] = "Pressão Sensor 5 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S5)):
        sheet1['G' + str(row+2)] = BMP280_pressure_S5[row]
#Pressure6
if number_BMP280_sensors_active > 5 :
    sheet1['H'+str(1)] = "Pressão Sensor 6 (Pa)"
    for row in range(len(BMP280_pressure_S6)):
        sheet1['H' + str(row+2)] = BMP280_pressure_S6[row]
##### Downstream Temperature Data #####
if DS18B20_sensor == 1:
    sheet3['A'+str(1)] = "Iteração"
    sheet3['B'+str(1)] = "Tempo(s)"
    sheet3['C'+str(1)] = "Temperatura DS18B20 (°C)"
    for row in range(len(DS18B20_Temperature)):
        sheet3['A' + str(row+2)] = float(iteration[row])
        sheet3['B' + str(row+2)] = float(delta_time[row])
        sheet3['C' + str(row+2)] = DS18B20_Temperature[row]
##### Venturi Data #####
sheet4['A'+str(1)] = "Iteração"
sheet4['B'+str(1)] = "Tempo (s)" #tempo para coletar 1 dado
sheet4['C'+str(1)] = "Pressão Montante P1 (Pa)"
sheet4['D'+str(1)] = "Pressão Jusante P2 (Pa)"
sheet4['E'+str(1)] = "Temperatura Montante (°C)"
sheet4['F'+str(1)] = "Massa Específica Montante (kg/m3)"
sheet4['G'+str(1)] = "Viscosidade Dinâmica (Pa s)"
sheet4['H'+str(1)] = "Razão de pressão Tau (P2/P1) (-)"
sheet4['I'+str(1)] = "Coeficiente isoentrópico k (-)"
sheet4['J'+str(1)] = "Fator de Expansibilidade E (-)"
sheet4['K'+str(1)] = "Diferencial de Pressão (P1-P2) (Pa)"
sheet4['L'+str(1)] = "Vazão Mássica (kg/s)"
sheet4['M'+str(1)] = "Vazão Volumétrica (m3/s)"
sheet4['N'+str(1)] = "Velocidade Tubo_D (m/s)"
sheet4['O'+str(1)] = "Reynolds_D (-)"
sheet4['P'+str(1)] = "Velocidade no Leito (m/s)"
sheet4['Q'+str(1)] = "Erro absoluto da Pressão (Pa)"
sheet4['R'+str(1)] = "Erro absoluto da Velocidade no leito (m/s)"
sheet4['S'+str(1)] = "Diâmetro d da contração do Venturi (mm)"
for row in range(len(iteration)):
    sheet4['A' + str(row+2)] = float(iteration[row])

```

```

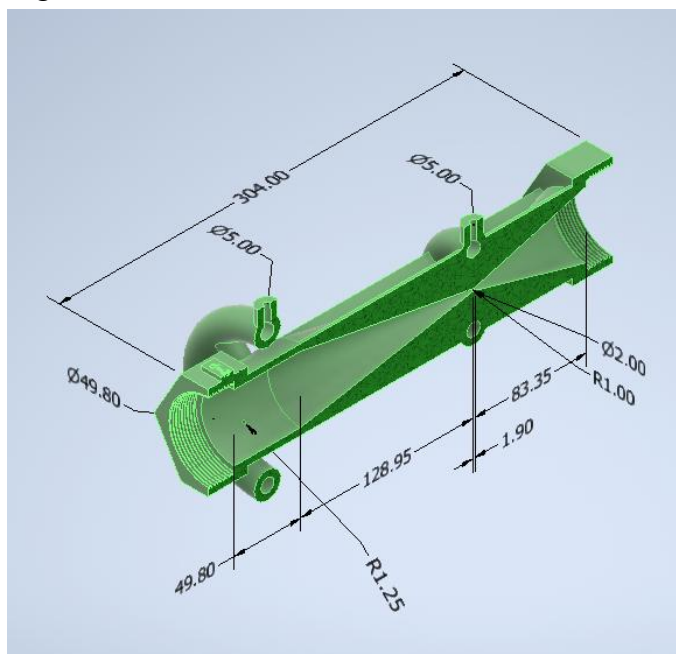
for row in range(len(delta_time)):
    sheet4['B' + str(row+2)] = float(delta_time[row])
for row in range(len(upstream_pressure)):
    sheet4['C' + str(row+2)] = float(upstream_pressure[row])
for row in range(len(downstream_preasure)):
    sheet4['D' + str(row+2)] = float(downstream_preasure[row])
for row in range(len(upstream_temperature)):
    sheet4['E' + str(row+2)] = float(upstream_temperature[row])
for row in range(len(density_air)):
    sheet4['F' + str(row+2)] = float(density_air[row])
for row in range(len(dynamic_viscosity_air)):
    sheet4['G' + str(row+2)] = float(dynamic_viscosity_air[row])
for row in range(len(pressure_ratio_tau)):
    sheet4['H' + str(row+2)] = float(pressure_ratio_tau[row])
for row in range(len(isoentropic_expasion_k)):
    sheet4['I' + str(row+2)] = float(isoentropic_expasion_k[row])
for row in range(len(expansibility_factor_epsilon)):
    sheet4['J' + str(row+2)] = float(expansibility_factor_epsilon[row])
for row in range(len(delta_pressure)):
    sheet4['K' + str(row+2)] = float(delta_pressure[row])
for row in range(len(mass_flow)):
    sheet4['L' + str(row+2)] = float(mass_flow[row])
for row in range(len(volumetric_flow)):
    sheet4['M' + str(row+2)] = float(volumetric_flow[row])
for row in range(len(velocity_D)):
    sheet4['N' + str(row+2)] = float(velocity_D[row])
for row in range(len(Reynolds_D)):
    sheet4['O' + str(row+2)] = float(Reynolds_D[row])
for row in range(len(fluidizedBed_velocity)):
    sheet4['P' + str(row+2)] = float(fluidizedBed_velocity[row])
for row in range(len(error_absolute_deltaPressure)):
    sheet4['Q' + str(row+2)] = float(error_absolute_deltaPressure[row])
for row in range(len(error_absolute_fluidizedBed)):
    sheet4['R' + str(row+2)] = float(error_absolute_fluidizedBed[row])
sheet4['S' + str(2)] = float(d*1000)
##### Minimum Fluidization Data #####
sheet5['A'+str(1)] = "Iteração"
sheet5['B'+str(1)] = "Tempo (s)" #tempo para coletar 1 dado
sheet5['C'+str(1)] = "Velocidade no Leito (m/s)"
sheet5['D'+str(1)] = "Diferencial de Pressão do Leito (Pa) -> S3-S4"
sheet5['E'+str(1)] = "Pressão após Placa Distribuidora (Pa) -> S3"
sheet5['F'+str(1)] = "Erro absoluto da Pressão (Pa)"
sheet5['G'+str(1)] = "Erro absoluto da Velocidade no leito (m/s)"
sheet5['H'+str(1)] = "Diametro Interno do Leito (mm)"
for row in range(len(iteration)):
    sheet5['A' + str(row+2)] = float(iteration[row])
for row in range(len(delta_time)):
    sheet5['B' + str(row+2)] = float(delta_time[row])
for row in range(len(fluidizedBed_velocity)):
    sheet5['C' + str(row+2)] = float(fluidizedBed_velocity[row])
for row in range(len(delta_pressure_fluidizedBed)):
    sheet5['D' + str(row+2)] = float(delta_pressure_fluidizedBed[row])
for row in range(len(pressure_after_distributor)):
    sheet5['E' + str(row+2)] = float(pressure_after_distributor[row])
for row in range(len(error_absolute_deltaPressure)):
    sheet5['F' + str(row+2)] = float(error_absolute_deltaPressure[row])
for row in range(len(error_absolute_fluidizedBed)):
    sheet5['G' + str(row+2)] = float(error_absolute_fluidizedBed[row])
sheet5['H' + str(2)] = float(fluidized_bed_diameter*1000)
workbook.save(excel_path)
print("Data exported to Excel")

```

APÊNDICE F - Detalhamento dos Tubos de Venturi

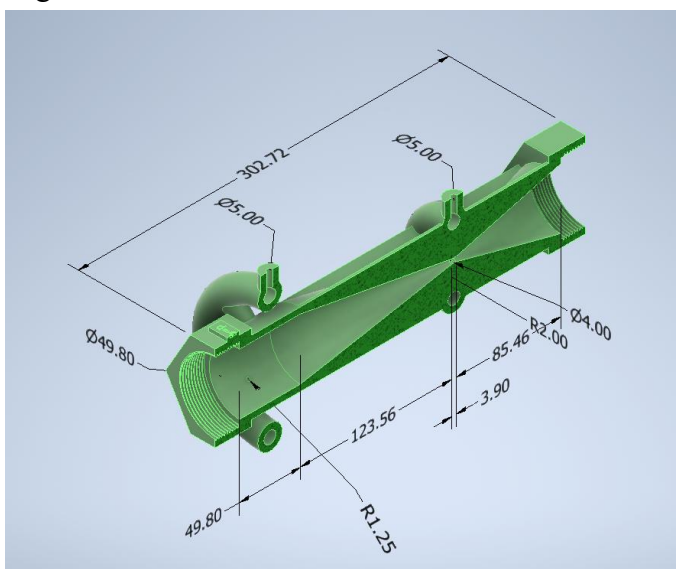
Na Figura 64 a Figura 68 são mostrados os 5 modelos dos tubos de Venturi, com as respectivas dimensões.

Figura 64 - Tubo de Venturi em corte com $d = 2$ mm

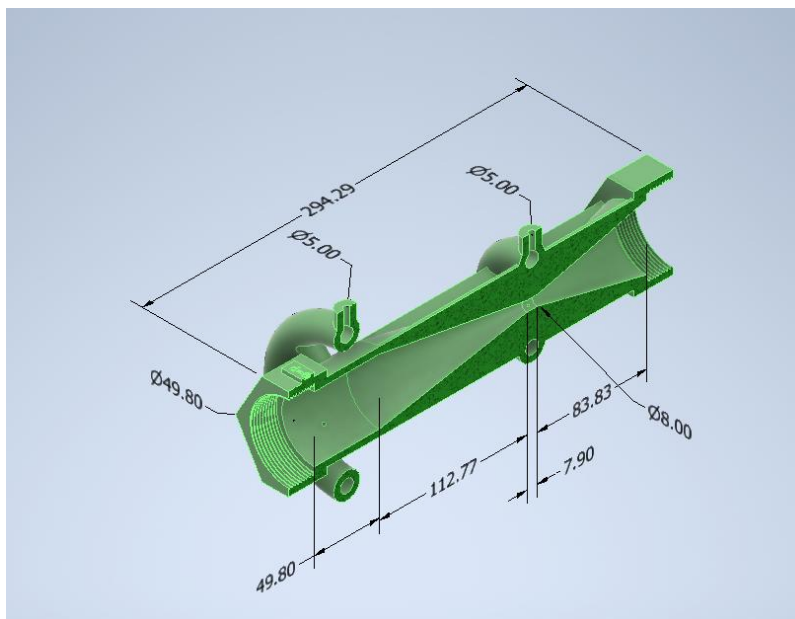


Fonte: Autoria própria

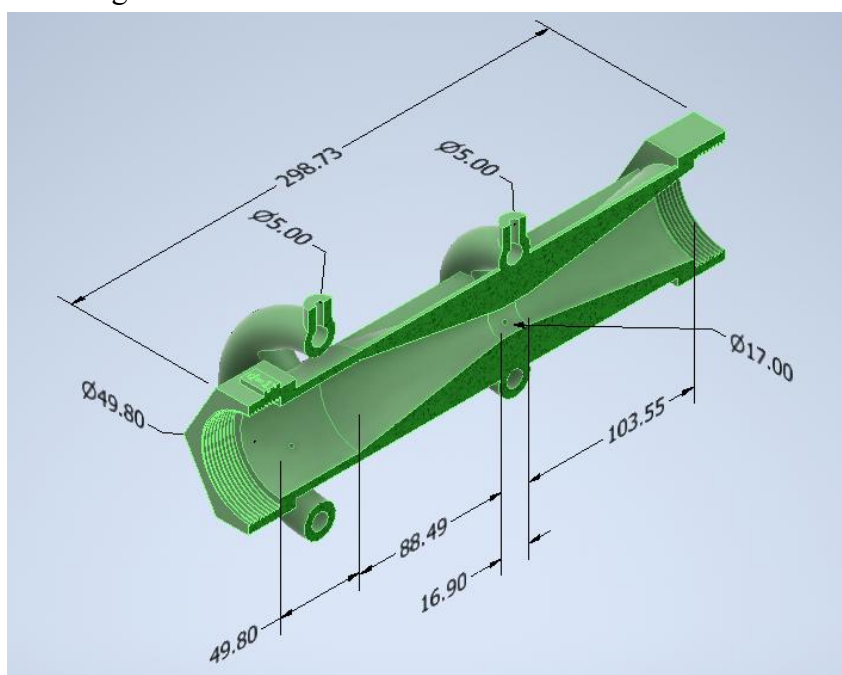
Figura 65 - Tubo de Venturi em corte com $d = 4$ mm



Fonte: Autoria própria

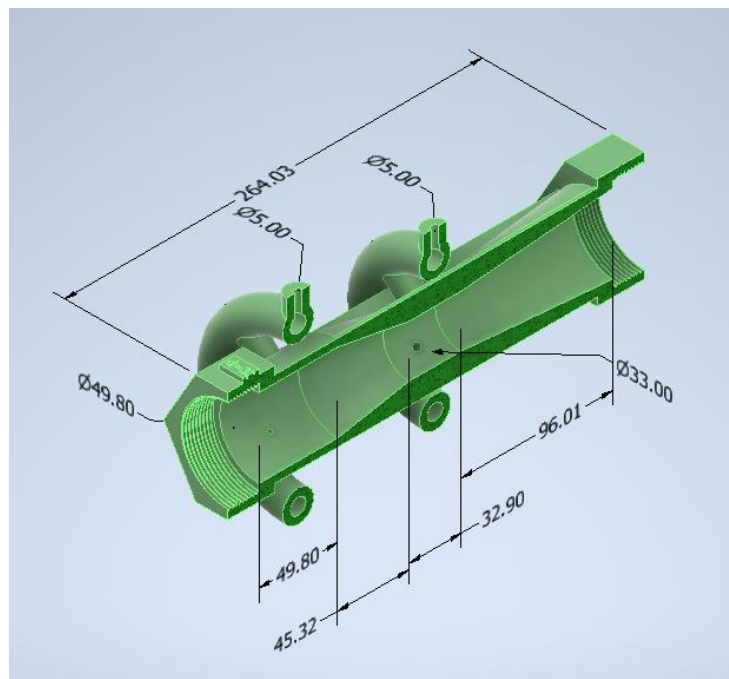
Figura 66 - Tubo de Venturi em corte com $d = 8$ mm

Fonte: Autoria própria

Figura 67 - Tubo de Venturi em corte com $d = 17$ mm

Fonte: Autoria própria

Figura 68 - Tubo de Venturi em corte com $d = 33$ mm



Fonte: Autoria própria

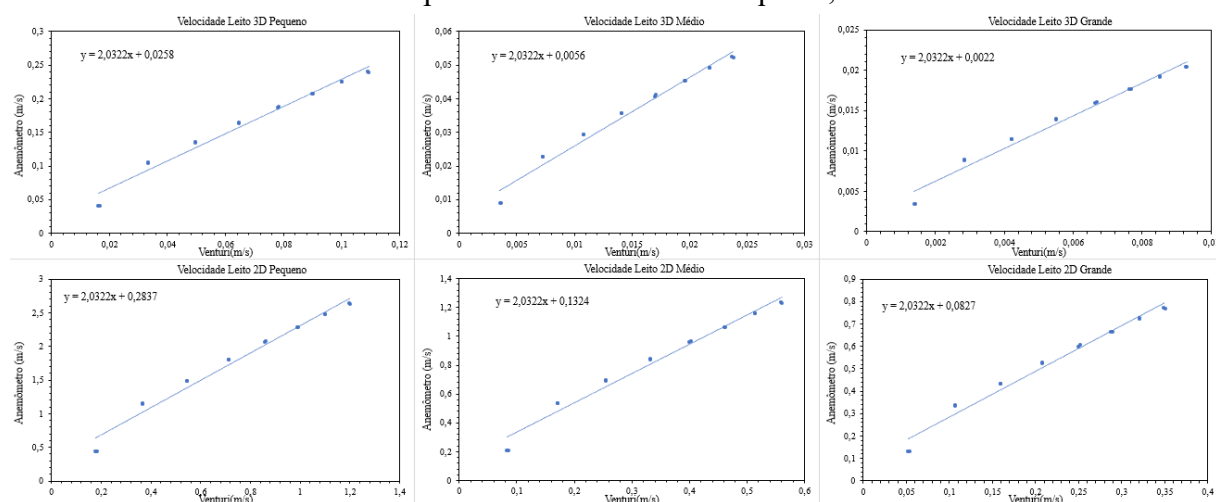
Um detalhe importante que deve ser notado é que os ângulos divergentes do tubo de Venturi foram reduzidos conforme o diâmetro d foi aumentado. A intenção é reduzir ainda mais a perda de pressão (perda de energia) causado pelo Venturi. Isso não foi feito para todos os tubos devido às limitações de dimensão inerentes à altura da impressora 3D, tornando inviável imprimir algo maior que 300 mm de comprimento.

O ângulo divergente para $d = 3, 5$ e 10 mm é igual a 15° , enquanto que $d = 20$ mm com ângulo de 9° e $d = 30$ mm com ângulo de 5° . Se o ângulo de 5° fosse utilizado para todos os tubos de Venturi, o comprimento total dos Venturi de diâmetro d menores (2mm, 4mm) teriam um comprimento maior que 300 mm, ultrapassando o limite físico possível de impressão da impressora 3D.

APÊNDICE G - Calibração dos Tubos de Venturi - Curvas e Equações

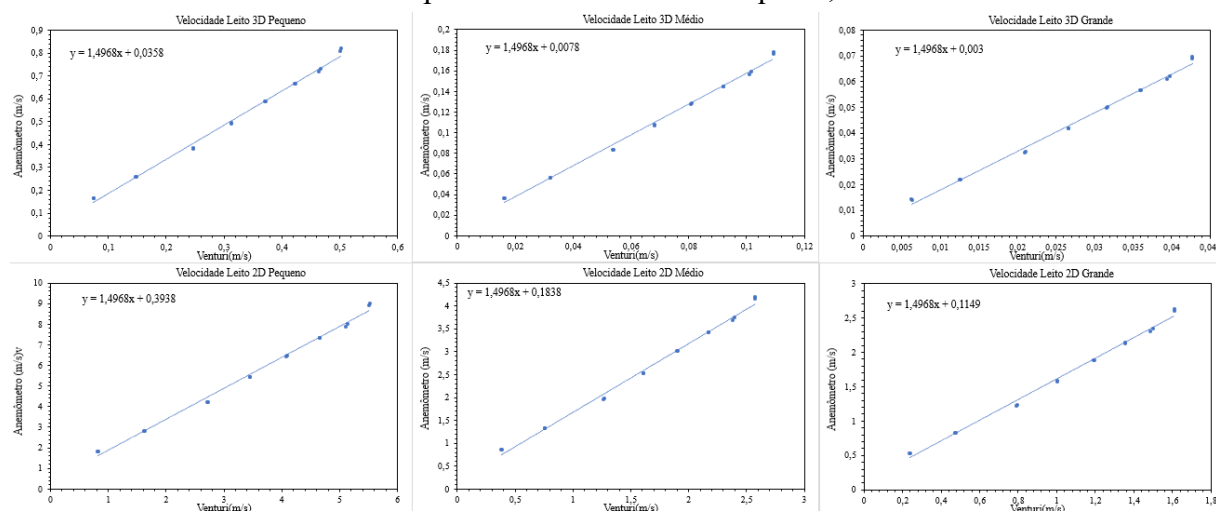
Na Figura 69 a Figura 73 estão todas as curvas de calibração utilizadas para os 5 tubos de Venturi com diâmetros $d = 2 \text{ mm}$, 4 mm , 8 mm , 17 mm , 33 mm .

Figura 69 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 2 \text{ mm}$ para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande



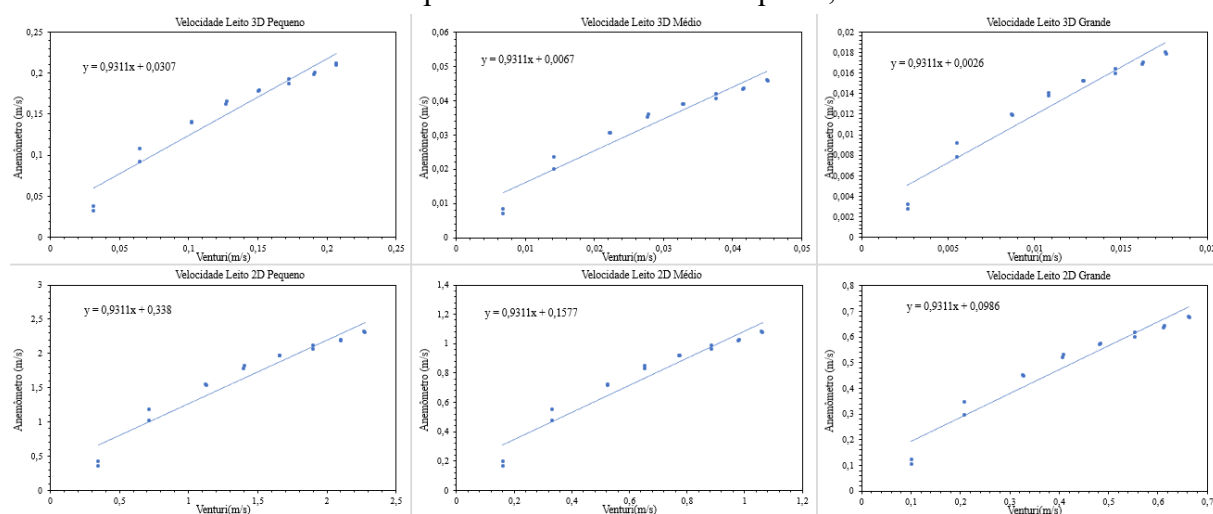
Fonte: Autoria própria

Figura 70 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 4 \text{ mm}$ para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande



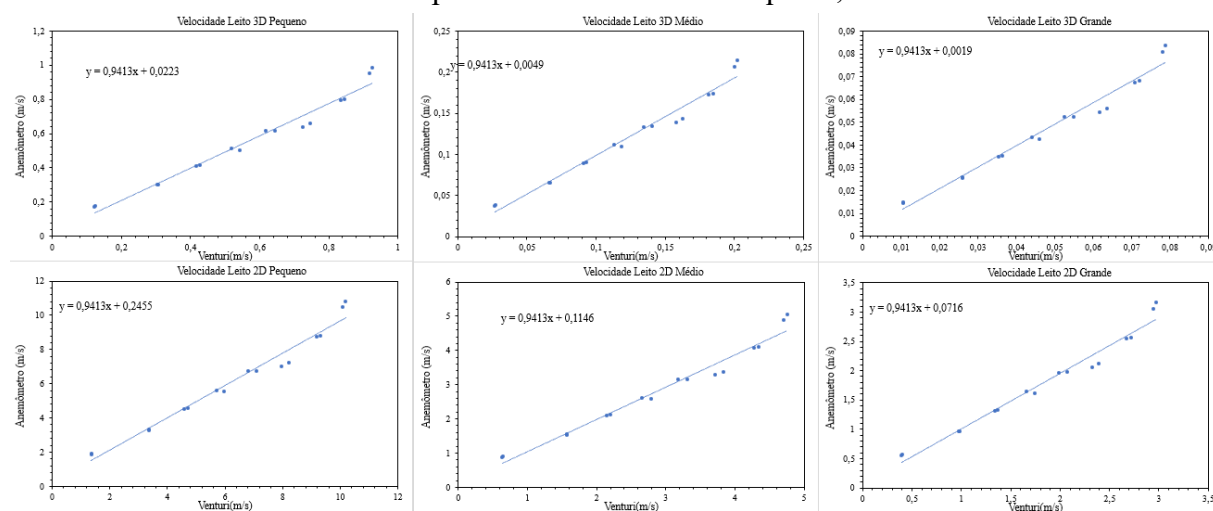
Fonte: Autoria própria

Figura 71 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 8$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande



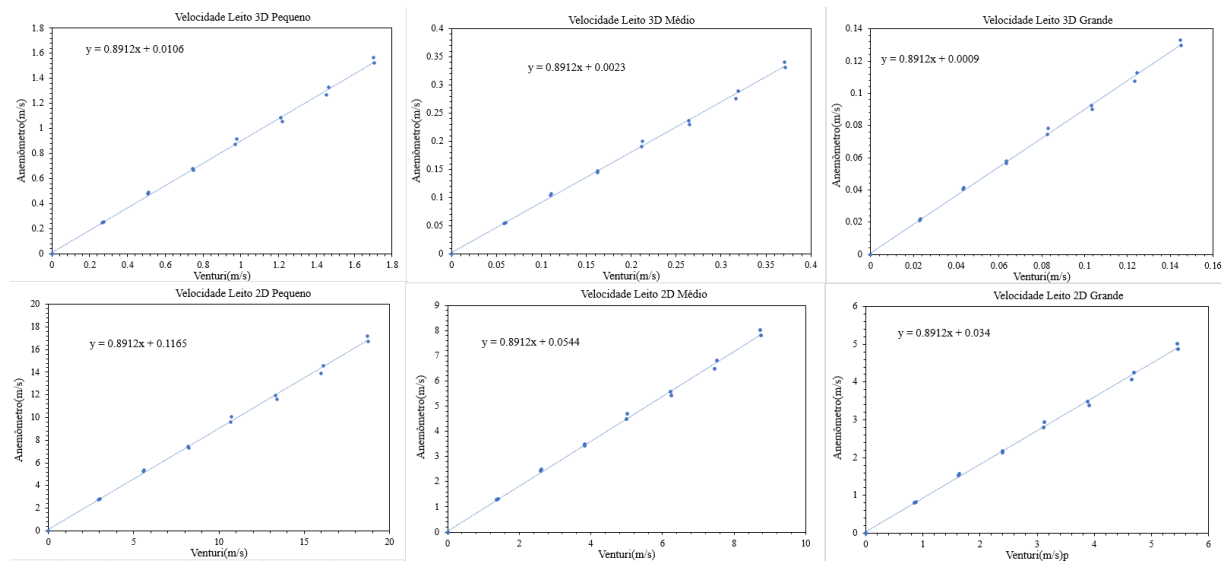
Fonte: Autoria própria

Figura 72 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 17$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande



Fonte: Autoria própria

Figura 73 - Relação entre as velocidades médias de um anemômetro de fio quente e o Tubo de Venturi $d = 33$ mm para os leitos 3D e 2D Pequeno, Médio e Grande

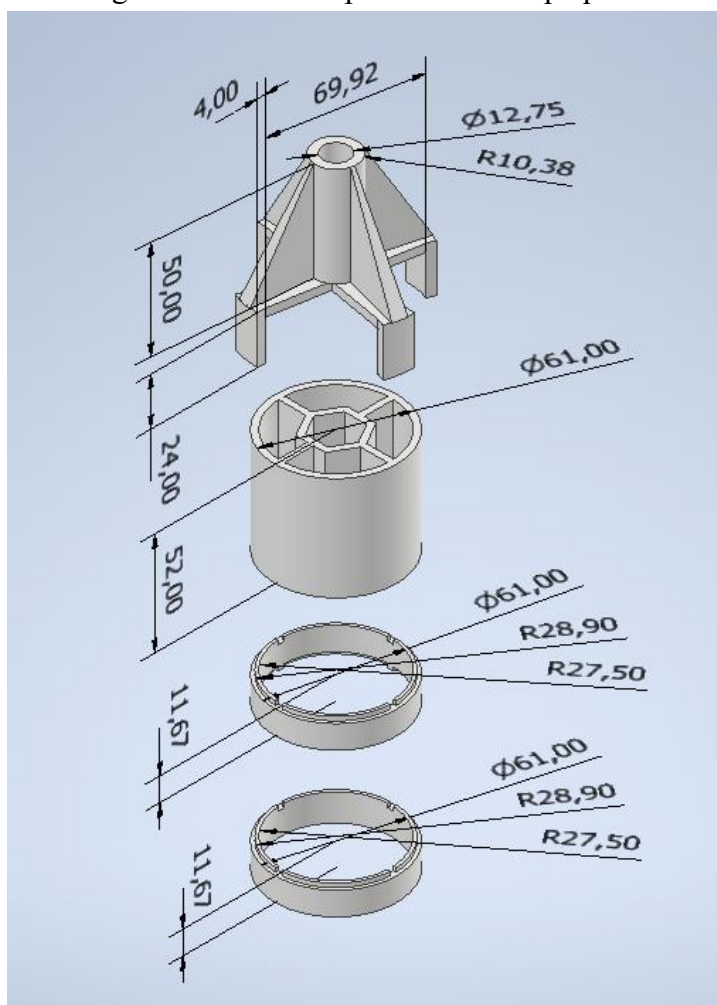


Fonte: Autoria própria

APÊNDICE H - Detalhamento dos Caladores

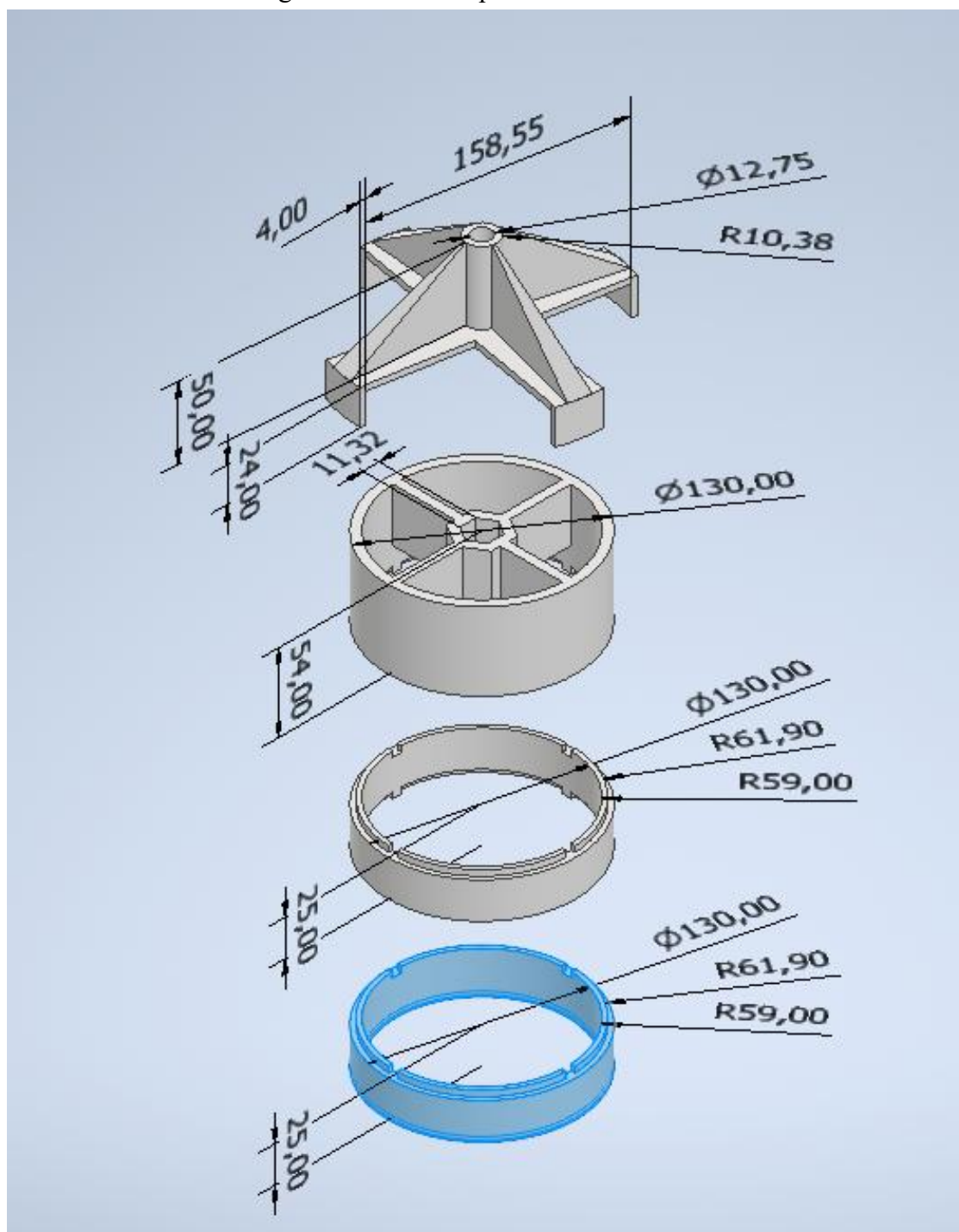
Figura 74 a Figura 76 estão os detalhes dos caladores, com suas peças formadas (de baixo para cima nas imagens) pelo anel base, anel intermediário, encaixe superior e garra guia. Interessante notar que apesar de ter apenas 1 anel intermediário na imagem, diversos anéis intermediários podem ser encaixados um em cima do outro possibilitando ajustar o tamanho de acordo com a altura do leito no experimento. Os caladores seguem exatamente o mesmo esquema, a única diferença mais importante é o diâmetro que aumenta proporcionalmente com o diâmetro do calador. Embora nem todas as dimensões estejam explicitadas nas imagens abaixo, foram selecionadas as dimensões mais importantes para o dimensionamento dos caladores. As outras dimensões podem variar sem afetar o sistema como um todo.

Figura 74 - Calador para o leito 3D pequeno



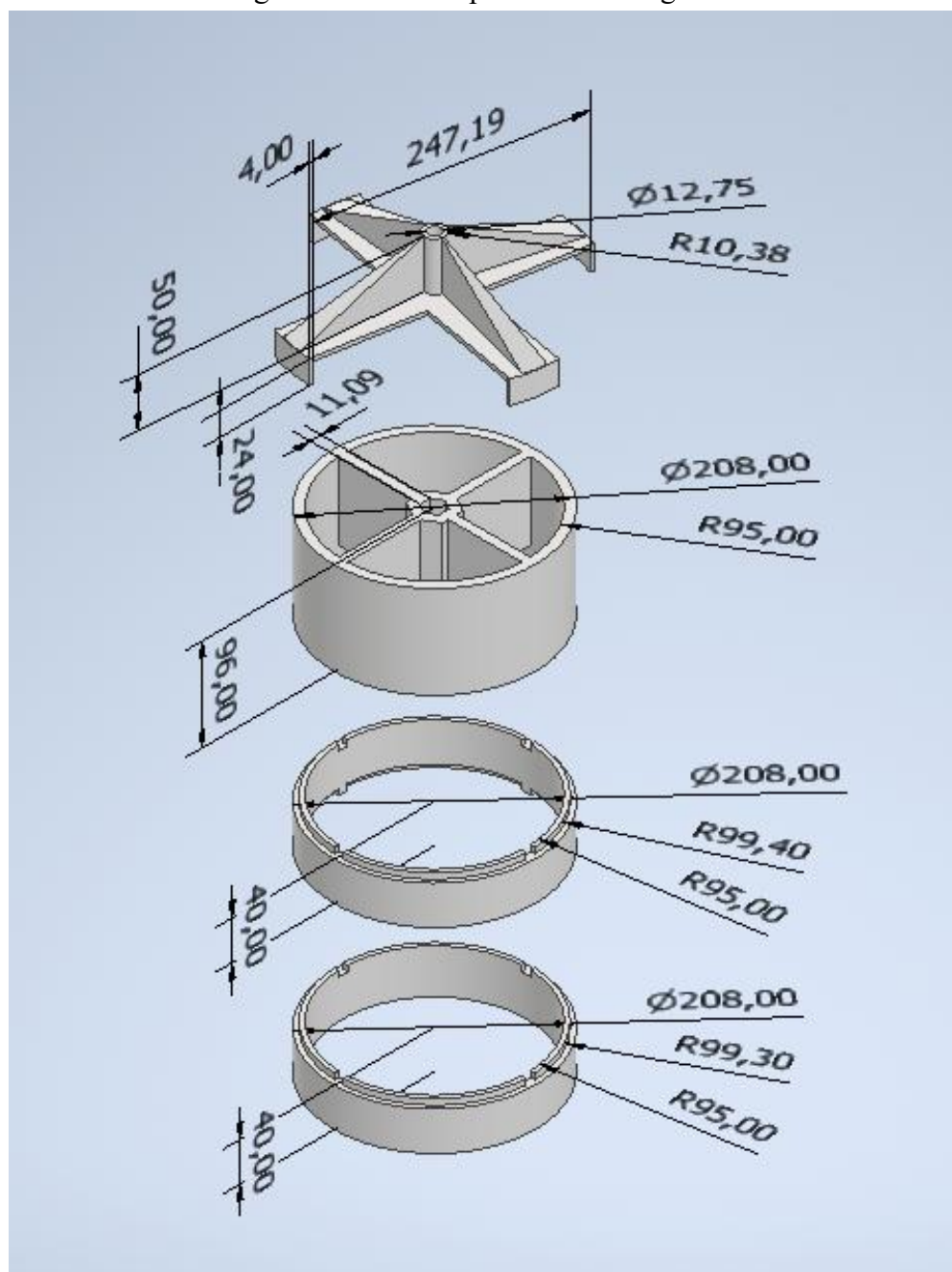
Fonte: Autoria própria

Figura 75 - Calador para o leito 3D médio



Fonte: Autoria própria

Figura 76- Calador para o leito 3D grande



Fonte: Autoria própria

Além disso, é válido mencionar mais algumas informações com relação a esse sistema. A garra guia é feita apenas para centralizar a barra que será usada para inserir o calador dentro do leito com relação a saída da câmara de fluidização, garantindo que o calador seja posicionado de forma correta em todo o experimento.

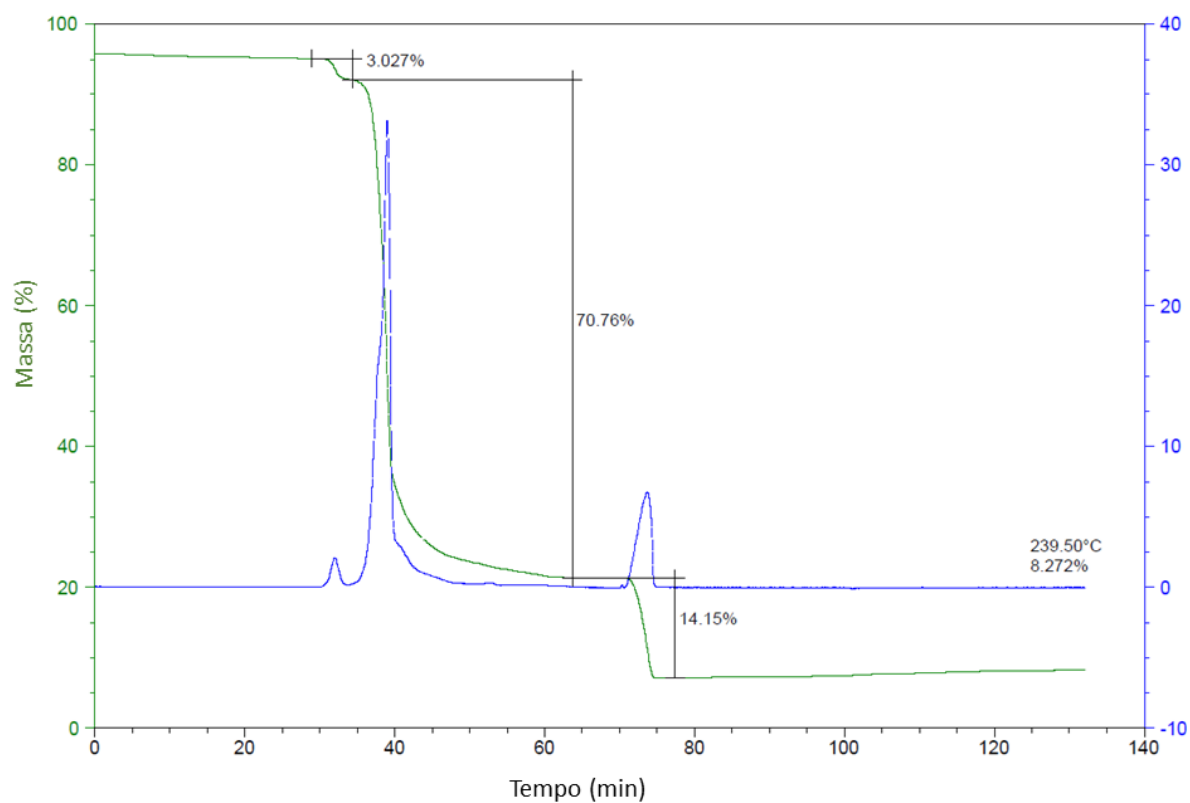
O encaixe superior é apenas para conectar os anéis com a barra. No caso dos anéis

intermediários e o anel base, eles são feitos para extrair e separar as amostras. A única diferença entre o anel intermediário e o anel base é que o anel base não possui um conector para conseguir se acoplar à um próximo anel.

APÊNDICE I - Análise Imediata da Casca de Arroz

Abaixo estão as curvas utilizadas como referência para análise imediata da Casca de Arroz na Figura 77.

Figura 77 – Análise imediata da casca de arroz usada nos experimentos
DSC-TGA



Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE J - Caracterização Granulométrica da Areia

Com o objetivo de caracterizar a granulometria do material particulado, mais especificamente a areia utilizada nos experimentos, teve que ser aplicado um procedimento que será descrito a seguir. Esse procedimento aplicado segue as normas da ABNT NBR 248 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

De acordo com as normas, os materiais que normalmente são necessários no processo estão listados a seguir de acordo com a ordem que será necessário:

1. Amostra representativa da areia utilizada no experimento.
2. Estufa para secagem de amostras (opcional);
3. Conjunto de peneiras metálicas padronizadas;
4. Agitador mecânico de peneiras (vibratório);
5. Balança analítica com precisão mínima de 0,1% da massa da amostra;

No processo de preparação da massa de areia, utiliza-se os dois primeiros itens da lista. A areia aplicada nos experimentos foi recebida previamente preparada por ter sido obtida no Instituto de Pesquisa Tecnológico (IPT), sendo peneirada na faixa entre 150 μm e 300 μm , o que facilitou a escolha das peneiras.

Para obter uma amostra representativa do material, os 25 kg de areia foram quarteados diversas vezes seguidas. O número de vezes que o material pode sofrer quarteamento não possui limites, no entanto, segundo as normas, para peneiras com aberturas menores que 4,75 mm, o que seria o caso, existe uma quantidade de massa mínima necessária de 300 g para fazer a caracterização.

O processo de quarteamento é descrito a seguir:

1. O material é dividido em 4 partes iguais;
2. Descartar 2 partes opostas;
3. Juntar 2 partes restantes;
4. Repetir o processo quantas vezes necessárias até alcançar a quantidade de massa desejada para a amostra.

Importante notar que, de acordo com as normas, devem ser utilizadas duas amostras

para o processo. Embora não esteja explícito em como obtê-las, foi aplicado o processo de quarteamento seguido até obter a massa da primeira amostra e, em seguida, o material foi misturado e o processo repetido para obter a massa da segunda amostra.

O quarteamento dos 25 kg de areia foi feito 5 vezes, reduzindo a massa de cada amostra para aproximadamente 781 g, totalizando uma quantidade de areia de 1,56 kg. Após o processo de quarteamento, a areia foi secada a 105° C na estufa por algumas horas.

O próximo passo é selecionar as peneiras corretas e uni-las para poder depositar o material na peneira de maior abertura. A quantidade de material que deve ser depositada sobre as peneiras para aberturas menores que 4,75 mm não pode ser maior que 200 gramas. Ou seja, cada amostra teve que ser seccionada e peneirada em partes.

A seleção das peneiras é feita de acordo com a Figura 78, seguindo os seguintes passos:

1. Determinar o maior diâmetro possível das partículas, sendo assim, definindo a peneira de maior abertura que será utilizada. No caso da areia que foi caracterizada, seria a peneira de 300 μm ;
2. Definir o número de peneiras que será utilizado, normalmente entre 5 e 7 peneiras. Foi estabelecido o valor de 7 peneiras;
3. Calcular o fator de tabelamento que é a razão entre a peneira de maior abertura por número de peneiras. Nesse caso, seria 300 μm dividido por 7, resultando em um fator de 0,043;
4. Começar na Figura 78 pela coluna com a peneira de maior abertura (300 μm) e encontrar qual linha tem o valor mais próximo do fator de tabelamento calculado no passo anterior. No exemplo, o valor mais próximo é 0,050 da linha de 250 μm ;
5. Selecionar a próxima coluna de acordo com o valor da última linha (250 μm) e repetir o processo encontrando o valor mais próximo do fator de tabelamento;
6. Realizar etapas 4 e 5 até alcançar o final da tabela.

Figura 78 - Diagrama de escolha das peneiras

Maior índice da Peneira (mm): 0,300							Número de Peneiras: 7							Fator de tabelamento: 0,043		
Diâmetro (mm)																
	0.053	0.063	0.075	0.090	0.106	0.125	0.150	0.180	0.212	0.250	0.300	0.355	0.425	0.500	0.600	0.710
0.053	0	0.01	0.022	0.037	0.053	0.072	0.097	0.127	0.159	0.197	0.247	0.302	0.372	0.447	0.547	0.657
0.063	-	0	0.012	0.027	0.043	0.062	0.087	0.117	0.149	0.187	0.237	0.292	0.362	0.437	0.537	0.647
0.075	-	-	0	0.015	0.031	0.05	0.075	0.105	0.137	0.175	0.225	0.28	0.35	0.425	0.525	0.635
0.090	-	-	-	0	0.016	0.035	0.06	0.09	0.122	0.16	0.21	0.265	0.335	0.41	0.51	0.62
0.106	-	-	-	-	0	0.019	0.044	0.074	0.106	0.144	0.194	0.249	0.319	0.394	0.494	0.604
0.125	-	-	-	-	-	0	0.025	0.055	0.087	0.125	0.175	0.23	0.3	0.375	0.475	0.585
0.150	-	-	-	-	-	-	0	0.03	0.062	0.1	0.15	0.205	0.275	0.35	0.45	0.56
0.180	-	-	-	-	-	-	-	0	0.032	0.07	0.12	0.175	0.245	0.32	0.42	0.53
0.212	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.038	0.088	0.143	0.213	0.288	0.388	0.498
0.250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.05	0.105	0.175	0.25	0.35	0.46
0.300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.055	0.125	0.2	0.3	0.41
0.355	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.07	0.145	0.245	0.355
0.425	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.075	0.175	0.285
0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.1	0.21
0.600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.11
0.710	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
0.850	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

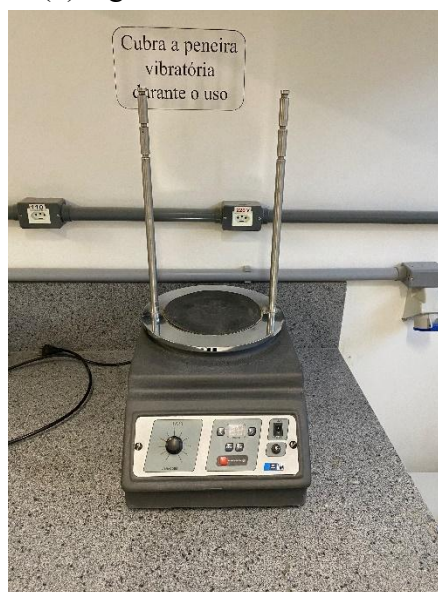
Fonte: Grupo LC3

Após a seleção das peneiras, elas são posicionadas uma em cima da outra, com a peneira de maior abertura no topo e a menor na base, seguida de um recipiente de fundo formando uma coluna de peneiras conforme mostra na Figura 79 (a). O material, no caso a areia, é colocado aos poucos na peneira superior, tomando o cuidado de não ultrapassar o limite máximo de massa definido pela norma. Essa torre de peneiras é colocada no agitador mecânico vibratório por 10 minutos conforme Figura 79 (b).

Figura 79 - (a) Peneiras parcialmente empilhadas (b) Agitador mecânico vibratório



(a)



(b)

Fonte: Grupo LC3

Após essa etapa, as peneiras são removidas e o material retido em cada peneira é pesado em uma balança. Esse processo se repete até que toda a massa das amostras seja seccionado em diferentes faixas granulométricas.

Posteriormente, diversos parâmetros são calculados para obter o perfil granulométrico do material. Com base na massa retida em cada peneira (m_i) e na massa total da amostra (m_{total}), calcularam-se:

Porcentagem retida em cada peneira (R_i):

$$R_i = \frac{m_i}{m_{\text{total}}} \times 100$$

Porcentagem acumulada retida (A_i):

$$A_i = \sum_{j=1}^i R_j$$

Porcentagem acumulada passante (P_i):

$$P_i = 100 - A_i$$

Esses valores foram utilizados para a construção da curva granulométrica (porcentagem passante acumulada vs diâmetro das peneiras).

A partir da curva granulométrica, foram determinados os seguintes diâmetros por interpolação linear:

1. D_{10} : diâmetro para o qual 10% da amostra passa.
2. D_{50} (mediana): diâmetro correspondente a 50% passante.
3. D_{90} : diâmetro correspondente a 90% passante.

Esses valores caracterizam a distribuição do material e são usados para cálculo de parâmetros adimensionais e modelagem do comportamento do leito.

Também foi calculado o índice de uniformidade é obtido por:

$$U = D_{60}/D_{10}$$

Este índice indica a dispersão das partículas:

$U < 2$: material uniforme;

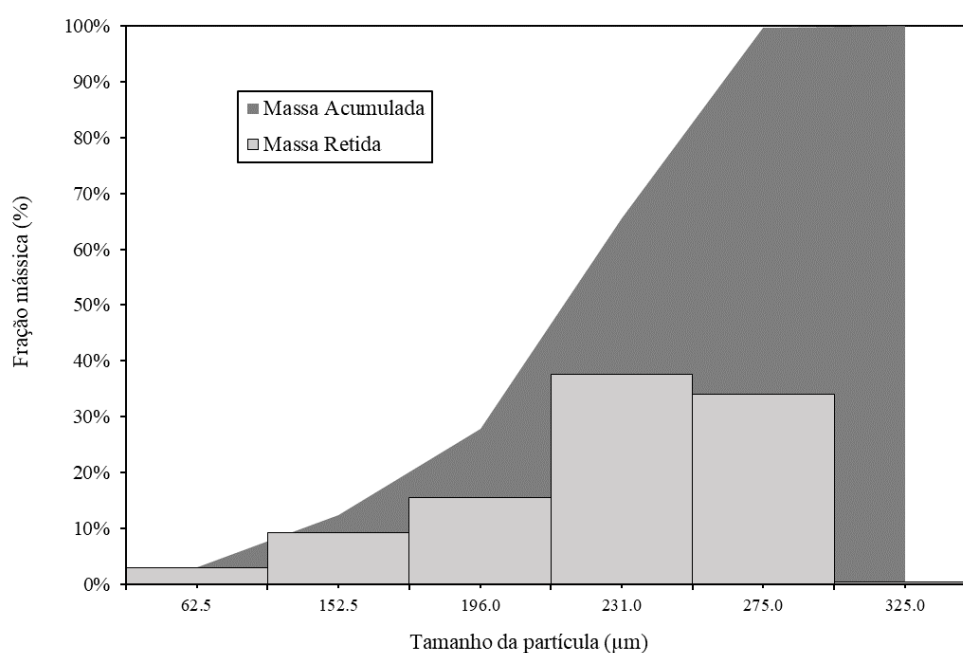
$2 \leq U < 4$: distribuição moderada;

$U \geq 4$: material heterogêneo.

Por fim, foi obtido o diâmetro médio de Sauter que foi explicado na seção 2.1.8, pelas equações (5), (6) e (7).

A caracterização granulométrica da areia IPT da faixa de $150\mu\text{m}$ - $300\mu\text{m}$ está mostrada na Figura 80, na qual está a distribuição da fração mássica de cada peneira, assim como a fração mássica acumulada.

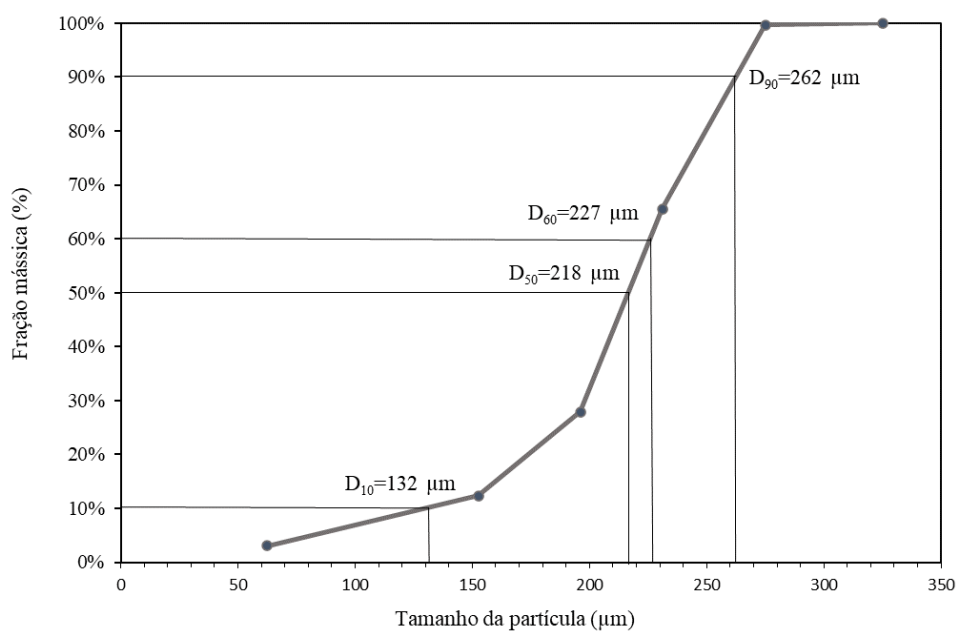
Figura 80 - Distribuição granulométrica da areia IPT



Fonte: Autoria Própria

No entanto, para obter os valores de D_{10} , D_{50} , D_{60} e D_{90} assim como o valor de U , a curva da fração mássica acumulado foi montado separadamente e está mostrado na Figura 81, com os valores retirados na curva. Com os valores de D_{60} e D_{10} obtidos, calculou-se o $U = 1,71$, sendo classificado como um material uniforme.

Figura 81 - Distribuição granulométrica com fração mássica acumulada da areia IPT com os valores de D definidos na curva.



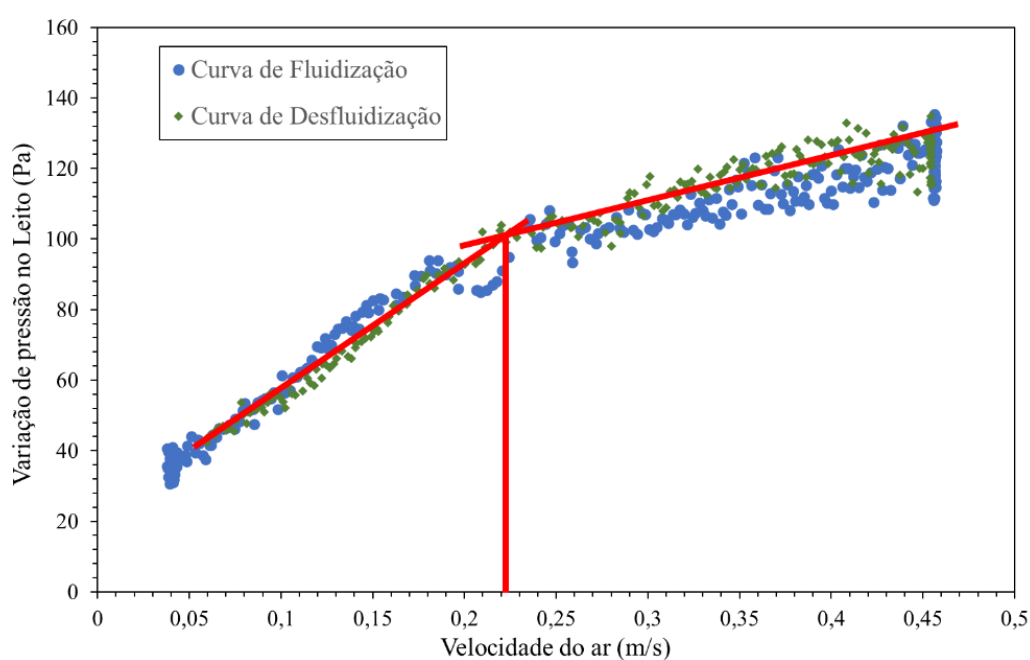
Fonte: Autoria Própria

O diâmetro médio (d_p) foi calculado com base nos dados mostrados na Figura 80 e na Figura 81, obtendo um valor de $d_p = 209,56 \mu\text{m}$.

APÊNDICE K - Curvas de Fluidização e Desfluidização para Obtenção da Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf})

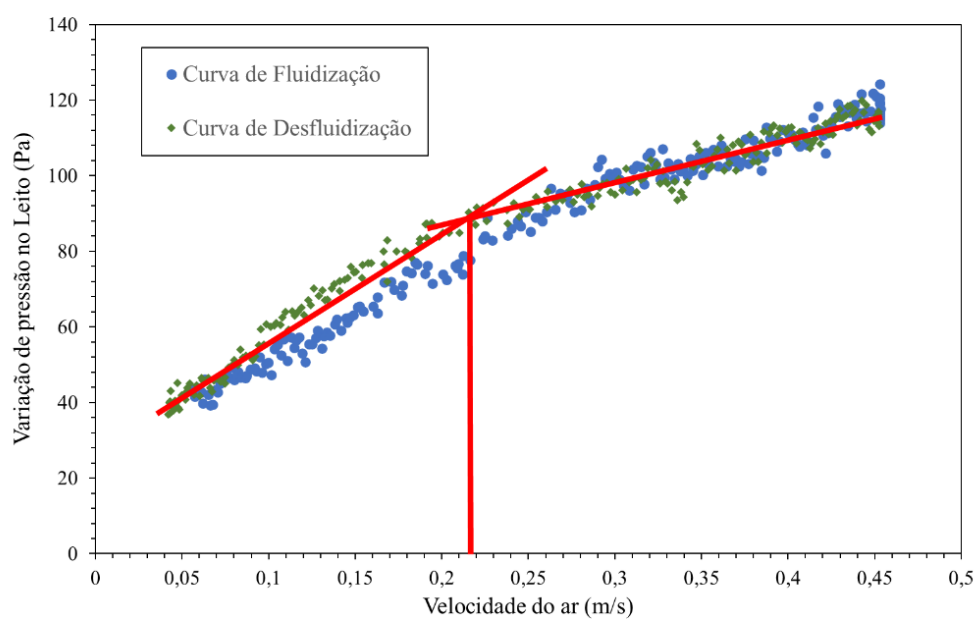
Figura 82 a Figura 99 estão as curvas de fluidização e desfluidização obtidas para cada um dos pontos da matriz de Taguchi, com seus respectivos valores de U_{mf} obtidas a partir dos gráficos.

Figura 82- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 1



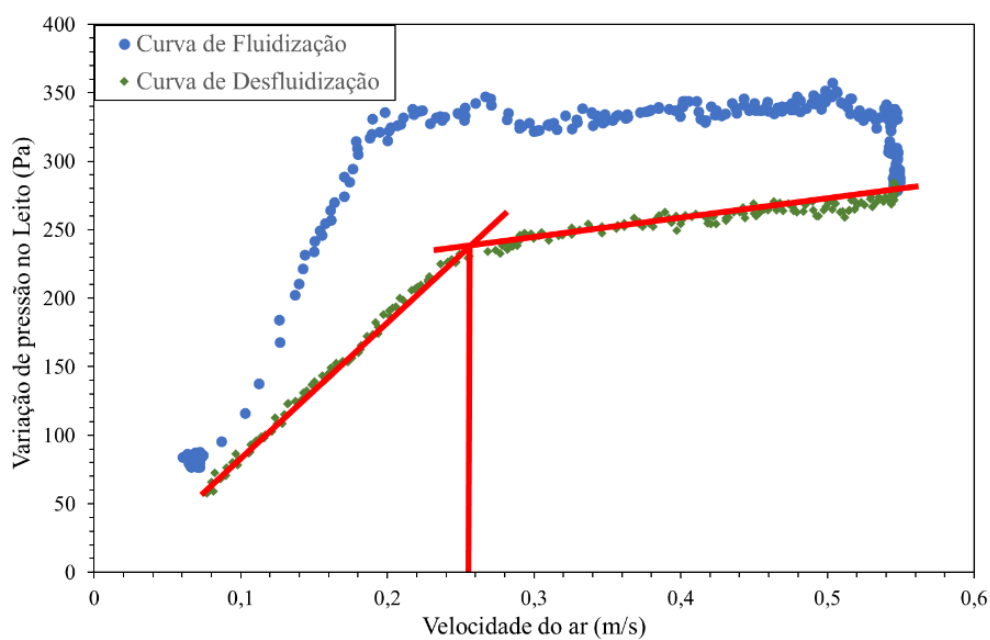
Fonte: Autoria Própria

Figura 83- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 1 Réplica 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 84- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 2 Réplica 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 85- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 2 Réplica 2

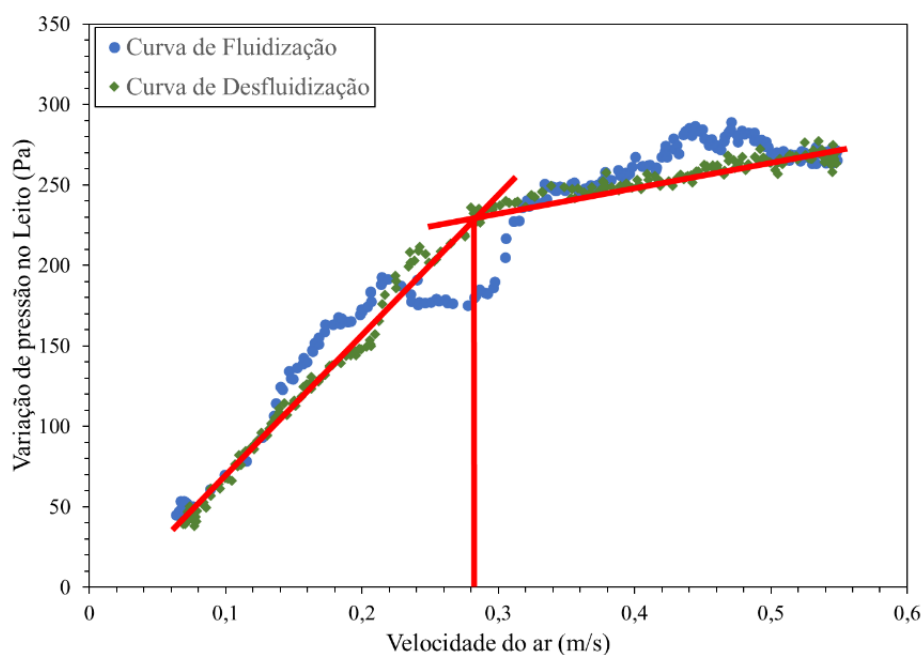


Figura 86- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 3 Réplica 1

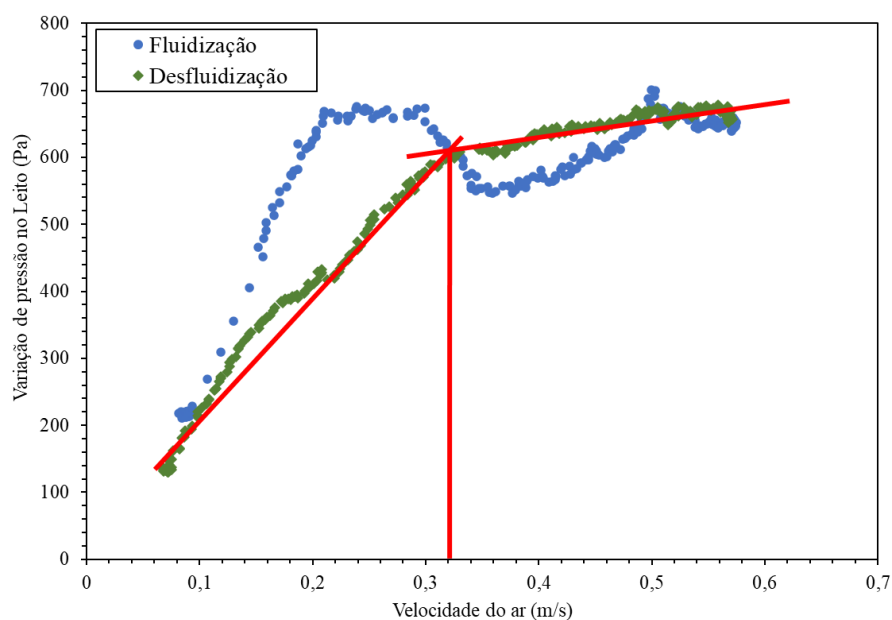
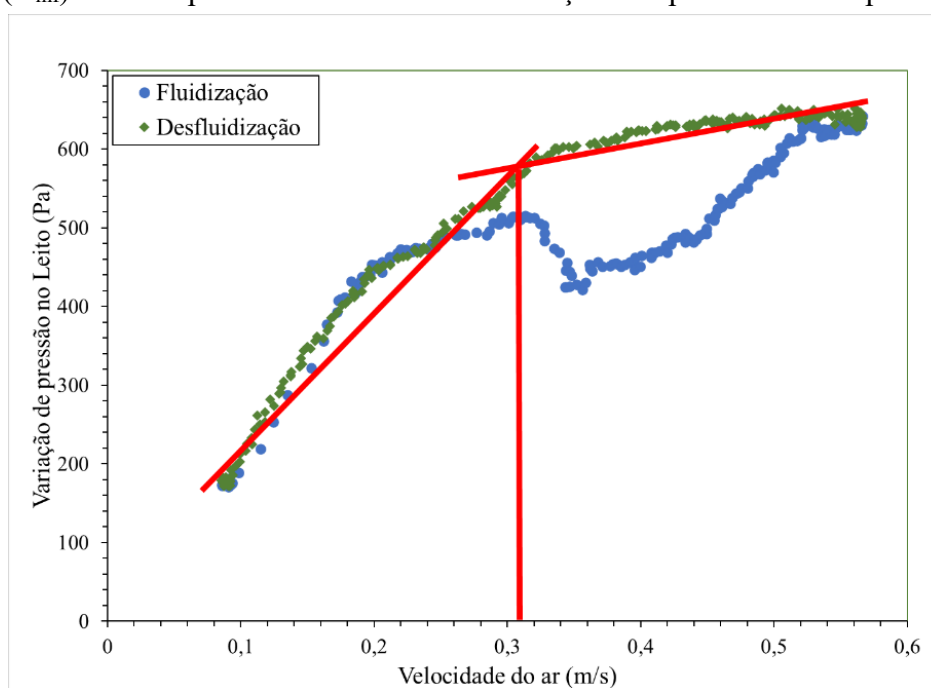
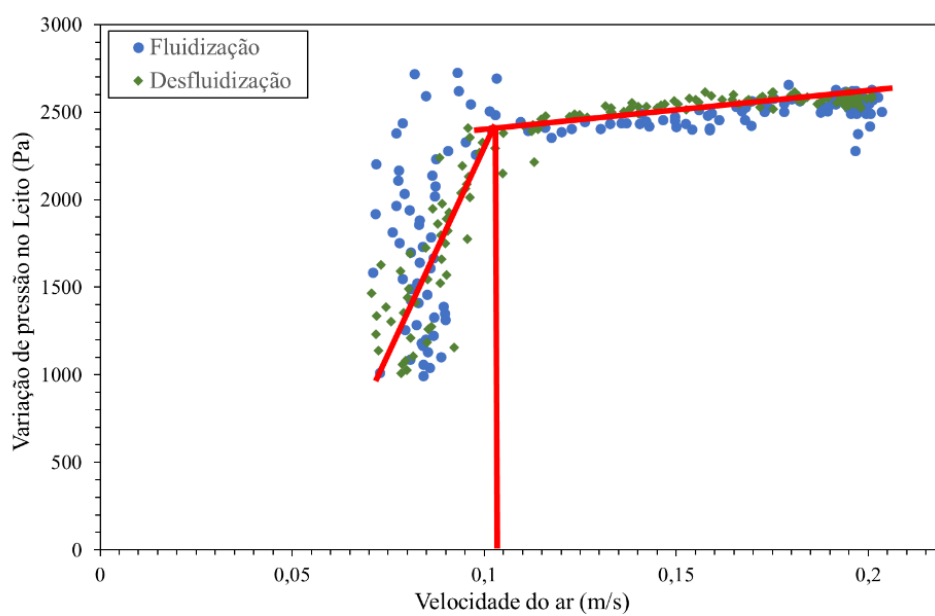


Figura 87- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 3 Réplica 2



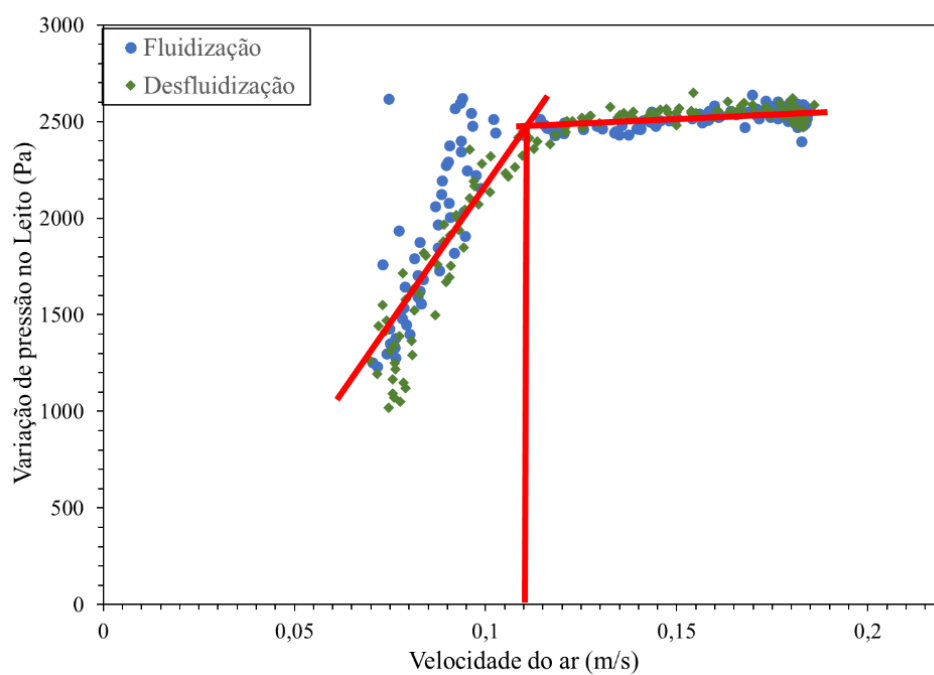
Fonte: Autoria Própria

Figura 88- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 4 Réplica 1



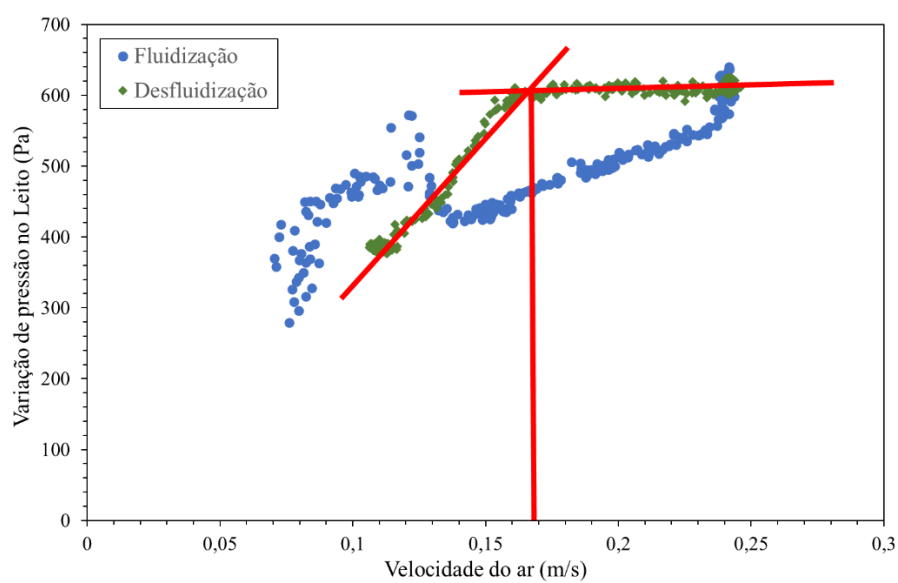
Fonte: Autoria Própria

Figura 89- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 4 Réplica 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 90- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 5 Réplica 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 91- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 5 Réplica 2

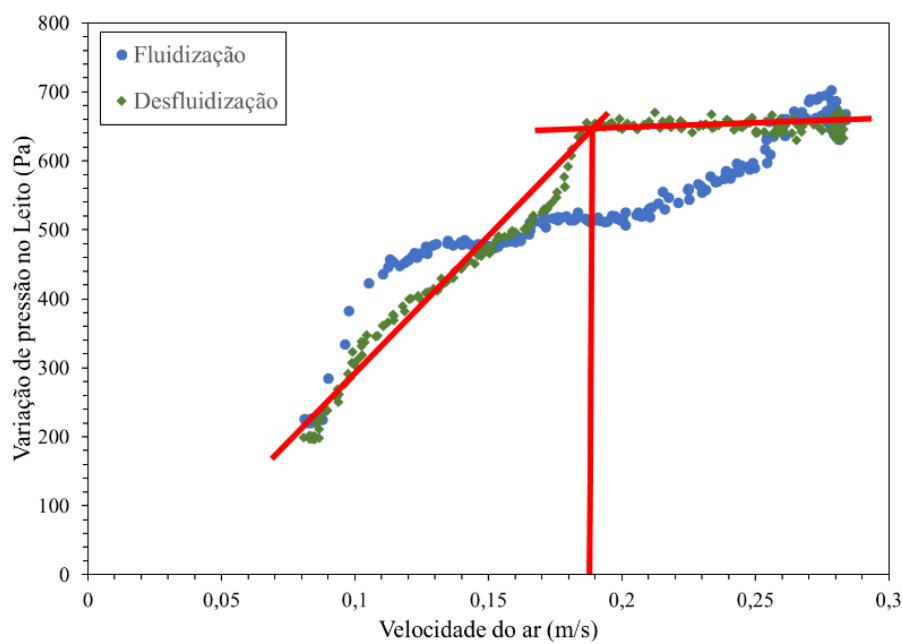


Figura 92- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 6 Réplica 1

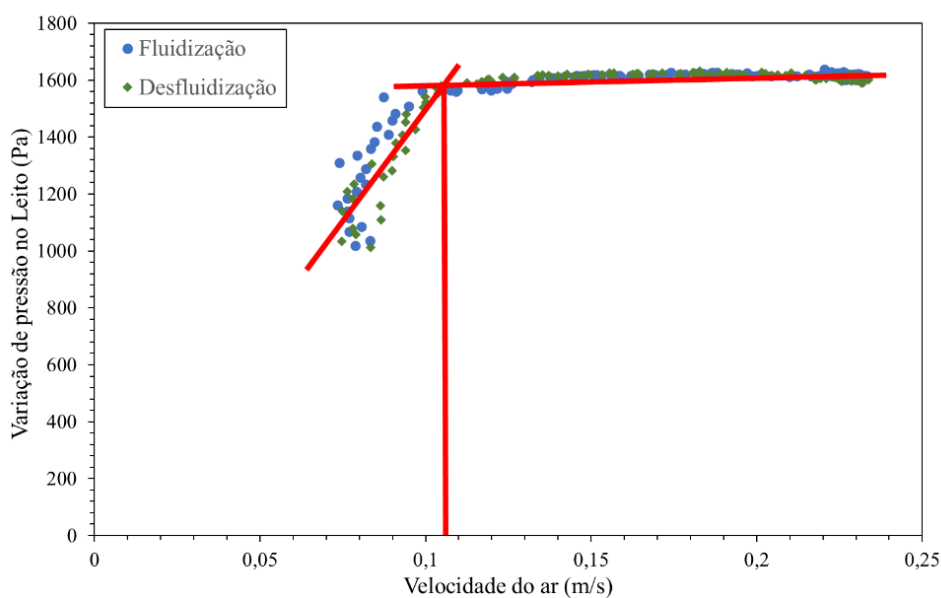


Figura 93- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 6 Réplica 2

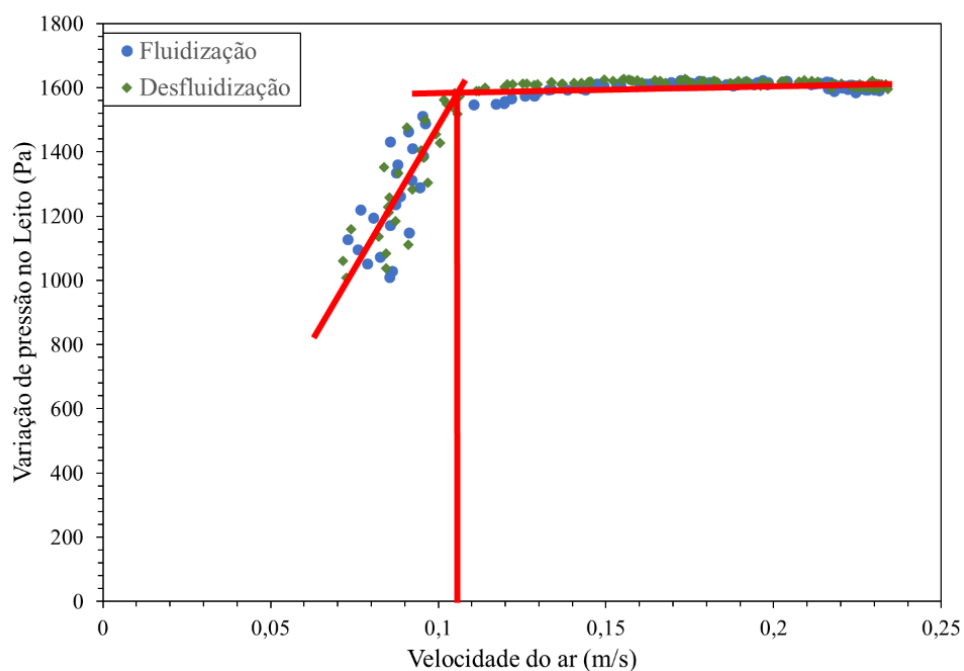


Figura 94- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 7 Réplica 1

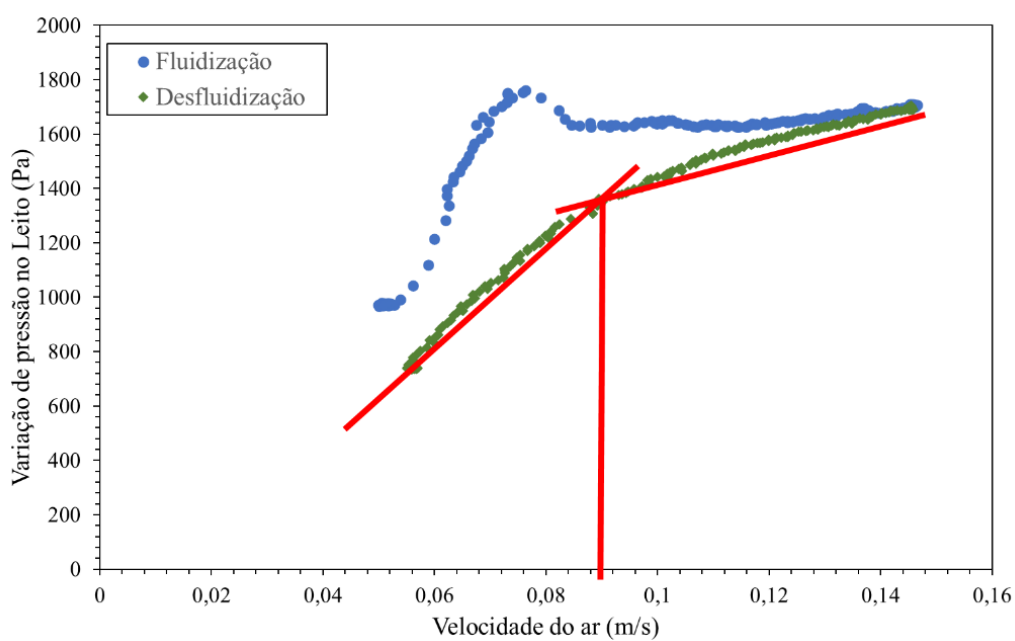


Figura 95- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 7 Réplica 2

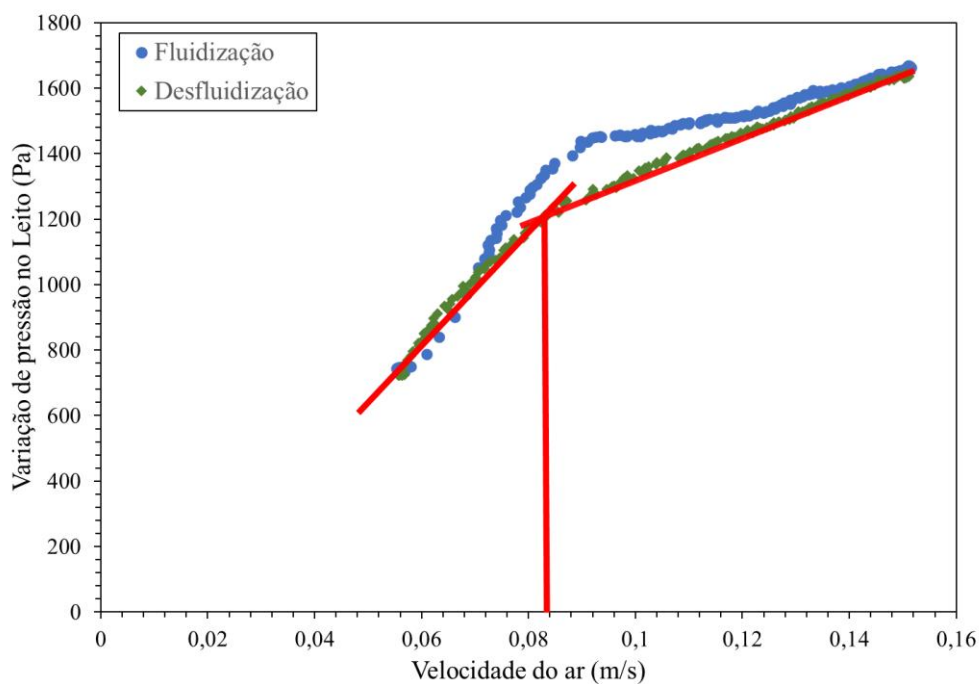


Figura 96- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 8 Réplica 1

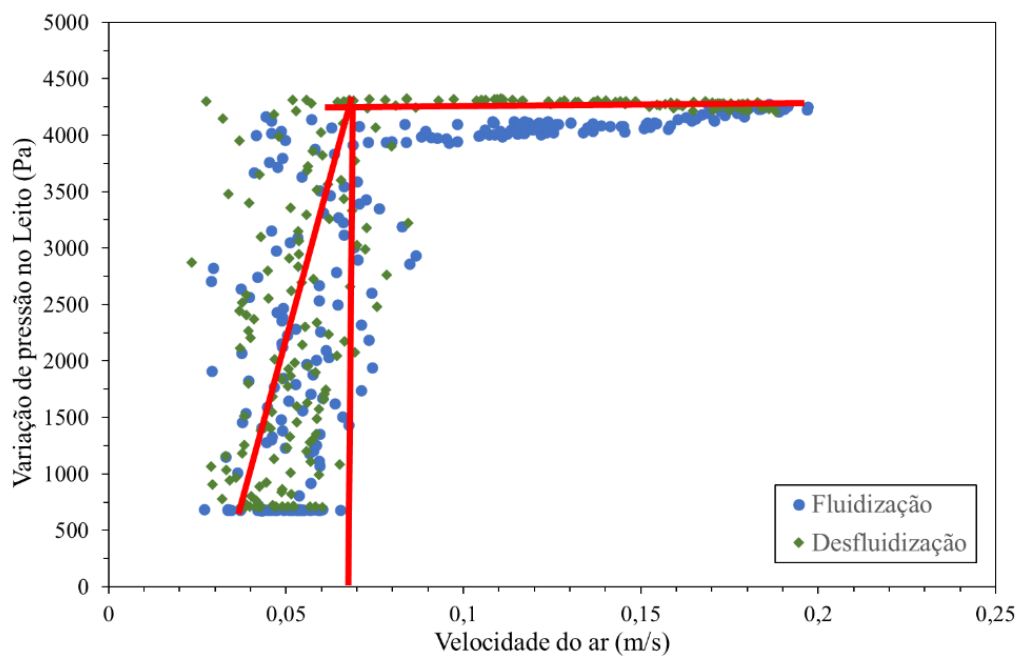
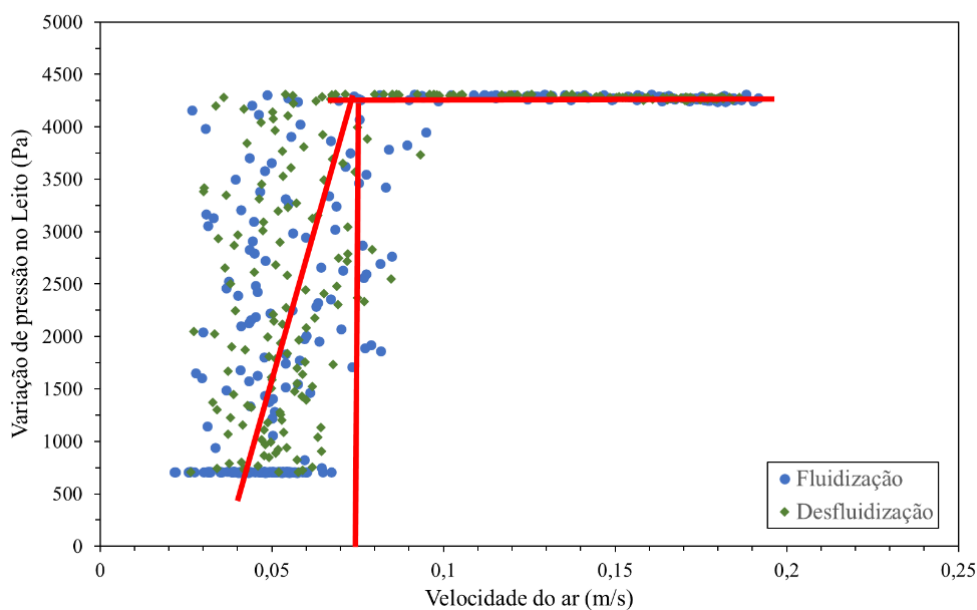
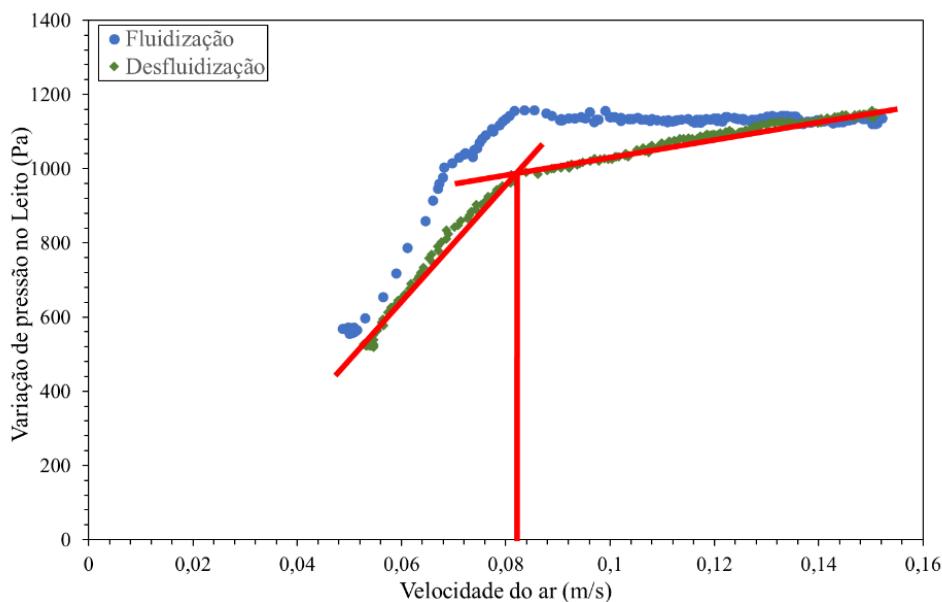


Figura 97- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 8 Réplica 2



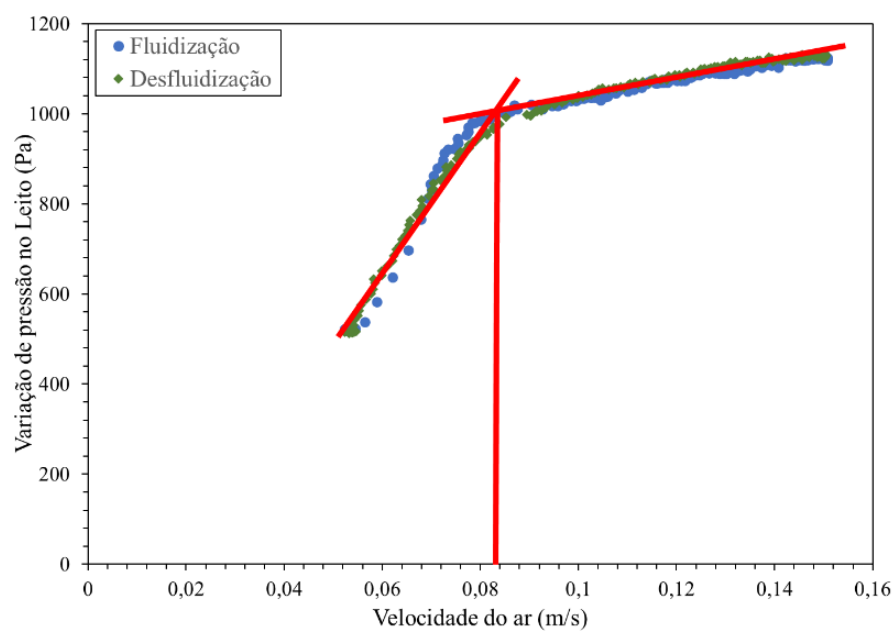
Fonte: Autoria Própria

Figura 98- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 9 Réplica 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 99- Curvas de fluidização e desfluidização com Velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) obtida a partir da curva de desfluidização - Experimento 9 Réplica 2

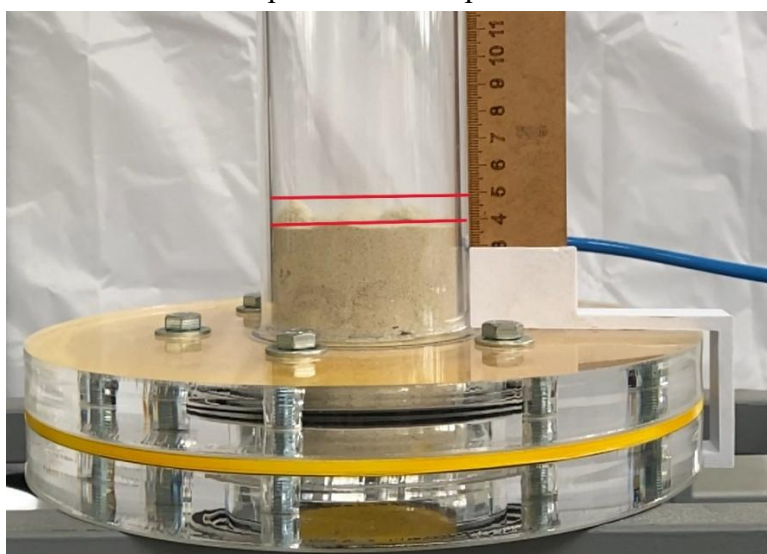


Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE L - Capturas se Tela para Obtenção das Alturas de Fluidização e Expansão Do Leito

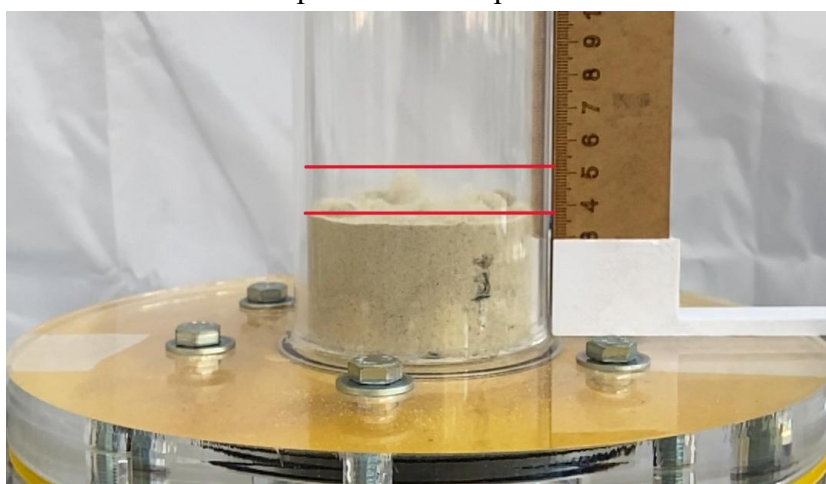
Figura 100 a Figura 135 estão as capturas de tela dos vídeos de cada um dos experimentos que foram usados como referência para coletar os valores de expansão do leito.

Figura 100- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 1 Réplica 1



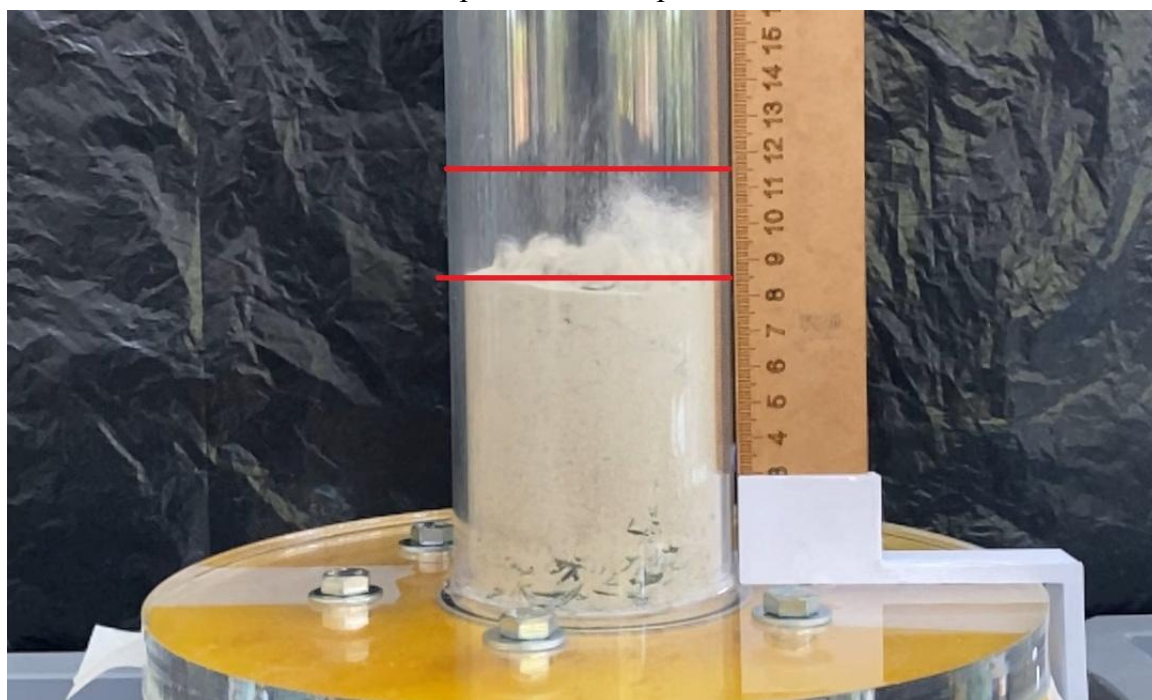
Fonte: Autoria Própria

Figura 101- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito - Experimento 1 Réplica 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 102- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 2 Réplica 1



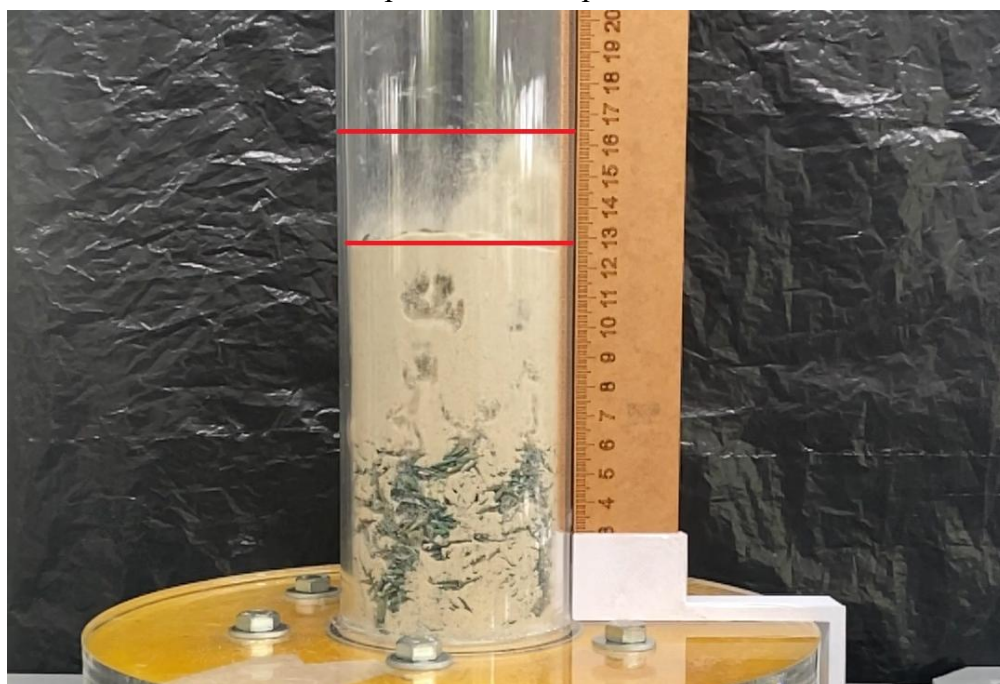
Fonte: Autoria Própria

Figura 103- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 2 Réplica 2



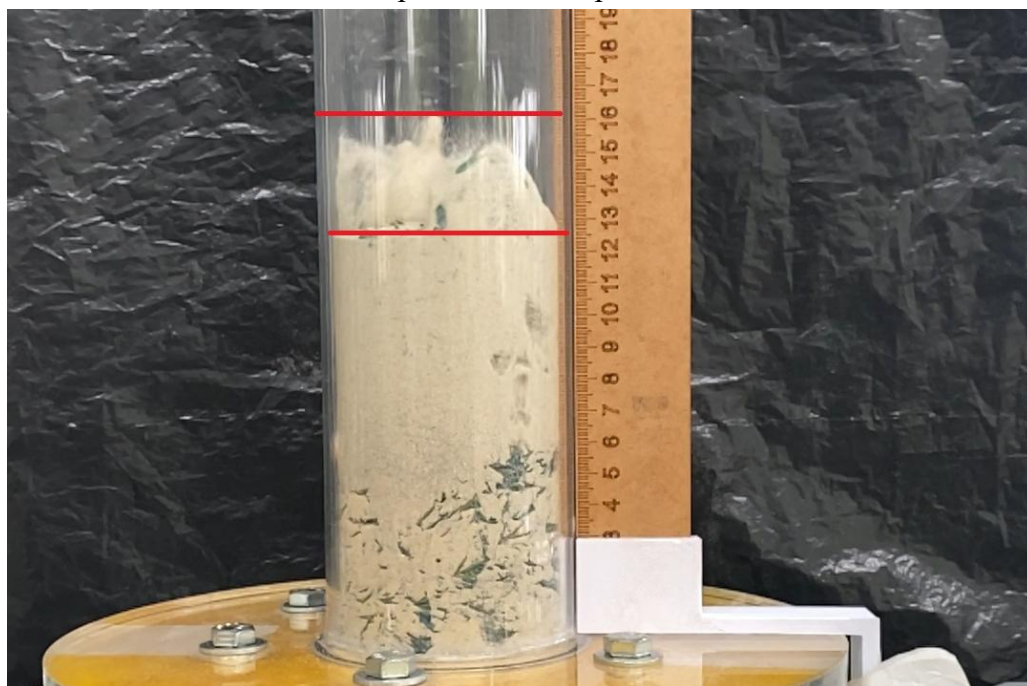
Fonte: Autoria Própria

Figura 104- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 3 Réplica 1



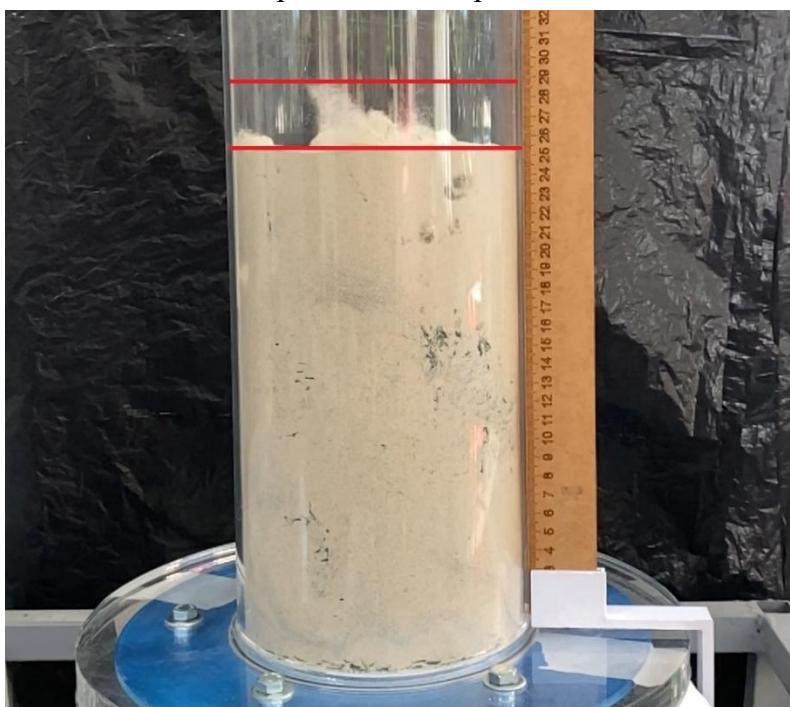
Fonte: Autoria Própria

Figura 105- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 3 Réplica 2



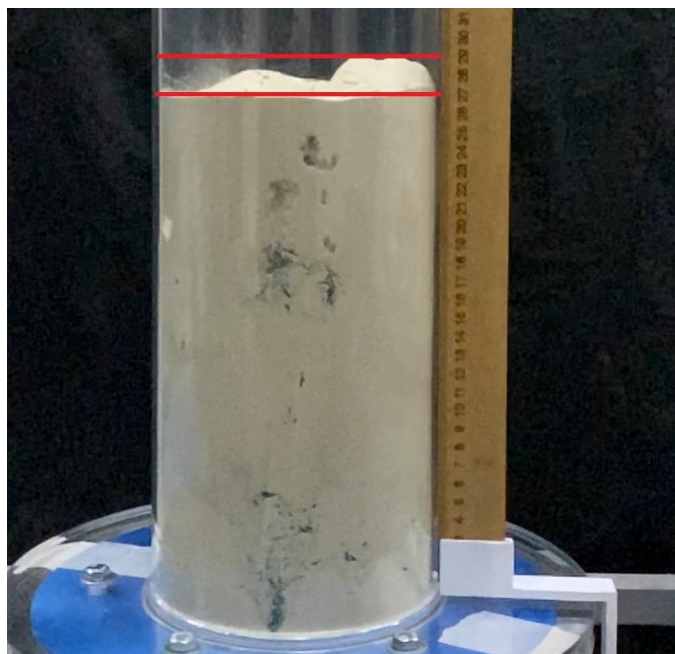
Fonte: Autoria Própria

Figura 106- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 4 Réplica 1



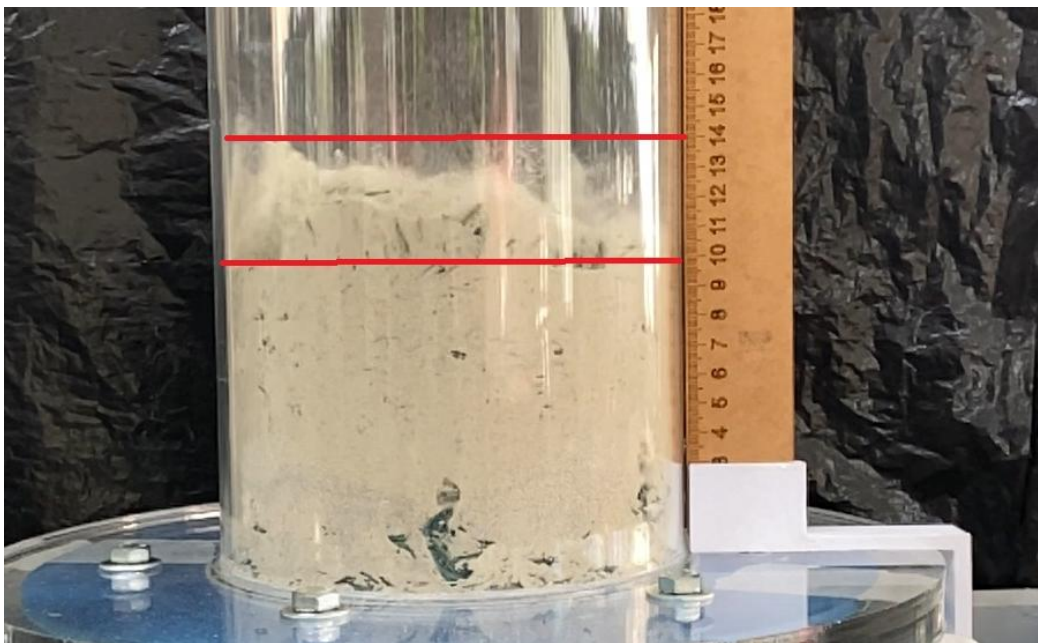
Fonte: Autoria Própria

Figura 107- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 4 Réplica 2



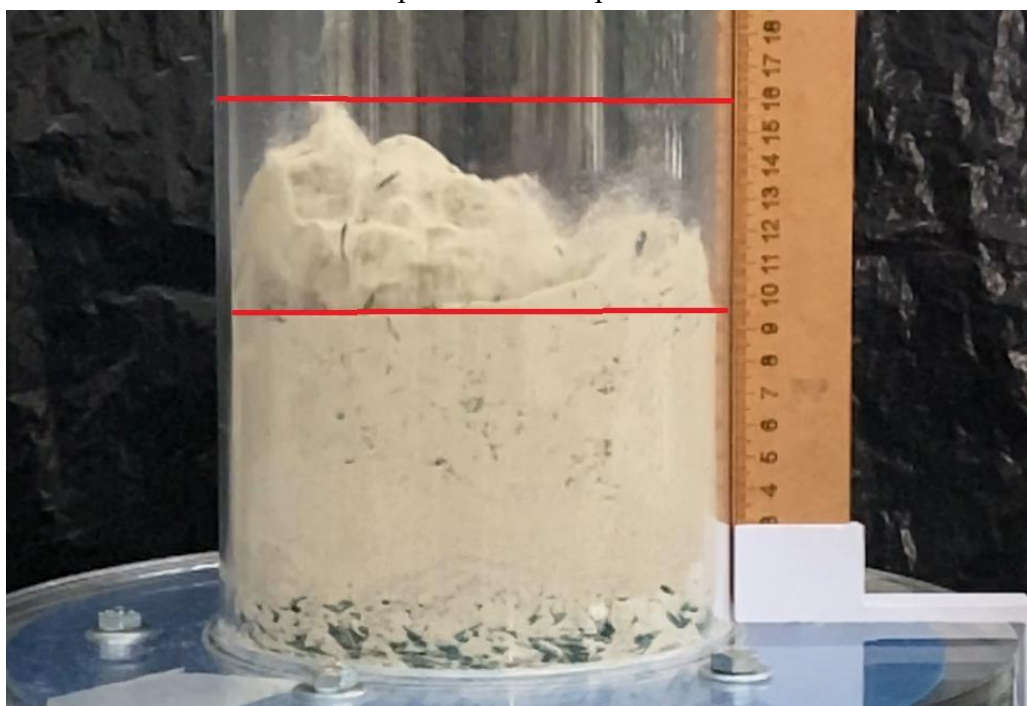
Fonte: Autoria Própria

Figura 108- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 5 Réplica 1



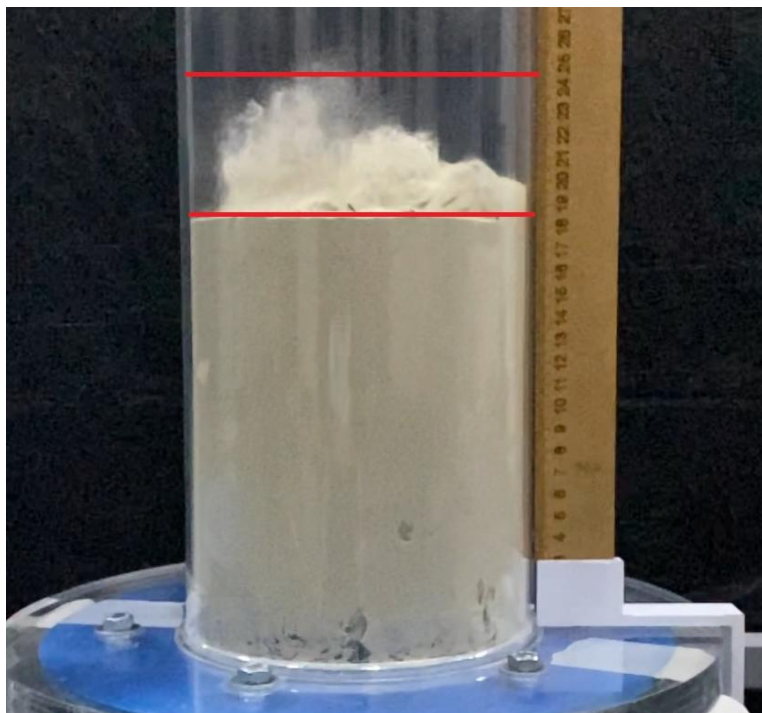
Fonte: Autoria Própria

Figura 109- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 5 Réplica 2



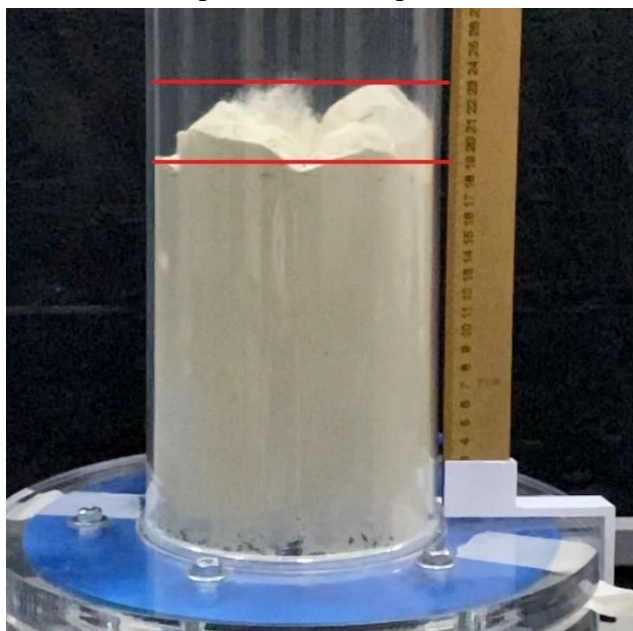
Fonte: Autoria Própria

Figura 110- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 6 Réplica 1



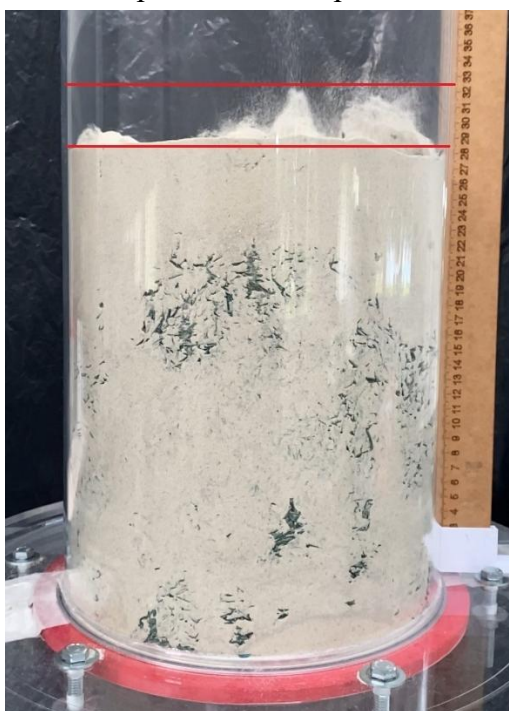
Fonte: Autorial Própria

Figura 111- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 6 Réplica 2



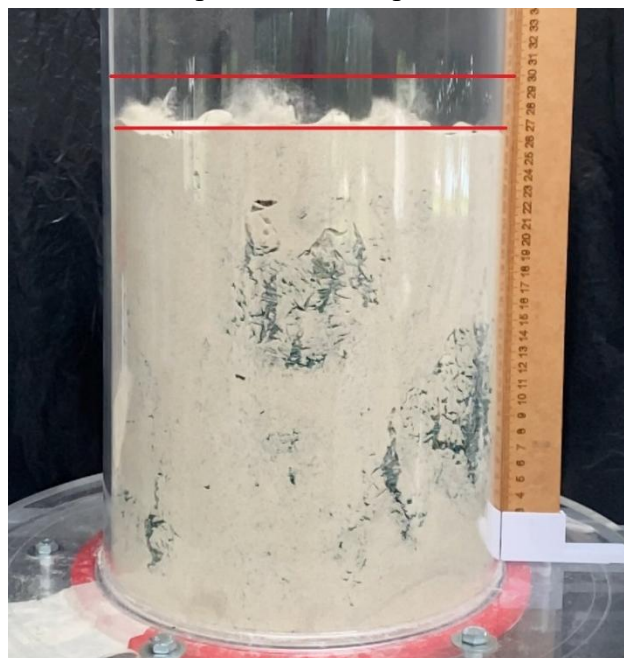
Fonte: Autorial Própria

Figura 112- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 7 Réplica 1



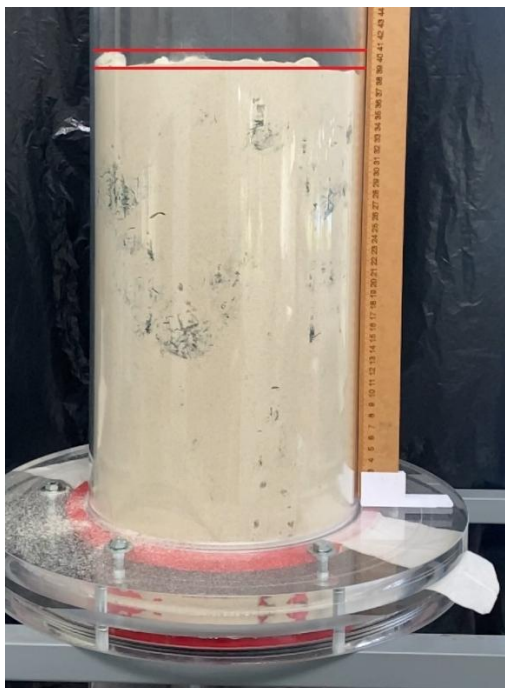
Fonte: Autoria Própria

Figura 113- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 7 Réplica 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 114- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 8 Réplica 1



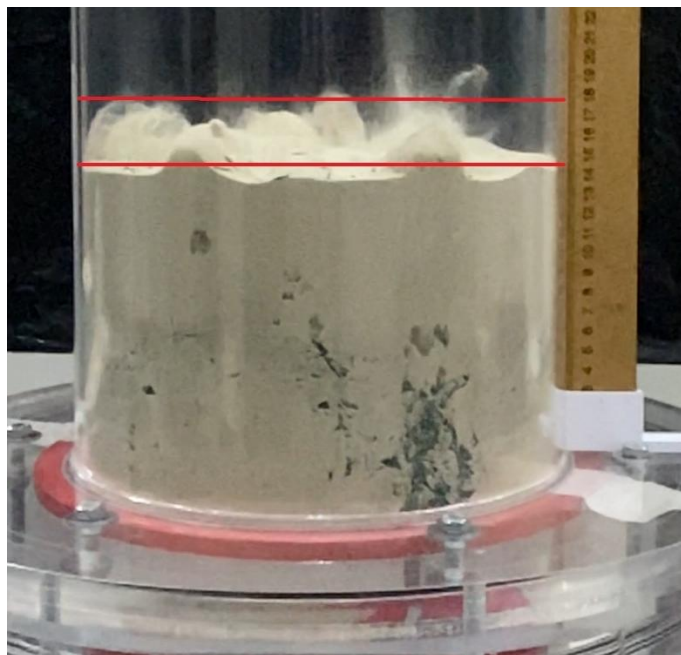
Fonte: Autoria Própria

Figura 115- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 8 Réplica 2



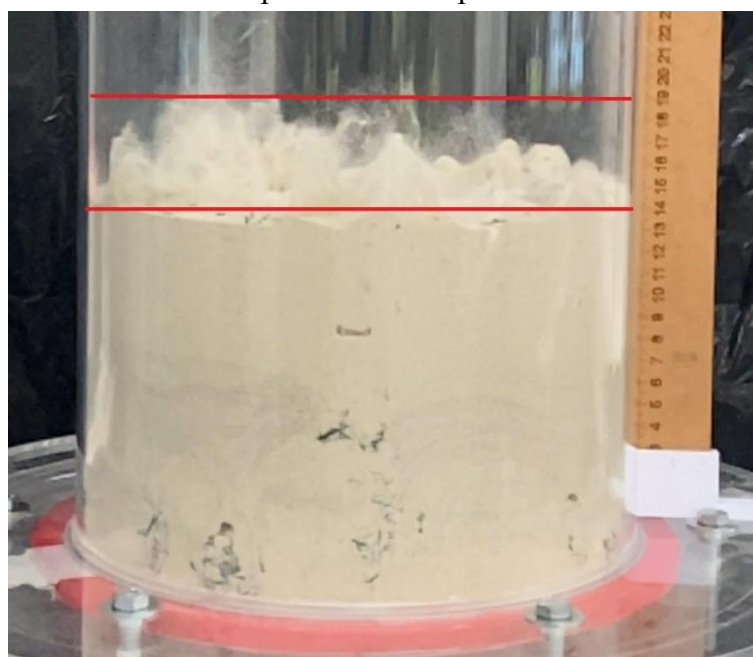
Fonte: Autoria Própria

Figura 116- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 9 Réplica 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 117- Captura de tela do vídeo de fluidização para avaliar a expansão do leito -
Experimento 9 Réplica 2

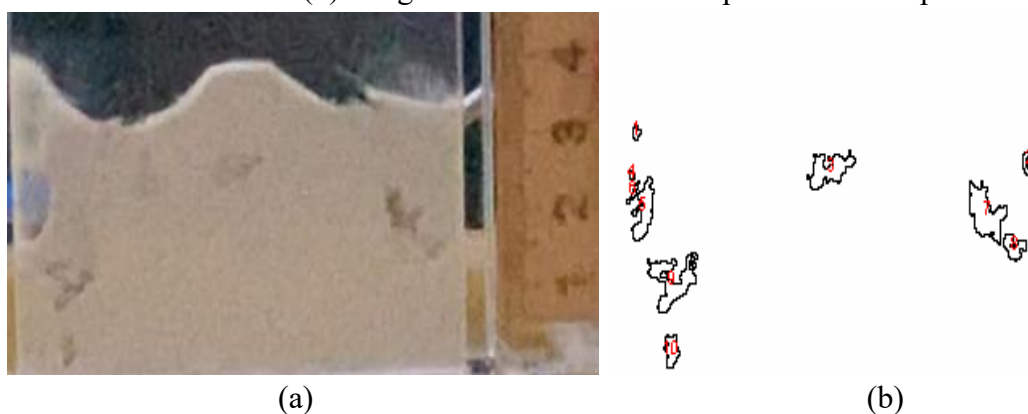


Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE M - COLETÂNEA DAS IMAGENS UTILIZADAS PARA DETERMINAR DIÂMETRO DE BOLHA

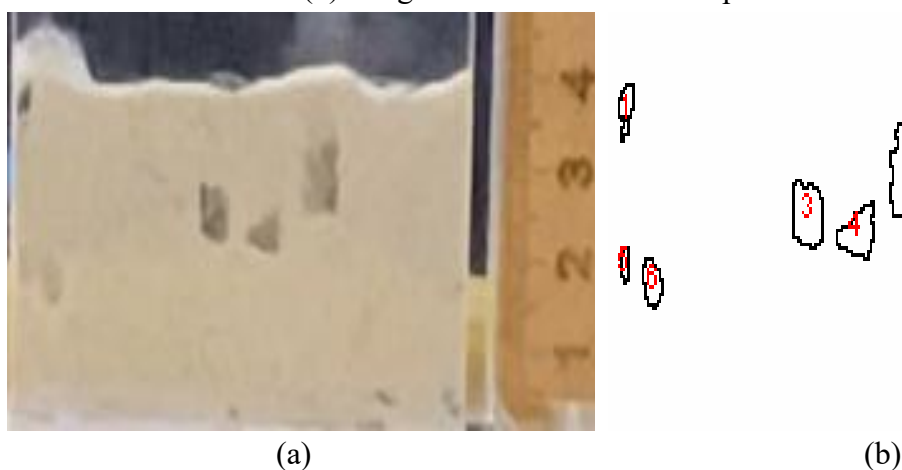
Abaixo estão as imagens utilizadas para determinar o Diâmetro médio das bolhas nos Leitos Bidimensionais. Essas imagens foram selecionadas aleatoriamente dos vídeos e tratadas com o uso do software ImageJ.

Figura 118- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 1 Réplica 1



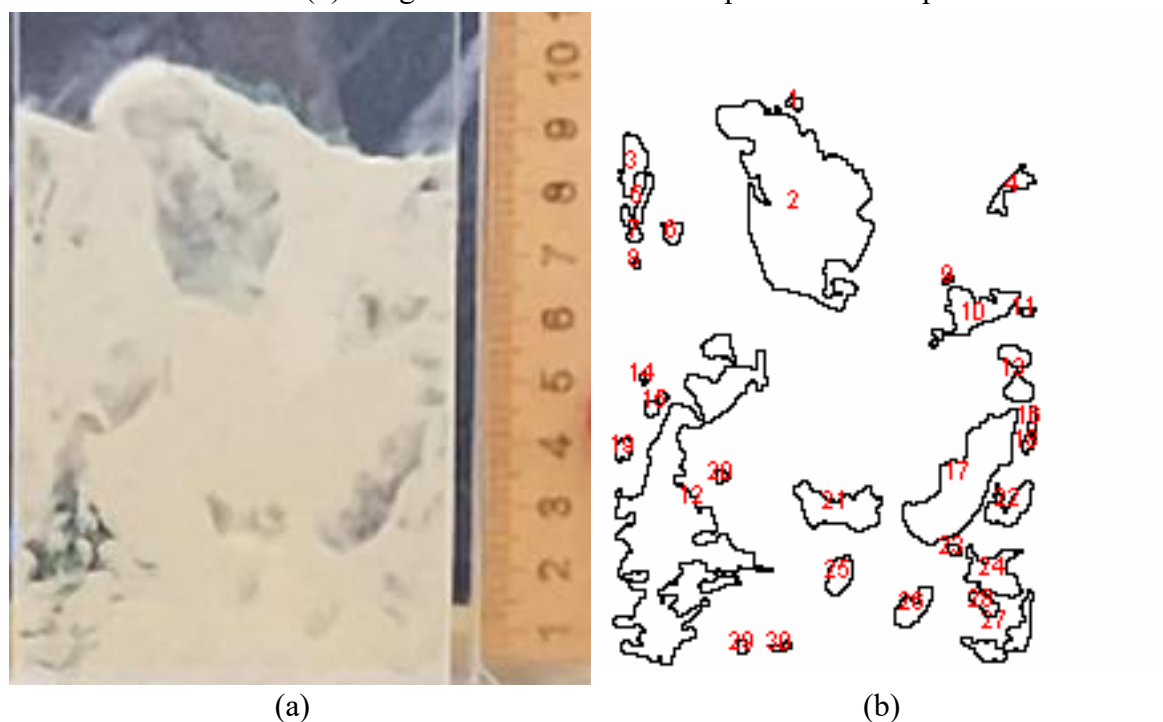
Fonte: Autoria Própria

Figura 119- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 1 Réplica 2



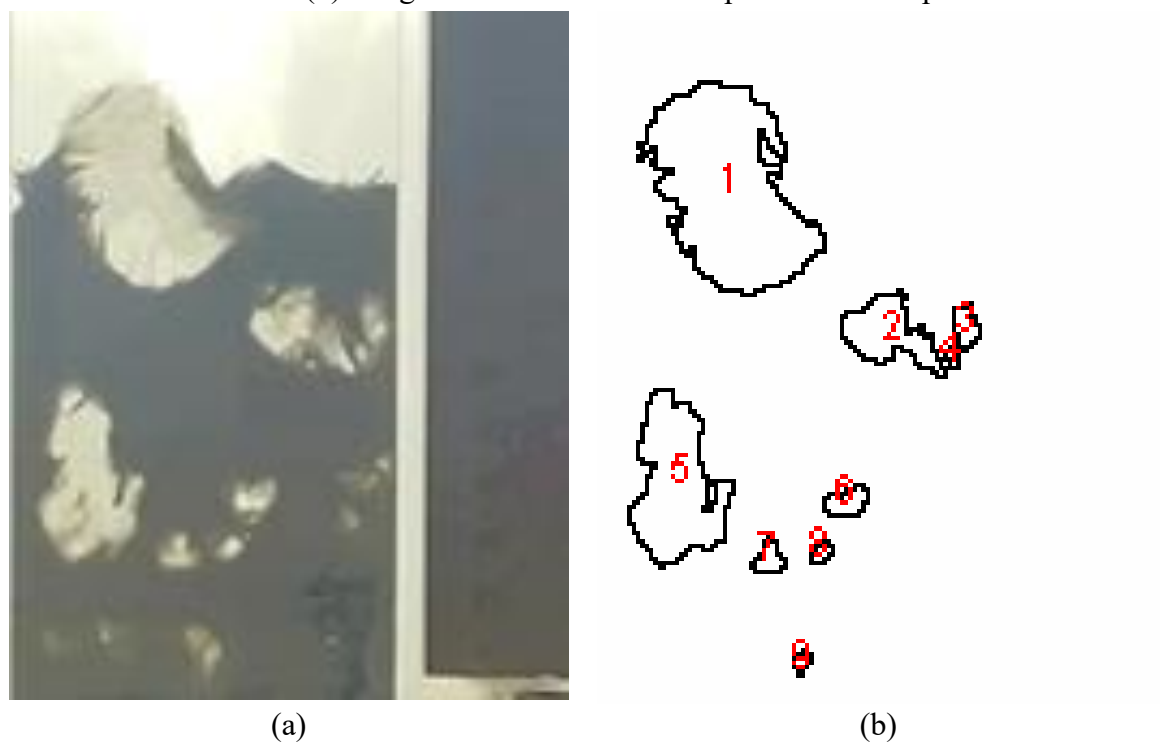
Fonte: Autoria Própria

Figura 120- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 2 Réplica 1



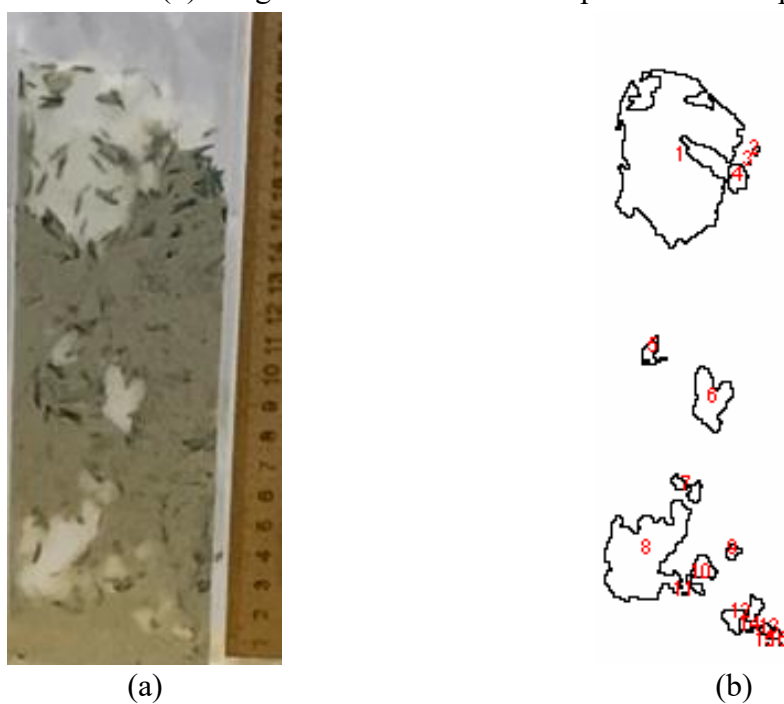
Fonte: Autoria Própria

Figura 121- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 2 Réplica 2



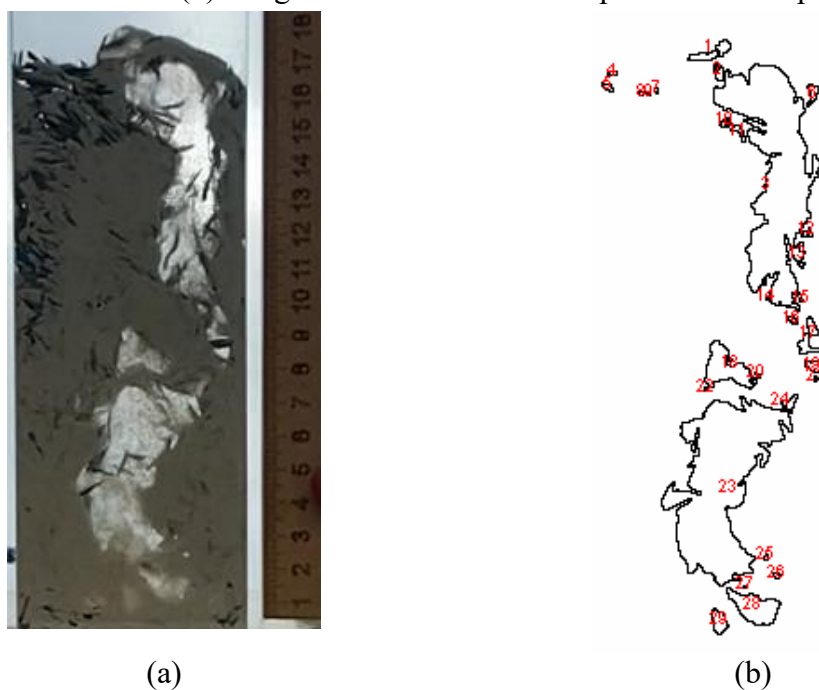
Fonte: Autoria Própria

Figura 122- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 3 Réplica 1



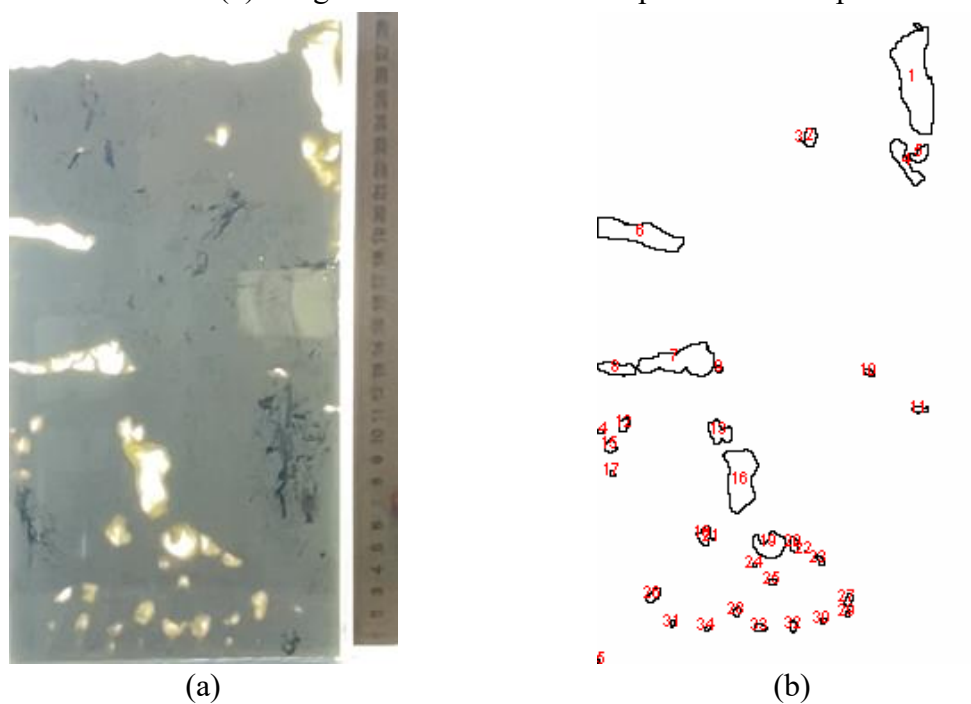
Fonte: Autoria Própria

Figura 123- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 3 Réplica 2



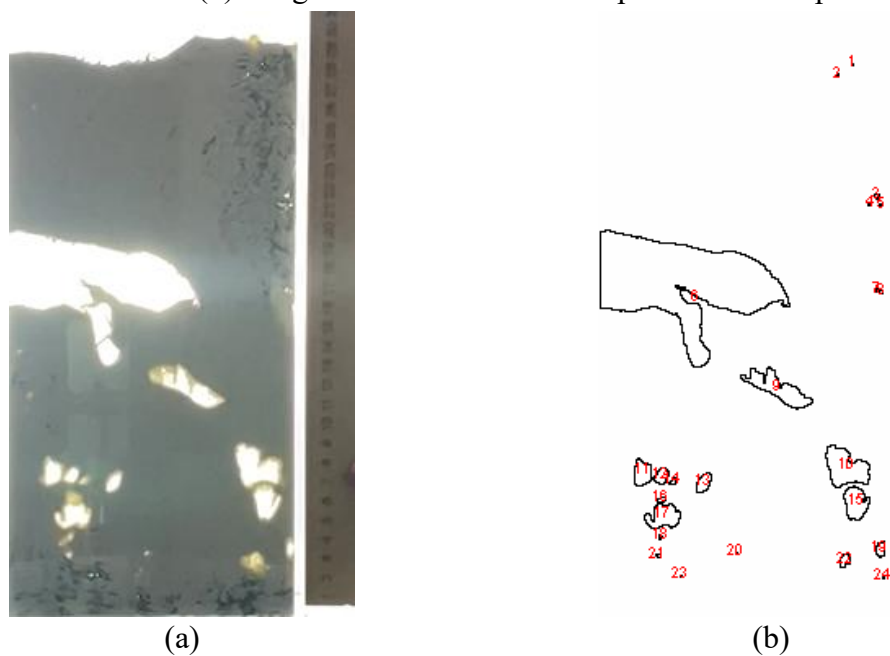
Fonte: Autoria Própria

Figura 124- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 4 Réplica 1



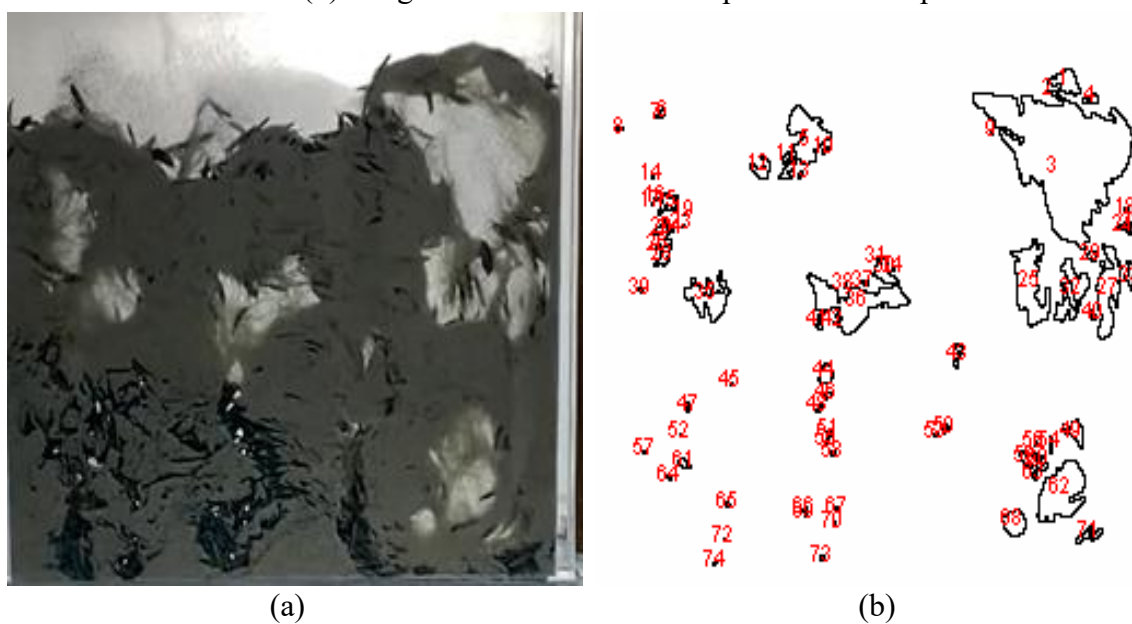
Fonte: Autoria Própria

Figura 125- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 4 Réplica 2



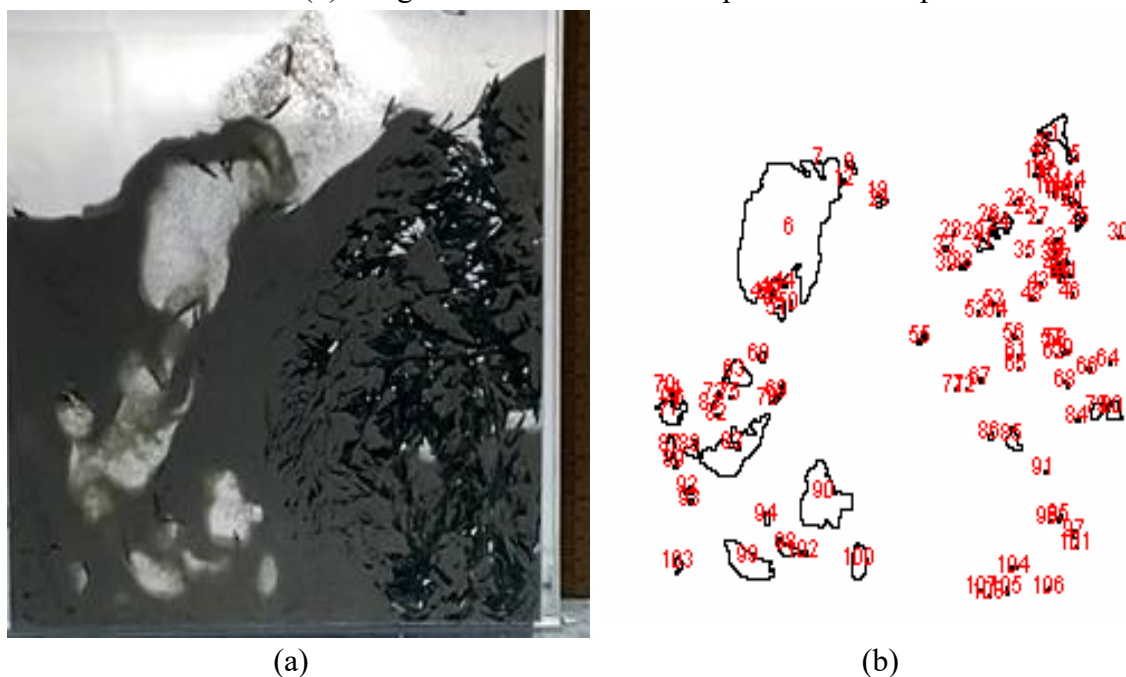
Fonte: Autoria Própria

Figura 126- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 5 Réplica 1



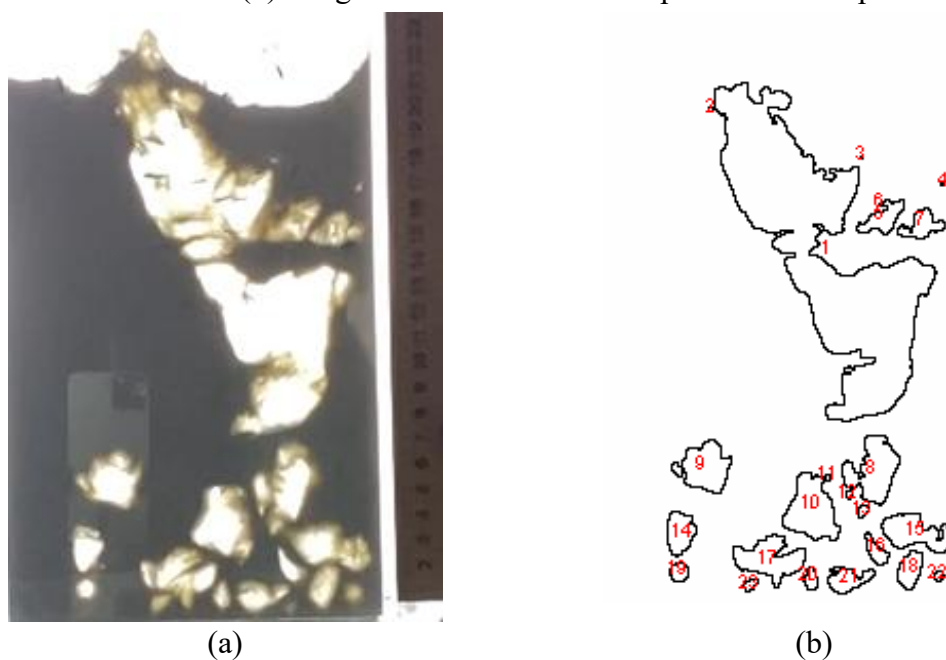
Fonte: Autoria Própria

Figura 127- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 5 Réplica 2



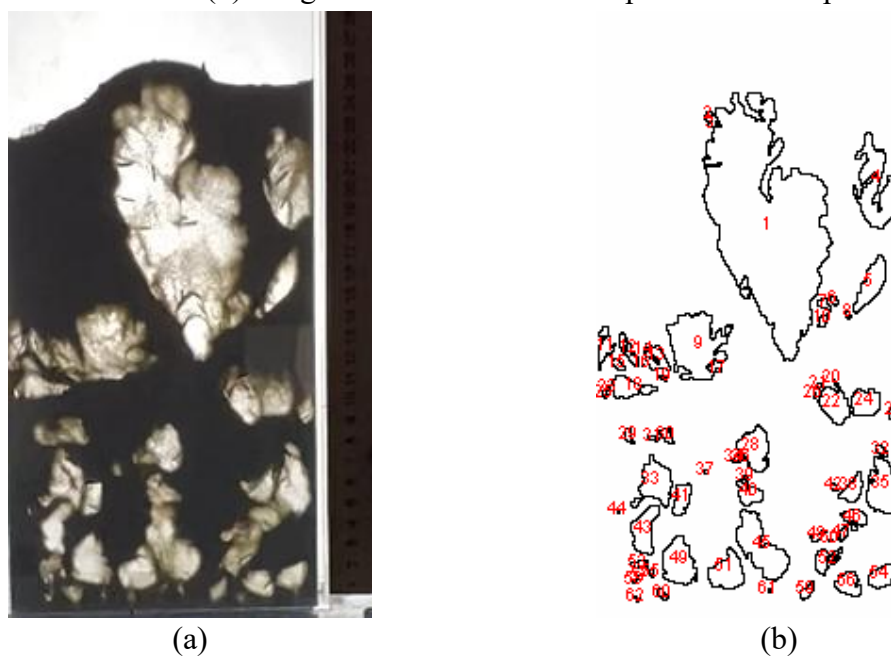
Fonte: Autoria Própria

Figura 128- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 6 Réplica 1



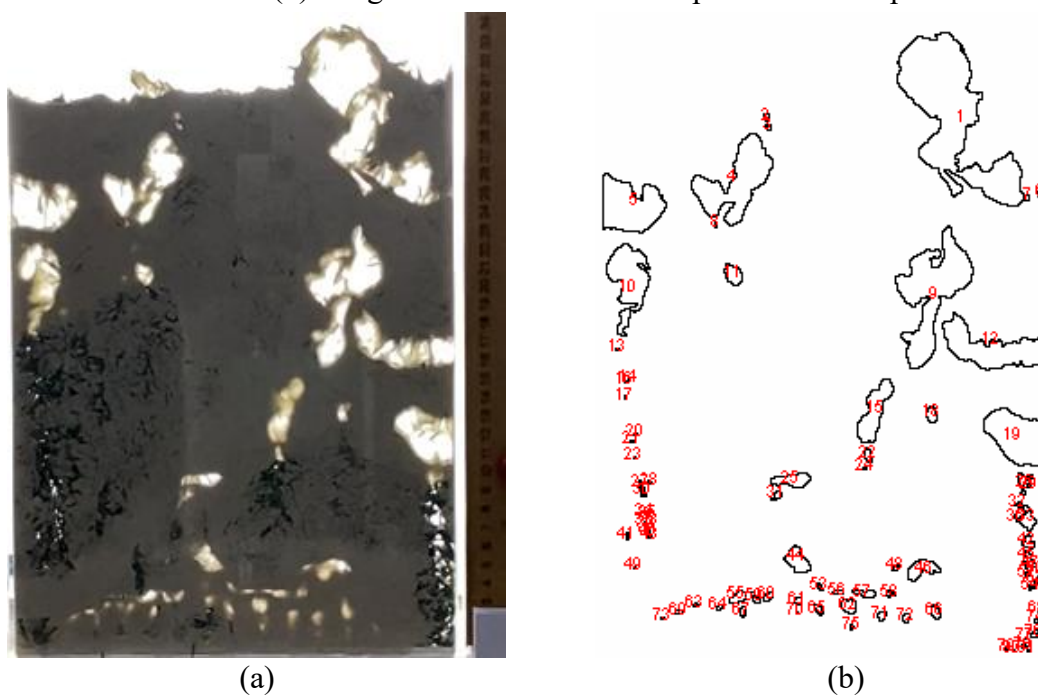
Fonte: Autoria Própria

Figura 129- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 6 Réplica 2



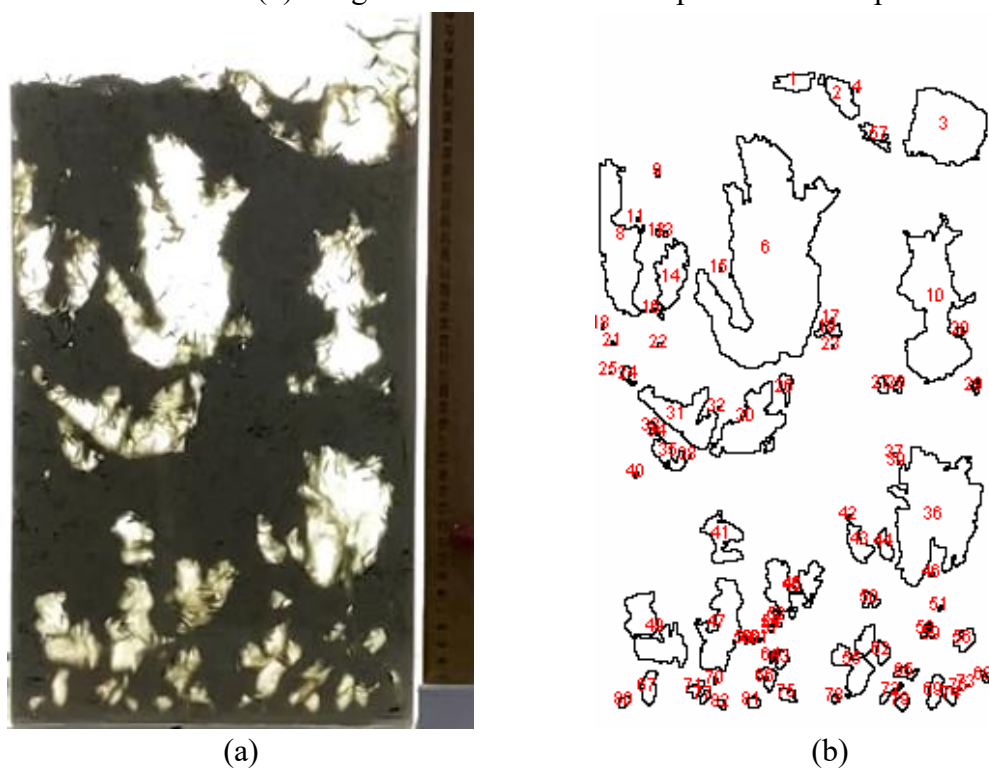
Fonte: Autoria Própria

Figura 130- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 7 Réplica 1



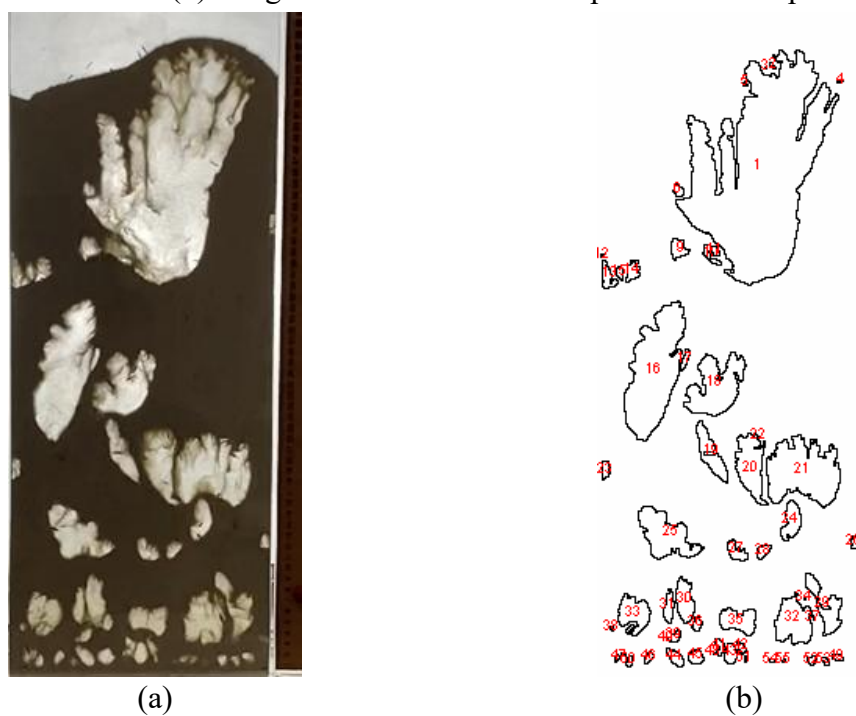
Fonte: Autoria Própria

Figura 131- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 7 Réplica 2



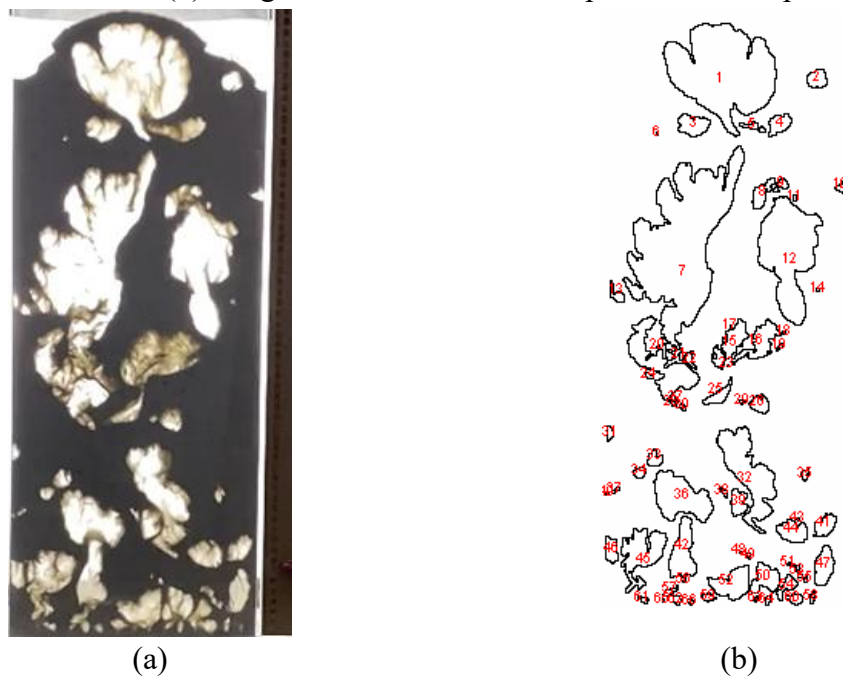
Fonte: Autoria Própria

Figura 132- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 8 Réplica 1



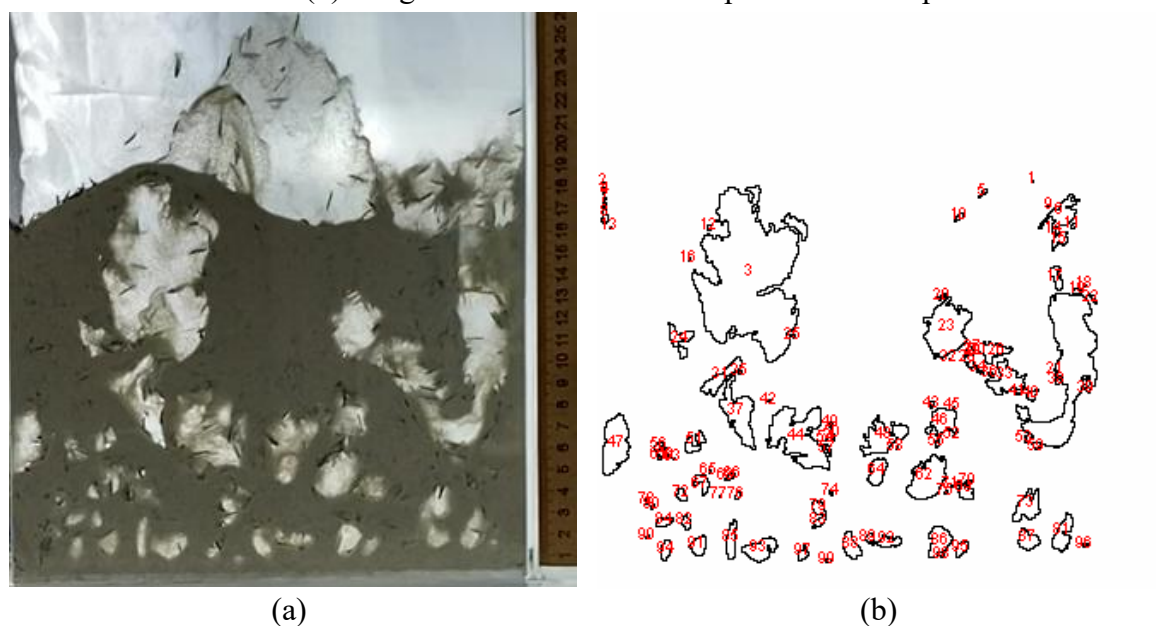
Fonte: Autoria Própria

Figura 133- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 8 Réplica 2



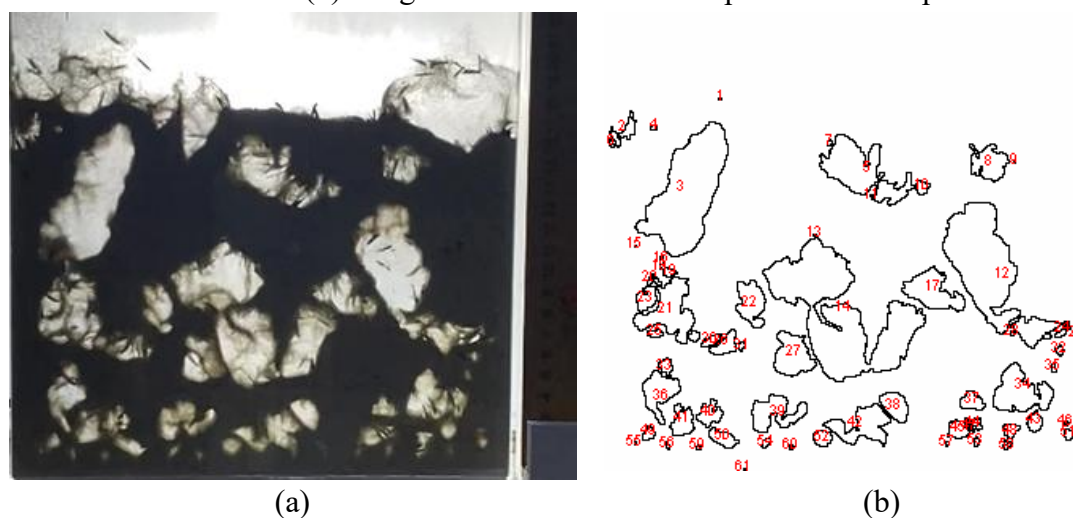
Fonte: Autoria Própria

Figura 134- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 9 Réplica 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 135- Captura de tela do vídeo para análise do diâmetro de bolha (a) Imagem sem tratamento (b) Imagem com tratamento - Experimento 9 Réplica 2



Fonte: Autoria Própria