

FERNANDO MANENTE PERRELLA BALESTIERI

**Influência do tipo de distribuidor na fluidodinâmica de uma
mistura biomassa-areia em leito fluidizado**

Fernando Manente Perrella Balestieri

**Influência do tipo de distribuidor na fluidodinâmica de uma
mistura biomassa-areia em leito fluidizado**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ivonete Ávila
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna

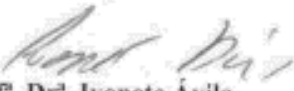
B184i	<p>Balestieri, Fernando Manente Perrella Influência do tipo de distribuidor na fluidodinâmica de uma mistura biomassa-areia em leito fluidizado / Fernando Manente Perrella Balestieri – Guaratinguetá, 2019. 149 f : il. Bibliografia: f. 110-116</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientadora: Profª. Drª. Ivonete Ávila Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna</p> <p>1. Biomassa. 2. Leito fluidizado (Pirometalurgia) 3. Materiais granulados. I. Título.</p> <p>CDU 620.91(043)</p>
-------	--

FERNANDO MANENTE PERRELLA BALESTIERI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. IVONETE ÁVILA
Orientadora / UNESP-FEG


Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
CEFET/RJ


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP/FEG

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 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá
2014/2015	Engenharia Mecânica (Intercâmbio) Swansea University

À Deus, à minha família e aos meus amigos
que sempre me apoiaram

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus pela minha vida, minha família, meus amigos e pela força constante que ele me dá, sem a qual, nada conseguiria;

à minha família em geral, por sempre estar lá por mim e em especial:

aos meus pais, *José Benedito e Fátima Cristina*, que desde criança me incentivaram a estudar e aperfeiçoar constantemente. Além disso, sempre me deram apoio e estiveram presentes, mesmo de tão longe;

aos meus tios, *José Antônio e Ieda*, que também me apoiaram bastante, principalmente durante todo o tempo em que estive em Guaratinguetá;

ao meu tio *Cláudio* que me ajudou na montagem dos equipamentos;

à minha orientadora, *Prof^a. Dr^a. Ivonete Ávila* e ao meu co-orientador, *Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna* por terem me dado essa oportunidade de crescimento profissional e pessoal, além de terem transmitido seus conhecimentos e auxiliado nos momentos de necessidade;

aos técnicos da FEG/UNESP, por ajudarem na realização desse trabalho;

aos meus colegas do Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC₃), por criarem um ambiente de pesquisa integrado e gostoso de conviver;

à UNESP, por me ajudar no meu desenvolvimento profissional;

aos meus amigos, por tornarem a vida mais leve;

à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização desta pesquisa.

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

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

RESUMO

O leito fluidizado é um sistema que é utilizado na indústria para diversos tipos de aplicações, variando desde craqueamento de petróleo e processamento de materiais como silício e urânio até secagem de grãos. Dentre esses diversos processos, o leito fluidizado também pode ser aplicado em processos termoquímicos como combustão e gaseificação de biomassa, apresentando vantagens como alta eficiência, perfil térmico homogêneo, além de flexibilidade de combustível. No entanto, o uso da biomassa no leito ainda gera algumas dificuldades, principalmente para partículas como a casca de arroz, que não fluidizam tão facilmente. Para contornar esse problema, normalmente é acrescentado um material inerte e barato como a areia. Essa mistura binária de biomassa e inerte pode gerar outros problemas, como segregação do material particulado, caminhos preferenciais do gás e pontos de estagnação, o que reduz consideravelmente a eficiência do sistema. Portanto, passa a ser importante entender como os diferentes parâmetros existentes no leito influenciam no comportamento dessa mistura para conseguir evitar esses problemas. Nesse trabalho foi feita uma análise comparativa avaliando 3 fatores: tipo de placa distribuidora (perfurada e com injetores *tuyere*), responsável por injetar o gás de fluidização no leito, a granulometria do material inerte (675 e 325 μm) e porcentagem de casca de arroz (1% até 10% da massa total). Esses fatores foram alterados separadamente para explorar a influência que eles causam no nível de mistura do leito entre os dois particulados (índice de mistura) assim como na velocidade de mínima fluidização e na expansão do leito. Também foram feitos experimentos para obter o comportamento térmico do material particulado para a combustão e gaseificação, relacionando esses dados com os obtidos no leito. Os resultados indicam que a placa com injetores gera uma maior queda de pressão, mas diminui os pontos de estagnação e melhora o nível de mistura do leito se comparado com a placa perfurada. O aumento da granulometria e da proporção de casca de arroz pioram a fluidização, geram canais preferenciais e aumentam a velocidade de mínima fluidização. A expansão do leito parece ser mais influenciada pela proporção de casca. O comportamento térmico da casca de arroz e da mistura casca/areia tiveram comportamentos diferentes, indicando que areia tem a função de não apenas auxiliar na fluidização, mas de reduzir a temperatura de funcionamento do leito em um processo de gaseificação.

PALAVRAS-CHAVE: Leito fluidizado borbulhante. Biomassa. Casca de arroz. Distribuidor. Índice de mistura

ABSTRACT

The fluidized bed is a system used in the industry for a variety of applications, ranging from oil cracking and processing of materials such as silicon and uranium to grain drying. Among these several processes, the fluidized bed can also be applied in thermochemical processes such as biomass combustion and gasification, presenting advantages such as high efficiency, homogeneous thermal profile, and fuel flexibility. However, the use of the biomass in the bed still generates some difficulties, especially for particles like the rice husk, that do not fluidize so easily. To work around this problem, an inert, inexpensive material such as sand is usually added to the bed. This binary mixture of biomass and inert can create other problems, such as segregation of the particulate solids, gas preference paths and stagnation points, which considerably reduces the efficiency of the system. Thus, it becomes important to understand how these different parameters in the bed influence the behavior of the mixture to avoid these problems. In this work a comparative analysis was carried out evaluating 3 factors: type of distribution plate (perforated and with tuyere injectors), responsible for injecting the fluidization gas in the bed, the inert granulometry (675 and 325 μm) and percentage of rice husk (1% to 10% of the total mass). These factors were altered separately to explore the influence they cause on the level of bed mixing between the two particulates (mixing index) as well as the velocity of minimum fluidization and bed expansion. Experiments were also conducted to obtain the thermal behavior of the particulate for combustion and gasification, relating these data to those obtained in the bed. The results indicate that the tuyere injectors plate generates a greater pressure drop, but decreases the stagnation points and improves the bed mixing level when compared to the perforated plate. The increase in grain size and the proportion of rice husks worsen fluidization, generate preferential channels and increase the minimum fluidization velocity. The bed expansion seems to be more influenced by the proportion of rice husk. The thermal behavior of the rice husk and the rice husk/sand mixture had different behaviors, indicating that sand has the function of not only assisting in fluidization but also of reducing the bed operating temperature in a gasification process.

KEYWORDS: Bubbling fluidized bed. Biomass. Rice husk. Distributor. Mixing index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de um reator de leito fluidizado borbulhante.	24
Figura 2 - Número de publicações que abordam sistemas fluidizados aplicados à biomassa no período (1ª. a 6ª. etapa do refinamento): (a) por ano e (b) por período.	26
Figura 3 - Países que mais publicam no tema de sistemas de fluidização com aplicação da biomassa.	27
Figura 4 - Estratificação dos resultados da busca por área.	27
Figura 5 - Número de citações dos artigos que abordam o tema de fluidização no período de 1980-2020.	28
Figura 6 - Diferentes regimes da fluidização.	31
Figura 7 - Fluxograma dos tipos de distribuidores encontrados na literatura.	33
Figura 8 - Classificação das partículas para o ar em condições ambientes.	37
Figura 9 - Regime de fluidização afetada pelo tipo de partícula.	38
Figura 10 - Esquema da bancada experimental.	49
Figura 11 - Bancada montada para experimentos (a) Bancada Geral (b) Leito utilizado no experimento.	50
Figura 12 - Formato do projeto do distribuidor de ar de fluidização: placa perfurada.	51
Figura 13 - Placa perfurada usada nos experimentos.	52
Figura 14 - Projeto da placa com injetores (a) Placa distribuidora sem os injetores <i>tuyeres</i> (b) Injetor <i>tuyere</i> avulso.	54
Figura 15 - Disposição dos injetores na placa distribuidora.	55
Figura 16 - Placa distribuidora com injetores do tipo <i>tuyere</i> usada no experimento.	55
Figura 17 - Esquema de uma placa de orifício em uma tubulação com tomadas <i>flange taps</i>	56
Figura 18 - (a) Sistema montado para definir a vazão máxima obtida do compressor; (b) Anemômetro utilizado para medir a velocidade de saída do ar (c) Sistema utilizado para obter a temperatura do ar antes da placa de orifício.	58
Figura 19 - Dimensões gerais da Placa de Orifício.	61
Figura 20 - Sistema de Medição com as distâncias padronizadas.	62
Figura 21 - Sensor BOSCH modelo BMP280.	63
Figura 22 - Modelo Final dos sensores com as seringas para a medição de pressão (a) Seringa com o sensor BMP280 (b) Os três sensores com identificação para serem usados no leito.	64
Figura 23 - Fluxograma da base de algoritmo usado no sistema de Aquisição de Pressão.	65

Figura 24 - Sistema de Aquisição de Pressão (a) Esquema das conexões (b) Sistema final completo	66
Figura 25 - Relação resultante das velocidades medidas pelo anemômetro de fio quente e a placa de orifício	67
Figura 26 - Anemômetro de fio quente	69
Figura 27 - Relação resultante das velocidades medidas pelo anemômetro de fio quente e a placa de orifício	69
Figura 28 - Amostras da casca de arroz (a) in natura (b) tingida (c) moída	71
Figura 29 - Areia como material inerte (a) Granulometria 500-150 μm (valor médio de 325 μm) (b) Granulometria 850-500 μm (valor médio de 675 μm).....	72
Figura 30 - Relação entre variação de pressão e velocidade do ar.	75
Figura 31 - Régua para medição da altura do leito.....	76
Figura 32 - Calador aplicado para determinar o índice de mistura (a) Calador com amostras coletadas (b) Distância das câmaras de amostragem do calador.	77
Figura 33 - Distribuição granulométricas das duas faixas de areia utilizadas nos experimentos (a) Areia 324 μm (500-150 μm) (b) Areia 647 μm (850-500 μm).....	82
Figura 34 - Queda de pressão dos dois distribuidores em relação a velocidade do ar	84
Figura 35 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.	86
Figura 36 - Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa com injetores <i>Tuyere</i> ; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.	87
Figura 37 – Perfil do leito durante experimentos de nível de mistura (a) distribuidor de placa perfurada (b) distribuidor com injetores <i>tuyere</i>	89
Figura 38 - Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 647 μm ; 5% de Casca de arroz.	90
Figura 39 - Perfil do leito durante experimentos de nível de mistura (a) 324 μm (b) 647 μm	91
Figura 40 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 1% de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização	93

Figura 41 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5 % de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização	94
Figura 42 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 10% de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização	95
Figura 43 – Relação entre velocidade de mínima fluidização e proporção de casca de arroz .	96
Figura 44 - Curvas TG/DTG em função da temperatura para amostras da casca de arroz, em atmosferas de (a) ar sintético (combustão) e (b) dióxido de carbono (gaseificação).	99
Figura 45 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da areia com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação).	101
Figura 46 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da mistura (90% areia e 10% casca de arroz) com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação).	102
Figura 47 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da mistura (90% areia do IPT e 10% casca de arroz) com dióxido de carbono (gaseificação).	103
Figura 48 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). (a) Ensaio da casca de arroz lavada (b) Ensaio da mistura (90% areia do IPT e 10% casca de arroz lavada) com dióxido de carbono	103
Figura 49 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG). Ensaio da mistura (90% areia e 10% casca de arroz) com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação).....	104
Figura 50 - Duplicata da casca de arroz em ar sintético.....	141
Figura 51 - Duplicata da areia em ar sintético.....	141
Figura 52 - Duplicata da mistura de 10% casca de arroz e 90% areia em ar sintético.....	142
Figura 53 - Duplicata da casca de arroz em Dióxido de Carbono.....	142
Figura 54 - Duplicata da areia em Dióxido de Carbono.....	143
Figura 55 - Duplicata da mistura de 10% casca de arroz e 90% areia em Dióxido de Carbono	143

Figura 56 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 1% de Casca de arroz.	144
Figura 57 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 2% de Casca de arroz.	144
Figura 58 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 3% de Casca de arroz.	145
Figura 59 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 4% de Casca de arroz.	145
Figura 60 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.	146
Figura 61 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 6% de Casca de arroz.	146
Figura 62 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 7% de Casca de arroz.	147
Figura 63 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 8% de Casca de arroz.	147
Figura 64 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 9% de Casca de arroz.	148
Figura 65 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 10% de Casca de arroz.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos das medições feitas antes da instalação da placa de orifício	59
Tabela 2 - Características físicas dos materiais particulados.	83
Tabela 3 - Dados obtidos no experimentos de fluidização	97
Tabela 4 - Dados da decomposição térmica da casca de arroz obtida nos ensaios TG em atmosferas de ar sintético e CO ₂	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Números de artigos publicados na base de dados do <i>Scopus</i> relacionados ao tema da pesquisa.....	26
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Coeficiente	adm.
c	Razão entre queda de pressão no distribuidor e leito	adm.
D	Diâmetro interno da tubulação	mm
d	Diâmetro	mm
E	Relação em função de β	adm.
H	Altura	m
m	Massa	kg
M	Nível de mistura	%
n	Número total de amostras	unidade
N	Unidades por área	unidade/m ²
p	Pressão	kPa
Q	Vazão	m ³ /s
Re	Número de Reynolds	adm.
U	Velocidade do ar de fluidização	m/s
V	Volume	m ³
X	Fração mássica	adm.
\bar{X}	Fração mássica média	adm.

Letras Gregas

β	Relação entre diâmetro do orifício e da tubulação	adm.
γ	Fator de expansão isoentrópica	adm.
δ	Expansão do leito	adm.
Δ	Variação	adm.
σ	Desvio padrão	adm.
ε	Porosidade do leito	adm.
μ	Viscosidade dinâmica	Pa s
ρ	Massa específica	kg/m ³

Subscrito

1	montante da placa de orifício
2	jusante da placa de orifício
a	aparente
an	anemômetro

b	leito
c	casca de arroz
d	distribuidor
ds	descarga
g	gás
gr	faixa granulométrica
i	numeração da amostra
in	inicial
m	mistura
md	médio
mf	mínima de fluidização
mp	material particulado
o	superficial do gás
op	orifício da placa de orifício
or	orifício de entrada da placa e do injetor (iguais)
p	partícula
po	placa de orifício
r	real
rf	referência
s	segregação
s1	sensor 1
s2	sensor 2
s3	sensor 3
t	orifício de saída do injetor <i>tuyere</i>
ta	total das amostras
v	Volumétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS.....	23
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	24
1.4	RELEVÂNCIA DO TEMA ABORDADO NA PESQUISA.....	25
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DE QUALIFICAÇÃO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO.....	30
2.2	DISTRIBUIÇÃO DO GÁS DE FLUIDIZAÇÃO.....	33
2.3	MATERIAL PARTICULADO DO LEITO.....	36
2.4	BIOMASSA: FONTE ENERGÉTICA NO LEITO FLUIDIZADO.....	39
2.5	USO DA CASCA DE ARROZ NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	42
2.6	MISTURA E SEGREGAÇÃO ENTRE BIOMASSA E INERTE	43
2.7	ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	47
3	BANCADA EXPERIMENTAL UTILIZADA NA PESQUISA.....	49
3.1	SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO.....	49
3.2	PROJETO DAS PLACAS DISTRIBUIDORAS DO AR DE FLUIDIZAÇÃO.....	51
3.2.1	Placa distribuidora do tipo perfurada.....	51
3.2.2	Placa distribuidora com Injetores do tipo <i>tuyere</i>	52
3.2.3	Caracterização dos distribuidores do ar de fluidização.....	55
3.3	PROJETO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	56
3.3.1	Projeto da placa de orifício.....	56
3.3.2	Projeto do sistema de aquisição de pressão.....	62
3.4	AFERIMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	66
3.4.1	Aferimento e Ajuste dos sensores de pressão.....	67
3.4.2	Aferimento e Ajuste da placa de orifício	68
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
4.1	MATERIAL PARTICULADO	71
4.1.1	Casca de arroz	71
4.1.2	Material Inerte.....	72
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL PARTICULADO	72
4.2.1	Massa específica.....	72

4.2.2	Massa específica aparente.....	73
4.2.3	Porosidade.....	73
4.2.4	Classificação do material particulado	74
4.2.5	Distribuição Granulométrica da Areia.....	74
4.3	VARIÁVEIS OBTIDAS NO LEITO FLUIDIZADO.....	74
4.3.1	Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do gás de fluidização	74
4.3.2	Velocidade de mínima fluidização	75
4.3.3	Expansão do Leito	76
4.3.4	Nível de mistura.....	76
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	78
4.4.1	Procedimento experimental – Determinar velocidade de mínima fluidização ...	79
4.4.2	Procedimento experimental – Análise da mistura do leito	80
4.5	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL PARTICULADO.....	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL PARTICULADO	82
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS DISTRIBUIDORES.....	84
5.3	INFLUÊNCIA DOS FATORES ESTUDADOS NA FLUIDIZAÇÃO DO LEITO .	85
5.3.1	Influência do Tipo de Distribuidor	85
5.3.2	Influência da Granulometria da Areia.....	89
5.3.3	Influência da Proporção de Casca de arroz.....	91
5.3.4	Coletânea dos dados obtidos na fluidização do leito	97
5.4	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL PARTICULADO.....	98
5.4.1	Comportamento da decomposição térmica.....	98
5.4.2	Análise preditiva do efeito da temperatura	105
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
6.1	CONCLUSÕES.....	106
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE PARA O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE PRESSÃO	116
	APÊNDICE B - DUPLICATAS DA CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS PARTICULADOS.....	141

**APÊNDICE C - PERFIS DE FLUIDIZAÇÃO – QUEDA DE PRESSÃO NO
LEITO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR 144**

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A utilização de combustíveis fósseis tem como resultado a produção de Gases do Efeito Estufa (GEE), acarretando problemas para o meio ambiente. Além disso, por ser uma fonte de energia não renovável, mesmo que ainda exista uma quantidade considerável disponível para uso, invariavelmente essa fonte se esgotará. Somando isso ao fato de que haverá um crescimento da demanda de energia em 30% até 2040, de acordo com os relatórios mais recentes da *International Energy Agency* (IEA), se torna necessário investir em fontes renováveis de energia para a redução do impacto ambiental negativo.

De acordo com as possíveis previsões da IEA, a tendência é de que a participação de fontes renováveis no consumo final de energia seja próximo de 45% no Brasil em 2040 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017) e que o uso de bioenergia na indústria vá crescer em 13% até 2023 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Uma das fontes de energia com grande potencial na aplicação em sistemas de geração de energia é a biomassa. Ela é considerada como uma possível alternativa em substituição, total ou parcial, aos combustíveis fósseis por ser uma fonte renovável, diversificando a matriz energética (OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013). Além disso, ela é considerada versátil por ser a base para a geração de biocombustíveis como o biogás, bio-óleo e biocarvão (OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013). Também pode ser utilizada na produção de componentes químicos amplamente aplicados na indústria, como no caso da sílica produzida a partir da casca de arroz (AZAT et al., 2019)

Considerando os diversos tipos de tecnologias atualmente disponíveis para combustão de biomassa, o leito fluidizado é considerado o mais vantajoso devido à sua flexibilidade com relação ao combustível, baixo impacto ambiental, facilidade de controle e alta eficiência de combustão (SILVA, 2011). Em especial, o leito fluidizado borbulhante apresenta maior eficiência em transferir calor, requer menor energia e apresenta menor abrasão se comparado com o leito circulante (PARK; CHOI, 2013).

Os leitos fluidizados, ou as técnicas de fluidização, não são usados apenas para conversão termoquímica, mas também para secagem, revestimento e separação de materiais (FOTOVAT et al., 2015) e craqueamento catalítico do petróleo (PAUDEL; FENG, 2013). Portanto, se torna importante compreender melhor a fluidodinâmica do leito, pois esta influencia diretamente em cada um dos processos citados, seja na transferência de calor e de

massa na combustão ou na área de contato do processo de craqueamento catalítico (DA CUNHA; PEREIRA; ROCHA, 2009).

As características físicas da biomassa, como geometria e massa específica, fazem com que seja difícil de utilizá-la em um leito sem nenhum material particulado adicional, pois a biomassa normalmente não fluidiza com facilidade. Ela tende a desenvolver canais preferenciais de escoamento do gás que é injetado no leito, o que prejudica a circulação de material e o processo como um todo. Assim, para facilitar a fluidização, é acrescentado um material inerte, o qual também gera outros benefícios, como uma maior homogeneidade no perfil de temperatura do leito (OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013).

Considerando que o inerte possui uma grande influência nos processos físicos do leito, se torna importante avaliar como que as características desse inerte, entre elas, granulometria e tipo de inerte, influenciam na eficiência do processo. Muitas vezes a areia é selecionada como material inerte pela sua disponibilidade e custo. No caso da biomassa, a casca de arroz se destaca por ser um dos produtos agrícolas com maior produção mundial, sendo que seus resíduos possuem um potencial energético estipulado de $23,5 \cdot 10^{18}$ J (WORLD BIOENERGY ASSOCIATION, 2017).

Além das características dos materiais utilizados, a maneira como o gás é injetado no leito influencia diretamente no processo. A fluidodinâmica da fase densa, a dispersão do gás, o tamanho e comportamento da bolha, o contato gás-sólido e o nível de mistura dos particulados são alguns dos fatores influenciados pelo distribuidor (SHUKRIE; ANUAR; OUMER, 2016). Portanto, conseguir projetar esse equipamento de maneira adequada e entender sua influência em relação a esses parâmetros se torna relevante.

Há na literatura diversos estudos que foram desenvolvidos para sistemas de fluidização considerando misturas binárias (ABDULLAH; HUSAIN; YIN PONG, 2003; ÁVILA et al., 2017; CUI; GRACE, 2007; OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013; PARK; CHOI, 2013; ZHANG et al., 2012a). 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).

Avaliar como a granulometria, proporção da biomassa e o tipo de distribuidor afetam a fluidodinâmica do leito podem ajudar a melhorar a eficiência dos processos, pois uma maior homogeneidade na mistura entre inerte e biomassa facilita a transferência de calor e torna o perfil térmico mais uniforme (GHALY; MACDONALD, 2012; LUNDBERG et al., 2017;

OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013). Embora os efeitos da granulometria e da proporção de biomassa tenham sido um pouco mais explorados, poucos trabalhos avaliam o efeito de diferentes tipos de distribuidores no nível de mistura do leito.

Além disso, há também carência de investigações que tentam relacionar as informações obtidas em um ensaio a frio de fluidização com informações térmicas do material que é usado no leito, sendo que apenas um trabalho foi encontrado que tentou estabelecer uma possível relação entre dados fluidodinâmicos e térmicos (PÉCORA et al., 2014).

Neste contexto, considerando as três variáveis avaliadas (tipo de placa distribuidora, proporção de biomassa/inerte e granulometria do inerte), assim como os dados possíveis de serem obtidos na análise térmica, a questão de pesquisa que está orientando o desenvolvimento deste trabalho é: como esses parâmetros se relacionam e de que forma contribuirão com informações para uso em projeto de um leito fluidizado borbulhante de forma a melhorar a eficiência da fluidização da biomassa?

Os resultados obtidos nesta pesquisa podem também contribuir com dados para o desenvolvimento de programas de simulação específicos para sistemas de fluidização em que visam o uso de biomassa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de mestrado é entender de que forma o tipo de distribuidor de ar de um reator de leito fluidizado borbulhante pode afetar o nível de mistura e homogeneidade entre uma biomassa (casca de arroz) e material inerte (areia).

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os objetivos específicos listados na sequência:

1. Caracterizar a queda de pressão de dois distribuidores de ar de fluidização, após o projeto e construção dos mesmos e proceder a montagem da bancada experimental;
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;
3. Avaliar o efeito do tipo de distribuidor, da granulometria e da proporção de biomassa no leito por meio da determinação do índice de mistura, expansão do leito e velocidade de mínima fluidização;
4. Explorar possíveis relações entre os dados provenientes das análises térmicas

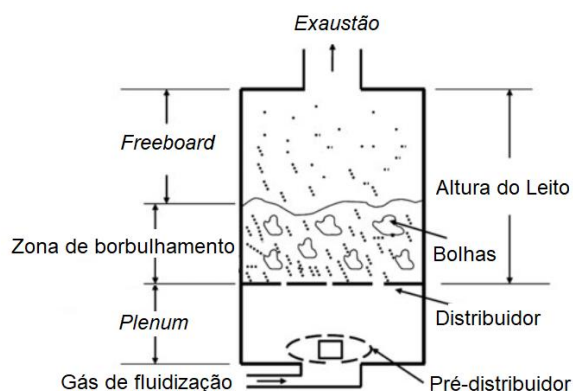
com os dados obtidos da fluidização feita a temperatura ambiente.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Nos sistemas de fluidização, o tipo de reator é classificado em leito fixo ou em movimento, leito fluidizado e leito arrastado, sendo que o leito fluidizado é ainda classificado por borbulhante e circulante (BASU, 2006).

Em geral, um leito fluidizado borbulhante é uma coluna cilíndrica, onde ocorre o arraste de sólidos, sendo definidas duas zonas: a primeira refere-se à fase densa borbulhante e acima desta há uma zona da fase diluída, na qual a massa específica dos sólidos diminui em função da altura do leito, denominada por *freeboard* (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; RAZZAQUE, 2016). A injeção do ar de fluidização é feita na parte inferior da coluna, por meio do pré-distribuidor, entrando na câmara plena (RAZZAQUE, 2016). A câmara plena, ou *plenum*, é separada do reator por meio de uma placa distribuidora, ou distribuidor do ar de fluidização. O esquema simplificado do leito fluidizado borbulhante é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático de um reator de leito fluidizado borbulhante.



Fonte: Adaptado de Razaque (2016).

No processo de combustão em reator de leito fluidizado, a maior parte da reação ocorre no leito fluidizado denso, sendo completadas na zona da fase diluída. A principal função do *freeboard* é evitar que uma grande quantidade do material do leito seja arrastada pela corrente de gás (YANG, 2003). O *plenum* tem por função homogeneizar a pressão do ar de fluidização à montante do distribuidor (ÁVILA, 2008). A principal função do distribuidor de gás é induzir uma fluidização uniforme e estável em toda a seção transversal do leito, evitando regiões não fluidizadas (YANG, 2003).

A fim de contribuir cientificamente com dados relevantes, delimitou-se o estudo ao

distribuidor do ar de fluidização, uma vez que uma distribuição uniforme do gás na forma de pequenas bolhas em toda a área do leito é um aspecto relevante em aplicações onde uma alta conversão é requerida. Serão avaliadas a proporção da queda de pressão, tamanho do orifício, geometria, espaço e zonas mortas para dois distribuidores de gás, dos tipos placa perfurada e injetor tipo *tuyere*, aplicados para a fluidização da casca de arroz em ensaios à frio.

1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA ABORDADO NA PESQUISA

Considerando os problemas descritos no item 1.1, em que os resultados desta pesquisa podem contribuir para o meio científico, justifica-se também relevância do tema abordado pela análise das publicações disponíveis na literatura.

De forma a avaliar a relevância das pesquisas que abordam as tecnologias de fluidização, apresenta-se uma análise dos artigos disponíveis nesta base de dados do *Scopus*. Esta base de dados permite o acesso às informações quantitativas dos artigos científicos multidisciplinares publicados internacionalmente na área de interesse. Este levantamento foi feito em junho de 2019, sendo que grande parte das pesquisas descritas no capítulo 2, fazem parte dos artigos encontrados nesta análise.

O termo principal utilizado na primeira etapa da busca foi “fluidized bed” OR “fluidised bed”, pesquisados nos campos: “Article title, Abstract, Keywords”, resultando em 50.507 publicações. A partir deste resultado, fez-se o refinamento, sendo impostas limitações como mostrado no Quadro 1.

A partir desta primeira busca, foi feito um refinamento, limitando a busca a artigos científicos em periódicos, escritos na língua inglesa. Posteriormente, fez-se o refinamento considerando a área de interesse e documentos que abordassem o termo “biomass”, obtendo um total de 5.949. Para estes documentos encontrados, apresenta-se a evolução da quantidade de publicações no período de 1980-2019 na Figura 2.

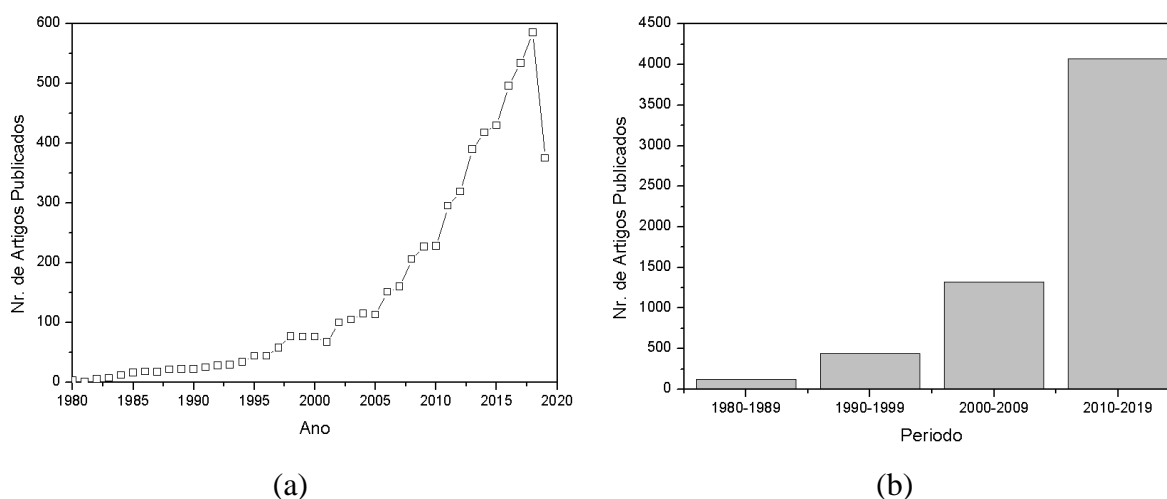
Nota-se na Figura 2(a) que o tema de fluidização aplicado à biomassa vem crescendo desde 1980, sendo que as publicações tiveram um crescimento mais significativos nos últimos 10 anos, Figura 2(b), evidenciando o interesse da comunidade científica no tema pesquisado.

Quadro 1 - Números de artigos publicados na base de dados do *Scopus* relacionados ao tema da pesquisa.

Etapas	Critério de busca	Termos de Pesquisa	Limitação	Resultados
1ª.	“Article title, Abstract, Keywords”	"fluidized bed" OR "fluidised bed"	-	50.507
2ª.	“Documents Type / Source Type”	-	“Article – Article in Press/ Journal”	38.114
3ª.	“Language”	-	English	30.157
4ª.	“Subject area”	-	“Chemical Engineering; Energy; Engineering; Environmental Science”	26.093
5ª.	“Search within results...”	“biomass”	1980-atual	5.949
6ª.	-	-	Países que mais publicam (1º a 14º. posição)	4.602
7ª.	“Search within results...”	“distributor plate” OR “distributor”		216

Fonte: Scopus (2019).

Figura 2 - Número de publicações que abordam sistemas fluidizados aplicados à biomassa no período (1ª. a 6ª. etapa do refinamento): (a) por ano e (b) por período.



Fonte: Scopus (2019).

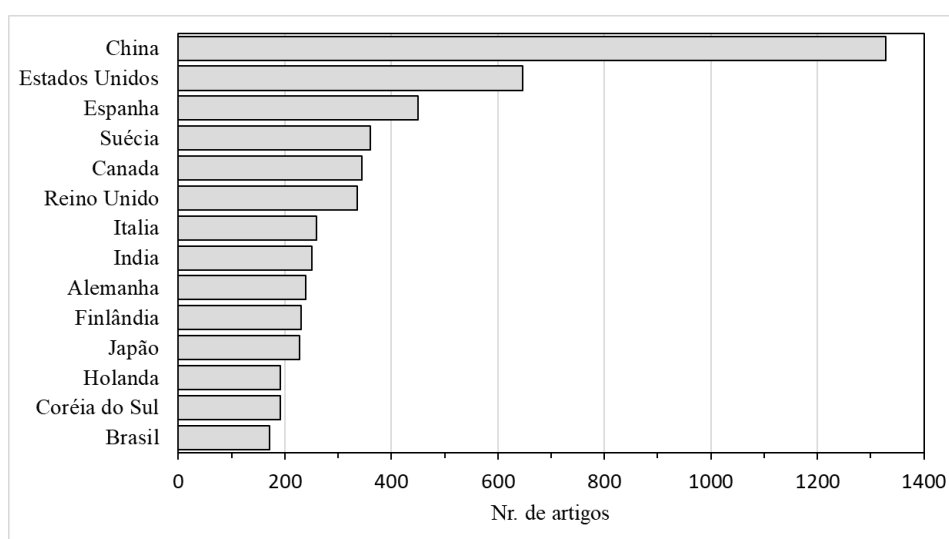
Fez-se também uma análise dos países que mais publicaram no tema de fluidização, como mostrado na

Figura 3. Na

Figura 3 é possível ver que a China possui a maior quantidade de publicações (1.329),

seguida pelos Estados Unidos com número bem inferior (646). É provável que a quantidade de publicações na China seja justificada pela alta aplicação de sistemas fluidizados no uso do carvão mineral na geração termoelétrica, sendo que o consumo deste em 2014 foi superior a 250 milhões de toneladas (WU et al., 2018). O Brasil ocupa a 14ª. posição em publicações com 171 publicações. Nota-se que o total das publicações dos 14 países representa em torno de 77% dos resultados obtidos na 5ª. etapa de refinamento (5.949 artigos).

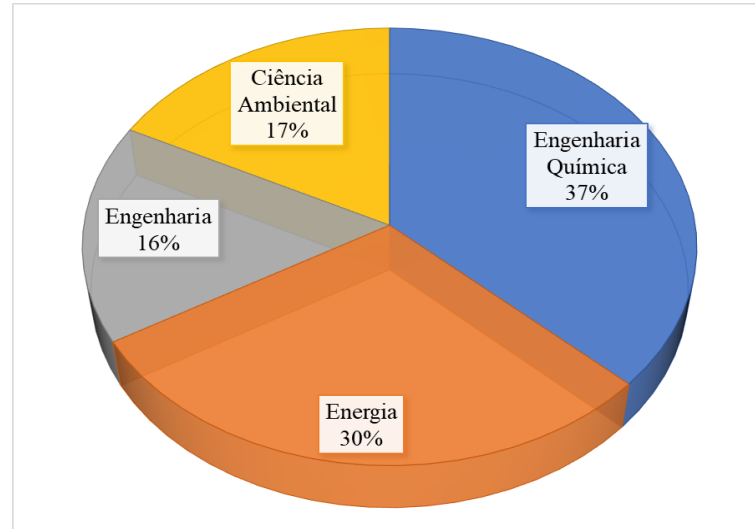
Figura 3 - Países que mais publicam no tema de sistemas de fluidização com aplicação da biomassa.



Fonte: Scopus (2019).

Também é possível verificar que, aproximadamente, 30% dos artigos encontrados estão dentro da área de energia conforme indicado na Figura 4.

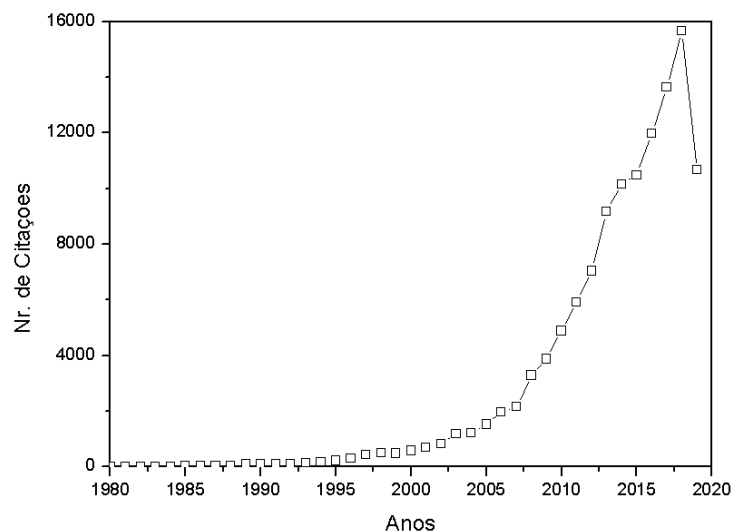
Figura 4 - Estratificação dos resultados da busca por área.



Fonte: Scopus (2019).

Para os 4.602 documentos encontrados apresenta-se a análise da quantidade de citações no período (Figura 5). Na Figura 5, é possível verificar que, até o ano de 1990, as citações destes artigos eram inferiores à 100, sendo que entre 1991 e 1995, o número um pouco mais do que dobrou, atingindo um valor de 220 citações no ano. A partir de 1996, os números começaram a crescer seguindo um comportamento próximo do exponencial, chegando em 2018 a ocorrência de 15.672 citações.

Figura 5 - Número de citações dos artigos que abordam o tema de fluidização no período de 1980-2019.



Fonte: Scopus (2019).

Na 7ª etapa, foram acrescentados os termos “distributor plate” OR “distributor” para ser pesquisado entre os 4.602 artigos da 6ª etapa, resultando em um número total de 206 artigos

relacionados, uma redução considerável do número total anterior. Além disso, dos 206 artigos, apenas 16 artigos investigam de alguma forma a influência da placa distribuidora, sendo que os outros artigos não têm como enfoque os distribuidores do leito fluidizado. Portanto, esse resultado mostra uma possível lacuna de conhecimento, o que pode significar que o efeito do tipo de distribuidor para uma mistura biomassa/inerte ainda não é completamente conhecido. Importante notar que nenhum dos 16 artigos comparava o efeito de dois tipos de placas distribuidoras diferentes.

Considerando a análise apresentada anteriormente, verifica-se que o assunto é de grande interesse no meio científico e que ainda há uma tendência crescente de publicações na área. O número de publicações de grupos brasileiros ainda é baixo, indicando a deficiência de investimento em pesquisa nesta área no país, uma vez que há uma grande disponibilidade de biomassa para uso energético. Assim, é possível afirmar que o desenvolvimento de pesquisas de aplicação da biomassa em sistema de fluidização é relevante, o que justifica um investimento nessa área, tanto intelectual quanto financeiro, com o objetivo de aprofundar sobre o assunto, resultando em equipamentos mais baratos e eficientes.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente texto está estruturado em 6 capítulos, sendo que neste primeiro capítulo apresenta-se a introdução, composta pela descrição do problema da fluidização aplicada à biomassa com a questão da pesquisa, os objetivos, delimitação da pesquisa e justificativa para a realização deste trabalho.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica de trabalhos que abordam placas distribuidoras e/ou nível de mistura entre combustível e inerte em leito fluidizado, além de abordar conceitos e informações relacionados à biomassa e ao sistema de fluidização. Posteriormente, os dados obtidos na revisão são resumidos e analisados.

No terceiro capítulo é discutido a montagem da bancada experimental com enfoque nos projetos das placas distribuidoras do gás de fluidização e do projeto da placa de orifício utilizada para a medição de vazão no sistema.

No quarto capítulo são revisados todos os materiais aplicados na pesquisa, assim como os processos de caracterização do material particulado e os métodos usados para a investigação do assunto em questão.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos, juntamente com suas análises e comparações com outros trabalhos similares existentes.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões com base nos resultados obtidos, assim como sugestões e questões a serem exploradas em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO

Os sistemas de fluidização são utilizados na indústria para diversos tipos de aplicações. Dentre os diferentes tipos de uso em que o sistema de fluidização é aplicado, pode-se dividir em processos químicos e processos físicos (IDAKIEV et al., 2018).

Nos processos químicos, estes podem ser aplicados em processos catalíticos para obtenção de produtos químicos e polímeros, como o anidrido maléico ($C_4H_2O_3$) e o cloreto de vinila (C_2H_3Cl), que é o monômero do policloreto de polivinila (PVC). Também é muito aplicado no craqueamento catalítico, um processo importante no ambiente industrial petrolífero (YATES; LETTIERI, 2016). Além disso, existem processos químicos não-catalíticos que envolvem, desde combustão e gaseificação de materiais como carvão mineral e biomassa até a participação no processamento de urânio e produção de silício ultrapuro.

Nos processos físicos, existem aplicações para sistemas de secagem, processos de granulação, aquecimento e adsorção de materiais (IDAKIEV et al., 2018; YATES; LETTIERI, 2016).

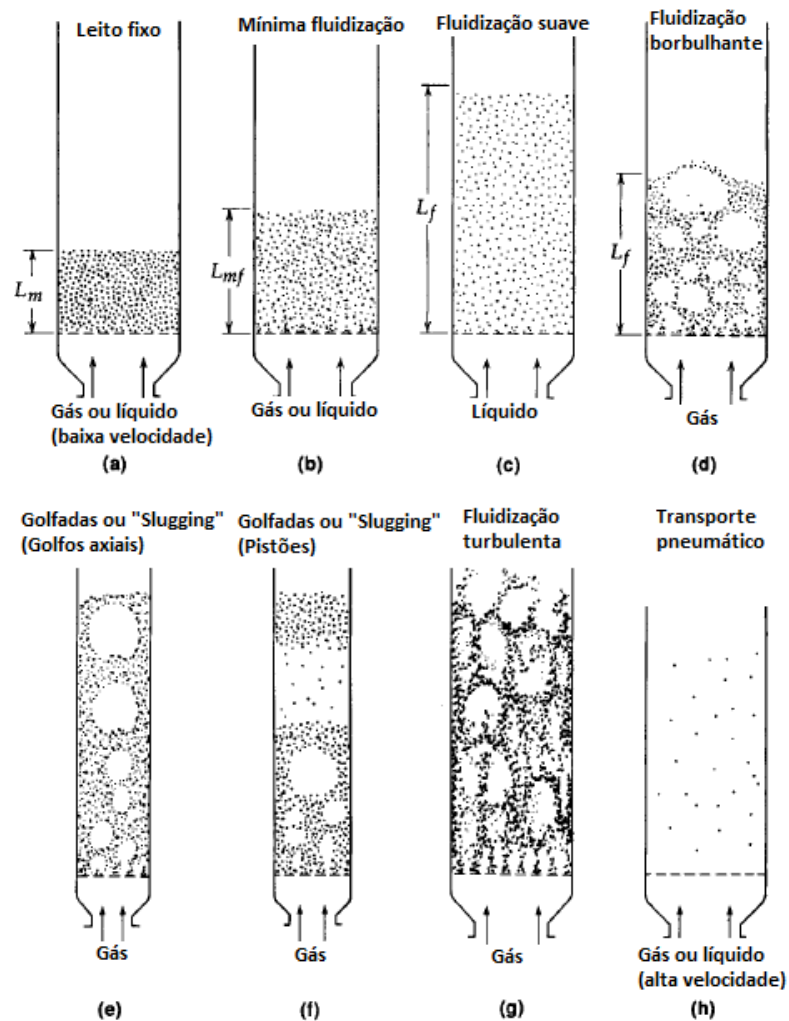
A fluidização é a base do funcionamento de um reator de leito fluidizado e consiste em escoar um fluido, no sentido contrário a gravidade através de um aglomerado de sólidos particulados. Quando a vazão desse fluido é muito baixa, ele consegue passar entre os interstícios do material granulado, mantendo o sólido em repouso. Entretanto, conforme a vazão do fluido é aumentada, a força de arraste gerada pelo fluido se iguala à força oposta da gravidade. Isto faz com que o material granulado fique suspenso, com liberdade para se movimentar e apresente um comportamento similar ao de um fluido, o que deu origem ao nome fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; YATES; LETTIERI, 2016).

Com relação ao fluido utilizado no leito, tanto um gás quanto um líquido podem ser utilizados. Entretanto, por estarem em fases diferentes, as características da fluidização também se tornam diferentes. Quanto maior a vazão do fluido, maior é a expansão que o material particulado sofre dentro do sistema de fluidização. Em uma relação líquido-sólido, a expansão do material ocorre de maneira homogênea, fazendo com que o espaço entre as partículas seja homogêneo, conforme pode ser visto na Figura 6 (a), (b) e (c) (DAVIDSON; CLIFT; HARRISON, 1982; KUNII; LEVENSPIEL, 1991; YATES; LETTIERI, 2016).

No entanto, para sistemas gás-sólido, esse comportamento homogêneo se torna difícil de ser observado, pois na maior parte das vezes, quando a vazão é aumentada acima da

mínima fluidização, ocorre a formação de bolhas e canais preferenciais. Essas bolhas são regiões onde não existe ou há pouco material particulado. Além disso, se a velocidade do gás aumenta, o tamanho e número das bolhas, assim como a sua distribuição e formato dentro do sistema também se modificam, conforme pode ser visto na Figura 6 (d), (e), (f), (g) e (h) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 6 - Diferentes regimes da fluidização



Fonte: Adaptado de Kunii; Levenspiel (1991).

Os diferentes regimes da fluidização foram identificados e classificados, sendo que quando o fluido passa por entre os interstícios do material particulado, o regime é conhecido como leito fixo, Figura 6(a). Quando o fluido mantém todas as partículas em suspensão, contrabalanceando o seu peso e fazendo com que a somatória das forças em cada partícula seja aproximadamente zero, esse estado é chamado de mínima fluidização, Figura 6(b). No regime de mínima fluidização, a queda de pressão medida entre duas seções em alturas

diferentes ao longo do leito se iguala aproximadamente à pressão das partículas e do gás localizados entre as duas seções avaliadas. Essa pressão das partículas e do gás é proveniente da relação entre o peso dessa mistura e a área do perfil do leito (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A fluidização suave, mostrada na Figura 6(c), é um processo que normalmente só ocorre com líquidos, com uma expansão progressiva e homogênea, sem observar grandes espaços vazios, espaços sem material particulado e apenas líquido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

No caso do gás, com o aumento da vazão, há a formação de canais preferenciais de escoamento e vazios de particulado, identificados como bolhas, que crescem conforme sobem no leito e colapsam na superfície, sendo este regime descrito como borbulhante, Figura 6(d) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Os leitos fluidizados que operam nesse regime são chamados de borbulhantes.

Se as bolhas crescerem demasiadamente, é gerado o efeito de golfada ou *slugging*, com vazios que podem chegar ao tamanho do diâmetro do leito. Para partículas mais finas, ocorre conforme visto na Figura 6(e), enquanto que, para partículas mais grossas, ocorre conforme mostrado na Figura 6(f) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Na fluidização turbulenta, Figura 6(g), a superfície superior do leito desaparece, surgindo um vazio de particulados de diferentes tamanhos e formatos. Caso a vazão for aumentada ainda mais, os particulados passam a ficar mais afastados e são carregados para fora do leito, Figura 6(h), causando um transporte pneumático (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Os leitos que operam no regime turbulento e de transporte pneumático são chamados de leito fluidizados circulantes.

Embora existam setores que utilizam o contato líquido-sólido em um leito fluidizado, como no caso da hidrometalurgia e processamento bioquímico (MANDAL, 2015), a maior parte das operações no meio industrial tem como base de funcionamento o contato gás-sólido. Isso se deve ao fato de que entre os diferentes tipos de equipamentos que envolvem contato gás-sólido, como os reatores de leito fixo, móvel e cilindro rotativo, o leito fluidizado apresenta propriedades diferentes e úteis, como a homogeneidade de temperatura ao longo de todo o reator (ARAGÓN; PALANCAR; SERRANO, 2009; KUNII; LEVENSPIEL, 1991; MOSTOUFI; CHAOUKI, 2004).

O modelo mais simples de um leito fluidizado comumente funciona com duas entradas e duas saídas, sendo um par de entrada e saída usado para a vazão do gás enquanto que o outro par é usado para a injeção e remoção do material sólido particulado que será usado no processo que estará acontecendo dentro do sistema de fluidização, quer seja combustão,

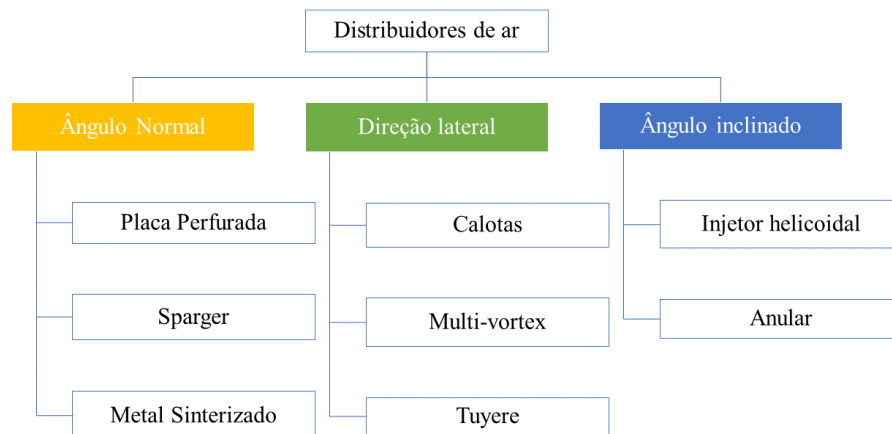
gaseificação, secagem ou outro processo(KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

2.2 DISTRIBUIÇÃO DO GÁS DE FLUIDIZAÇÃO

O distribuidor do gás de fluidização influencia diretamente no funcionamento do reator de leito fluidizado. É por meio dele que o gás é injetado dentro do leito, afetando a sua operação e eficiência (SHUKRIE; ANUAR; OUMER, 2016). De acordo com Geldart e Baeyens (1985), o projeto inadequado de um distribuidor ou seu mal funcionamento é responsável por uma parte substancial dos problemas encontrados em um leito. Embora essa afirmação possa não representar a situação atual, uma vez que ela foi feita há algumas décadas, ela indica a importância do distribuidor do gás de fluidização no funcionamento de um leito.

Existem diferentes tipos de distribuidores, sendo que eles podem ser normalmente classificados de acordo com a direção da injeção do gás e do tipo de injetor que se tem na placa que compõe o distribuidor. Os tipos de distribuidores podem ser vistos no fluxograma da Figura 7 conforme indicado por Shukrie (2016).

Figura 7 - Fluxograma dos tipos de distribuidores encontrados na literatura.



Fonte: Adaptado de Shukrie (2016).

Ressalta-se que existem variações do que está descrito na Figura 7, como a placa perfurada que, no seu modelo mais simples, é apenas um prato de metal com orifícios dispostos em uma determinada ordenação, normalmente triangular ou quadrada. Entretanto, ela pode ser intercalada com uma segunda placa perfurada ou possuir uma curvatura para facilitar com que o material se mova para o centro e não fique estagnado nas laterais do reator

(KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Geldart e Baeyens (1985) realizaram uma revisão do estado da arte no que concerne aos distribuidores. Eles citaram as principais equações de velocidade superficial do gás e de variação de pressão, discutindo a importância dessas equações e como que as propriedades da placa, como o diâmetro, passo e disposição dos orifícios, assim como a área livre da placa distribuidora e penetração do gás afetam esses parâmetros. Também foi consideravelmente discutido a razão da queda de pressão (Δp) do distribuidor e do leito ($c = \Delta p_d / \Delta p_b$) e como ela é afetada pela razão de altura para a mínima fluidização (H_{mf}) e diâmetro (d_b) do leito (H_{mf}/d_b), identificando que o c recomendado para a placa distribuidora tende a reduzir conforme a razão H_{mf}/d_b aumenta.

Sreenivasan e Raghavan (2002) fizeram um estudo hidrodinâmico de um leito fluidizado anelar espiral, fazendo uma relação entre os dados coletados experimentalmente e um modelo criado por eles para conseguir prever a variação de pressão do sistema. Os dados encontrados foram coerentes, mas os autores descreveram a necessidade de um aprofundamento do estudo e uma melhora do modelo matemático desenvolvido.

Wormsbecker; Pugsley; Tanfara (2007) compararam a capacidade de secagem entre um distribuidor do tipo malha e dois tipos de placa perfurada, um com furos regulares e outro com orientação circular, do tipo *swirler*, com o objetivo de gerar um movimento de rotação do gás. Os resultados indicam que a placa perfurada *swirler* tem melhor desempenho para massas acima de 2,5 kg e velocidades entre 1 e 1,5 m/s. Para maiores velocidades ou menor quantidade de material dentro do leito, o comportamento dos distribuidores foi muito similar. Isso indica que a placa perfurada circular tem uma melhor distribuição radial comparado com os outros dois modelos.

Sobrinho, Ellis e Vega (2009) realizaram um estudo da fluidodinâmica de um leito no regime turbulento utilizando medidas de pressão e massa específica aparente para uma placa perfurada e um injetor do tipo calota. Apesar do estudo ter sido efetuado no regime transiente e não no regime borbulhante, os perfis de pressão mostraram que os injetores de calota têm uma distribuição radial mais homogênea durante a fluidização, mas com uma massa específica aparente maior na região inferior do leito se comparado com a placa perfurada.

Kuprianov et al. (2010) utilizaram um distribuidor *swirler* com injeção de gás secundária, também chamado de distribuidor anelar espiral na combustão de casca de arroz em um leito fluidizado. O estudo foi conduzido a fim de avaliar a influência da umidade da casca na emissão de NOx. Os perfis de temperatura ao longo do diâmetro se mostraram uniformes, mostrando uma transferência de massa e calor eficiente e intensa. Os resultados

indicaram que uma maior umidade reduz efetivamente a emissão de NOx e que, nas melhores condições de excesso de ar para o caso avaliado (40-50%), foi possível alcançar uma eficiência entre 99,4 e 99,6% com o distribuidor *swirler* na queima da casca de arroz.

Brink, Saayman e Nicol (2011) realizaram um estudo em um leito fluidizado pseudo bidimensional testando dois tipos diferentes de distribuidores, sendo um deles de placa perfurada simples e o outro do tipo *multi-vortex* (MV), um distribuidor com tubos direcionados na horizontal e na vertical em diferentes alturas com a intenção de criar pequenos redemoinhos dentro do leito. Interessante notar que, para realizar os testes de comparação entre dois modelos diferentes de placas distribuidoras, foram igualados dois parâmetros principais: a razão de área livre e as velocidades de orifício. Os resultados encontrados mostraram que o distribuidor do tipo *multi-vortex* melhora consideravelmente a eficiência de conversão do ozônio para todas as velocidades testadas, podendo chegar à uma melhora de até 20% na conversão, com uma média de 14,7%. Essa melhora na conversão foi identificada apesar do tamanho das bolhas no leito terem aumentado. Esse aumento das bolhas tende a diminuir a taxa de reação por dificultar a transferência de massa no reator, mas, conforme indicado pelos resultados, a convecção extra gerada pelo distribuidor supera essas dificuldades.

Sánchez-Prieto et al. (2014) estudaram o efeito da temperatura no projeto de dois distribuidores: o de placa perfurada e o de placa com injetores do tipo *tuyere*. Para realizar essa análise, foram obtidas curvas de pressão dos distribuidores para diferentes temperaturas. As análises mostraram uma diminuição da queda de pressão do distribuidor com o aumento da temperatura, pois a massa específica do gás também diminuiu. De acordo com os autores, a área livre necessária de um distribuidor para uma determinada queda de pressão é menor para casos em que o leito opera em temperaturas mais elevadas. Assim, eles propuseram um novo método para projetar distribuidores, levando em conta essa diferença causada pela temperatura. Esses experimentos foram executados apenas para partículas do tipo Geldart B, que são consideradas partículas de fácil fluidização.

Miin et al. (2015) também estudaram o distribuidor anular espiral, focando na fluidodinâmica do mesmo, utilizando captura de imagens com uma câmera de alta velocidade. Foram testados diferentes ângulos das lâminas do distribuidor (12°, 15° e 18°), tamanhos de partículas (2900 e 3100 μm) e massa do material particulado (500, 750, 1000, 1250, 1500 g). Os resultados mostraram que um aumento no ângulo da lâmina e na massa do leito diminuíram a velocidade da partícula. No caso do tamanho da partícula, uma velocidade mínima de rotação foi atingida mais rapidamente com uma partícula menor.

Aworinde, Holland e Davidson (2015) testaram um novo tipo de injetor com um filete helicoidal utilizado na placa distribuidora de gás a fim de promover um escoamento rotativo, melhorando a dispersão do gás e promovendo um maior contato de gás-sólido no leito. Aplicando a ressonância magnética e a medição de queda de pressão e velocidade do escoamento, foi possível aferir produção de bolhas menores, indicando realmente um maior contato e nível de mistura, aumentando a eficiência do processo. O injetor também apresentou maior queda de pressão se comparado aos injetores comuns devido ao caminho espiral que o ar precisa percorrer.

2.3 MATERIAL PARTICULADO DO LEITO

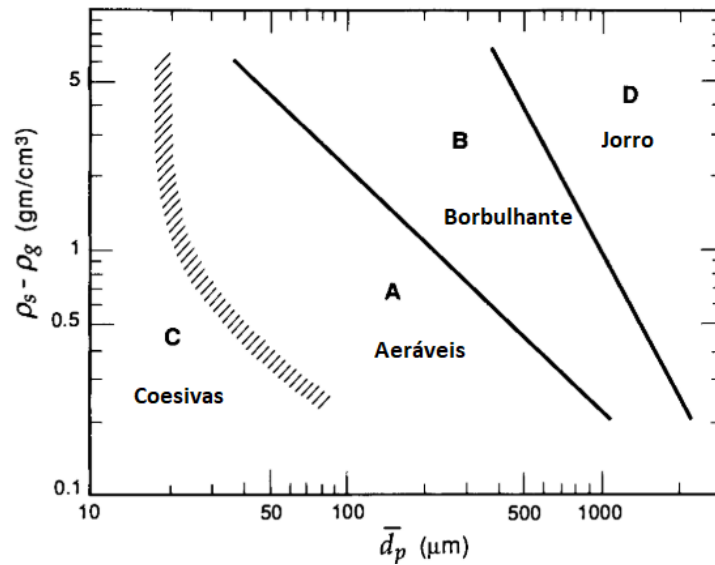
Como a vazão do gás no reator de leito fluidizado modifica o regime de fluidização das partículas do leito, partindo de leito fixo até chegar em transporte pneumático, o material do leito também afeta a forma com que essa fluidização ocorre. Para uma mesma vazão de gás, é possível obter comportamentos diferentes no leito devido às propriedades dessas partículas, como massa específica, esfericidade ou diâmetro.

Geldart (1973) classificou essas partículas em 4 grupos diferentes de acordo com seu comportamento de fluidização. Os 4 grupos estão listados abaixo juntamente com informações adicionais obtidas de Kunii e Levenspiel (1991):

- Grupo A: Material aerável, de baixa massa específica e diâmetro médio. Possui fácil fluidização, apresentando uma expansão de leito suave para baixas velocidades de gás. Com uma maior vazão, há o surgimento de pequenas bolhas.
- Grupo B: Particulados similares à areia. Fluidiza bem com surgimento de bolhas que podem crescer consideravelmente.
- Grupo C: Particulado coesivo, muito fino. Fluidização é difícil devido às forças entre partículas que tendem a superar a força exercida pelo gás. Farinha é um exemplo típico desse tipo de sólido.
- Grupo D: De jorro, material largo e denso, difícil de fluidizar. Apresenta canais preferenciais e tende a gerar grandes jorros, com comportamento errático. Grãos e carvão são alguns exemplos desse tipo de particulado.

Na Figura 8, apresenta-se a classificação de partículas dada por Geldart (1973) com os 4 grupos descritos previamente. As partículas foram divididas em função do diâmetro da partícula (d_p) e a diferença entre as massas específicas do sólido que está sendo fluidizado (ρ_s) e do gás de fluidização (ρ_g).

Figura 8 - Classificação das partículas para o ar em condições ambientes.



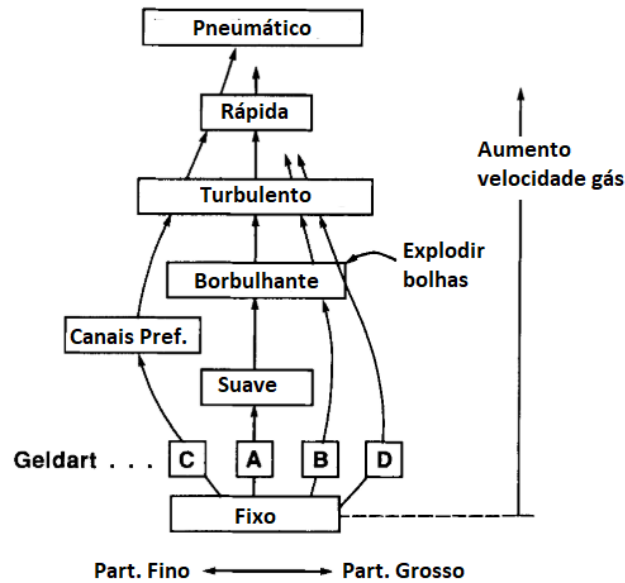
Fonte: Adaptado de Geldart (1973).

A relação entre os regimes de fluidização e os tipos de particulados pode ser melhor compreendida na Figura 9, mostrando, por exemplo, que os grupos C e D não apresentam comportamento de leito borbulhante.

A composição dos particulados sólidos que ficam dentro do sistema de fluidização depende muito do objetivo para qual o sistema está sendo utilizado. No caso de um leito aplicado para secagem, que é um procedimento muito comum nos setores farmacêuticos e de alimentos, é possível encontrar desde granulados usados na composição de remédios até grãos e sementes, entre outros produtos agrícolas (CHEN et al., 2018; CHOKPHOEMPHUN; CHOKPHOEMPHUN, 2018; IDAKIEV et al., 2017). No entanto, não fica restrito à apenas esses tipos de sólidos particulados, tendo também aplicações na secagem até para pólenes apícolas (LINHARES; SANTOS; PRADO, 2014).

Se o reator de leito fluidizado for utilizado para processos de revestimento, podem ser encontrados cápsulas e remédios como material particulado (CARTER; BRIENS, 2018). Para os processos químicos têm-se desde urânio e silício até catalizadores usados no craqueamento de petróleo (YATES; LETTIERI, 2016).

Figura 9 - Regime de fluidização afetada pelo tipo de partícula.



Fonte: Adaptado de Kunii; Levenspiel (1991).

Quando o sistema de fluidização é aplicado em processos termoquímicos, o objetivo principal pode ser para obter produtos, como é o caso da gaseificação, ou para a geração de energia térmica no caso da combustão. Para estas aplicações, o leito fluidizado é inicialmente formado por uma massa de material particulado, que normalmente se encontra na faixa de tamanho de 0,1 a 0,3 mm ou 0,25 a 1,0 mm, dependendo do tipo de combustor (BASU, 2013). Esses sólidos são denominados por material do leito e que podem ser quimicamente inertes, como a areia, cascalho ou cinza do carvão. No caso de materiais não inertes, é comum utilizar calcário fresco ou usado, que normalmente é aplicado na queima de carvão com alto teor de enxofre para a sorção do SO_2 liberado na queima (BASU, 2013).

Após o início da queima dentro do leito, o material particulado passa a ser composto pela mistura das cinzas do material queimado, o combustível que está sendo inserido dentro do leito e particulados que se encontram entre essas duas condições, tendo apenas parte da sua composição entrado em combustão. No caso, as características físico-químicas do material particulado também dependem do combustível que está sendo usado, que pode ser desde carvão mineral até biomassa.

A gaseificação é basicamente uma forma de combustão incompleta com atmosfera deficiente em oxigênio na qual o combustível sólido é transformado em combustível gasoso (*syngas*), composto principalmente de gás metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2) (FORDE et al., 2014). Além do *syngas*, a gaseificação também gera outros materiais, uma vez que não é possível converter 100% do combustível sólido. Assim, o que

não é convertido no *syngas* passa a ser alcatrão e biocarvão ou *biochar* (YOU et al., 2017). Embora em um processo ideal de gaseificação não é esperada a produção do biocarvão, em processos reais uma pequena porcentagem (<10%) é obtida (KAMBO; DUTTA, 2015). Assim, na gaseificação, o material particulado é composto também pelo biocarvão resultante desse processo. O alcatrão normalmente não faz parte do particulado, uma vez que em um processo bem controlado, ele sai junto com o gás de síntese e só condensa após deixar o leito, durante o resfriamento.

Ressalta-se que, tanto na combustão quanto na gaseificação, além da mistura de combustível sólido e cinzas/biocarvão como material particulado dentro do leito, também pode ser acrescentado um material inerte para facilitar a fluidização do combustível e auxiliar na propagação de calor dentro do leito. Esse material não é adicionado para ter interação química com o material, embora isso possa ocorrer em processos de aglomeração e sinterização (MORRIS et al., 2018).

2.4 BIOMASSA: FONTE ENERGÉTICA NO LEITO FLUIDIZADO

A mistura de biocarvão com biomassa ocorre não apenas como resultado da gaseificação, mas também é encontrada em leitos cujo objetivo seja utilizar dois combustíveis simultaneamente. Se o reator for utilizado para queima, o processo é conhecido como co-combustão, enquanto que se for aplicado para produção de *syngas*, passa a ser chamado de co-gaseificação (MALLICK; MAHANTA; MOHOLKAR, 2017).

A ideia que permeia a co-gaseificação entre a biomassa e o biocarvão é de que o efeito sinérgico entre eles aumenta a eficiência energética do processo, além de ajudar a reduzir a produção de alcatrão dentro do reator (MALLICK; MAHANTA; MOHOLKAR, 2017).

Dentre os diferentes tipos de combustíveis particulados sólidos que podem ser usados em um leito, a biomassa apresenta um considerável potencial de crescimento no setor energético, não apenas por existir em grande quantidade nas florestas e plantações, mas também por ser uma opção viável para a geração de energia sem afetar de maneira tão significativa o ecossistema se comparada com as fontes de energia fósseis.

O termo biomassa engloba não apenas os vegetais presentes na natureza, assim como os resíduos gerados a partir de sua utilização, variando desde resíduos florestais e agrícolas, até como material orgânico contido nos resíduos industriais, domésticos e rurais (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012). A biomassa também pode ser definida como qualquer material orgânico que pode ser transformado em energia térmica, elétrica ou mecânica

(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Do ponto de vista energético, a biomassa é toda matéria que possui bioenergia armazenada na sua constituição. A bioenergia, por sua vez, é definida como uma forma de energia química que é acumulada mediante processos de fotossíntese recentes. Conseqüentemente, a biomassa é um material orgânico que conseguiu acumular energia proveniente da radiação solar transformando-a em energia química (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

No entanto, para esse processo de conversão de energia acontecer, a planta, além da luz solar, também necessita de água e dióxido de carbono. Em um processo endotérmico, ela absorve essa energia na fotossíntese, gerando glicose e oxigênio. Essa glicose armazenada na planta é a retentora da bioenergia e que, em processos termoquímicos como a combustão, pode ser transformada em outras formas de energia (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

Esse aproveitamento da bioenergia faz com que o dióxido de carbono e a água usadas no processo de fotossíntese sejam novamente liberados na atmosfera. Se a quantidade entre o que é plantado e o que é colhido de biomassa for mantida a mesma, o impacto ambiental no que concerne ao efeito estufa e ao aquecimento global se torna relativamente neutro. Essa consideração de neutralidade da biomassa depende muito dos fatores que são considerados no ciclo de vida do carbono usado desde os cultivos até o seu uso final. Entretanto, o uso da biomassa como fonte energética é considerada muito mais ambientalmente amigável se comparado com outras fontes de energia como o petróleo e o carvão. Além disso, devido à sua característica cíclica com relação ao carbono, ela também é classificada como uma fonte de energia renovável (SPEIGHT, 2011)

A biomassa é utilizada como fonte de energia desde antes do surgimento do *homo sapiens*, quando hominídeos se utilizavam de lenha para obter uma fogueira, fonte de energia térmica. Durante muito tempo, a biomassa, principalmente na forma de lenha, serviu como fonte principal de energia para cocção, proteção e até para sobreviver à ambientes com temperaturas desfavoráveis ao ser humano (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Após a Revolução Industrial, a biomassa passou a ceder cada vez mais espaço para o carvão mineral, principalmente porque os países que estavam na vanguarda dessa mudança possuíam grandes reservas desse combustível. Além disso, a devastação das florestas inglesas para produção de lenha estava atingindo um nível crítico (LEITE, 2014).

Para países com uma vasta área florestal inexplorada, essa substituição ocorreu de

forma mais lenta, como nos Estados Unidos, ou nem chegou a de fato acontecer, como foi o caso do Brasil. Devido às suas reservas de carvão serem limitadas, com uma baixa qualidade e de difícil extração, o Brasil manteve a lenha como fonte principal de energia até quase a metade do século XX (LEITE, 2014).

Com o advento do petróleo e de seus derivados, assim como o investimento em outras fontes de energia como a hídrica e a nuclear, a biomassa passou a exercer um papel pouco expressivo na matriz energética mundial. Durante décadas, a produção de energia proveniente da biomassa permaneceu a mesma, uma vez que, entre 1973 e 2016, a porcentagem na participação da matriz energética mundial permaneceu próxima dos 10%. Entretanto, mesmo com essa porcentagem permanecendo estável, o seu valor bruto cresceu na última década, saindo de 1096 Mtoe em 2005 para 1349 Mtoe em 2016 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017, 2018).

Em contrapartida, o Brasil no começo dos anos 70 tinha quase metade da sua Oferta Interna de Energia (OIE) proveniente da combustão de biomassa, principalmente da lenha. Com o passar das décadas, essa proporção caiu consideravelmente, sendo que em 2003 apenas 25% da OIE era proveniente da biomassa. Essa queda ocorreu principalmente pela queda na utilização de material florestal em detrimento de outras fontes de energia, como o petróleo e a hídrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015, 2016; LEITE, 2014).

Entretanto, mesmo com essa redução na matriz energética brasileira nas últimas décadas, a participação da biomassa ainda se manteve acima da média mundial. É interessante notar que, em 2014, a participação da biomassa se manteve próxima de 23%, um valor similar ao obtido em 2003. Contudo, a participação dos derivados de cana-de-açúcar e outros restos de plantações cresceu de 13,83% para 15,75% entre 2005 e 2014 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015). Além disso, no começo do século, começou a ter um crescimento da bioeletricidade na Geração Elétrica Total, subindo de 2% para quase 8% entre 2000 e 2014, principalmente no que se refere ao aproveitamento de palhas e pontas de plantações (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

A biomassa é tida como uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento no futuro próximo (OLIVEIRA; CARDOSO; ATAÍDE, 2013), sendo considerada uma alternativa energética de vanguarda, inclusive para mitigar os efeitos do aquecimento global (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008; DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013). Portanto, a utilização de biomassa para a geração de energia se torna cada vez mais crucial. Por outro lado, alega-se que o material e as áreas de cultivo que

poderiam ser utilizados para produção de alimentos estariam sendo desperdiçados para a produção de biomassa e geração de energia, principalmente considerando que muitos países possuem um território pequeno e desfavorável a grandes plantações.

Neste contexto, poder utilizar os resíduos agrícolas não apenas ajuda a contornar esse problema citado acima como também reduz os impactos ambientais negativos gerados pelo descarte inadequado desses resíduos, além de preservar a saúde da população e agregar valor à esses materiais (FURLAN et al., 2018).

Outro fator interessante é que, se os resíduos de plantações não forem aproveitados, esse material será decomposto 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, os efeitos do metano relacionados ao efeito estufa são 25 vezes mais potentes se comparado com o do dióxido de carbono (CO_2) (KRAPIVIN; VAROTSOS; SOLDATOV, 2017; YVON-DUROCHER et al., 2014). Isso significa que a queima da biomassa, que resulta grande parte em CO_2 e água, tem um efeito menor com relação ao aquecimento global se comparado com o seu descarte no ambiente.

2.5 USO DA CASCA DE ARROZ NA GERAÇÃO DE ENERGIA

As plantações de arroz têm aumentado continuamente ao redor do mundo devido à crescente demanda de alimentos. Anualmente, há um descarte das plantações de aproximadamente 1.370.000 toneladas, consistindo basicamente de casca e palha de arroz (DARMAWAN et al., 2018).

Segundo Darmawan et al (2018), para cada 1 kg de arroz produzido, é gerado 0,28 kg de casca de arroz e 1,1 kg de palha. Por outro lado, de acordo com Koopmans e Koppejan (1997) a produção dos resíduos para cada 1 kg de arroz resulta em 0,267 kg de casca de arroz e 1,76 kg de palha de arroz, um valor ligeiramente diferente, principalmente no que concerne à palha de arroz.

Embora esses valores possam variar um pouco, é possível perceber que mais da metade da massa gerada em uma plantação de arroz não é inicialmente utilizada para consumo. Entretanto, existe um considerável valor monetário agregado nesse material, uma vez que é investido recursos como água, energia e adubo no seu cultivo (DARMAWAN et al., 2018).

Muitas vezes, os resíduos das plantações são queimados, o que causa danos não apenas ao meio ambiente como também pode afetar a saúde da população local. Simplesmente deixar esse material ao relento se decompondo também não é interessante, pois gera gás metano, que

é considerado mais danoso com relação ao aquecimento global do que o dióxido de carbono gerado na queima. Além disso, ambas opções são consideradas um desperdício se analisadas com uma perspectiva econômica, visto que parte dos recursos investidos na plantação é literalmente descartado (DARMAWAN et al., 2018; SOAM et al., 2016; YVON-DUROCHER et al., 2014).

Assim, se torna importante aproveitar esses recursos de alguma forma, sendo a combustão uma das maneiras de usar a casca de arroz, que é um resíduo agrícola com um conteúdo energético relativamente alto (12-18 MJ/kg) (KARMAKAR et al., 2013).

Além da combustão, também é possível aplicar um processo de gaseificação, cujo gás obtido pode ser utilizado em sistemas de ciclo combinado com gaseificação integrada, apresentando uma melhora na eficiência de 6% se comparado à uma planta de combustão de carvão pulverizado (KARMAKAR et al., 2013).

A tecnologia de leito fluidizado apresenta vantagens na queima de biomassa de baixa massa específica se comparado aos reatores convencionais de leito fixo. Esses reatores convencionais normalmente apresentam problemas com a gaseificação da casca de arroz devido à sua grande quantidade de cinzas com baixo ponto de fusão, além de sua baixa massa específica aparente. Além disso, os reatores de leito fluidizado são melhores no processo de conversão com uma distribuição térmica muito mais homogênea, alcançando maiores eficiências (KARMAKAR et al., 2013).

Tendo como base o trabalho feito por Geldart (1973), a casca de arroz é uma partícula que é classificada como Grupo D, apresentando uma baixa massa específica ($\rho = 505 \text{ kg/m}^3$) e um diâmetro de partícula alto ($d_p = 7\text{-}8 \text{ mm}$). Devido a essas características, a casca de arroz tem um comportamento de jorro no leito, caracterizada por segregação de camadas e bolhas estourando na superfície. Por causa disso, a casca de arroz precisa ser fluidizada junto com materiais do Grupo B, como a areia de sílica, com o objetivo de melhorar a fluidização e homogeneidade do processo (KOOK et al., 2016).

2.6 MISTURA E SEGREGAÇÃO ENTRE BIOMASSA E INERTE

O material particulado dentro do sistema de fluidização possui diferentes comportamentos dependendo do tipo de partícula e da velocidade do gás. Quando a extensão 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, principalmente para casos em que a velocidade do gás U é próxima da

velocidade de mínima fluidização U_{mf} (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

Existem diversas maneiras para analisar o nível de mistura de um leito, sendo alguns deles (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

- Rastreado o movimento de algumas partículas dentro do leito;
- Medir a mistura de dois tipos de sólidos com ambos originalmente dispostos em camadas separadas;
- Medir a troca de calor em um leito com a parte superior aquecida e a parte inferior resfriada.

Esses estudos ajudam a entender melhor a fluidodinâmica do leito e podem ser aplicados para melhorar a eficiência dos processos (PÉCORA et al., 2014) e a precisão dos programas de simulação numérica.

Pécora et al. (2011) desenvolveram um estudo avaliando a influência do distribuidor de gás variando o diâmetro dos furos e a proporção de bagaço de cana e inerte em um leito fluidizado borbulhante. Para isso, foi construído um leito em escala laboratorial com ciclone e placa de distribuição com injetor tipo *tuyere*. A partir dos dados obtidos do autor, foi possível perceber que a velocidade de mínima fluidização não é afetada pela quantidade de bagaço ou pelo diâmetro do orifício. Entretanto, houve uma maior queda de pressão para os casos com orifícios menores nos injetores tipo *tuyere*.

Ghaly e MacDonald (2012) pesquisaram a influência da granulometria da areia, do formato e ângulo das placas injetoras, da altura do leito e da velocidade de fluidização na mistura e no tempo de residência. Os equipamentos foram compostos principalmente de um leito, ciclone e compressor. O nível de mistura foi avaliado utilizando um método visual, com imagens obtidas por máquinas de fotografia de alto movimento. Fazendo comparação entre as fotografias, Ghaly e Macdonald (2012) afirmaram que a concavidade afeta o nível de mistura e movimentação dos materiais. Tanto os pratos côncavos quanto os convexos atingiram um bom nível de mistura, gerando fluxos convectivos que se movimentam para cima e para baixo no leito. Entretanto, a placa côncava apresentou maior tempo de residência, o que permite uma maior eficiência. O tempo de residência também aumenta com alturas maiores do material no leito.

Zhang et al. (2012a) apresentaram um estudo fluidodinâmico para uma mistura binária de bagaço de tabaco e resina de troca iônica do cátodo. A resina foi utilizada para substituir o carvão por apresentar diâmetro e massa específica similares. Como o experimento foi executado à temperatura e pressão ambientes, o fator energético não exerce influência nos resultados. As medições da queda de pressão em função da velocidade superficial de gás

foram coletadas para diferentes proporções de biomassa/resina com até no máximo 20% de fração mássica do bagaço. Quanto maior fosse a proporção de biomassa no leito, maior era o valor da queda de pressão em que ocorria a fluidização. É interessante perceber que a velocidade do ar foi aumentada gradativamente até estabilizar a queda de pressão e, posteriormente, o processo inverso foi feito para observar possível efeito de histerese.

Além disso, foram avaliados os efeitos do gás de jato central e do gás anular (gás proveniente da placa injetora sinterizada) separadamente e em conjunto, comparando o nível de mistura em função da altura do leito. Para obter esse perfil, a câmara foi dividida em dez camadas de 100 mm no qual foi calculado a fração mássica para cada uma e seus valores foram comparados com a fração mássica total. Os resultados mostraram uma maior segregação quando usados separadamente do que quando usados em conjunto.

Sampaio et al. (2013) também realizaram testes avaliando a influência da placa com os distribuidores de ar variando o número e o diâmetro dos orifícios, ângulo do gás vertical e ângulo entre orifício e a tangente do círculo envolvendo os injetores tipo *tuyere*. A análise foi feita em uma mistura biomassa/areia com uma composição de 5% em peso da biomassa à temperatura e pressão ambiente. Os resultados foram coletados e analisados por meio de métodos estatísticos, indicando que apenas a variação do diâmetro e do número de orifícios foram significativos para o processo. Além disso, para avaliar o nível de segregação e a qualidade da fluidização, coletaram amostras em duas posições radiais e longitudinais diferentes, calculando a massa específica de cada uma, diferente de Pécora et al. (2011) que utilizaram apenas um método visual.

Oliveira et al. (2013) avaliaram a fluidodinâmica do leito correlacionando a velocidade de mínima fluidização com as propriedades físicas de três tipos diferentes de biomassa e areia com quatro diâmetros diferentes. Eles constataram, assim como Park e Choi (2013), que pequenas bolhas geram uma maior segregação no leito. Entretanto, dos diferentes dados obtidos se constatou que, quanto maior a diferença de tamanho e massa específica entre as partículas da mistura, maior o efeito de segregação.

Pécora et al. (2014) realizou um estudo avaliando as propriedades físico-químicas e o comportamento hidrodinâmico para tentar prever o processo de combustão em um leito. Foram realizados testes de análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTG), assim como medição das velocidades mínimas de fluidização e porosidade para cinco tipos diferentes de biomassa, entre elas, a casca de arroz.

Foi notado que a massa específica aparente afeta diretamente a velocidade de mínima fluidização, sendo que, quanto maior a porosidade (ϵ) no material, maior é a velocidade

mínima. Também foi constatado que o calor liberado nos processos de análise térmica varia não apenas com a sua composição química, mas também de acordo com a sua morfologia, pois uma biomassa mais porosa facilita a difusão do oxigênio na reação.

Sharma et al. (2015) desenvolveram um estudo de fluidização em leito à frio para casca de arroz, palha de trigo e talo de algodão, sendo que os três são resquícios de plantações, muitas vezes inutilizados. Assim, realizando o experimento sem modificar a geometria da biomassa, obteve-se que essas biomassas são difíceis de fluidizar sem um material inerte. Dentre eles, a casca de arroz em pequena quantidade mostrou pouca fluidização com uma grande facilidade de segregação.

Libardi et al. (2016) exploraram a fluidodinâmica da casca de macadâmia, um resíduo proveniente do processamento da noz de macadâmia. O trabalho foi feito em um leito de jorro com misturas de areia como inerte. Para avaliar o nível de mistura para diferentes velocidades e proporções mássicas, foram colhidas amostras em diferentes camadas, similar ao que foi feito por Zhang et al. (2012b). Os resultados mostraram uma menor fração mássica na base do leito, demonstrando uma maior facilidade de segregar a casca na parte superior.

Lv et al.(2018) realizaram um estudo em que foram colocadas duas camadas de material granulado (magnetita e carvão) com massa específicas diferentes inicialmente separadas. Posteriormente, realizaram a fluidização do material e analisaram como esse material se misturava dentro do leito ao longo do tempo. Foi constatado que o leito passa por um processo inicial de mistura intensa (macro mistura), posteriormente atingindo um processo de mistura moderada (micro mistura). Para chegar nesse estágio de micro mistura, o leito testado demorou entre 2 e 5 minutos para entrar em um regime dinâmico estável no qual ficava variando entre segregação e mistura do material.

Esse tempo também dependeu da proporção entre os granulados, sendo que quanto maior a quantidade de carvão, maior o tempo para entrar em regime estável. Para conseguir avaliar o nível de mistura do leito, o mesmo foi separado em cinco camadas para extrair a proporção de carvão e magnetita em cada uma delas. Foram testadas as velocidades de fluidização, a granulometria do carvão, variando de 0 até 0,6 mm e proporções de carvão de 5, 10 e 15%. Os índices de mistura atingiram o seu menor valor, ou seja, o maior grau de mistura possível com a menor granulometria e proporção de carvão e velocidades acima de 9,83 cm/s. Também foi aplicado um arranjo ortogonal de três fatores para obter as suas ordens de importância, sendo a velocidade do gás o parâmetro de maior influência e a granulometria, a de menor.

2.7 ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da análise da literatura disponível, foi possível perceber alguns pontos importantes no que concerne às pesquisas envolvendo o leito fluidizado. Primeiramente, foi possível notar que esse é um tema que vem sendo investigado há várias décadas, existindo diversos tipos de aplicações, que abrangem desde a área de combustíveis e conversão energética até o setor de tratamento e produção de materiais. Por causa disso, há um certo conhecimento acumulado sobre o assunto, sendo esse aplicado até os dias atuais, como a classificação dos regimes de fluidização ou do material particulado conforme estabelecido por Geldart (1973).

Desse material particulado que é utilizado no leito, a aplicação da biomassa, inclusive da casca de arroz, para aproveitamento energético tem grande potencial, devido à sua grande disponibilidade e projeção de crescimento nos próximos anos. Além disso, por ser uma fonte neutra de carbono, seu uso ajudaria a mitigar os efeitos negativos provenientes do uso de combustíveis não renováveis.

Outro ponto importante é que, dentre as diversas peças que compõem esse sistema, a placa distribuidora do gás de fluidização, também chamado de distribuidor, se destaca por controlar a maneira como o gás é inserido no leito, afetando a dinâmica de mistura dos materiais particulados e, por consequência, a eficiência do processo (SHUKRIE; ANUAR; OUMER, 2016).

Foi possível notar que existem diversos tipos de distribuidores conforme resumido e indicado por Shukrie (2016), variando desde o modelo mais simples, como a placa perfurada até modelos mais complexos e recentes, como a placa do tipo *multi-vortex* (MV) explorada por Brink, Saayman e Nicol (2011) e Chokphoemphun e Chokphoempun (2018).

Nesses trabalhos, normalmente são avaliados alguns fatores, como o perfil de pressão, conforme feito por Geldart e Baeyens (1985), Sobrino, Ellis e Vega (2009), Sánchez-Prieto et al. (2014) e Aworinde, Holland e Davidison (2015). Também podem ser avaliados os perfis de temperatura como feito por Sánchez-Prieto et al. (2014) ou a eficiência do processo, estudado por Kuprianov et al. (2010).

Embora existam alguns trabalhos que comparem o efeito de dois ou mais tipos de distribuidores diferentes, como efetuado por Wormsbecker, Pugley e Tanfara (2007), poucos trabalhos avaliam isso relacionando esse fator com a homogeneidade do material particulado no leito, assim como a qualidade da fluidização do mesmo.

Entretanto, dos diversos trabalhos que exploram o nível de mistura por meio de testes

realizados à temperatura ambiente (testes à frio), muitos exploram fatores como proporção mássica entre dois tipos de particulados, faixa granulométrica ou variação da velocidade de injeção do gás de fluidização. Em vários desses estudos são avaliados apenas as características físicas do material particulado, uma vez que o foco é o estudo fluidodinâmico.

Por outro lado, ressalta-se que o objetivo é aproveitar essas informações para aplicar em testes reais, que envolvem processos químicos como a combustão e gaseificação. Assim, torna-se interessante cruzar as informações obtidas de um teste à frio com as propriedades químicas do particulado e simulações feitas em equipamentos como a balança termogravimétrica ou a bomba calorimétrica conforme feito por Pécora et al. (2014).

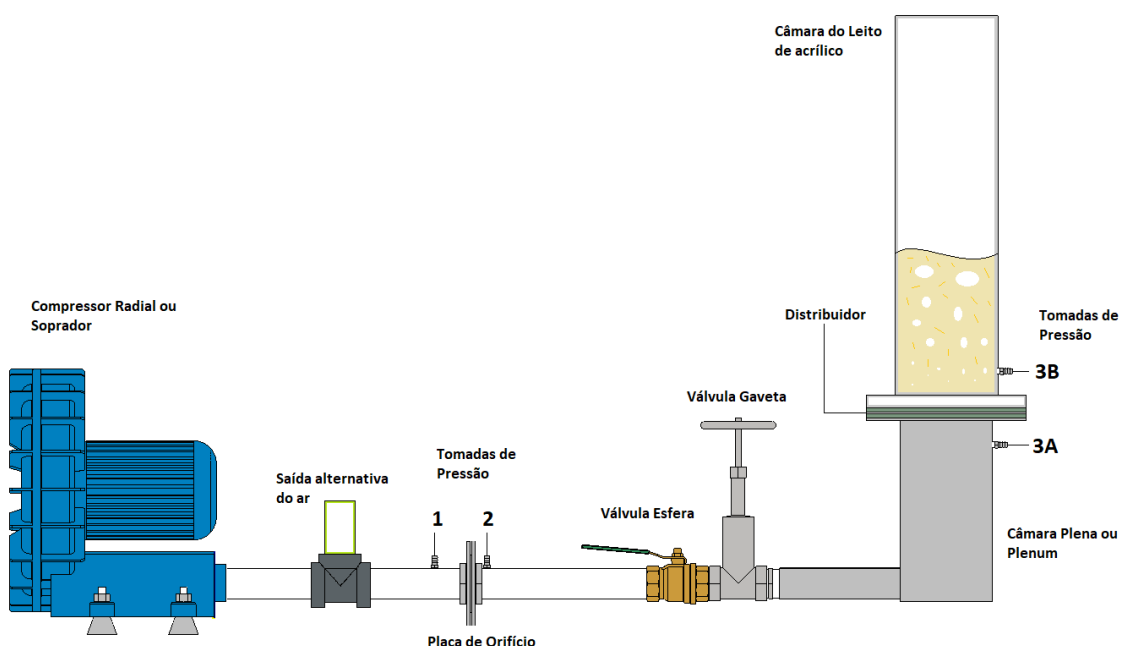
3 BANCADA EXPERIMENTAL UTILIZADA NA PESQUISA

3.1 SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO

O sistema de fluidização utilizado para realizar os testes pode ser visualizado na Figura 10. O leito fluidizado é do tipo borbulhante atmosférico e foi projetado pelo Grupo de Pesquisa do LC₃ e construído na oficina mecânica do Departamento de Energia da Faculdade de Guaratinguetá. A bancada experimental em escala de laboratório é composta por uma coluna construída em acrílico (leito fluidizado), um soprador (compressor radial) Ibram CR8 com uma potência de 7,5 cv, podendo atingir uma vazão máxima de 8 m³/min e 4000 mmH₂O de pressão. No sistema também é utilizada uma placa de orifício a montante do leito para a medição de vazão. A placa de orifício foi dimensionada e construída especificamente para este projeto.

As medições de pressão são feitas nas tomadas de pressão 1, 2, 3A e 3B indicadas na Figura 10. Essas medições são realizadas por um sistema de aquisição de pressão desenvolvido para esse trabalho. No caso, as tomadas 3A e 3B foram numeradas dessa forma por nunca serem usadas simultaneamente nos experimentos, sendo utilizado o mesmo sensor para ambas as saídas (3A e 3B). A tomada 3A é usada na caracterização dos distribuidores enquanto a 3B é usada em todos os outros experimentos.

Figura 10 - Esquema da bancada experimental



Fonte: Autoria Própria

A vazão do ar no sistema de fluidização é controlada por meio de duas válvulas, uma de esfera e outra de gaveta. São usadas duas válvulas para obter um controle mais preciso da vazão. Também é importante notar que foi colocada uma saída alternativa para o ar com o objetivo de evitar o superaquecimento do soprador em casos em que é utilizado uma vazão mais baixa. Foi colocado um longo tubo na saída do ar para reduzir o barulho, atuando como um supressor de ruído, conforme visto na Figura 11.

Figura 11 - Bancada montada para experimentos (a) Bancada Geral (b) Leito utilizado no experimento.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

O leito é uma coluna cilíndrica com diâmetro interno de aproximadamente 156 mm, altura de 650 mm e espessura de parede de 5 mm, sendo esta geometria escolhida em função da simplicidade na construção. A coluna foi fabricada em acrílico com o objetivo de permitir a visualização da mistura e a movimentação do material particulado. Fazem ainda parte do sistema de fluidização, o leito, a câmara plena (*plenum*) e a placa distribuidora. No leito é onde ocorre o processo de mistura dos particulados (inerte e biomassa) e a câmara plena é responsável por homogeneizar a pressão do gás de fluidização. Entre o leito e a câmara plena, está a placa distribuidora, ou distribuidor, que é usado para injetar o gás de fluidização no leito. No caso, serão utilizados dois tipos de distribuidores: placa perfurada simples e placa com injetor do tipo *tuyere*. Foram selecionadas essas duas placas por apresentarem maior simplicidade em sua construção, devido às restrições de tempo e recursos disponíveis.

3.2 PROJETO DAS PLACAS DISTRIBUIDORAS DO AR DE FLUIDIZAÇÃO

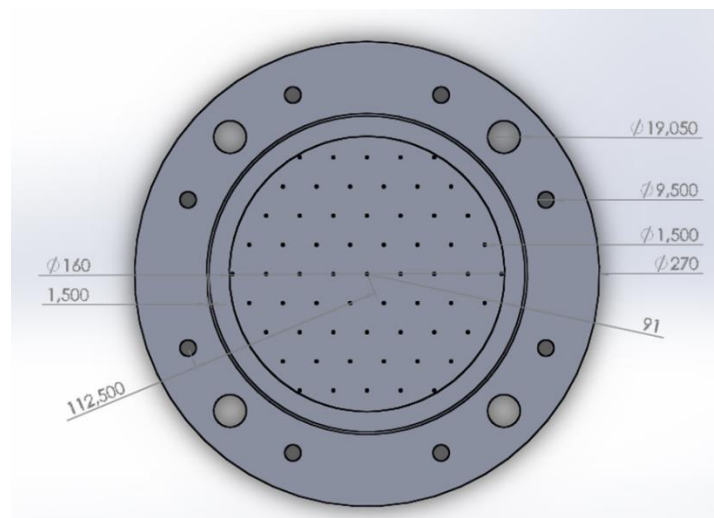
3.2.1 Placa distribuidora do tipo perfurada

Um dos distribuidores de ar de fluidização utilizado nesta pesquisa, refere-se a uma placa perfurada. Dentre as vantagens deste tipo de distribuidor do gás, citam-se a facilidade na fabricação, modificação e limpeza, além do baixo custo. Como desvantagens verifica-se que esta permite a passagem do material particulado e estar sujeita a deformações.

A placa perfurada foi projetada e construída anteriormente pelo Grupo de Pesquisa do LC₃ durante a construção do leito fluidizado. A placa perfurada foi confeccionada em aço inox, tendo sido avaliada a possibilidade de utilizar outros materiais, tais como alumínio e latão.

Na Figura 12 apresenta-se o projeto da placa distribuidora com 61 orifícios de 1,5 mm de diâmetro. O diâmetro total da placa é de 270 mm, 104 mm a mais que o diâmetro do leito (156 mm) para acomodar 8 furos de 9,5 mm e quatro furos de 19,05 mm, localizados a 112,5 mm do centro da placa, por onde passarão parafusos que fixam a placa aos flanges que unem o *plenum* ao leito e às hastes de sustentação do leito. Além disso, há 2 sulcos de 0,75 mm de raio, um em cada face da placa distribuidora, onde serão colocados anéis de vedação com a finalidade de vedação do sistema. A espessura da placa é definida pela disponibilidade de chapas comerciais. Foi definida uma espessura de aproximadamente 3 mm.

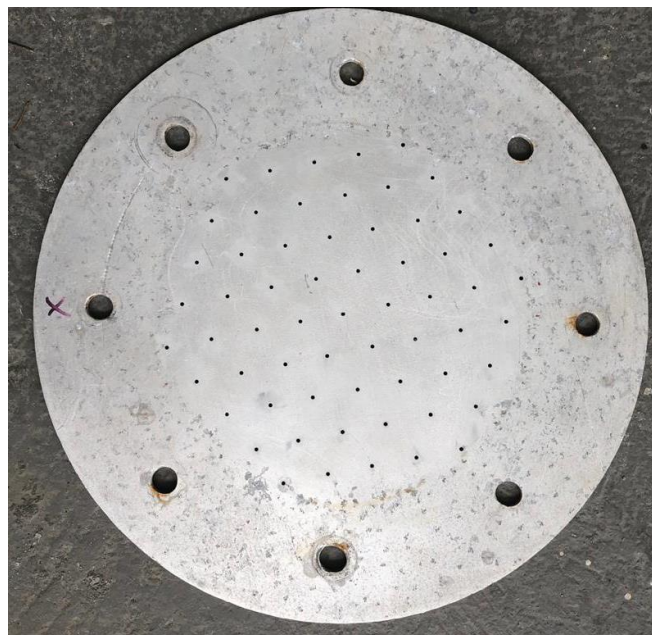
Figura 12 - Formato do projeto do distribuidor de ar de fluidização: placa perfurada



Fonte: Grupo de pesquisa do LC₃ (2019).

Entretanto, a placa distribuidora resultante foi ligeiramente diferente do projeto original, não possuindo os furos maiores para as hastes de sustentação e os sulcos para o anel de vedação. Esses sulcos não foram usinados no projeto final da placa devido à falta de equipamentos que pudessem realizar esse processo. Além disso, a vedação foi feita por meio de dois anéis de acetato-vinilo de etileno, posicionados entre o leito e o distribuidor, sendo o suficiente para obstruir possíveis vazamentos no sistema. Na Figura 13 mostra-se a imagem da placa perfurada que foi utilizada nos experimentos.

Figura 13 - Placa perfurada usada nos experimentos.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Placa distribuidora com Injetores do tipo *tuyere*

A placa com injetores do tipo *tuyere* se caracteriza por possuir injetores *tuyere* que injetam o gás lateralmente, ou seja, paralelo a placa distribuidora. Para o projeto dessa placa, foi utilizado o procedimento sugerido por Kunii e Levenspiel (1991). A equação (1) foi usada como base para projetar as dimensões dos furos na placa, assim como os furos e dimensões do injetor tipo *tuyere*.

$$d_{or} = \left(\frac{4 U_o}{\pi U_{or} N_{or}} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Na equação (1), U_{or} é a velocidade do gás no orifício de entrada do injetor e U_o é a velocidade do gás medido a montante do distribuidor.

O d_{or} representa o diâmetro do orifício na placa distribuidora sem os injetores do tipo *tuyere*. Entretanto, uma vez que os injetores serão fixados na placa distribuidora, as dimensões do orifício da placa e do orifício de entrada do injetor foram adotadas como sendo iguais e ambas representadas por d_{or} . O mesmo vale para o termo N_{or} , que representa o número de orifícios por área da placa, assim como o número de injetores que serão fixados na mesma.

Com o objetivo de obter d_{or} , foi necessário estabelecer um valor para N_{or} . Considerando que havia uma placa distribuidora do tipo perfurada existente de um projeto anterior, foi feita a tentativa de igualar o número de furos em ambas as placas. Entretanto, isso tornaria impraticável a construção da segunda placa, pois os injetores ocupariam um espaço consideravelmente maior do que apenas o furo. Portanto, foi utilizado o maior número possível permitido, adotando um valor de $N_{or}=2.500$ *tuyeres/m²*. Um número maior que esse tornaria o espaço entre os injetores consideravelmente pequeno, dificultando muito o processo de fabricação da placa distribuidora.

Para obter U_o , foi feita uma estimativa com base no trabalho de Pécora et al. (2014), em que foi obtida uma velocidade de mínima fluidização para a mesma proporção utilizada neste trabalho para a casca de arroz e areia (5% e 95%, respectivamente). Os autores fluidizaram a mistura, de aproximadamente 2 kg, com uma velocidade próxima de 0,127 m/s.

U_{or} foi calculada com base na equação (2), sendo que a variação de pressão do distribuidor (Δp_d) foi adotada com base na recomendação de Kunii e Levenspiel (1991), adotando um valor de 40% da queda de pressão causada pelo leito. Em pré-testes que foram realizados sem a medição de vazão, por meio apenas da avaliação visual, foi identificado uma queda de pressão próxima de 550 Pa para que ocorresse a fluidização em um leito com 2 kg de areia.

$$U_{or} = C_d \left(\frac{2 \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{0,5} \quad (2)$$

O valor do coeficiente de distribuição (C_d) é tabelado de acordo com o número de Reynolds (Re) que é calculado com a equação (3). Re depende da velocidade do ar (U_o), assim como da massa específica do gás de fluidização (ρ_g), a sua viscosidade (μ_g) e diâmetro interno da tubulação em que a velocidade do gás foi medida (D). No caso, os valores utilizados foram: $D = 49$ mm (2"); $\rho_g = 1,15$ kg/m³ e $\mu_g = 18 \cdot 10^{-6}$ Pa·s. O valor obtido de Reynolds foi de 401 aproximadamente, obtendo um C_d de 0,69 e um d_{or} de 2,19 mm. Devido

às limitações de brocas disponíveis, foi arredondado o valor para 2 mm de diâmetro.

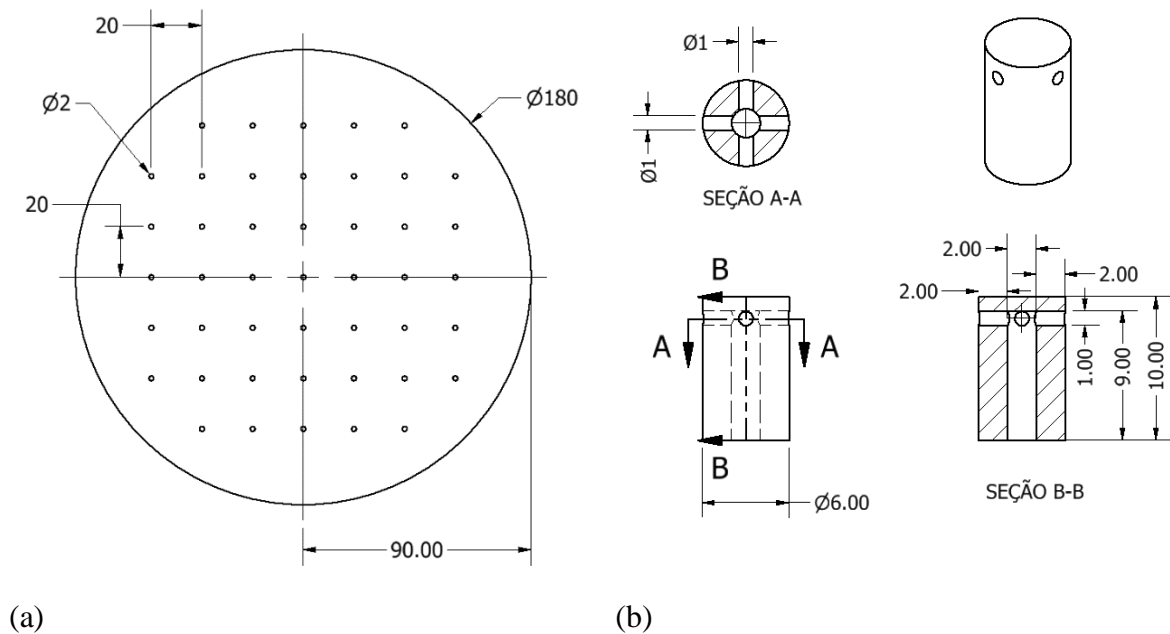
$$Re = \frac{D U_o \rho_g}{\mu_g} \quad (3)$$

Com o objetivo de obter o diâmetro do orifício de saída do *tuyere*, adotou-se que as velocidades na saída e na entrada do injetor seriam as mesmas e que teria apenas 4 canais de saída, pela facilidade de montagem. Foi definido um volume de controle no injetor para aplicar a equação da continuidade, obtendo o valor de 1 mm de diâmetro no orifício de saída do mesmo.

Na Figura 14 é apresentado o projeto da placa distribuidora com as dimensões da placa e do injetor tipo *tuyere* de acordo com os cálculos efetuados. As imagens da Figura 14 mostram ambos antes de serem unidos por meio de um processo de soldagem.

Figura 14 - Projeto da placa com injetores (a) Placa distribuidora sem os injetores *tuyeres* (b)

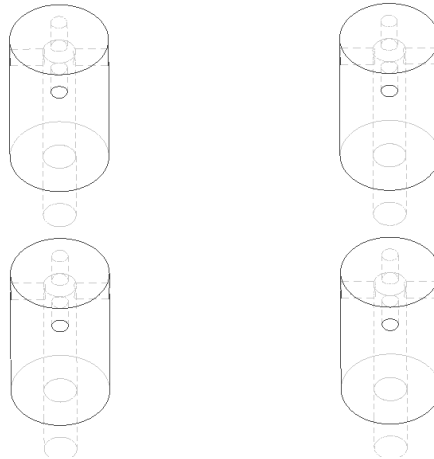
Injetor *tuyere* avulso.



Fonte: Autoria Própria.

A disposição de cada injetor em relação à placa e aos outros injetores é mostrada na Figura 15. Essa disposição foi selecionada por ser mais fácil de montar e soldar os distribuidores na placa. Do ponto de vista técnico, configurações diferentes do posicionamento de saída de ar dos injetores tornaria o processo mais impreciso e difícil de certificar que todos eles estariam posicionados da mesma maneira.

Figura 15 - Disposição dos injetores na placa distribuidora



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 16 é possível visualizar a placa no seu estado final, da forma que foi utilizada nos experimentos, com os injetores soldados na placa.

Figura 16 - Placa distribuidora com injetores do tipo *tuyere* usada no experimento.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.3 Caracterização dos distribuidores do ar de fluidização

Antes dos distribuidores serem aplicados na fluidização, é necessário proceder a caracterização do distribuidor, medindo a sua queda de pressão (Δp_d) de acordo com a velocidade de gás (U) conforme discutido por Geldart (1985). A obtenção do perfil de queda de pressão do distribuidor é usada para avaliação da qualidade da fluidização assim como para avaliar a necessidade energética do sistema, uma vez que distribuidores com uma maior queda

de pressão exigem sistemas mais robustos e um maior consumo de energia. Por causa disso, alguns estudos tentam encontrar maneiras de minimizar ou eliminar a queda de pressão causada por um distribuidor por meio de métodos de otimização de geometrias ou meios alternativos de inserir o gás no leito fluidizado (D. GELDART; BAEYENS, 1985; WANG; FAN; LUO, 2014; ZHAO et al., 2014).

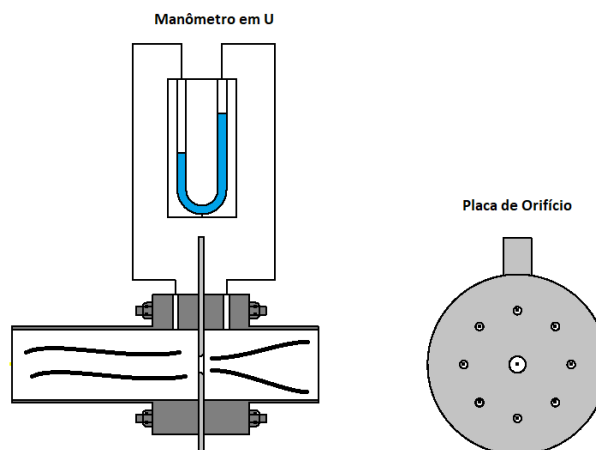
3.3 PROJETO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

3.3.1 Projeto da placa de orifício

Com o objetivo de dimensionar a placa de orifício, foi usada como base a norma ABNT NBR-ISO-5167 (1994) e o livro específico para medições de vazão de GÉRARD J. DELMÉE (2003).

A placa de orifício é uma superfície delgada que possui um furo passante cujo diâmetro é necessariamente menor que diâmetro da tubulação da qual deseja se medir a vazão. Conseqüentemente, quando a placa é posicionada entre dois flanges que conectam uma tubulação à outra, a diminuição no diâmetro causa uma constrição no escoamento do fluido (gás ou líquido), gerando uma queda de pressão pelo princípio de Bernoulli. Se essa queda de pressão for medida, se torna possível calcular a vazão existente dentro da tubulação, aplicando as equações de Bernoulli e da continuidade. Um esquema da montagem desse sistema de medição pode ser visto na Figura 17 (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

Figura 17 - Esquema de uma placa de orifício em uma tubulação com tomadas *flange taps*.



Fonte: Autoria Própria.

A equação comumente usada para o cálculo da vazão é definida na equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (GÉRARD J. DELMÉE, 2003). Ela é derivada das equações da continuidade e de Bernoulli, com algumas alterações para aumentar a precisão dos resultados e contornar as limitações existentes na equação de Bernoulli, que ignora a viscosidade do fluido.

$$Q_v = 1,1107 \cdot C_{ds} E \beta^2 \cdot D^2 \cdot \gamma \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho_g}} \quad (4)$$

Na equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Q_v é a vazão volumétrica, D é o diâmetro interno da tubulação, C_{ds} é o coeficiente de descarga, γ é o fator de expansão isentrópica, ρ_g é massa específica do gás, p_1 e p_2 são a pressão a montante e a jusante da placa de orifício, respectivamente. C_{ds} é o coeficiente de descarga, usado para corrigir as diferenças entre a vazão real e a teórica e γ é o fator de expansão isentrópico que foi inserido na equação para contabilizar a compressibilidade do fluido, se tornando particularmente importante quando o fluido é um gás. No caso, tanto E quanto β são relações fundamentadas na literatura que relacionam o diâmetro da tubulação com o diâmetro do orifício da placa (dop), sendo β uma razão entre ambos os diâmetros (dop/D) e E sendo definido como $E = 1/\sqrt{(1 - \beta^4)}$ (GÉRARD J. DELMÉE, 2003; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

A equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é usada tanto para calcular a vazão de uma tubulação quando se tem o sistema de medição montado (similar ao esquema mostrado na Figura 17), como para quando se deseja projetar uma placa de orifício. Entretanto, os valores de C_{ds} e de γ são dependentes de β , que é a incógnita final da equação quando se está projetando a placa de orifício. Portanto, é preciso adotar um valor inicial para ambas as variáveis e depois corrigi-las, utilizando um método iterativo (GÉRARD J. DELMÉE, 2003; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Além disso, é necessário adotar um valor para a variação de pressão causada pela placa de orifício. Entretanto, valores muito baixos de pressão fazem com que a precisão da medição fique comprometida enquanto que valores muito altos geram uma queda de pressão grande no sistema, sendo que em casos extremos pode ocasionar um bloqueio na passagem do fluido.

Para fazer uma estimativa dos valores de pressão e temperatura que são usados para definir a massa específica, assim como obter uma faixa da vazão volumétrica que se pode

obter, foram feitos alguns testes preliminares no sistema. Para isso, o compressor foi conectado ao leito fluidizado e foi medido, com um anemômetro, a velocidade do ar na saída do reator, conforme pode ser visto na Figura 18 (a) e (b). Também foi medido a pressão no *plenum* do leito para se obter uma estimativa inicial aproximada da pressão a montante da placa de orifício.

Para obter uma estimativa da temperatura do ar onde está instalada a placa, foi desacoplado o leito do compressor e medida a temperatura na saída da tubulação conforme mostrado na Figura 18 (c). A temperatura não permanecia constante e era difícil de medir, mas sempre variava dentro de uma faixa entre 35 e 50°C. Essa variação é consideravelmente pequena e, portanto, influencia muito pouco no cálculo da vazão.

Figura 18 - (a) Sistema montado para definir a vazão máxima obtida do compressor; (b) Anemômetro utilizado para medir a velocidade de saída do ar (c) Sistema utilizado para obter a temperatura do ar antes da placa de orifício.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Os dados coletados podem ser vistos na Tabela 1. A velocidade média do ar foi calculada com base em quatro medições diferentes, assim como o diâmetro interno médio do leito que foi usado para obter a área da seção de saída do ar e a vazão. O diâmetro interno médio do leito teve um valor de aproximadamente 156,07 mm.

Na Tabela 1, a vazão varia de valores muito baixos (0,00095 m³/s) a valores consideravelmente altos (0,025 m³/s), o que torna mais difícil o dimensionamento da placa, pois para valores muito baixos, a precisão da medição pode se tornar pequena enquanto para

valores altos, a queda de pressão pode ser muito grande.

Tabela 1 - Dados obtidos das medições feitas antes da instalação da placa de orifício

Variáveis	Vazão Mínima	Vazão Normal	Vazão Máxima	Vazão Fundo de Escala
Velocidade Média (m/s)	0,05	0,27	0,76	1,31
Pressão manométrica (kPa)	1,91	3,08	11,07	19,60
Vazão (m ³ /s)	0,00095	0,00518	0,01463	0,02506

Fonte: Autoria Própria.

Pela identificação visual, foi possível notar que a vazão de fundo de escala faz com que o regime de fluidização do leito não seja um regime borbulhante, fazendo com que o mesmo se torne algo próximo de um regime turbulento, quase que passando para transporte pneumático, pois parte do material inerte começou a ser jogado para fora do reator. Assim, como não é objetivo deste trabalho lidar com vazões tão grandes, foi utilizada como vazão de fundo de escala valores ligeiramente menores, sendo adotada a vazão como 0,022 m³/s.

A maior pressão medida no *plenum* do leito foi de aproximadamente 120 kPa. Observa-se que existe uma queda de pressão ao longo da tubulação, foi estimada, com base em cálculos preliminares, a pressão montante da placa como 125 kPa para a configuração de fundo de escala.

Para o diferencial de pressão, foi adotado um valor inicial de 1800 mmH₂O, um valor próximo dos valores utilizados por Gérard J. Delmée (2003), que variam de 1000 a 2500 mmH₂O. No caso, o limite de medição do manômetro utilizado é de 2000 mmH₂O, conseqüentemente foi escolhido um valor menor que o máximo para se ter um coeficiente de segurança.

Para obter os valores do coeficiente de descarga e do fator de expansão isentrópica, é necessário determinar a forma de coleta das pressões a montante e jusante da placa, sendo que comumente existem quatro tipos de tomadas: tomadas de flange (*flange taps*), tomadas de canto (*corner taps*), tomadas em D e ½ D (*radius taps*) e tomadas em 2 ½D e 8D (*pipe taps*).

Tomadas de canto e de flange são particularmente similares, sendo que as tomadas de pressão são feitas ao lado da placa, junto ao flange. Para isso, é necessário adaptar o flange para realizar as medições de pressão. A única diferença entre as duas tomadas é que a de canto possui câmaras piezométricas nos flanges, fazendo com que a abertura no flange utilizada para medir a pressão não tenha contato direto com a turbulência gerada pela placa.

No caso da tomada de flange, existe um contato direto com o escoamento (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

As outras duas tomadas são realizadas nas tubulações a montante e a jusante da placa, sendo que o distanciamento da mesma é padronizado e pode ser observado pelo próprio nome das tomadas. Entretanto, as tomadas de D e $\frac{1}{2} D$ são consideradas mais eficientes que as tomadas $2 \frac{1}{2} D$ e $8D$, uma vez que a rugosidade dos tubos possui uma menor influência nos resultados obtidos. Assim, as tomadas em $2 \frac{1}{2} D$ e $8D$ têm um aumento na imprecisão de medição em 50%, sendo normalmente usada para casos em que a precisão não é tão importante (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

Para o caso estudado, foi escolhido tomadas em D e $\frac{1}{2} D$ por ser considerado mais preciso que as em $2 \frac{1}{2} D$ e $8D$ e ser menos complexo de montar se comparado com as tomadas de flange e de canto.

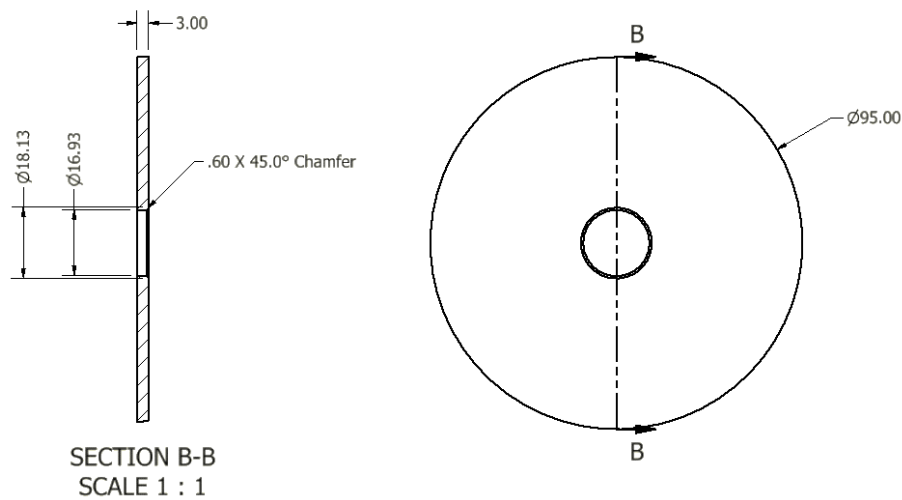
Além de determinar o tipo de tomada, também é necessário especificar o tipo de placa que será utilizado. Além da placa clássica, cujo furo é concêntrico com relação à tubulação, também existem as placas excêntricas e as segmentadas. Ambas são usadas para o caso em que o fluido está carregado de impurezas. Entretanto, a placa de furo excêntrico é preferida para casos com condensados enquanto que a placa segmental é mais utilizada para líquidos com materiais sólidos em suspensão (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

Com relação às placas concêntricas, as mais comumente utilizadas são as de bordo reto. No entanto, para baixos números de Reynolds, no qual a velocidade do fluido é muito baixa ou a sua viscosidade é muito alta, são usadas as placas de entrada cônica e as de $\frac{1}{4}$ de círculo (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

Nesse trabalho é medida apenas a vazão do ar atmosférico na tubulação, sendo uma variação de pressão relativamente baixa (entre 101 e 130 kPa), o que faz com que praticamente não exista acúmulo de condensado na tubulação. No caso dos valores de Reynolds para as diferentes vazões, apenas a vazão mínima do sistema fica abaixo do limite mínimo de Reynolds. Entretanto, essas vazões muito baixas não serão usadas nos experimentos e, portanto, a placa escolhida foi a de bordo reto.

Os valores iniciais obtidos para o diâmetro do orifício foram de 16,93 mm. Portanto, o modelo inicial foi feito considerando essas dimensões. O projeto da placa de orifício pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Dimensões gerais da Placa de Orifício.



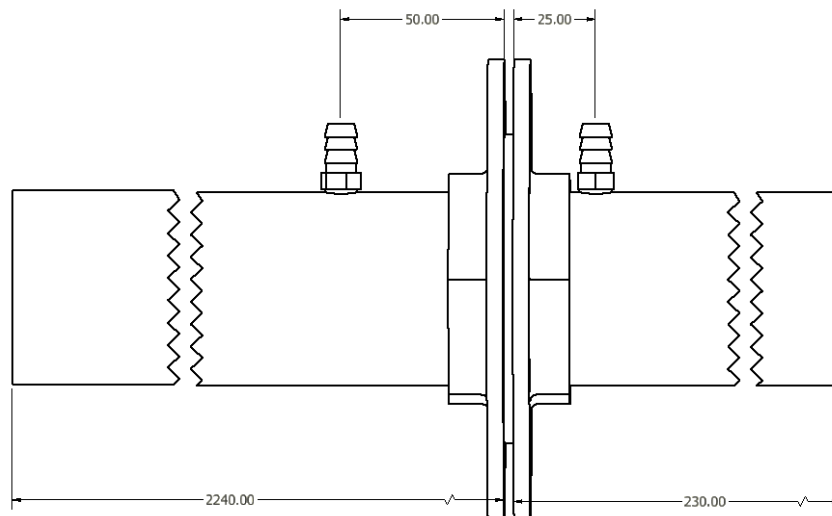
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a norma ABNT NBR-ISO-5167-1 (1994), existem algumas limitações com relação às instalações que devem ser feitas da placa de orifício. Além de existirem valores mínimos para os valores de β e de Reynolds, também é importante ter um trecho reto a montante e a jusante da placa para que turbulências causadas por conexões e válvulas não atrapalhem a medição (AI-BEED, 1998).

Considerando sistemas com válvulas a montante da placa, o distanciamento mínimo é do valor de 2240 mm a montante e 230 mm a jusante para uma tubulação de 2" (GÉRARD J. DELMÉE, 2003).

Para as tomadas, também é necessário ter uma distância exata de 50 mm e 25 mm a montante e a jusante da placa, respectivamente. As limitações descritas podem ser visualizadas na Figura 20.

Figura 20 - Sistema de Medição com as distâncias padronizadas.



Fonte: Autoria Própria.

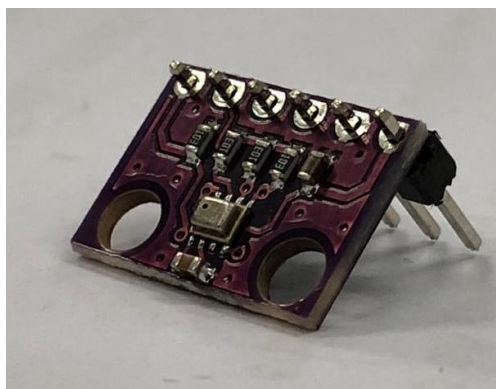
Outra restrição para medir de maneira precisa é a rugosidade R_a (média aritmética dos picos e vales) da tubulação a montante e a jusante da placa. A norma ABNT NBR-ISO-5167-1 (1994) fornece as tabelas para rugosidades máximas e mínimas. No caso, apenas para β maior que 0,65 e/ou Reynolds superiores a 10^7 em que a rugosidade mínima definida é diferente de zero.

Sabendo que o β obtido para a placa é de aproximadamente 0,34, com um Reynolds máximo de 42750, o valor tabelado de máxima rugosidade para as tubulações é de 0,073 mm. Sabendo que as tubulações a montante e jusante da placa são feitas de policloreto de polivinila (PVC) e que as suas rugosidades são tabeladas como menores que 0,03 mm, as especificações delimitadas pela norma foram atingidas ($0 < 0,03 < 0,073$).

3.3.2 Projeto do sistema de aquisição de pressão

Com o objetivo de realizar a aquisição de dados, mais especificamente as pressões localizadas a montante e jusante da placa de orifício e no leito, foram utilizados sensores da Bosch do modelo BMP280. Eles são capazes de medir tanto a pressão absoluta quanto a temperatura de um determinado ambiente. Além disso, por eles serem aplicados em dispositivos eletrônicos móveis para estimar sua altitude com relação ao nível do mar, esses sensores possuem uma boa precisão e confiabilidade, mantendo um baixo custo e tamanho reduzido. Um exemplar do sensor BMP280 é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Sensor BOSCH modelo BMP280



Fonte: Autoria Própria

De acordo com a ficha de dados fornecida pelo fabricante, esses sensores possuem uma faixa de operação entre 30 e 110 kPa, com precisão da pressão absoluta de ± 100 Pa e relativa de ± 12 Pa, além de uma precisão de $\pm 0,01$ °C para a temperatura. Eles possuem interface digital do tipo Circuito Inter Integrado (I²C) com 3,4 MHz e Serial Protocolo de Interface Periférica (SPI) com 10 MHz, ambas 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. Para os experimentos, foi escolhida a interface SPI pela maior taxa de aquisição (10 MHz) e facilidade em conectar diversos sensores simultaneamente. Também foi selecionado o modo de Ultra Resolução nas coletas de dados para poder melhorar a precisão do sistema de aquisição.

Entretanto, modificar os sensores para realizar as medições de pressão se tornou necessário, uma vez que os sensores BMP280 foram fabricados apenas para medir a pressão atmosférica, não havendo nenhum tipo de isolamento entre o sensor e o ambiente. Por isso, foram adaptadas seringas de laboratório para funcionar como pequenos vasos de pressão, criando um recipiente isolado com pressão interna diferente da atmosférica. Como as variações de pressão nos experimentos são pequenas, a resistência oferecida por uma seringa de polímero foi suficiente para a realização dos testes. Os fios que conectam cada sensor ao resto do sistema saem por um furo lateral feito nas seringas, sendo esse furo selado com silicone.

Na Figura 22(a) é mostrada a seringa com o sensor BMP280. Na Figura 22(b) é mostrado o modelo final que foi utilizado para aquisição de pressão nos experimentos. Os sensores foram identificados através de números, sendo que cada sensor foi atribuído ao seu respectivo ponto de medição, possibilitando uma maior precisão após cada sensor ser calibrado especificamente para aquisição de dados naquele ponto do sistema. O Sensor 1 foi

atribuído ao ponto de pressão montante da placa de orifício, o Sensor 2, jusante da placa de orifício e o Sensor 3 para as medições no leito, tanto montante quanto jusante da placa distribuidora. Os sensores foram numerados de acordo com o esquema da bancada experimental mostrado na Figura 10.

Figura 22 - Modelo Final dos sensores com as seringas para a medição de pressão (a) Seringa com o sensor BMP280 (b) Os três sensores com identificação para serem usados no leito



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria

Além dos sensores, também se utilizou uma placa de aquisição para a interface entre os sensores e o computador. Essa placa tem a função de coletar e processar os dados enviados de cada sensor, além de comandar e gerenciar o funcionamento de cada um deles. Entre as diversas placas existentes no mercado, foi escolhida a placa Arduino pelo seu baixo custo e facilidade de programação comparado com outras placas disponíveis. O modelo escolhido foi o Arduino DUE por ser uma placa com maior capacidade de processamento e maior quantidade de entradas e saídas se comparadas com o modelo convencional Arduino UNO. Suas especificações envolvem um microcontrolador de 32 bits, Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, 54 I/O digitais, 12 entradas analógicas e 512 kB de memória.

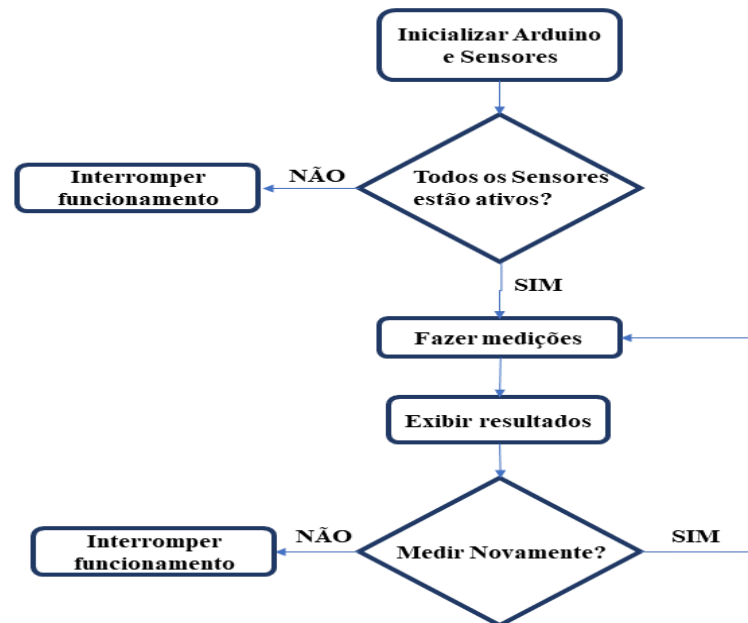
Para o Arduino executar as suas funções, é necessário criar um código fonte e armazená-lo em sua memória. Portanto, foram criados 3 algoritmos diferentes com o intuito de executar as seguintes operações:

- Calibrar o sistema;
- Obter o perfil da queda de pressão pela velocidade do ar no leito;

- Exibir velocidade momentânea do leito.

Embora existam pequenas variações para cada tipo de algoritmo, cada um deles segue a mesma lógica do Fluxograma exibido na Figura 23. Os programas completos para cada caso podem ser vistos no APÊNDICE A.

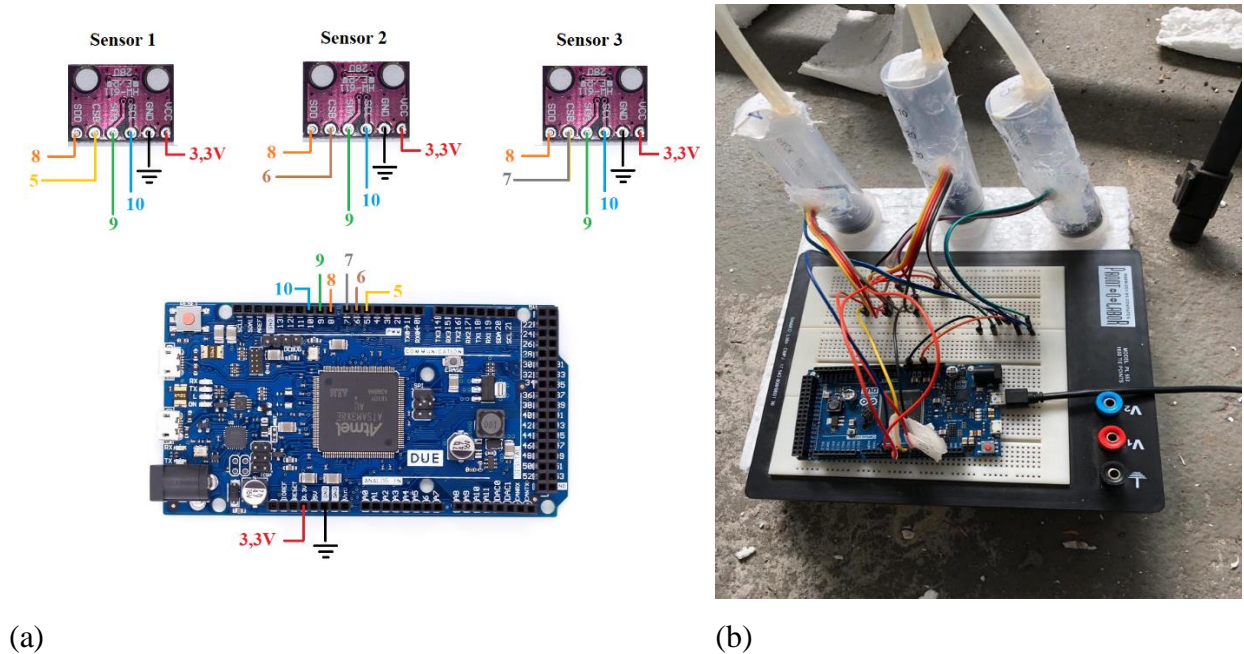
Figura 23 - Fluxograma da base de algoritmo usado no sistema de Aquisição de Pressão



Fonte: Autoria Própria

Após todas essas etapas, o sistema completo foi montado conforme mostrado na Figura 24. O esquema das conexões entre Arduino e os sensores foi montada para a interface digital SPI, com o Arduino DUE conectado ao computador por meio de um cabo micro USB/USB, para o qual são enviados todos os dados obtidos.

Figura 24 - Sistema de Aquisição de Pressão (a) Esquema das conexões (b) Sistema final completo



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria

Antes de realizar os experimentos, foram necessários alguns testes preliminares com o objetivo de encontrar possíveis vazamentos no sistema de aquisição de pressão, assim como certificar de que os valores que estavam sendo coletados eram confiáveis.

Os testes de vazamento foram feitos conectando o sistema de aquisição de pressão ao leito fluidizado com o compressor radial em funcionamento. Por consequência, as seringas com os sensores foram pressurizadas e se houvesse algum vazamento, seria possível identificar por meio da percepção tátil. Quaisquer pontos de vazamento identificados foram estancados com a aplicação de silicone.

3.4 AFERIMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

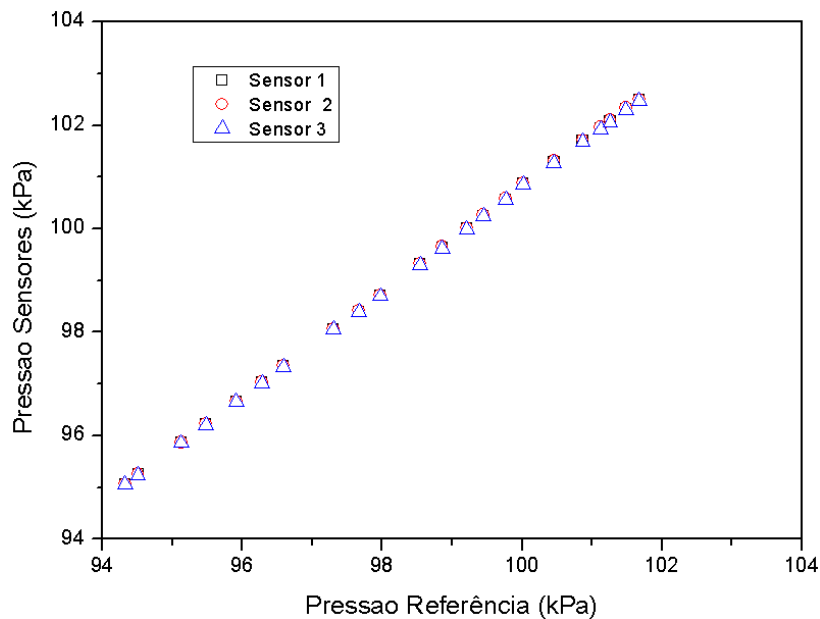
A calibração foi executada pela possibilidade de existirem erros nos processos de medição. No caso da placa de orifício, erros podem existir devido a aproximações nos cálculos, imprecisões nas dimensões da placa ou ruídos não identificados, enquanto nos sensores, pode haver defeitos de fábrica ou imprecisões causadas pelo código fonte.

3.4.1 Aferimento e Ajuste dos sensores de pressão

Os 3 sensores foram conectados à tomada de pressão no leito para poder ajustar diferentes valores de pressão por meio da variação de vazão. Portanto, para conseguir calibrar os sensores, foi conectado na mesma tomada de pressão um manômetro em U de água para ser utilizado como referência. No entanto, os sensores medem valores absolutos de pressão enquanto o manômetro obtém valores relativos à pressão atmosférica. Para contornar esse problema, os valores do manômetro foram somados a pressão absoluta medida com um barômetro local.

Os testes de aferimento do sistema foram realizados e as relações obtidas podem ser visualizadas na Figura 25, sendo que a Pressão de Referência é a soma das pressões medidas pelo manômetro em U e pelo barômetro.

Figura 25 - Relação resultante das velocidades medidas pelo anemômetro de fio quente e a placa de orifício



Fonte: Autoria Própria

Essas curvas foram usadas para obter as equações de correção de pressão para cada sensor, sendo elas posteriormente acrescentadas no código fonte do Arduino para melhorar a precisão dos dados. Entretanto, pode ser percebido nas curvas de calibração que o ajuste necessário é muito pequeno e poderia ter sido desprezado. Além disso, entre os 3 sensores não existe praticamente diferença nenhuma, com as 3 retas posicionadas da mesma maneira.

A equação (5) foi obtida para o Sensor 1.

$$P_{rf} = 738,15 + 0,98468 P_{S1} \quad (5)$$

A equação (6) foi obtida para o Sensor 2.

$$P_{rf} = 789,24 + 0,984 P_{S2} \quad (6)$$

A equação (7) foi obtida para o Sensor 3.

$$P_{rf} = 633,12 + 0,98585 P_{S3} \quad (7)$$

Nas equações dos sensores, P_{rf} é a Pressão Referência (Manômetro + Barômetro) e P_{S1} , P_{S2} e P_{S3} são as pressões de cada sensor, com a unidade definida em kPa.

3.4.2 Aferimento e Ajuste da placa de orifício

No processo de calibração da placa de orifício foram utilizados os sensores calibrados previamente, medindo a diferença de pressão a montante e a jusante da placa, indicadas pelos números 1 e 2 na Figura 10. Essa diferença de pressão foi aplicada na equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para calcular a velocidade do ar na tubulação de 2”.

Com o objetivo de aferir e calibrar a placa de orifício, foi medida a velocidade do ar na saída do leito com um anemômetro de fio quente exibido na Figura 26. Para estabilizar o escoamento e torná-lo o mais uniforme possível, reduzindo turbulências existentes, foi retirada a placa distribuidora do leito, assim como todo o material particulado, transformado o leito em uma tubulação de 156 mm (aproximadamente 6 polegadas).

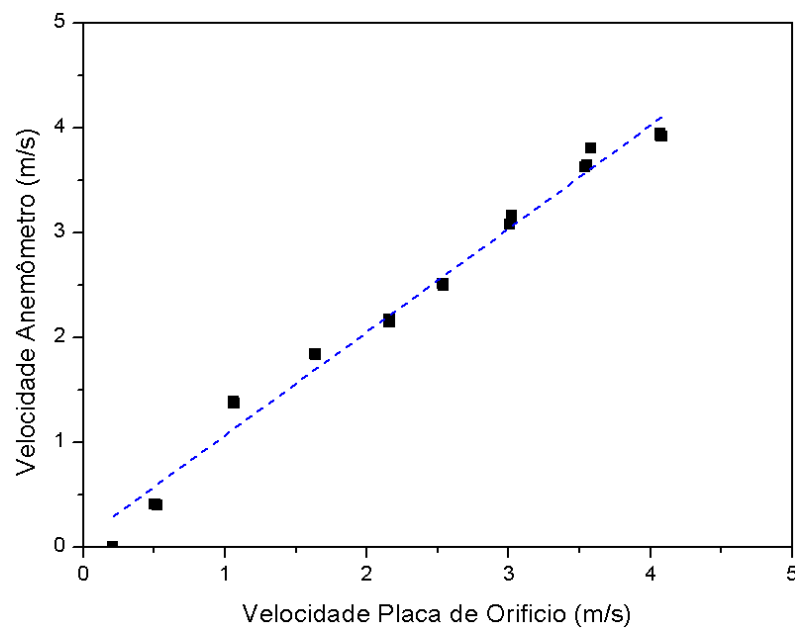
Figura 26 - Anemômetro de fio quente



Fonte: Autoria Própria

Foram realizadas cinco medições diferentes para cada velocidade na saída do leito, obtendo um valor médio mais próximo do real. A relação resultante das velocidades medidas pelo anemômetro e pela placa de orifício podem ser vistas na Figura 27. As velocidades do leito foram convertidas para a velocidade medida na tubulação por meio da equação da continuidade, sabendo que a vazão permanece constante.

Figura 27 - Relação resultante das velocidades medidas pelo anemômetro de fio quente e pela placa de orifício



Fonte: Autoria Própria

A relação linear foi utilizada para obter a equação (8), sendo elas posteriormente acrescentadas no código fonte do Arduino para melhorar a precisão dos dados. Na equação U_{an} é a velocidade do anemômetro e U_{po} é a velocidade calculada na placa de orifício.

$$U_{an} = 0,08248 + 0,9851 U_{po} \quad (8)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

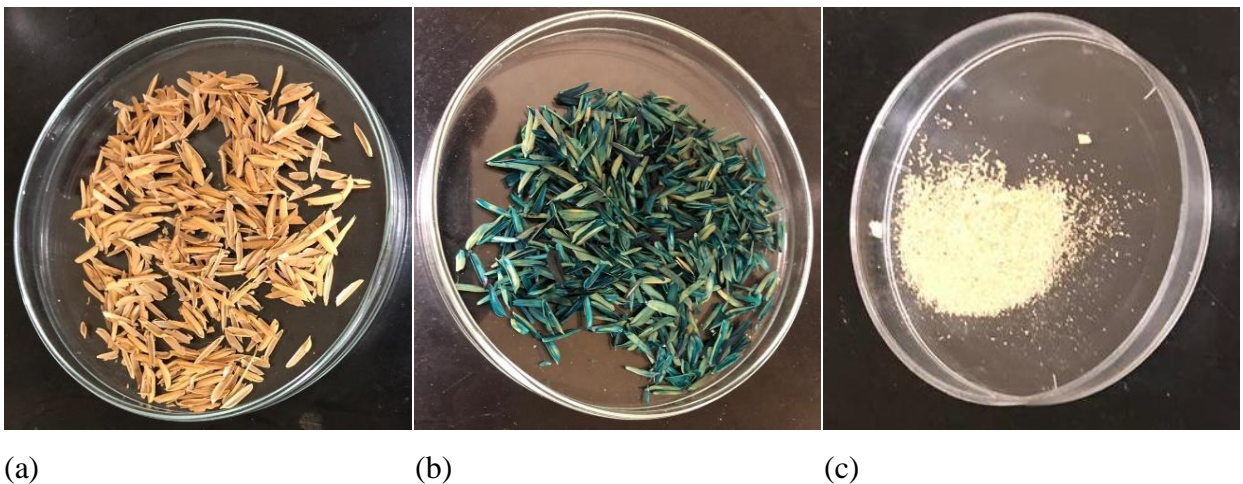
4.1 MATERIAL PARTICULADO

4.1.1 Casca de arroz

A casca de arroz foi fornecida por produtores da cidade de Guaratinguetá, localizada na região do Vale do Rio Paraíba do Sul, no estado de São Paulo, para atender a outros projetos do grupo de pesquisa do LC₃ (VIEIRA, 2018). Ela foi utilizada como a biomassa no reator de leito fluidizado, sendo aplicada nos ensaios sem quase nenhuma modificação (*in natura*). Entretanto, para facilitar na visualização dentro do leito, a casca de arroz foi tingida na cor anil, aumentando o contraste visual com relação à areia. Para os testes que foram feitos no leito de acrílico, foram testadas as proporções de 1% até 10% (40 g até 400g) de casca de arroz com relação à massa de material inerte dentro do leito, variando em 1% (40g) para cada experimento. Pode ser visto na Figura 28 as imagens representando as cascas de arroz usadas nos experimentos.

Nos testes de caracterização em análise térmica, a casca de arroz foi moída e selecionada na granulometria média de 233 μm . Isso foi feito devido ao cadinho que é utilizado na análise térmica, cujas dimensões de 5,8 mm de diâmetro e 2,6 mm de altura (VIEIRA, 2018) dificultam o uso da casca de arroz *in natura*.

Figura 28 - Amostras da casca de arroz (a) *in natura* (b) tingida (c) moída

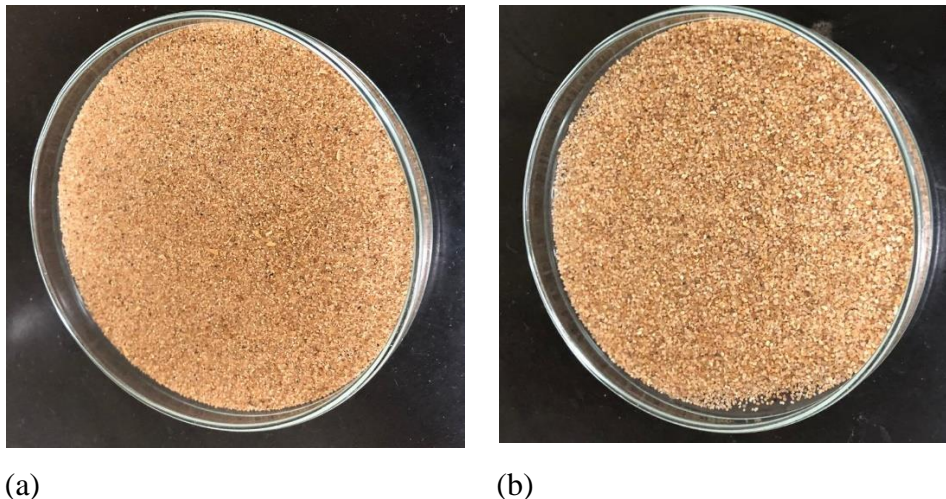


Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Material Inerte

Como material inerte, foi utilizada areia de construção de Ribeirão Preto, SP. A areia foi selecionada em duas faixas granulométricas abertas, por meio de peneiras da série ASTM (mesh). Foram utilizados os particulados obtidos entre duas peneiras, sendo as faixas escolhidas entre 500-150 μm e entre 850-500 μm , ou seja, utilizaram-se as partículas que passaram pela peneira de maior abertura da malha e ficaram retidas na peneira com a menor abertura. Na Figura 29 é possível visualizar as duas faixas granulométricas da areia que foram usadas no leito.

Figura 29 - Areia como material inerte (a) Granulometria 500-150 μm (valor médio de 325 μm) (b) Granulometria 850-500 μm (valor médio de 675 μm).



Fonte: Autoria Própria.

Em todos os testes para avaliar o comportamento térmico do material utilizou-se amostras de areia com granulometria inferior a 150 μm .

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL PARTICULADO

4.2.1 Massa específica

A massa específica do material particulado (ρ_{mp}) é definida de acordo com a equação (9), uma razão entre a massa do particulado (m_{mp}) e o volume real (V_r) do material. Os particulados sempre apresentam espaços vazios entre cada partícula que modificam o volume

total do material. A soma do volume de cada partícula, desconsiderando os espaços não preenchidos é definido como volume real.

No caso, para poder obter o volume real, foi utilizado um cilindro graduado com um volume de água fixo e posteriormente foi acrescentado uma massa fixa de 10g. A variação de volume representa o volume real do particulado.

$$\rho_{mp} = \frac{m_{mp}}{V_r} \quad (9)$$

4.2.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente (ρ_a) é uma propriedade determinada pela equação (10), uma relação direta entre massa e volume aparente (V_a). Essa propriedade é principalmente utilizada para caracterizar materiais particulados, sendo diferente da massa específica.

O volume aparente depende, dentre outros fatores, de como o material é acomodado dentro do recipiente, uma vez que a forma como as partículas se sobrepõem pode aumentar ou diminuir o volume total do mesmo. Portanto, o volume aparente do material tem uma relação direta com esse espaço não preenchido e não é constante.

O volume aparente foi medido utilizando um béquer de laboratório, com diâmetro de aproximadamente 175 mm, um valor próximo ao do diâmetro interno da coluna do leito (156,07 mm). Assim, foi possível minimizar possíveis erros e variações que se poderia ter se fosse utilizado um recipiente com diâmetro muito diferente da coluna de acrílico. Foram feitas três medidas separadas e cada massa foi obtida com uma balança de precisão de 0,01g.

$$\rho_a = \frac{m_{mp}}{V_a} \quad (10)$$

4.2.3 Porosidade

A porosidade é uma relação entre a massa específica aparente e a massa específica, fornecendo uma proporção do volume não preenchido com relação ao volume total. Ela é dada pela equação (11).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp}} \quad (11)$$

4.2.4 Classificação do material particulado

Geldart (1973) classificou as partículas em 4 grupos diferentes, sendo que cada grupo apresentava uma característica diferente de fluidização. Assim, a casca de arroz e a areia foram avaliadas e classificadas de acordo com o mesmo critério, uma vez que essa classificação ajuda a entender melhor o regime do leito e o escoamento das partículas.

4.2.5 Distribuição Granulométrica da Areia

Foi realizada a análise da distribuição granulométrica das duas faixas de areia que foram utilizadas nos experimentos (850-500 μm e 500-150 μm) com o uso de peneiras ASTM.

A escolha das peneiras foi realizada de acordo com o que havia disponível no laboratório, sendo selecionadas 5 peneiras (425, 355, 300, 250, 212, 180 e 150 μm) para a determinação da distribuição entre 500 e 150 μm e 2 peneiras (710 e 600 μm) para a faixa entre 850 e 500 μm . Os diâmetros médios para cada faixa granulométrica foram determinados de acordo com as metodologias propostas por Geldart (1987) e Kunii e Levenspiel (1991), utilizando a equação (12).

$$d_{\text{md}} = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_{\text{gr}}}{d_{\text{gr}}}} \right] \quad (12)$$

Sendo que d_{md} é o diâmetro médio das partículas, X_{gr} é a fração mássica de cada faixa granulométrica e d_{gr} é o diâmetro aritmético entre as peneiras que a fração mássica X_{gr} atravessou e a que ficou retida.

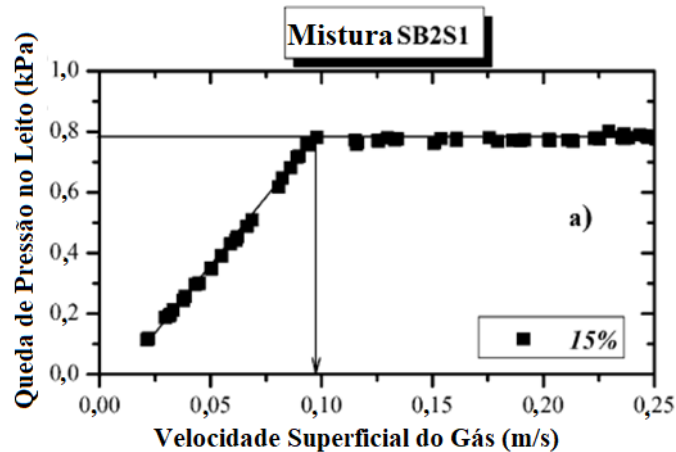
4.3 VARIÁVEIS OBTIDAS NO LEITO FLUIDIZADO

4.3.1 Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do gás de fluidização

Obter o perfil de queda de pressão do leito (Δp_b) em função da velocidade superficial do gás de fluidização (U_o) é um procedimento muito comum em testes a frio por ser utilizado como base para a obtenção da velocidade de mínima fluidização. Ele também ajuda a

compreender melhor o comportamento geral do sistema de fluidização, podendo ser usado como base de comparação na qualidade da fluidização do leito. A Figura 30 exemplifica um perfil obtido para uma mistura de biomassa (sorgo doce) com areia.

Figura 30 - Relação entre variação de pressão e velocidade do ar.



Fonte: Adaptado de Oliveira, Cardoso e Ataíde (2013).

Importante salientar que os perfis de queda de pressão no leito pela velocidade do ar obtidos nesse trabalho são calculados fazendo a diferença entre a pressão atmosférica local, obtida por meio dos sensores, e a pressão medida nas saídas 3A ou 3B (3A para caracterização dos distribuidores e 3B para os outros experimentos), conforme exemplificado na Figura 10. Foi assumido que a pressão na saída do leito é praticamente a mesma que a pressão atmosférica.

4.3.2 Velocidade de mínima fluidização

Como mostrado na Figura 30, o ponto onde se inicia uma estabilização da queda de pressão representa a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}). Ou seja, ela representa a menor velocidade do gás de fluidização no qual há um equilíbrio de forças entre a gravidade e a força de arraste, fazendo com que a queda de pressão gerada pelo material particulado se estabilize.

Essa variável foi obtida não apenas para avaliar a qualidade de fluidização do leito, como também para ser usada como parâmetro de referência em alguns dos ensaios posteriores.

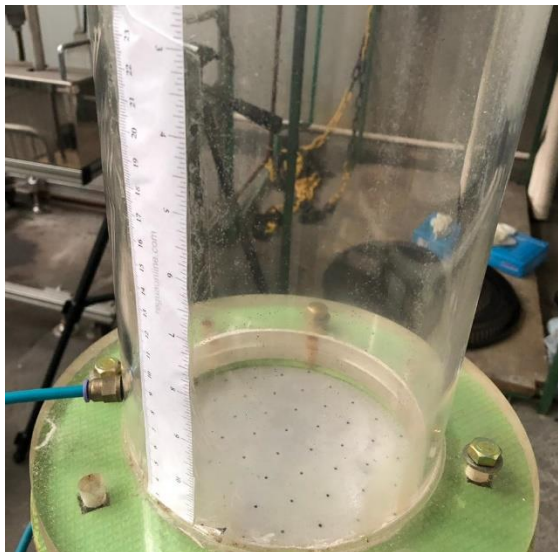
4.3.3 Expansão do Leito

A expansão do leito é a razão entre a altura expandida do leito H_b e a altura do leito inicial H_{in} antes de ocorrer a fluidização, como mostrado na equação (13).

$$\delta = \frac{H_b}{H_{in}} \quad (13)$$

Determinar a expansão do leito é fundamental para dimensionamento do leito de fluidização real. Consequentemente, será usado uma régua acoplada ao cilindro de acrílico, conforme indicado pela Figura 31, para identificar a altura média do leito, pois existe uma incerteza inerente ao processo de expansão, principalmente para vazões mais elevadas.

Figura 31 - Régua para medição da altura do leito.



Fonte: Autoria Própria.

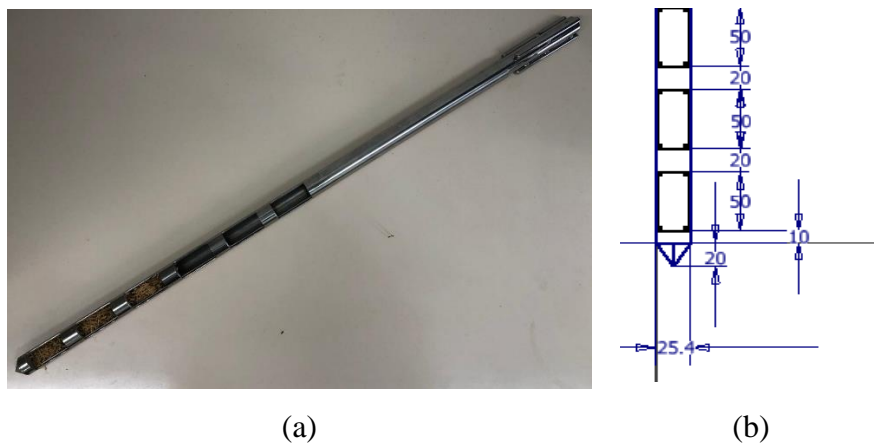
4.3.4 Nível de mistura

O nível de mistura do leito foi inferido de duas maneiras diferentes: visual e extração de amostra. As informações obtidas dos dois meios de avaliação serão comparadas e avaliadas.

A análise visual é a forma mais simples e tem apenas um caráter qualitativo, auxiliando na interpretação dos outros dois meios de avaliação. Também é uma forma relativamente efetiva de encontrar pontos de segregação e caminhos preferenciais pelo qual o ar irá percorrer.

Além do método não-intrusivo, também serão extraídas amostras com o uso do calador, um equipamento mostrado na Figura 32. Ele será inserido pela parte de cima do leito, na região central, longe das paredes de acrílico, onde não é possível ter acesso visual ao nível de mistura. Como o calador é dividido em várias seções, é possível extrair amostras simultaneamente de diferentes alturas do leito. As alturas de amostragem são definidas de acordo com as distâncias das câmaras do calador mostradas na Figura 32.

Figura 32 - Calador aplicado para determinar o índice de mistura (a) Calador com amostras coletadas (b) Distância das câmaras de amostragem do calador.



Fonte: Autoria própria.

Essas amostras serão aplicadas para determinar o índice de mistura (M) do leito de acordo com o equacionamento de Kramer (PARK; CHOI, 2013) indicado na equação (14). O valor do índice de mistura pode variar entre $M = 0$ para completamente segregado, e $M = 1$ para completamente misturado. O índice de mistura também pode ser representado como uma porcentagem, que é a maneira como ele será apresentado nesse trabalho.

$$M = \frac{\sigma_s^2 - \sigma}{\sigma_s^2 - \sigma_m^2} \quad (14)$$

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 (15), com X_i a fração mássica da biomassa em uma determinada altura, \bar{X} a média das alturas e n o número de camadas no leito.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (15)$$

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 (16) e (17).

$$\sigma_s = X_c (1 - X_c) \quad (16)$$

Nas equações (16) e (17), X_c é definido como a fração mássica do componente na mistura, m_p é a massa de uma única partícula e m_{ta} é quantidade total de massa das amostras.

$$\sigma_m = \frac{m_p X_c (1 - X_c)}{m_{ta}} \quad (17)$$

Para determinar a massa de uma única casca de arroz, determinou-se a massa de 150 unidades de casca de arroz e o valor obtido foi dividido pelo número total de cascas, podendo obter o valor unitário m_p que seria utilizado na equação (17).

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No geral, foram testados três fatores e como eles influenciam o nível de mistura do leite e a sua movimentação no regime de fluidização. Os três fatores avaliados são:

- Tipo de placa distribuidora: Perfurada e *Tuyere*;
- Faixas de granulometria do inerte: 500-150 μm e 850-500 μm ;
- Proporção de biomassa: 1% até 10%.

A quantidade de inerte usada em todos os experimentos foi padronizada, tendo seu valor fixado em 4 kg, o mesmo valor utilizado por Lv et al. (2018). Foi feito um teste padrão com placa distribuidora perfurada, inerte do tipo areia com diâmetro de partícula médio de 325 μm e proporção de 5% de casca de arroz. Com base nesse experimento, foi alterado cada um dos

três fatores citados acima, avaliando a resposta nos parâmetros do leito separadamente.

Conforme constatado por Lv et al.(2018), para uma mistura de diferentes materiais particulados, o leito demora entre 2 a 5 minutos para atingir um ponto de equilíbrio, sem que a sua massa específica aparente se modifique de maneira significativa. Portanto, para não ficar tão próximo do limite de 5 minutos constatado por Lv et al.(2018), será aplicado um período de 10 minutos. Após esse tempo, o calador será inserido dentro do leito para extrair simultaneamente amostras de diferentes alturas durante o seu funcionamento.

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas, sendo que a primeira delas é específica para a obtenção da velocidade de mínima fluidização e a segunda é para a análise de mistura do leito. É importante notar que, para realizar a segunda parte do procedimento, é necessário obter, primeiramente, a velocidade de mínima fluidização. Isso ocorre porque para conseguir fazer com que o leito entre em regime de fluidização borbulhante, a U_{mf} é usada como referência de ajuste da velocidade do ar que é injetado.

De acordo com Kunii e Levenspiel (1991), para um sistema com particulados grandes, como é o caso da casca de arroz, a velocidade mínima para o leito entrar em regime borbulhante é praticamente igual à U_{mf} . No caso de particulados pequenos, foi constatado que a velocidade para entrar no regime borbulhante diminuía, se aproximando de U_{mf} , conforme o tamanho da partícula aumentava, sendo que acima de 150 μm , a velocidade estabilizava em um valor de aproximadamente 1,2 U_{mf} . Com base nessas informações, foi escolhido um valor de 1,2 U_{mf} para realizar os testes de análise de mistura do leito.

Antes de realizar cada teste, foi feita uma mistura prévia do material para conseguir manter o sistema em um regime permanente, obter uma maior estabilidade em determinar a velocidade de mínima fluidização e avaliar a tendência de segregação reduzindo o impacto do estado inicial do leito, seguindo os procedimentos realizados por Pécora et al. (2014).

4.4.1 Procedimento experimental – Determinar velocidade de mínima fluidização

1. Fazer a pesagem do material que vai ser inserido no leito e ajustar a quantidade de acordo com o valor estabelecido;
2. Ligar o compressor com as válvulas ainda completamente fechadas;
3. Realizar a mistura prévia do material e inseri-lo no leito;
4. Abrir vagarosamente as válvulas globo e gaveta para aumentar a vazão do gás de fluidização dentro do leito;
5. Para cada aumento de vazão, medir a queda de pressão do leito, assim como a

temperatura do ar na saída da tubulação, a pressão a montante da placa de orifício e a expansão do leito;

6. Continuar até a queda de pressão do leito estabilizar;
7. Após estabilizar, diminuir a vazão do gás, fazendo o caminho inverso e desfluidizando o leito;
8. Para cada redução de vazão, medir a queda de pressão do leito, assim como a temperatura do ar na saída da tubulação e a pressão a montante da placa de orifício;
9. Realizar o processo até atingir o ponto de fechamento das válvulas;
10. Com os dados obtidos, determinar a velocidade de mínima fluidização;
11. Repetir o processo para cada combinação de níveis e fatores.

4.4.2 Procedimento experimental – Análise da mistura do leito

1. Fazer a pesagem do material que vai ser inserido no leito e ajustar a quantidade de acordo com o valor estabelecido;
2. Ligar o compressor com as válvulas ainda completamente fechadas;
3. Realizar a mistura prévia do material e inseri-lo no leito;
4. Ajustar a velocidade do gás para $1,2 U_{mf}$;
5. Manter o leito nesses parâmetros fluidizando durante 10 minutos;
6. Após esse período, realizar a extração da amostra de diferentes níveis do leito com o uso do calador;
7. Realizar a separação do material de cada amostra para calcular o nível de mistura;
8. Retornar o material da amostra para o resto da mistura de casca de arroz com inerte;
9. Com os dados obtidos, determinar o nível de mistura;
10. Repetir o processo para cada combinação de níveis e fatores.

4.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL PARTICULADO

O comportamento da decomposição térmica é avaliado por meio da análise térmica, contemplando a análise termogravimétrica (TGA, *Thermogravimetric Analysis*), análise térmica diferencial (DTA, *Differential Thermal Analysis*) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC, *Differential Scanning Calorimetry*). Foi utilizado um sistema simultâneo de

análise térmica disponível no LC₃ da TA Instruments, modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC.

Os testes foram aplicados para 3 amostras: casca de arroz (236 μm), areia (> 150 μm) e mistura de 10% de casca de arroz e 90% de areia. Foi escolhida essa proporção porque valores abaixo de 10% resultariam em uma quantidade de casca de arroz muito pequena, tornando difícil acertar a proporção no equipamento.

Para todas as amostras foram aplicadas atmosferas de dióxido de carbono (CO_2) e ar sintético (80% N_2 +20% O_2) com vazão volumétrica de 100 ml/min. Os ensaios foram executados em duplicata com massa total de 10 mg e razão de aquecimento de 10°C/min, desde 30 °C até a temperatura de 1100°C. Observa-se que as atmosferas de ar sintético e CO_2 simulam os processos de combustão e gaseificação, respectivamente.

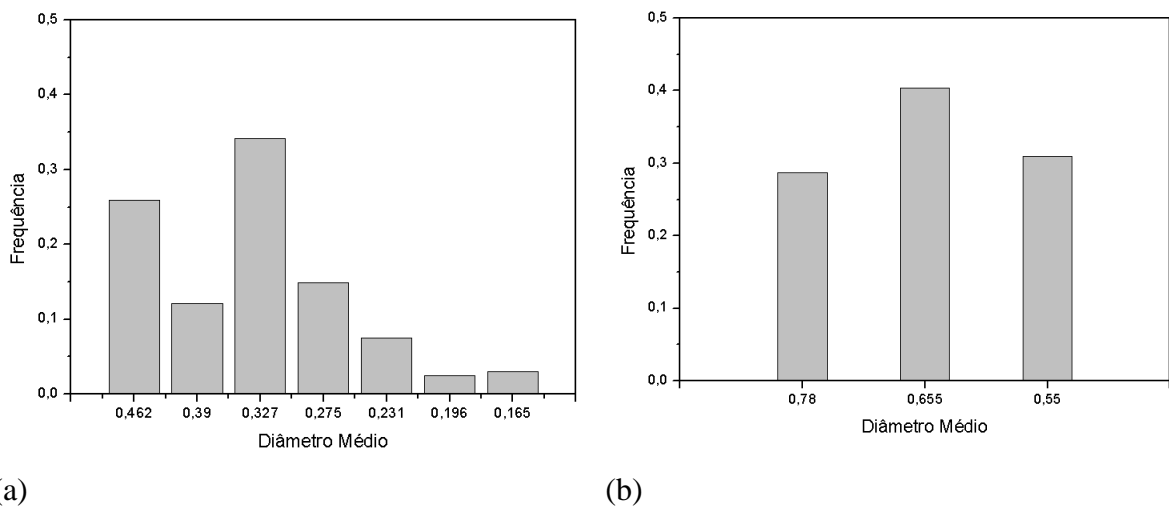
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL PARTICULADO

Nesse trabalho, foram utilizados 2 tipos de material particulado, a casca de arroz e a areia, sendo que essa última foi dividida em duas faixas granulométricas largas: 500-150 μm e 850-500 μm . O diâmetro médio da areia para cada faixa foi obtido usando os métodos de Geldart (1987) e Kunii e Levenspiel (1991) apresentados anteriormente na Seção 4.2.4, obtendo os valores de 324 μm (500-150 μm) e 647 μm (850-500 μm). As distribuições granulométricas para ambas as faixas de areia são mostradas na Figura 33. Observa-se que a areia com granulometria média de 647 μm possui uma distribuição homogênea, enquanto que a areia 324 μm não possui perfil unimodal.

Figura 33 - Distribuição granulométricas das duas faixas de areia utilizadas nos experimentos

(a) Areia 324 μm (500-150 μm) (b) Areia 647 μm (850-500 μm)



Fonte: Autoria própria.

O diâmetro médio da casca de arroz considerado foi aquele definido no trabalho de Abdullah, Husain e Pong (2003). Os diâmetros foram usados como parâmetros para a classificação das partículas de acordo com os métodos estabelecidos por Geldart (1973). Portanto, a caracterização física foi dividida entre os 3 materiais particulados (2 tipos de areia e casca de arroz) e está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas dos materiais particulados.

Parâmetros	Casca de arroz (<i>in natura</i>)	Areia 500-150 μm	Areia 850-500 μm
Diâmetro médio da partícula (μm)	1500	325	675
Massa específica (kg/m^3)	500	2552	2789
Massa específica aparente (kg/m^3)	106	1417	1238
Porosidade	0.788	0.445	0.556
Classificação da Partícula	Grupo D	Grupo B	Grupo B

Fonte: Autoria Própria

Avaliando os valores de massa específica, é possível perceber que a casca de arroz possui valor aproximadamente 5 vezes menor comparada com a areia utilizada nas duas faixas granulométricas. Entretanto, essa diferença aumenta para um valor próximo de 13 vezes quando avaliada a massa específica aparente.

Essa diferença de proporção entre as duas massas específicas é corroborada pela alta porosidade da casca de arroz, com um valor de 78,8%. Isso significa que quase 80% do volume de um recipiente com casca de arroz é preenchido pelo ar e que só os outros 20% é ocupado pela biomassa.

Nota-se também que existe uma certa variação entre todos os valores obtidos para as duas faixas granulométricas de areia, mas a variação não é tão significativa e pode ser justificada pela dificuldade de definir o volume aparente, pois isso depende de uma medição visual não tão precisa e constante. A maneira como as partículas se posicionam no recipiente podem influenciar no resultado.

Tomando como base os dados da Tabela 2 e o perfil gerado por Geldart (1973) apresentado na Figura 8, foi mapeado o comportamento das partículas. Importante salientar que foi usada a massa específica aparente para os cálculos, conforme indicado por Geldart (1973). O uso da massa específica aparente indica que a porosidade do material é um fator que não pode ser ignorado quando o comportamento fluidodinâmico em um leito é avaliado.

Assim, a areia foi classificada como Borbulhante (Tipo B) em ambos os casos considerados. Isso significa que ela é fácil de fluidizar atingindo o regime borbulhante para baixas vazões de ar, conforme previsto e indicado pela Figura 9.

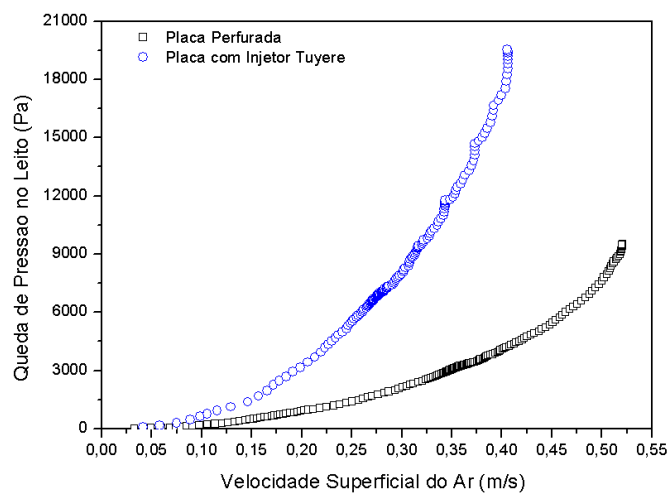
A casca de arroz, por outro lado, por ter um diâmetro de partícula alto, mas uma massa específica aparente muito baixa, sua classificação se torna mais difícil, ficando no extremo da

Figura 8, em uma região não mapeada. Extrapolando os valores, é possível deduzir que a sua classificação é do tipo de Jorro (Tipo D). Avaliando a Figura 9, isso mostra que a casca de arroz apresenta dificuldade de fluidização para baixas velocidades, pulando o regime borbulhante e indo direto para o regime turbulento. Ela também apresenta um comportamento de jorro, similar ao de um “chafariz”, criando jatos de material e caminhos preferenciais.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTRIBUIDORES

Foram realizados os testes para obter as curvas características de queda de pressão (Δp_d) em função da velocidade do gás, conforme indicado na Figura 34. É possível visualizar que a placa com injetores *tuyere* apresenta uma queda de pressão muito mais elevada se comparado com a placa perfurada. Entretanto, essa diferença só começa a surgir a partir de velocidades do gás próximo de 0,1 m/s. Após esse valor, a diferença se torna consideravelmente discrepante, indicando que as placas com injetores tipo *tuyere* aumentam o consumo de energia do soprador e, por consequência, do sistema como um todo. Portanto, para justificar o uso da placa com injetores do tipo *tuyere*, é necessário ocorrer um aumento considerável na eficiência de combustão do reator que compense essa maior queda de pressão.

Figura 34 - Queda de pressão dos dois distribuidores em relação a velocidade do ar



Fonte: Autoria Própria.

Esses resultados estão coerentes com os dados obtidos da literatura, conforme indicado por Geldart e Baeyens (1985), que comentam sobre a existência de distribuidores com alta e baixa queda de pressão, apresentando curvas que possuem um comportamento muito similar ao obtido na Figura 34. Além disso, a placa com os injetores apresenta uma maior área de

contato com o gás, aumentando o atrito se comparado com a placa perfurada, o que justifica a maior queda de pressão obtida.

5.3 INFLUÊNCIA DOS FATORES ESTUDADOS NA FLUIDIZAÇÃO DO LEITO

Com o objetivo de avaliar a influência dos 3 fatores (tipo de placa distribuidora, granulometria da areia e proporção de casca de arroz) no leito, foram consideradas as respostas dos seguintes parâmetros quando os fatores eram modificados:

- Perfil da queda de pressão no leito em função da velocidade do gás;
- Velocidade de mínima fluidização;
- Expansão do leito;
- Nível de mistura.

A seguir, os 3 fatores foram analisados separadamente nas Seções 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3, sendo que na Seção 5.3.4, foi apresentada uma coletânea de todos os principais dados obtidos nos experimentos de fluidização, indicando a melhor configuração encontrada para os casos avaliados.

5.3.1 Influência do Tipo de Distribuidor

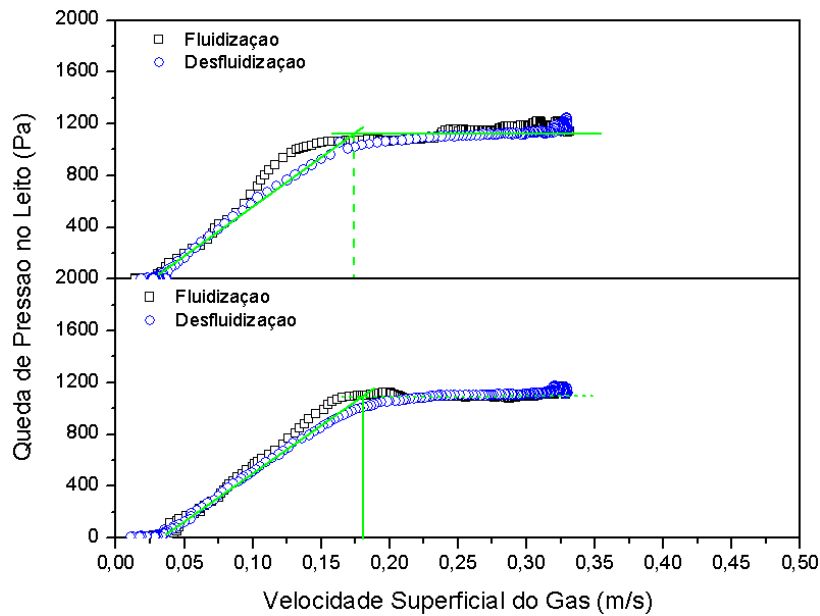
Foram efetuados testes para montar o perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do gás de fluidização do leito. Assim, foi obtido a velocidade de mínima fluidização fazendo uso do método gráfico, conforme feito por outros trabalhos como Pécora et al. (2014) e Lv et al. (2018). No entanto, é importante notar que embora esses trabalhos tenham definido U_{mf} apenas fazendo o processo de fluidização, existem trabalhos como os feitos por Rao e Bheemarasetti (2001) e Qiaoqun et al. (2005) que definem essa velocidade realizando a desfluidização do material particulado.

Para cada figura com os perfis de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás, são mostradas duas curvas de fluidização e de desfluidização, representando os testes em duplicata para cada configuração dos fatores que foram testados.

Nas Figura 35 e Figura 36 é possível ver os perfis do leito obtido para os dois tipos de placa distribuidoras de gás que foram usadas nesse trabalho. Os perfis foram obtidos com a

tomada de pressão localizada à jusante da placa distribuidora, o que significa que a queda de pressão das placas não é considerada. Também é importante notar que a granulometria e proporção de biomassa não foram alteradas, sendo mantidas em uma faixa de 500-150 μm com uma proporção mássica de 5% de casca de arroz.

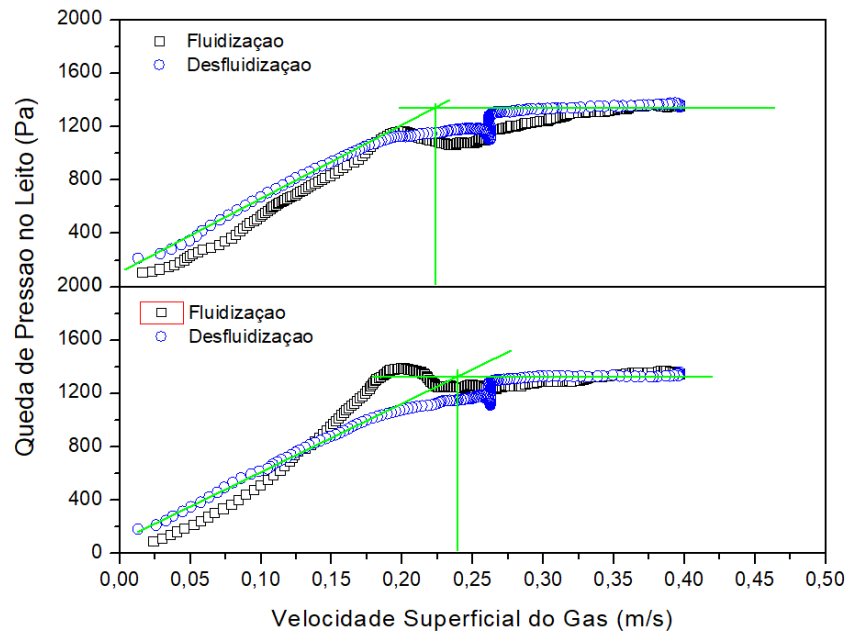
Figura 35 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.



Fonte: Aatoria Própria.

Ambos os perfis mostram um comportamento de histerese, no qual o perfil de pressão com o aumento da velocidade do gás (fluidização) é diferente do perfil obtido com a redução da vazão (desfluidização). Os perfis apresentados são similares, embora seja percebido uma pequena queda de pressão próxima da velocidade de mínima fluidização para as placas com injetores do tipo *tuyere*.

Figura 36 - Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa com injetores *Tuyere*; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.



Fonte: Autoria Própria

É possível que isso ocorra devido à característica binária da mistura. Mesmo que o material seja misturado previamente, antes de ser colocado no leito, pode ainda existir uma certa segregação. Portanto, para vazões mais altas, o gás consegue ter força suficiente para empurrar e movimentar o material existente no leito, equilibrando as forças gravitacionais e de arraste.

Conforme a velocidade do ar vai sendo reduzida, as cascas tendem a ficar estacionárias e se acumular até o ponto em que canais preferenciais são formados. Nesse momento, o ar passa direto por eles e a queda de pressão no leito é reduzida, causando essa súbita variação de pressão.

A velocidade de mínima fluidização é indicada nas curvas da Figura 35 e Figura 36 por meio das linhas verdes. Foi tirado um valor médio das velocidades, sendo que para a placa perfurada, $U_{mf} = 0,176$ m/s e para a placa com injetores $U_{mf} = 0,233$ m/s. Isso indica que a maneira como o ar é injetado no leito pode modificar a velocidade em que ocorre a fluidização do material, ao menos no que concerne a casca de arroz.

No entanto, os trabalhos que tentam prever a velocidade de mínima fluidização (AGU; PFEIFER; MOLDESTAD, 2019; PÉREZ et al., 2018; RASTEH; FARHADI; AHMADI,

2018) normalmente não consideram esse fator (placa distribuidora) nas suas equações. Portanto, esse indício deve ser melhor explorado antes de considerado como um verdadeiro fator que influencia na velocidade de mínima fluidização.

Considerando apenas as velocidades obtidas, é possível afirmar que a placa perfurada é mais vantajosa por fluidizar com uma velocidade menor se comparada com a placa com injetores *tuyere*, requerendo uma menor quantidade de energia e prolongando a vida útil do leito, uma vez que velocidades menores geram um menor desgaste.

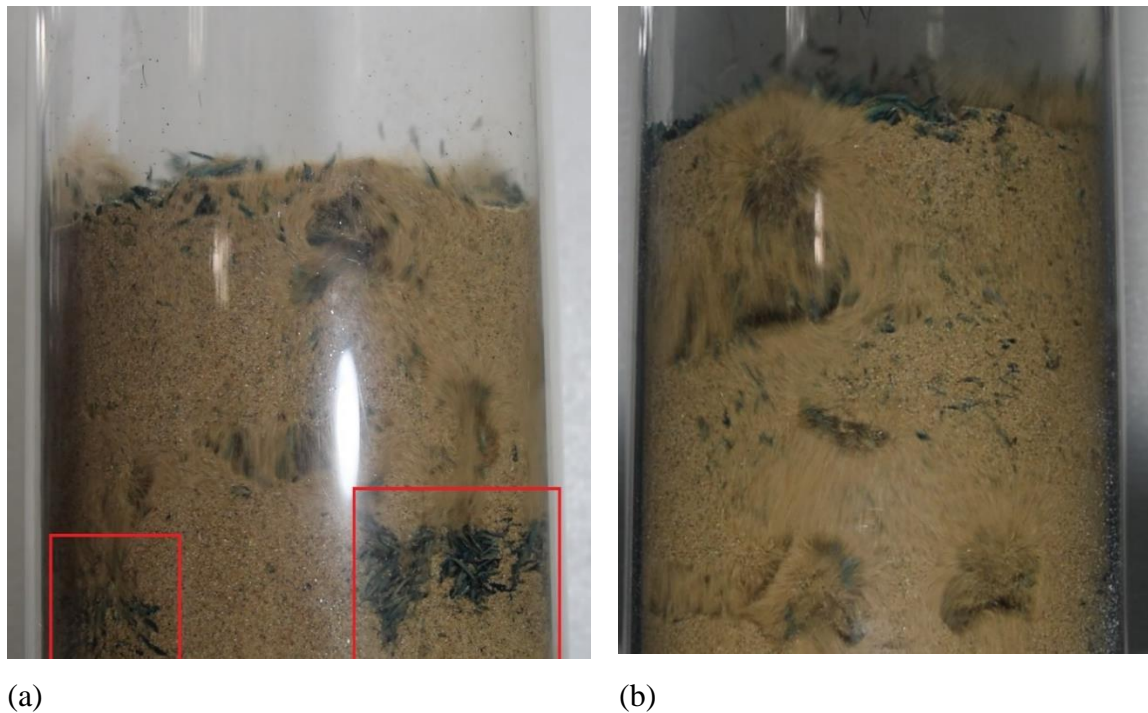
No caso da expansão do leito (δ), os dois tipos de placa tiveram valores médios muito próximos, com um valor de 1,20 para a perfurada e 1,18 para a com injetores. Os valores obtidos indicam que o tipo de placa distribuidora não afeta na expansão do material particulado no leito.

Além desses dados, também foi calculado o nível de mistura para ambas as placas com um tempo de funcionamento de 10 minutos e velocidade do gás de $1,2 U_{mf}$. Para realizar esses cálculos, foram coletadas amostras de diferentes alturas do leito e separados os particulados, sendo realizada a pesagem de cada um deles.

Os valores obtidos para os níveis de mistura são de 93,4% (média entre 92,5% e 95,4%) para a placa perfurada e 97,6% (média entre 96,3% e 98,9%) para a placa com injetores. Ambas as placas possuem um nível de mistura alto com areia de diâmetro médio de $324 \mu\text{m}$ (500-150 μm) e 5% de casca de arroz. Entretanto, a placa com injetores do tipo *tuyere* possui um nível de mistura ligeiramente melhor.

Durante os testes de fluidização para avaliar o nível de mistura, notou-se que para a placa perfurada, ocorriam diversos pontos de estagnação da casca de arroz, formando canais preferenciais conforme visto na Figura 37. Esses canais cresciam com o tempo até ficarem muito grandes e serem quebrados pelo escoamento de ar. Contudo, esse efeito não foi observado na placa com injetores, o que significa que provavelmente a injeção de ar paralela dos *tuyere* contribuiu para um melhor escoamento da casca de arroz, evitando aglomerações da casca.

Figura 37 – Perfil do leito durante experimentos de nível de mistura (a) distribuidor de placa perfurada (b) distribuidor com injetores *tuyere*



Fonte: Autoria Própria

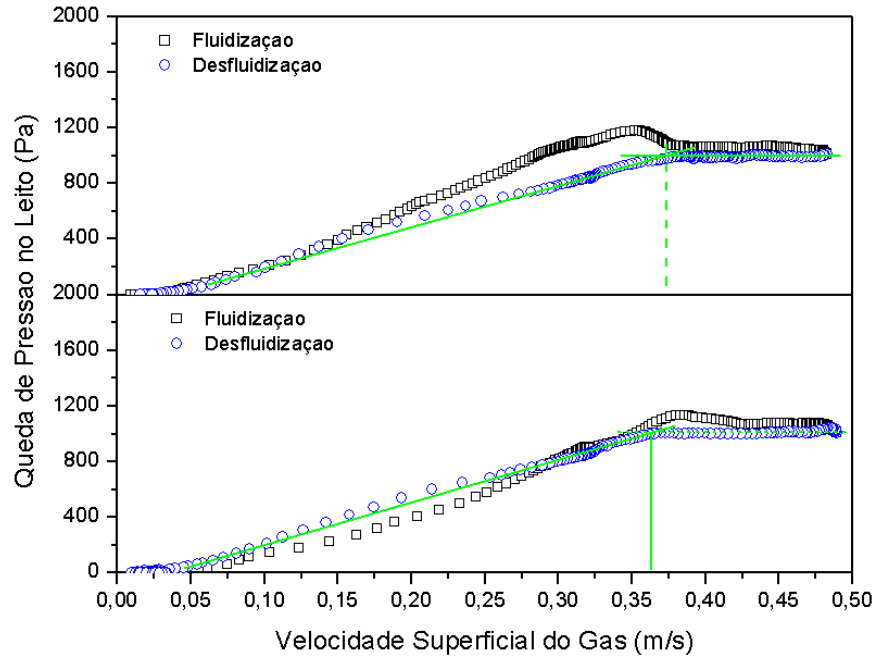
Portanto, embora a placa perfurada possua uma menor velocidade de mínima fluidização, reduzindo a energia requerida e os desgastes do leito, a placa com injetores possui um melhor nível de mistura, além de eliminar os pontos de estagnação, reduzindo incrustação e possíveis paradas que esse efeito possa causar.

5.3.2 Influência da Granulometria da Areia

Foram testadas duas faixas granulométricas, com os diâmetros médios de 324 μm (500-150 μm) e 647 μm (850-500 μm). O perfil de queda de pressão para 324 μm foi mostrado na Figura 35 com $U_{mf} = 0,176$ m/s. O experimento feito com a granulometria de 647 μm , placa perfurada e 5% de casca é mostrado na

Figura 38.

Figura 38 - Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 647 μm ; 5% de Casca de arroz.

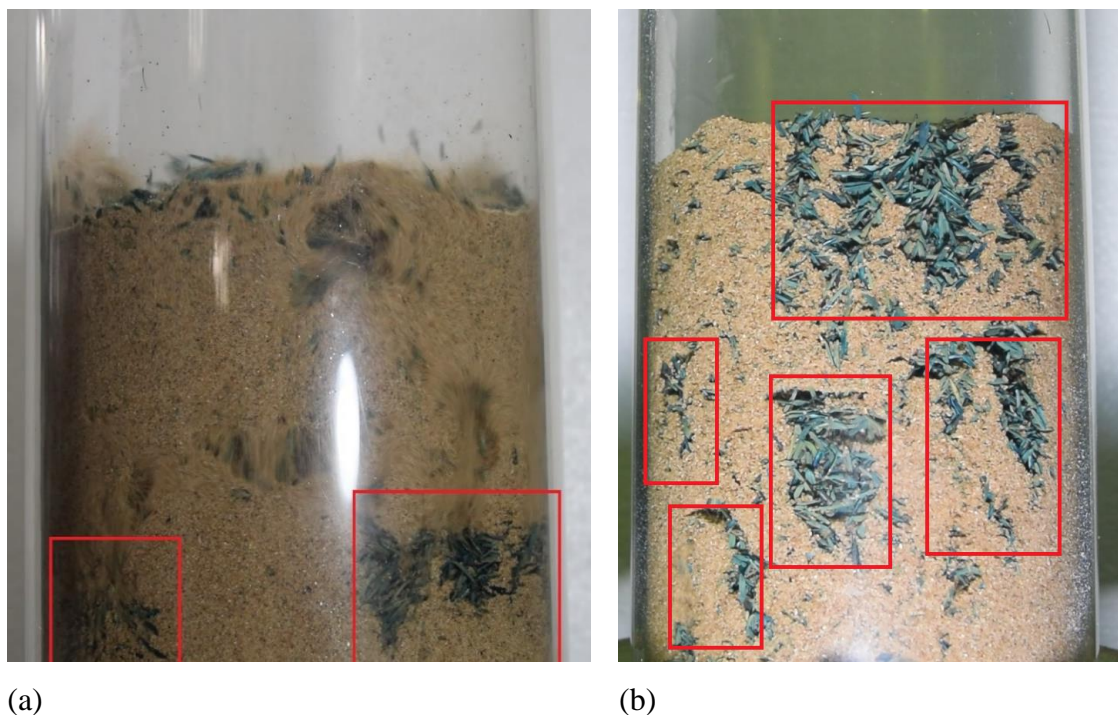


Fonte: Autoria Própria.

É interessante notar que o comportamento da curva de queda de pressão tem um perfil muito similar ao que é observado para a areia com menor diâmetro médio. Entretanto, a média da velocidade de mínima fluidização obtida foi de 0,363 m/s, um pouco mais do que o dobro se comparado com o valor obtido para 324 μm (0,176 m/s). Esse resultado indica uma relação linear entre a velocidade de mínima fluidização e o diâmetro médio da partícula, mesmo com 5% de casca de arroz acrescentada ao leito. Uma relação similar entre U_{mf} e diâmetro médio da partícula foi encontrada por Rao e Bheemarasetti (2001).

Entretanto, quando o experimento para determinar o nível de mistura e expansão do leito foi realizado, mesmo estabelecendo uma velocidade de 1,2 U_{mf} , o leito fluidizou, mas após alguns minutos, gerou diversos canais preferenciais e parou de fluidizar completamente, conforme mostrado na Figura 39(b), com os canais preferenciais formados indicados pelos retângulos vermelhos.

Figura 39 - Perfil do leito durante experimentos de nível de mistura (a) 324 μm (b) 647 μm



Fonte: Autoria Própria.

Quando a velocidade era aumentada para aproximadamente 0,50 m/s, o leito fluidizava passando direto para um regime de *Slugging*, que está fora do escopo desse trabalho, com um foco no regime borbulhante. Devido a esse fato, embora não tenha sido possível coletar o nível de mistura e a expansão do leito, é possível avaliar o efeito da granulometria.

Esses resultados mostram que o aumento da granulometria, ao menos para a casca de arroz, prejudica a fluidização e facilita a formação de canais preferenciais enquanto que, granulometrias menores conseguem reduzir esse efeito consideravelmente, gerando uma melhor fluidização.

Portanto, os resultados indicam que o aumento da granulometria na fluidização da casca de arroz não apenas exige uma maior energia do compressor devida à maior velocidade de mínima fluidização como também prejudica a fluidização por meio de formação de canais preferenciais a ponto de causar a parada do sistema.

5.3.3 Influência da Proporção de Casca de arroz

Antes de realizar os experimentos que avaliam o nível de mistura entre areia e casca de arroz, foram realizados um total de 20 experimentos, incluindo as duplicatas, para poder determinar as proporções mássicas que seriam utilizadas posteriormente. Todos os

experimentos foram feitos com areia de diâmetro médio de 324 μm (500-150 μm) e placa distribuidora do tipo perfurada.

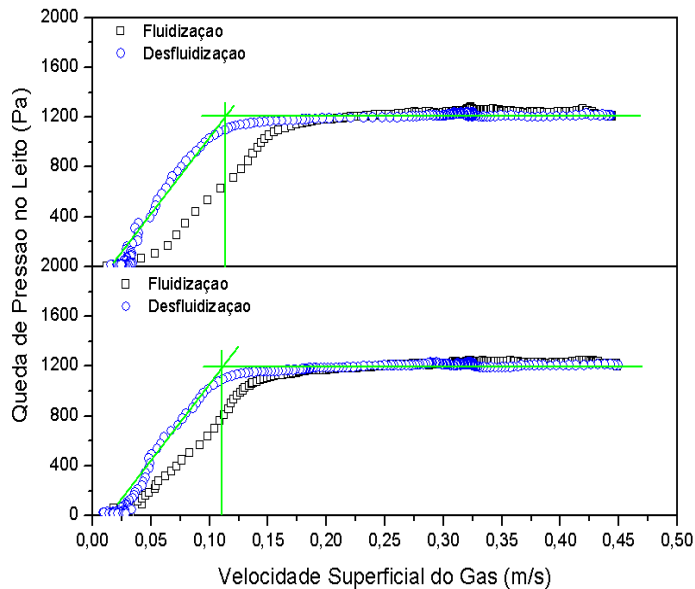
Os perfis de queda de pressão por velocidade do ar foram construídos para poder determinar a velocidade de mínima fluidização, variando as proporções mássicas de casca de arroz em 1% (40g), partindo de 1% até 10% (40g até 400g) de casca de arroz.

Como muitos dos perfis obtidos possuem comportamentos similares, apenas alguns deles são apresentados aqui para poder exemplificar o comportamento do leito conforme a proporção de casca de arroz é aumentada. Entretanto, todos os perfis obtidos a partir da variação de casca de arroz podem ser visualizados no APÊNDICE C.

Na Figura 40 (a) é mostrado o perfil da mistura com 1% de casca de arroz. É possível afirmar que a fluidização ocorre de maneira estável, sendo simples de determinar a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), com valores praticamente iguais. Os perfis tanto para a fluidização quanto para a desfluidização tiveram comportamentos similares entre as duplicatas.

Na Figura 40 (b), é possível ver que a casca de arroz (em verde) está bem distribuída, sem aparentemente acumular em nenhuma região do leito. Esse comportamento permanece durante todo o perfil de fluidização, mesmo com velocidades maiores que em regime de golfadas ou *slugging*.

Figura 40 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 1% de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

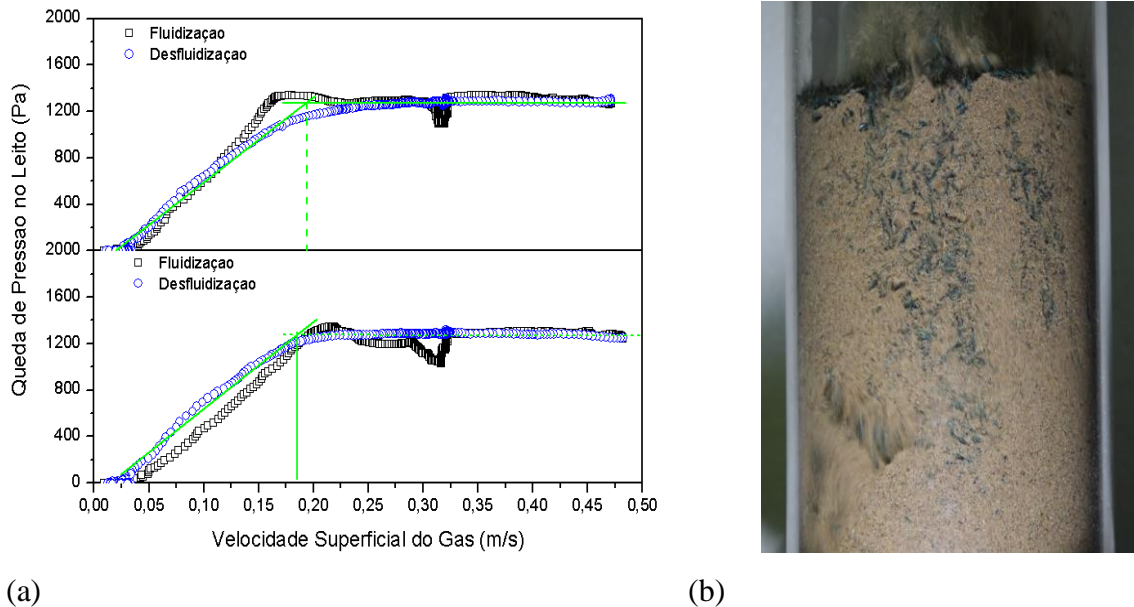
A partir de 1% de casca de arroz até 5%, conforme mostrado na Figura 41 (a), os perfis da queda de pressão pela velocidade da ar permanecem muito parecidos, embora a velocidade de mínima fluidização cresça com o aumento da proporção mássica da casca.

Com 5% de casca, é possível perceber uma pequena variação na pressão do leito próximo de 0,3 m/s. Essa queda durante os perfis de fluidização se torna mais presente e forte a partir de 6% de casca de arroz. Além disso, as curvas se tornam mais irregulares, dificultando identificar com precisão a velocidade de mínima fluidização. A curva obtida para 5% da Figura 41 (a) resultou praticamente no mesmo valor que a velocidade de mínima fluidização obtida na Figura 35. Entretanto, na Figura 41 (a), esta súbita variação de pressão pode ser observada enquanto que na Figura 35 ela é inexistente. Isso indica que o efeito foi causado pela casca de arroz e é influenciado pelo seu posicionamento no leito. Isso pode ser mais bem observado nas curvas com porcentagem acima de 5%.

Com 5% também foi possível observar pequenas regiões de estagnação da casca de arroz, formando canais preferenciais no qual o ar passa diretamente, conforme observado na Figura 41(b). Esses canais eram desfeitos com o aumento da velocidade do ar e não se formavam em velocidades mais altas com a formação de pistões ou golfos de ar que causavam

uma grande movimentação no leito.

Figura 41 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5 % de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização

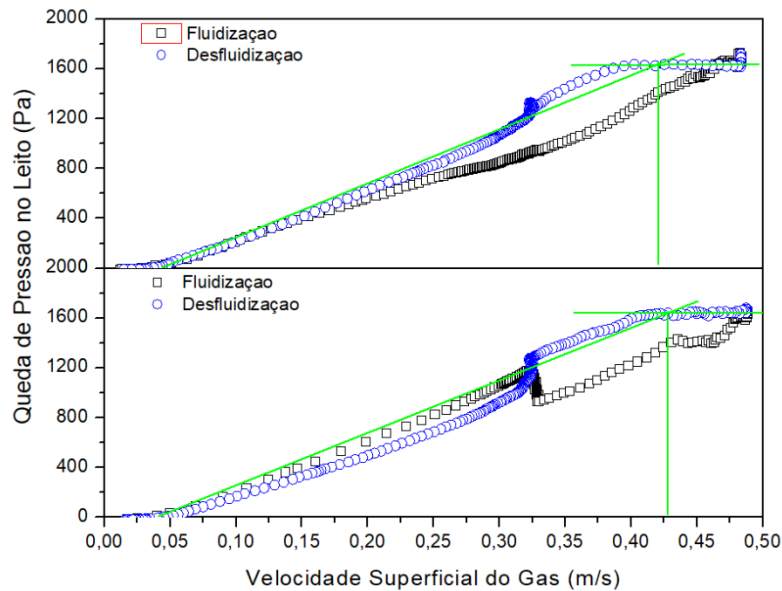


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 42(a) é possível notar que, com 10%, o perfil de fluidização é ainda menos regular, com um ponto de variação súbita de pressão próximo da velocidade de 0,32 m/s, similar ao que é observado com 5% ou acima. É possível que essa variação súbita de pressão seja o ponto em que os canais preferenciais que são formados no leito, Figura 41(b) e Figura 42(b), se reestruturam. Com a fluidização, se formam diversos canais preferenciais até atingir uma velocidade em que eles são destruídos. Com essa modificação, há um aumento súbito na queda de pressão causada pelo leito. O efeito inverso ocorre com a curva de desfluidização.

Com essa proporção de 10%, a qualidade da fluidização caiu muito, com grande estagnação ocorrendo em grande parte do leito. A região em que havia uma maior movimentação do material particulado era na parte superior do leito, próxima à região de *Freeboard* conforme visualizado na Figura 42 (b).

Figura 42 – Experimento em Duplicata para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 10% de Casca de arroz (a) Perfil da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização (b) Perfil do leito durante a fluidização



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

Com base em todas as curvas de fluidização obtidas, foi possível montar uma relação entre a proporção de casca de arroz e a velocidade de mínima fluidização que é exibido na Figura 43. É possível avaliar que a velocidade de mínima fluidização aumenta com um comportamento aparentemente exponencial. A equação (18) foi obtida para essa curva, sendo que U_{mf} é a velocidade de mínima fluidização em m/s e X_c é a proporção de casca de arroz em %.

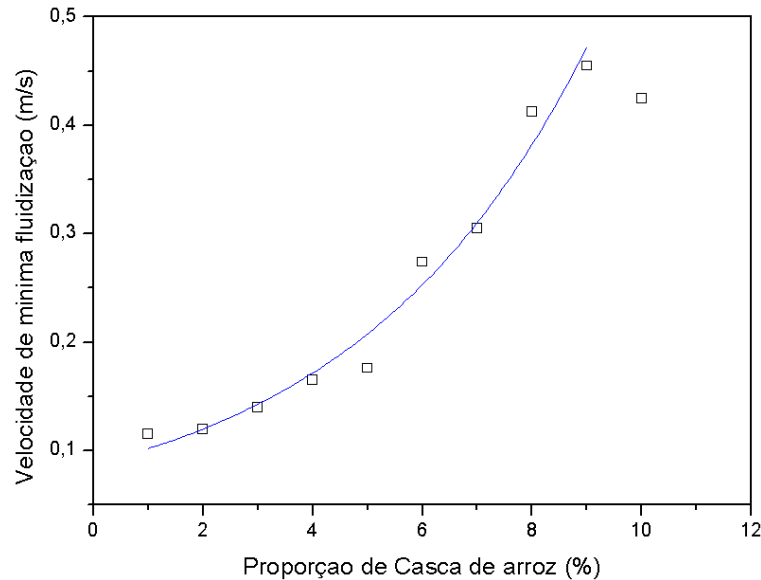
$$U_{mf} = 0,05609 e^{\frac{X_c}{4,36233}} + 0,03127 \quad (18)$$

Interessante notar que Qiaoqun et al. (2005) encontrou uma relação crescente entre a proporção de casca de arroz e a velocidade de mínima fluidização, similar ao que foi obtido nesse trabalho. Entretanto, a relação obtida por Qiaoqun et al. (2005) apresenta um comportamento aparentemente linear, enquanto que a relação obtida nesse trabalho se aproxima mais de um comportamento exponencial.

Nesse caso, essa diferença pode ser devido ao pequeno número de proporções de casca de arroz testadas por Qiaoqun et al. (2005). Eles avaliaram apenas 3 valores diferentes para os

duas granulometrias de areia que foram utilizadas. Isso pode ter escondido o comportamento exponencial da mudança da proporção de casca de arroz.

Figura 43 – Relação entre velocidade de mínima fluidização e proporção de casca de arroz



Fonte: Autoria própria.

Considerando todos os testes de mínima fluidização, optou-se por medir o nível de mistura e expansão do leito para as proporções de 1% e 5%. Esses valores foram escolhidos porque, abaixo de 1%, seria uma quantidade de casca muito pequena para conseguir avaliar por meio de amostragem e, acima de 5%, a qualidade da fluidização cai consideravelmente com diversos pontos de estagnação e dificuldade de definir uma velocidade de mínima fluidização mais precisa.

O nível de mistura calculado para 1% de casca foi de 98,9 % (média entre 98,7% e 99,1%) com uma expansão de leito de 1,055. Com 5%, o nível de mistura foi reduzido para 93,4% e a expansão aumento para 1,205. Isso indica que uma menor proporção de casca de arroz geraria uma mistura mais homogênea no leito e diminuiria a sua expansão. Esse resultado é corroborado pelos perfis obtidos nas imagens da Figura 40 (b) e da Figura 41(b). A formação de canais preferenciais indica uma possível segregação no leito.

Portanto, com base em todos os dados obtidos, é possível avaliar que o aumento de casca de arroz em um leito fluidizado causa um aumento na velocidade de mínima fluidização e de expansão do leito. Isso resulta em um sistema mais caro, com maior requerimento de energia para o compressor radial além de necessitar de um sistema de fluidização mais alto que possa suportar essa expansão. Além disso, há maior segregação e maior número de canais

preferenciais com uma maior quantidade de casca, o que resultaria em um perfil térmico menos homogêneo e menor eficiência.

Valores acima de 5% casca de arroz *in natura* em um leito não seriam recomendados nas condições consideradas devido à baixa qualidade de fluidização. Muito provavelmente o valor ótimo se localiza entre 1% e 5%. No entanto, seria necessária uma análise econômica considerando o preço da energia térmica que o leito produziria, assim como a sua eficiência, e a energia extra requerida para fluidizar uma maior proporção de casca de arroz.

5.3.4 Coletânea dos dados obtidos na fluidização do leito

A seguir, os principais dados obtidos nos experimentos de fluidização do leito, inclusive os dados apresentados no APÊNDICE C, foram reunidos e são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados obtidos no experimentos de fluidização

Tipo de Distribuidor	Granulometria do Inerte (μm)	Proporção de Biomassa (%)	Velocidade de Mínima Fluidização (m/s)	Expansão do Leito	Nível de Mistura
<i>Tuyere</i>	324	5	0,233	1,18	97,6
Perfurada	647	5	0,363	-	-
Perfurada	324	1	0,115	1,06	98,6
Perfurada	324	2	0,120	-	-
Perfurada	324	3	0,140	-	-
Perfurada	324	4	0,165	-	-
Perfurada	324	5	0,176	1,21	93,4
Perfurada	324	6	0,274	-	-
Perfurada	324	7	0,305	-	-
Perfurada	324	8	0,413	-	-
Perfurada	324	9	0,455	-	-
Perfurada	324	10	0,425	-	-

Fonte: Autoria Própria.

Com base nos dados exibidos na Tabela 3, é possível perceber que a configuração dos fatores que possui melhor nível de mistura é a placa perfurada com areia de 324 μm e 1% de casca de arroz, com um valor de 98,6%, indicando uma maior homogeneidade no leito, o que reduziria possíveis problemas de incrustação e paradas do sistema de fluidização, além de aumentar a eficiência térmica do leito.

Entretanto, a configuração com a placa de injetores *tuyere* possui um nível de mistura muito próximo dessa configuração anterior, com o valor de 97,6%, mas para uma proporção de casca de arroz 5 vezes maior (5%), indicando que a placa com injetores é melhor para ser utilizada do que a placa perfurada.

Portanto, de acordo com os dados obtidos, a placa com injetores *tuyere* não apenas teria os mesmos benefícios da melhor configuração da placa perfurada (1% de casca e 324 μm), como possibilitaria a aplicação de uma maior quantidade de casca de arroz no leito. Isso permitiria disponibilizar uma maior potência térmica para o caso de uma combustão ou uma maior vazão de gás de síntese em uma gaseificação.

Além disso, é possível perceber que uma maior granulometria, assim como o aumento da proporção de casca de arroz, comprometem a fluidização, causando canais preferenciais, aumento da queda de pressão e paradas de fluidização do leito.

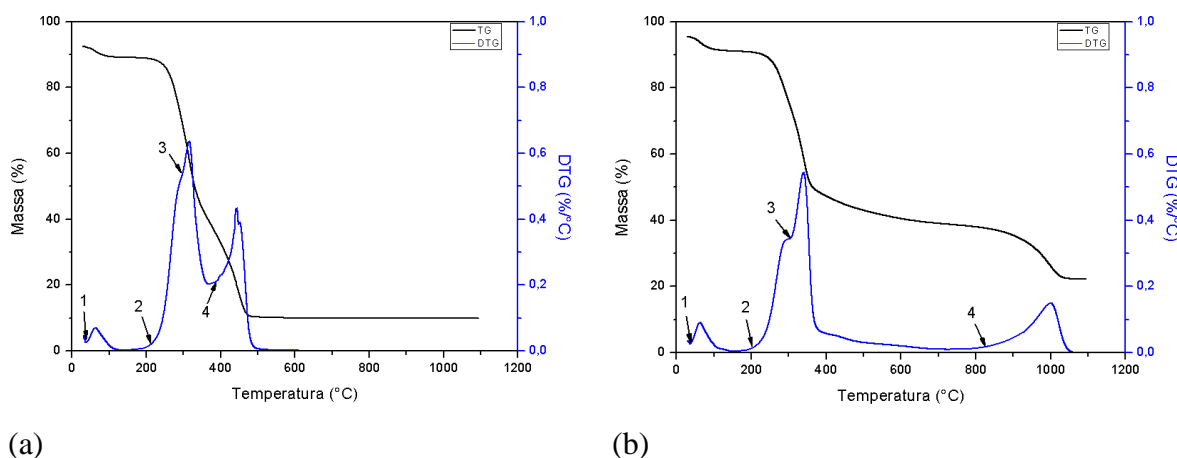
5.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL PARTICULADO

5.4.1 Comportamento da decomposição térmica

Os ensaios para a avaliação do comportamento térmico foram executados com o objetivo de estabelecer uma possível relação entre os comportamentos térmicos e fluidodinâmicos exibidos no leito, similar ao que foi realizado por Pécora et al. (2014).

As duplicatas de todas as curvas térmicas estão exibidas no APÊNDICE B. Elas foram separadas e colocadas em um apêndice por possuírem um comportamento similar as curvas mostradas a seguir. Na Figura 44 apresentam-se as curvas TG/DTG obtidas para os ensaios da casca de arroz em atmosferas de ar sintético e dióxido de carbono.

Figura 44 - Curvas TG/DTG em função da temperatura para amostras da casca de arroz, em atmosferas de (a) ar sintético (combustão) e (b) dióxido de carbono (gaseificação).



Fonte: Autoria Própria.

Em ambas as curvas TG/DTG apresentadas na Figura 44, observam-se perfis com 4 eventos de perda de massa para os ensaios em atmosferas de ar e CO_2 , respectivamente, sendo mais evidentes nos picos das curvas DTG. Estes eventos de decomposição térmica estão relacionados com a perda de umidade e decomposição térmica da hemicelulose, celulose e lignina, componentes principais na sua estrutura celular, assim como de outras biomassas.

Nota-se na Figura 44 que a primeira perda de massa ocorre, aproximadamente, entre 40-160°C e refere-se ao conteúdo de umidade da biomassa, que varia um pouco em função da heterogeneidade da amostra e da atmosfera reagente. Após a perda de umidade, dos componentes da biomassa, a hemicelulose é a primeira a se degradar sendo seguida pela celulose. Esses eventos se sobrepõem, podendo ser visualizado um “ombro” na curva DTG (mais visível na atmosfera de CO_2) e uma mudança na curvatura da curva TG. É nesse ponto em que a degradação da hemicelulose deixa de ser o evento principal e a reação dominante passa a ser a degradação da celulose. Esse trecho é considerado como o ponto em que ocorre a formação do biocarvão (CHEN et al., 2015).

Observa-se que a decomposição da hemicelulose inicia em temperaturas acima de 170°C. A decomposição da lignina também é sobreposta à decomposição da celulose, uma vez que a curva DTG não retorna à linha de base, sendo que a temperatura para o início da decomposição da lignina em atmosfera de CO_2 é muito maior que em atmosfera de ar sintético.

As temperaturas de início, de pico da DTG e temperatura final para cada evento são

resumidas na Tabela 4. Para os eventos que se sobrepõe, não é possível determinar a temperatura final. Observa-se, também, que o percentual de perda de massa considerado se refere ao início do evento subsequente, não representando o valor correto de cada um dos componentes, sendo apenas uma estimativa. Vale também ressaltar que a quantidade de resíduos maior em atmosfera de CO₂ é devido à dificuldade de queima do carbono fixo da biomassa, normalmente associada à lignina (GALINA et al., 2019; MORTARI et al., 2010). As duplicatas das curvas térmicas para a casca de arroz para ambas atmosferas, mostradas no APÊNDICE B, tiveram comportamentos semelhantes, indicando que os resultados estão coerentes.

Tabela 4 - Dados da decomposição térmica da casca de arroz obtida nos ensaios TG em atmosferas de ar sintético e CO₂.

Atmosfera	Componente	Temperatura (°C)			Perda de Massa (%)
		Inicial	Pico	Final	
Ar sintético	Umidade	40	61	120	4
	Hemicelulose	177	290	nd	23
	Celulose	290	316	nd	32
	Lignina	370	444	497	31
	Resíduos	497	nd	nd	10
CO ₂	Umidade	42	66	160	6
	Hemicelulose	186	293	nd	44
	Celulose	311	341	nd	16
	Lignina	386	1100	1085	11
	Resíduos	1085	nd	nd	23

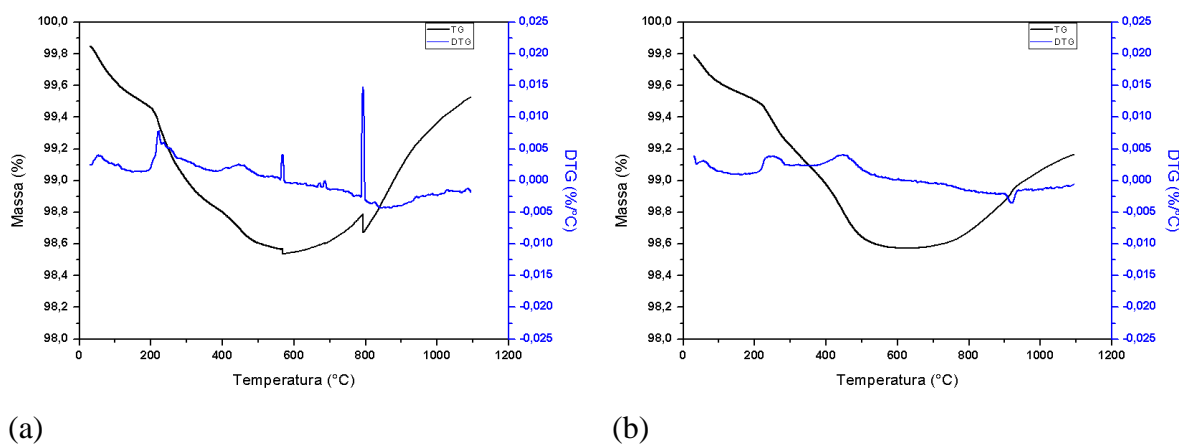
Nota: nd – não determinando.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 45 são apresentadas as curvas TG/DTG para amostras de areia em atmosferas de ar sintético e dióxido de carbono. É possível perceber que a areia pode ser considerada como inerte em um reator de leito fluidizado, uma vez que na faixa de temperatura em que ela foi testada, ela apresenta uma pequena perda de massa (< 2%). Observa-se que esta perda foi maior em atmosfera de CO₂, indicando que se trata de impurezas na amostra, uma vez que a atmosfera oxidante facilitaria a decomposição. Observa-se também que há um pico evidente

em torno de 800 °C em ar sintético, indicando uma possível decrepitação (CRNKOVIC et al., 2004; GALINA et al., 2019).

Figura 45 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da areia com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação).



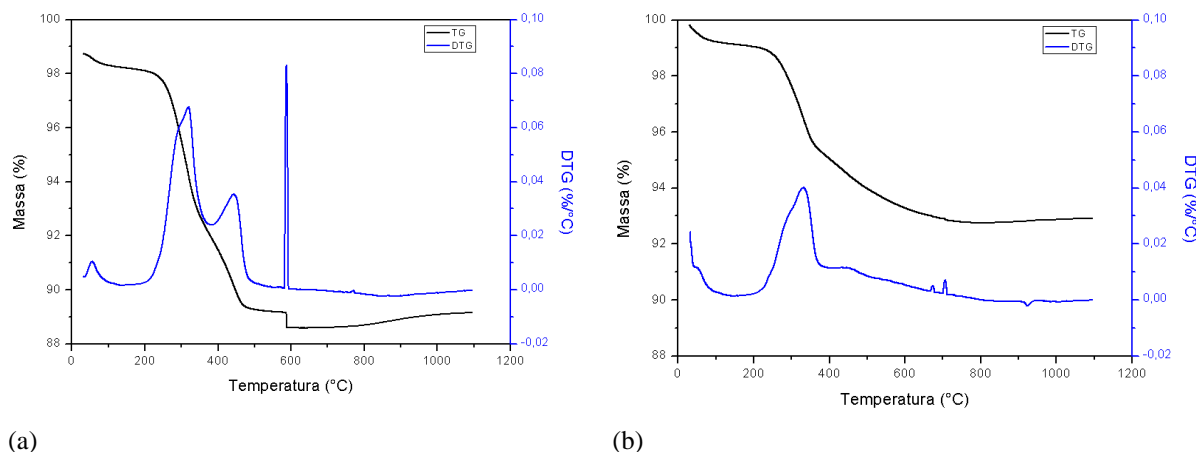
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 46 apresentam-se as curvas TG/DTG das amostras com mistura de areia (90%) e casca de arroz (10%) com ar sintético e dióxido de carbono.

Nota-se na Figura 46(a) que o efeito de decrepitação é observado devido à presença da areia na mistura em atmosfera de ar sintético. De forma geral, verifica-se que não ocorrem mudanças no perfil da curva TG, sendo observado somente o efeito da decrepitação na decomposição da biomassa. Interessante notar que na duplicata desse experimento, exibida na Figura 52 do APÊNDICE B, a decrepitação não ocorre. O percentual total de perda de massa foi similar ao ensaio com biomassa pura, pois a quantidade de massa de casca de arroz foi de 10% do total.

No caso da aplicação da atmosfera de CO₂, verifica-se mudança no perfil da TG, não sendo observado a decomposição da lignina na Figura 46(b). Possivelmente, a presença da areia em quantidade muito superior à biomassa, fez com que ocorresse um deslocamento da decomposição deste componente. Esse efeito na mudança do perfil térmico pode ser observado também na duplicata na Figura 55 do APÊNDICE B.

Figura 46 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da mistura (90% areia e 10% casca de arroz) com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação).

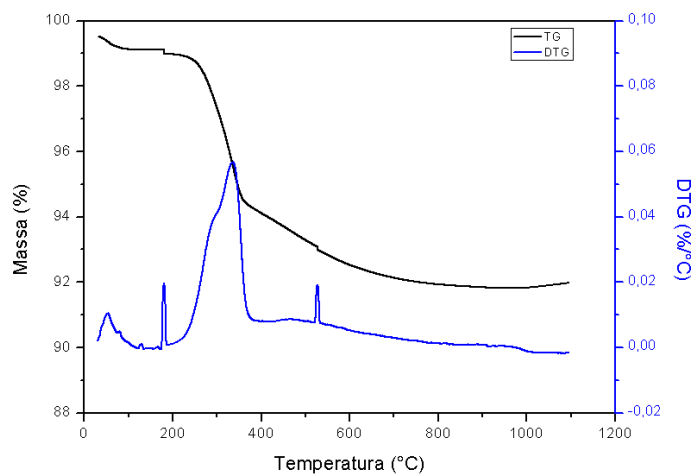


Fonte: Autoria Própria.

Entretanto, essa diferença de comportamento entre as atmosferas poderia ser devido à alguma impureza proveniente da casca de arroz ou da areia. Para se certificar que não se trata de impurezas, alguns testes extras para essa mistura em CO_2 foram realizados com a intenção de explorar melhor esse efeito. Primeiramente, o experimento com atmosfera de CO_2 para a mistura de casca de arroz e areia foi repetido com uma areia fornecida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológico (IPT). Essa areia é usada como material de referência e padronizada de acordo com a norma ABNT NBR 7215:1996, reduzindo o risco de possuir impurezas.

A curva térmica da mistura com areia do IPT em atmosfera de dióxido de carbono pode ser vista na Figura 47, sendo o seu comportamento muito próximo ao da curva obtida anteriormente na Figura 46 (b). Também foram identificados mais dois picos próximos de 200 °C e de 550 °C, que podem ser atribuídos ao fenômeno de decrepitação da areia.

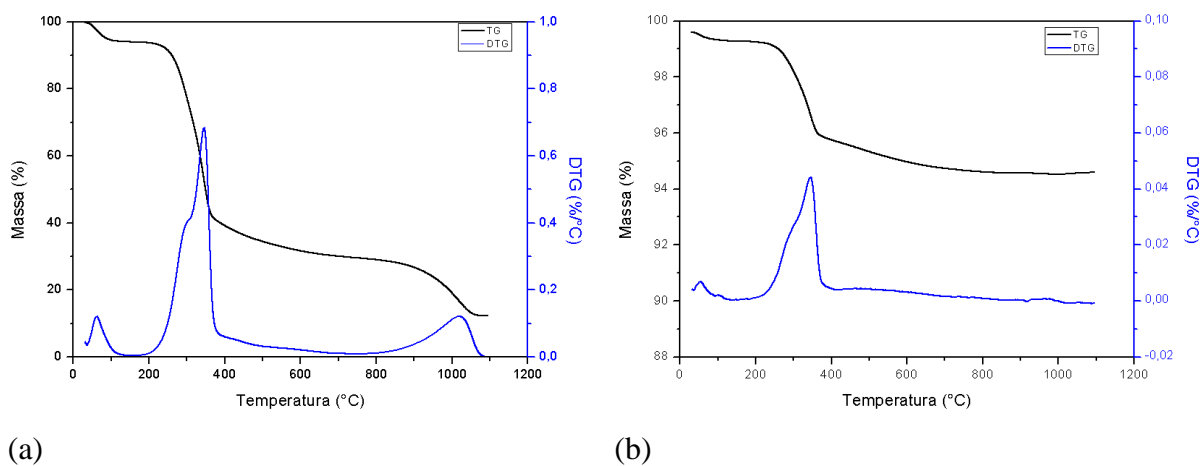
Figura 47 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). Ensaio da mistura (90% areia do IPT e 10% casca de arroz) com dióxido de carbono (gaseificação).



Fonte: Autoria Própria.

Além disso, para se certificar que as amostras de casca de arroz que foram usadas não estavam contaminadas, uma nova amostra de casca de arroz foi selecionada e lavada com água a temperatura próxima de 40 °C, com a intenção de remover todas as possíveis impurezas que possam existir. Assim, foram realizados os experimentos da casca de arroz lavada e da mistura entre a casca de arroz lavada e areia do IPT, ambas em atmosfera de CO₂, com as curvas resultantes mostradas na Figura 48.

Figura 48 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG) e sua derivada (Curva DTG). (a) Ensaio da casca de arroz lavada (b) Ensaio da mistura (90% areia do IPT e 10% casca de arroz lavada) com dióxido de carbono



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria.

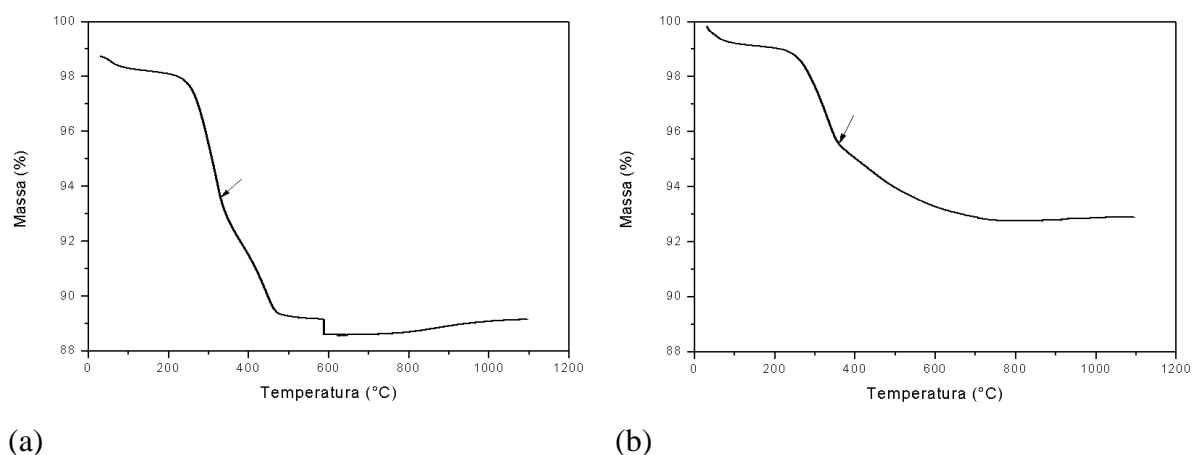
O comportamento obtido em ambos os casos na Figura 48 são muito similares aos obtidos anteriormente, indicando que esse efeito do deslocamento da curva DTG da lignina, observado na Figura 46(b), Figura 47 e Figura 48(b) não está sendo causado por impurezas.

Não foram encontrados trabalhos que explorassem esse efeito da mistura entre areia e biomassa, especialmente a casca de arroz. Entretanto, acredita-se que esse efeito seja devido às propriedades térmicas da areia, sendo ela uma boa condutora de calor. Uma vez que a areia está em quantidade consideravelmente superior à casca de arroz no cadinho durante o teste TG, é possível que ela ajude na homogeneização do perfil térmico, facilitando a decomposição da lignina. Assim, é possível que com o efeito da areia, a decomposição da lignina seja antecipada e suavizada. Enquanto que essa decomposição ocorre próxima de 1000 °C com apenas a casca de arroz, Figura 48 (a), na mistura ela pode ter acontecido entre 400 °C e 800 °C.

Se as curvas de TG para a mistura casca de arroz e areia nas duas atmosferas (ar sintético e dióxido de carbono) forem consideradas, elas possuem um comportamento muito próximo, com a decomposição da lignina possivelmente começando em temperaturas similares (300-350 °C), conforme indicado pelas setas na Figura 49.

Todavia, mesmo se esse for o caso, na atmosfera de dióxido de carbono o efeito é mais distribuído, com a possível decomposição da lignina iniciando próximo de 330 °C mas se estendendo até praticamente 600 °C. Também é possível ver que a redução de massa é menor, variando 4% na atmosfera de ar sintético e 2% na atmosfera de dióxido de carbono. Isso é coerente por serem processos termoquímicos diferentes (combustão e gaseificação).

Figura 49 - Variação da porcentagem de massa em relação a temperatura (Curva TG). Ensaio da mistura (90% areia e 10% casca de arroz) com (a) ar sintético (combustão) (b) dióxido de carbono (gaseificação)



Fonte: Autoria Própria.

Contudo, mais experimentos nessa área são necessários, visando explorar melhor o efeito entre a mistura da areia com a casca de arroz, assim como em outros tipos de biomassa e materiais inertes. Isso pode ter possíveis aplicações para melhor entender os processos que ocorrem em um leito fluidizado.

5.4.2 Análise preditiva do efeito da temperatura

Além de avaliar o efeito do inerte na decomposição térmica da biomassa, a caracterização física na temperatura ambiente no leito e análise térmica dos particulados foram realizadas a fim de avaliar os dados e tentar estabelecer uma relação entre eles. Análise similar foi realizada por Pécora et al. (2014).

No caso das análises térmicas feitas na balança termogravimétrica, o recipiente no qual o material é depositado é caracterizado como um leito do tipo fixo, no qual o material permanece estagnado durante o processo, diferente do leito, no qual há circulação do gás entre as partículas, causando movimentação do material.

Mesmo com essas diferenças que invariavelmente causam divergências entre o comportamento observado em análises TG/DTG e o comportamento térmico em leito a quente, ainda é possível fazer algumas análises complementares.

A curva obtida na atmosfera de dióxido de carbono para a mistura de casca e areia indica que a areia possivelmente deslocou a decomposição da lignina para temperaturas mais baixas. Enquanto que a lignina da casca de arroz se decompõe próximo de 1000 °C em atmosferas de dióxido de carbono, na mistura de casca e areia, isso parece ocorrer entre 400 °C e 600 °C.

Se esse for o caso, algo similar deve ocorrer em um leito fluidizado, no qual, em um processo de gaseificação, a areia não funcionaria apenas como um material inerte que facilita a fluidização, mas também como um material que poderia reduzir a temperatura de funcionamento do leito, diminuindo desgaste e possíveis problemas inerentes à altas temperaturas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi montado uma bancada de fluidização, assim como projetados e construídos a placa de orifício e o distribuidor com injetores do tipo *tuyere*. Posteriormente, foram realizados os experimentos para avaliar a influência de três fatores (tipo de distribuidor do leito, granulometria da areia e proporção mássica de casca de arroz) no comportamento de fluidização da mistura de casca de arroz e areia no leito.

No caso dos distribuidores, foram utilizados o de placa perfurada e o de placa com injetores do tipo *tuyere*. Para a areia, foram usadas as com diâmetro médio de 324 μm (500-150 μm) e de 647 μm (850-500 μm), enquanto que na proporção de casca de arroz, foram utilizados os valores de 1% até 10%, variando em 1%, analisando 10 proporções diferentes no total.

Como os experimentos foram feitos à temperatura ambiente (ensaios à frio), a influência desses três fatores foram avaliadas sobre as seguintes variáveis resposta: nível de mistura entre casca de arroz e areia, expansão do leito na fluidização (δ) e velocidade de mínima fluidização (U_{mf}).

Portanto, com base nos dados obtidos, para as mesmas condições de proporção e granulometria, a placa distribuidora perfurada possui uma menor velocidade de mínima fluidização ($U_{mf} = 0,176 \text{ m/s}$) se comparado com a placa com injetores ($U_{mf} = 0,233 \text{ m/s}$), consumindo menos energia e gerando um menor desgaste do leito. Por outro lado, a placa com injetores gerou um maior nível de mistura com 97,6% se comparado com 93,4% da placa perfurada, eliminando possíveis pontos de estagnação, o que aumentaria a eficiência térmica do sistema e reduziria problemas de incrustação. No caso da expansão do leito, os valores foram similares, com 1,18 e 1,21.

Variando a granulometria da areia, foi identificado que um maior diâmetro médio aumenta a velocidade de mínima fluidização, aumentando também a energia requerida para manter o sistema funcionando. Os dados indicam que a relação entre a velocidade de mínima fluidização é relativamente proporcional ao diâmetro médio da areia para baixas proporções de casca de arroz (menor ou igual à 5%), sendo que dobrar o diâmetro de 324 μm para 647 μm , a velocidade subiu de $U_{mf} = 0,176 \text{ m/s}$ para $U_{mf} = 0,363 \text{ m/s}$. O aumento da granulometria também dificulta consideravelmente a fluidização da casca de arroz, gerando diversos caminhos preferenciais e parada do leito, o que impossibilitou de determinar a

expansão do leito e o nível de mistura.

O aumento da proporção de casca de arroz também influencia negativamente a fluidização, principalmente para valores acima de 5%, gerando diversos caminhos preferenciais e parada do leito. As velocidades de mínima fluidização foram medidas para todas as 10 proporções, mostrando uma possível relação exponencial entre ambos. Considerando 1% de casca, o nível de mistura ficou em 98,6% com 1,06 de expansão, enquanto que para 5%, a mistura ficou com 93,4% e expansão de 1,21.

Considerando todos os dados coletados na fluidização, a placa com injetores em 5% de casca de arroz e granulometria de 324 μm é a melhor configuração por possuir um nível de mistura alto de 97,6%, muito parecido do nível máximo obtido entre todos os experimentos de 98,6%. Um maior nível de mistura resultaria em um perfil térmico mais homogêneo com maior eficiência térmica e redução de pontos de estagnação que causariam impregnações nas paredes do reator.

Embora o nível de mistura para essa configuração seja ligeiramente menor que o máximo obtido, uma quantidade 5 vezes maior de casca de arroz estaria sendo utilizada na fluidização (5% ao invés de 1%), disponibilizando uma maior potência térmica em casos de combustão e uma maior vazão de gás de síntese em uma gaseificação.

Além dos experimentos de fluidização, também foi realizado uma análise térmica, no qual foram obtidas curvas de variação mássica por temperatura para duas atmosferas diferentes (ar sintético e CO_2), simulando as reações químicas que ocorreriam dentro do leito fluidizado para a combustão e gaseificação, respectivamente. Essas atmosferas foram aplicadas para a casca de arroz, a areia e uma mistura de ambas na proporção de 10% casca de arroz e 90% areia, variando a temperatura de 30° C até 1100° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min.

Nessas análises térmicas, a areia isoladamente teve o comportamento geral de um material inerte para ambas as atmosferas. No caso da casca de arroz, foram obtidos 4 picos na curva DTG, representando a secagem do material e as decomposições da hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente. Entretanto, a curva de decomposição de lignina atinge seu pico próximo de 444° C para o ar sintético, enquanto que, para a atmosfera de CO_2 , ela ocorre bem depois, próximo de 1100° C.

Contudo, quando as mesmas atmosferas foram aplicadas à mistura de casca com areia, embora o comportamento na atmosfera de ar sintético tenha sido o mesmo da casca de arroz, isso mudou para a atmosfera de dióxido de carbono. No caso, a curva da decomposição de lignina da mistura “desapareceu” quando comparada com a curva de casca de arroz na mesma

atmosfera, indicando que a areia não se comporta como um material inerte em ambientes de CO₂.

Para eliminar a possibilidade desse comportamento ser resultado de impurezas presentes na mistura, o mesmo experimento foi replicado para uma nova amostra de casca de arroz lavada com areia do IPT padronizada, obtendo os mesmos resultados.

Uma possível hipótese para esse comportamento é que a areia está atuando como um catalizador na decomposição da lignina, suavizando e deslocando sua curva DTG para a esquerda, unindo esse evento às decomposições da hemicelulose e celulose. No entanto, não foram encontrados trabalhos que relatem comportamentos similares e se torna necessário explorar a influência química da areia na gaseificação da casca de arroz em trabalhos futuros.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização desse trabalho, foram identificadas algumas questões que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Essas questões estão sugeridas abaixo:

- Explorar outros tipos de distribuidores de ar no leito e seus efeitos nos fatores de fluidização, incluindo o nível de mistura;
- Avaliar como que a injeção e retirada contínua de material pode afetar a homogeneidade da mistura;
- Realizar experimentos explorando como que a mudança de distribuidor afeta outros tipos de biomassa;
- Testar se o deslocamento da curva DTG da lignina também ocorre para misturas com outras biomassas e materiais inertes;
- Avaliar o comportamento térmico da mistura de areia e casca de arroz para outras atmosferas, como o Oxigênio ou Nitrogênio;
- Explorar a influência da mudança de escala em reatores de leito fluidizado, especificamente na mudança de dimensões da placa distribuidora e o comportamento da fluidodinâmica do material do leito;

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M. Z.; HUSAIN, Z.; YIN PONG, S. L. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 6, p. 487–494, jun. 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2018.
- AGU, C. E.; PFEIFER, C.; MOLDESTAD, B. M. E. Prediction of void fraction and minimum fluidization velocity of a binary mixture of particles: Bed material and fuel particles. **Powder Technology**, v. 349, p. 99–107, maio 2019.
- AI-BEED, A. A. Piping systems. **Metal Finishing**, v. 96, n. 2, p. 100–101, fev. 1998.
- ARAGÓN, J. M.; PALANCAR, M. C.; SERRANO, M. Fluid dynamics of a fluidized-moving bed (flumov). **Powder Technology**, v. 188, n. 3, p. 213–221, jan. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215:1996: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR-ISO-5167: Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão - parte 1: placas de orifício, bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ÁVILA, Ivonete. **Um estudo da sorção de SO₂ por calcário em analisador termogravimétrico e na combustão de carvão em leito fluidizado**. Orientador: Fernando E. Milioli. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- ÁVILA, I. et al. Use of a fluidized bed combustor and thermogravimetric analyzer for the study of coal ignition temperature. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 984–992, mar. 2017.
- AWORINDE, S. M.; HOLLAND, D. J.; DAVIDSON, J. F. Investigation of a swirling flow nozzle for a fluidised bed gas distributor. **Chemical Engineering Science**, v. 132, p. 22–31, ago. 2015.
- AZAT, S. et al. Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 352–359, abr. 2019.
- BASU, P. **Combustion and Gasification in a fluidized bed**. 1 ed. New York: CRC Press, 2006.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction**. 2 ed. San Diego: Elsevier, 2013.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Bioetanol de**

cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1 ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. ISBN 9788587545244

BRINK, H. G.; SAAYMAN, J.; NICOL, W. Two dimensional fluidised bed reactor: Performance of a novel multi-vortex distributor. **Chemical Engineering Journal**, v. 175, p. 484–493, nov. 2011.

CARTER, A.; BRIENS, L. Inline acoustic monitoring to determine fluidized bed performance during pharmaceutical coating. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 549, n. 1–2, p. 293–298, out. 2018.

CHEN, H. et al. Scale-up of fluidized bed drying: Impact of process and design parameters. **Powder Technology**, v. 339, p. 8–16, nov. 2018.

CHEN, S. et al. TGA pyrolysis and gasification of combustible municipal solid waste. **Journal of the Energy Institute**, v. 88, n. 3, p. 332–343, ago. 2015.

CHOKPHOEMPHUN, S.; CHOKPHOEMPHUN, S. Moisture content prediction of paddy drying in a fluidized-bed drier with a vortex flow generator using an artificial neural network. **Applied Thermal Engineering**, v. 145, p. 630–636, dez. 2018.

CRNKOVIC, P. M. et al. O efeito da granulometria na decrepitação durante a decomposição térmica de calcários e carvão. **Química Nova**, v. 27, n. 1, p. 58–61, fev. 2004.

CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 1–2, p. 45–55, jan. 2007.

D. GELDART; BAEYENS, J. The Design of Distributors for Gas-Fluidized Beds. **Powder Technology**, v. 42, p. 67–78, 1985.

DA CUNHA, R. L. G.; PEREIRA, M. M. C.; ROCHA, S. C. S. Conventional and modified fluidized bed: Comparison of the fluid dynamics and application in particle granulation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 5, p. 1004–1011, maio 2009.

DARMAWAN, A. et al. Integrated system of rice production and electricity generation. **Applied Energy**, v. 220, p. 672–680, jun. 2018.

DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. **Fluidization**. 2 ed. New York: Academic Press, 2013. 847 p.

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, G. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p. 75–89, jan. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015**, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019960311&partnerID=40&md5=80e845748aa4faa007ac6a2c8f649112>. Acesso em: 27 out. 2018

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia Termelétrica - Gás Natural, Biomassa,**

Carvão, Nuclear. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, , 2016.

FORDE, C. J. et al. Biobased Fats (Lipids) and Oils from Biomass as a Source of Bioenergy. *In: Bioenergy Research: Advances and Applications*. [S.l.] Elsevier, 2014. p. 185–201.

FOTOVAT, F. et al. Sand-assisted fluidization of large cylindrical and spherical biomass particles: Experiments and simulation. **Chemical Engineering Science**, v. 126, p. 543–559, abr. 2015.

FURLAN, F. L. et al. Use of agricultural and agroindustrial residues as alternative adsorbents of manganese and iron in aqueous solution. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 2, p. 1, 29 mar. 2018.

GALINA, N. R. et al. Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 3, p. 741–754, jun. 2019.

GELDART, D., *Gas Fluidization Technology*. 1 ed. London: Wiley, 1987.476 p.

GELDART, D. Types of Fluidisation. **Powder Technology**, v. 7, p. 285–292, 1973.

GÉRARD J. DELMÉE. **Manual de Medição de Vazão**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2003.

GHALY, A. E.; MACDONALD, K. N. Mixing Patterns and Residence Time Determination in a Bubbling Fluidized Bed System. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 5, n. 2, p. 170–183, fev. 2012.

GRUPO DE PESQUISA LC₃. **Laboratório de Combustão e Captura de Carbono**. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/#!/lc3>. Acesso em: 25 set. 2019

IDAKIEV, V. V. et al. Inductive heating of fluidized beds: Drying of particulate solids. **Powder Technology**, v. 306, p. 26–33, jan. 2017.

IDAKIEV, V. V. et al. Inductive heating of fluidized beds: Spray coating process. **Powder Technology**, v. 328, p. 26–37, abr. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2017**, London, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 12 nov. 2018

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2018**, London, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 12 nov. 2018

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359–378, maio 2015.

KARMAKAR, M. K. et al. Investigation of fuel gas generation in a pilot scale fluidized bed autothermal gasifier using rice husk. **Fuel**, v. 111, p. 584–591, set. 2013.

KOOK, J. W. et al. Gasification and tar removal characteristics of rice husk in a bubbling fluidized bed reactor. **Fuel**, v. 181, p. 942–950, out. 2016.

KOOPMANS, A.; KOPPEJAN, J. **Agricultural and forest residues - generation, utilization and availability** Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, 1997.

KRAPIVIN, V. F.; VAROTSOS, C. A.; SOLDATOV, V. Y. Simulation results from a coupled model of carbon dioxide and methane global cycles. **Ecological Modelling**, v. 359, p. 69–79, set. 2017.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2 ed. USA: Elsevier, 1991.

KUPRIANOV, V. I. et al. Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. **Applied Energy**, v. 87, n. 9, p. 2899–2906, set. 2010.

LEITE, A. D. **A energia do Brasil**. 3 ed. Rio de Janeiro: Lexikon, 2014.

LINHARES, M. C.; SANTOS, L. D.; PRADO, M. M. Estudo do comportamento fluidodinâmico de grãos de polén apícola em leito fluidizado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. **Anais** [...] Florianópolis: 2014. Disponível em: [http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/engenharia/estudo do comportamento.pdf](http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/engenharia/estudo%20do%20comportamento.pdf). Acesso em: 19 nov. 2018.

LUNDBERG, L. et al. The role of fuel mixing on char conversion in a fluidized bed. **Powder Technology**, v. 316, p. 677–686, 2017.

LV, B. et al. Particle mixing and separation performance of gas-solid separation fluidized beds containing binary mixtures. **Fuel**, v. 226, p. 462–471, ago. 2018.

MALLICK, D.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. S. Co-gasification of coal and biomass blends: Chemistry and engineering. **Fuel**, v. 204, p. 106–128, set. 2017.

MANDAL, D. Hydrodynamics of particles in liquid–solid packed fluidized bed. **Powder Technology**, v. 276, p. 18–25, maio 2015.

MIIN, C. S. et al. Hydrodynamics of multi-sized particles in stable regime of a swirling bed. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 32, n. 11, p. 2361–2367, 15 nov. 2015.

MORRIS, J. D. et al. Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review. **Fuel**, v. 230, p. 452–473, out. 2018.

MORTARI, D. A. et al. Study of thermal decomposition and ignition temperature of bagasse , coal and their blends. **Thermal Engineering**, v. 9, p. 81–88, 2010.

MOSTOUFI, N.; CHAOUKI, J. Flow structure of the solids in gas–solid fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 20, p. 4217–4227, out. 2004.

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, out. 2013.

PARK, H. C.; CHOI, H. S. The segregation characteristics of char in a fluidized bed with varying column shapes. **Powder Technology**, v. 246, p. 561–571, set. 2013.

PAUDEL, B.; FENG, Z.-G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, v. 237, p. 134–140, 2013.

PÉCORA, A. A. B. et al. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical–chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 188–197, ago. 2014.

PÉCORA, A. A. B.; GERIS, M. V. A.; ARNAO, J. H. S. Experimental study of gas distributors for fluidized beds containing sand-bagasse mixtures. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 21. **Anais [...]** Natal, Brasil: 2011

PÉREZ, N. P. et al. Fluid dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 135–149, dez. 2017.

PÉREZ, N. P. et al. Prediction of the minimum fluidization velocity of particles of sugarcane bagasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 109, p. 249–256, fev. 2018.

QIAOQUN, S. et al. Simulation and experiment of segregating/mixing of rice husk–sand mixture in a bubbling fluidized bed. **Fuel**, v. 84, n. 14–15, p. 1739–1748, out. 2005.

R. RAO, T.; RAM. BHEEMARASETTI, J. . Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands. **Energy**, v. 26, n. 6, p. 633–644, jun. 2001.

RASTEH, M.; FARHADI, F.; AHMADI, G. Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds. **Powder Technology**, v. 338, p. 563–575, out. 2018.

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

REIS, L. B. DOS; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**. 2 ed. Barueri: Manole, 2012.

SAMPAIO, D. P.; FERREIRA, P. G.; PÉCORA, A. A. B. Effect of the geometry of a gas distributor (tuyere type) on fluidization of a binary mixture biomass-sand. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 22. **Anais [...]** Ribeirão Preto, Brasil: 2013

SÁNCHEZ-PRIETO, J. et al. The effect of temperature on the distributor design in bubbling fluidized beds. **Powder Technology**, v. 261, p. 176–184, jul. 2014.

SCOPUS. **Base de dados bibliográficos**. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 03 jun. 2019.

SHARMA, R. K. et al. Fluidization Study of Rice Husk, Wheat Straw and Cotton Stalk in a Cold Fluidized Bed. **Journal of Basic and Applied Engineering Research**, v. 2, n. 16, p. 1330–1333, 2015.

SHUKRIE, A.; ANUAR, S.; OUMER, A. N. Air Distributor Designs for Fluidized Bed Combustors : A Review. **Engineering, Technology and Fluidized Science Research**, v. 6, n. 3, p. 1029–1034, 2016.

SILVA, J. B. **Hidrodinâmica Da Fluidização De Biomassa E Inertes Em Leito Fluidizado**. Orientador: Alexandre Knesebeck Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SOAM, S. et al. Global warming potential and energy analysis of second generation ethanol production from rice straw in India. **Applied Energy**, v. 184, p. 353–364, dez. 2016.

SOBRINO, C.; ELLIS, N.; DE VEGA, M. Distributor effects near the bottom region of turbulent fluidized beds. **Powder Technology**, v. 189, n. 1, p. 25–33, jan. 2009.

SPEIGHT, J. G. **Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes**. 1 ed. [S.l.] Elsevier, 2010. p. 241–279.

SREENIVASAN, B.; RAGHAVAN, V. R. Hydrodynamics of a swirling fluidised bed. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 41, n. 2, p. 99–106, fev. 2002.

VIEIRA, Fábio. Roberto. **Estudo experimental da pirólise da casca de arroz em reator de leito fixo**. Orientadora: Ivonete Ávila. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp, Guaratinguetá, 2018.

WANG, L.; FAN, Y.; LUO, L. Lattice Boltzmann method for shape optimization of fluid distributor. **Computers and Fluids**, v. 94, p. 49–57, 2014.

WEL, P. VAN DER. Powder mixing. **Powder Handling Processing**, v. 11, p. 83–86, 1999.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics 2017**. Disponível em: http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA_GBS_2017_hq.pdf. Acesso em: 13 out. 2018

WORMSBECKER, M.; PUGSLEY, T. S.; TANFARA, H. The Influence of Distributor Design on Fluidized Bed Dryer Hydrodynamics. *In: The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering*. **Anais [...]** Vancouver, Canada, 2007. Disponível em: http://dc.engconfintl.org/fluidization_xii/100. Acesso em: 26 nov. 2018

WU, X. et al. Characterization and source apportionment of carbonaceous PM_{2.5} particles in China - A review. **Atmospheric Environment**, v. 189, p. 187–212, set. 2018.

XAVIER, T. P. et al. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. **Powder Technology**, v. 299, p. 210–216, out. 2016.

YANG, W.-C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. New York: Marcel

Dekker, 2003.

YATES, J. G.; LETTIERI, P. **Fluidized-Bed Reactors: Processes and Operating Conditions**. 1 ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. 205 p.

YOU, S. et al. A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 242–253, dez. 2017.

YVON-DUROCHER, G. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. **Nature**, v. 507, n. 7493, p. 488–491, 19 mar. 2014.

ZHANG, K. et al. Hydrodynamics of a fluidized bed co-combustor for tobacco waste and coal. **Bioresource Technology**, v. 119, p. 339–348, set. 2012a.

ZHANG, M. et al. Heat transfer characteristics of fluidized bed heat exchanger in a 300MW CFB boiler. **Powder Technology**, v. 222, p. 1–7, maio 2012b.

ZHAO, Z. et al. Hydrodynamic characterization of a tapered gas – solid bed without a gas distributor. **Powder Technology**, v. 256, p. 300–309, 2014.

APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE PARA O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE PRESSÃO

No Sistema de Aquisição de Pressão, é necessário criar um código fonte e armazená-lo na memória do Arduino. Portanto, foram criados 3 programas diferentes com o intuito de executar as seguintes operações:

- Programa 1: Calibrar o sistema;
- Programa 2: Obter o perfil da queda de pressão pela velocidade do ar no leito;
- Programa 3: Exibir velocidade momentânea do leito.

Os 3 programas são mostrados abaixo:

Programa 1: Calibrar o sistema

```
#include <stdio.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include "BlueDot_BME280.h"
BlueDot_BME280 bme1;           //Object for Sensor 1
BlueDot_BME280 bme2;           //Object for Sensor 2
BlueDot_BME280 bme3;           //Object for Sensor 3
int bme1Detected = 0;          //Checks if Sensor 1 is available
int bme2Detected = 0;          //Checks if Sensor 2 is available
int bme3Detected = 0;          //Checks if Sensor 3 is available
int controlWhile = 1;          //Controls While function for Serial commands
int controlWhile3 = 1;         //Controls While function for Orifice Plate calculations
String command;                //String used for Serial commands
int Counter = 0;                //Counting the number of measurements
int CounterControl = 0;         //Counts while(controlWhile3) to avoid infinite loop
double bme1Temp = 0;
double bme2Temp = 0;
double bme3Temp = 0;
double bme1Pres = 0;
double bme2Pres = 0;
double bme3Pres = 0;
double DeltaPres_BED = 0;       //Delta Pressure of the fluidized bed (bme3Pres - atmospheric Pressure)
double AtmosPres = 0;          //Atmospheric Pressure
double Del_1 = 0;
double Del_2 = 0;
double Del_3 = 0;
// *****ORIFICE PLATE*****
//Variables
double Z_Pmin = 0;              // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z_Pmax = 0;              // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z = 0.999732;            // Compression Factor [-] (105 kPa, 35 C)
double u = 0.00001775;          // Dinamic Viscosity [Pa s] (35 C)
double k = 1.41;                // Isentropic Factor [-]
double epsilon = 0;             // Isentropic Expansion Factor [-]
double d = 0.0099333;           // Diameter of the Orifice [m]
double D = 0.049;               // Diameter of the tubulation (2") [m]
double Ar = (3.14159265359*(pow(D,2)))/4; // Area of the tubulation (2") [m2]
double B = d/D;                 // Beta [-]
double E = 1/(pow((1-(pow(B,4))),0.5)); // E [-]
double epsilon1 = (0.41+(0.35*(pow(B,4))))/k; // Part of the epsilon that is calculated before the loop [-]
double M = 28.9625;             // Molar Mass of air [g/mol]
double R = 8.314462;            // Gas Constant [J/mol K]
double C = 0;                   // Coefficient of Discharge [-]
double Ci = 0.64;              // Initial Coefficient of Discharge [-]
```



```

double L1 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L1=0
double L2 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L2=0
double M2 = 2*L2/(1-B); // Used to Calculate C (ISO 5167)
double A = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167)
double DeltaPres = 0; // Pressure Difference to calculate U [Pa]
double rho = 0; // Density of air [kg/m3]
double Q = 0; // Volumetric flow [m3/s]
double ReD = 0; // Reynolds Number for flow inside tubulation [-]
double U = 0; // Air Velocity [m/s]
//Tables for Z and u in Matrix form
typedef struct {
    double Pres;
    double Temp;
    double Z;
}Z_Table;

typedef struct {
    double Temp;
    double u;
}u_Table;
//***** Z *****
// P(Pa) T(C) T(C) T(C) T(C)
// 0 20 50 100
//
// 39 226.6 0.99977 0.99985 0.99995 1.00004
// 98 066.5 0.99941 0.99963 0.99987 1.00011
// 392 266 0.99763 0.99852 0.99948 1.00045
// P(kPa) T(C) Z
Z_Table Values_Z[3][4] = {
    {39226.6, 0, 0.99977}, // Values_Z [0][0]
    {39226.6, 20, 0.99985}, // Values_Z [0][1]
    {39226.6, 50, 0.99995}, // Values_Z [0][2]
    {39226.6, 100, 1.00004} }, // Values_Z [0][3]

    {98066.5, 0, 0.99941}, // Values_Z [1][0]
    {98066.5, 20, 0.99963}, // Values_Z [1][1]
    {98066.5, 50, 0.99987}, // Values_Z [1][2]
    {98066.5, 100, 1.00011} }, // Values_Z [1][3]

    {392266, 0, 0.99763}, // Values_Z [2][0]
    {392266, 20, 0.99852}, // Values_Z [2][1]
    {392266, 50, 0.99948}, // Values_Z [2][2]
    {392266, 100, 1.00045} // Values_Z [2][3]
};
//***** u *****
// T(C) cP Pa s
// 0 0.0163 0.0000163
// 10 0.0166 0.0000166
// 20 0.017 0.000017
// 30 0.0175 0.0000175
// 40 0.018 0.000018
// 50 0.0185 0.0000185
// 60 0.019 0.000019
// 70 0.0194 0.0000194
// 80 0.0198 0.0000198
// T(C) u(Pa s)
u_Table Values_u[9] = {
    {0, 0.0000163}, // Values_u [0]
    {10, 0.0000166}, // Values_u [1]
    {20, 0.0000170}, // Values_u [2]
    {30, 0.0000175}, // Values_u [3]
    {40, 0.0000180}, // Values_u [4]
    {50, 0.0000185}, // Values_u [5]
    {60, 0.0000190}, // Values_u [6]
    {70, 0.0000194}, // Values_u [7]
    {80, 0.0000198} // Values_u [8]
};
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("Pressure Measurements for a Bubbling Fluidized Bed - Calibration"));
    //*****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
    //Choose between Software and Hardware SPI protocol for all sensors
    //parameter.communication == 1 ----> Software SPI
    //parameter.communication == 2 ----> Hardware SPI
    bme1.parameter.communication = 1;

```

```

bme2.parameter.communication = 1;
bme3.parameter.communication = 1;
//*****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
//Set the Chip Select pins for the SPI Communication.
//Each sensor must have a different Chip Select pin.
//Connect the Chip Select pins from the sensors to regular digital pins on the Arduino.
//----->> CS = CSB
bme1.parameter.SPI_cs = 5;           //Chip Select Pin for Sensor 1
bme2.parameter.SPI_cs = 6;           //Chip Select Pin for Sensor 2
bme3.parameter.SPI_cs = 7;           //Chip Select Pin for Sensor 3
//*****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
//If you are using Hardware SPI, then the MOSI, MISO and SCK pins are predefined by the Arduino Board (ICSP Header).
//The ICSP Header looks like this:
//   ICSP
//   MISO |x x| VCC
//   SCK  |x x| MOSI
//   /RESET |x x| GND
//Connect the SDO (sensor) to MISO (Arduino).
//Connect the SDI (sensor) to MOSI (Arduino).
//Connect the SCK (sensor) to SCK (Arduino). This one was obvious!
//In this case you can comment this section out.
//But if you are using Software SPI you need to set the pins for the MOSI, MISO and SCK lines.
//You may change those pins if you like, but remember to connect that pin to all sensors.
//MOSI = SDA
//MISO = SDO
//SCK = SCL
bme1.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
bme2.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
bme3.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors

bme1.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
bme2.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
bme3.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
bme1.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
bme2.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
bme3.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Now choose on which mode your device will run
//On doubt, just leave on normal mode, that's the default value
//0b00:  In sleep mode no measurements are performed, but power consumption is at a minimum
//0b01:  In forced mode a single measured is performed and the device returns automatically to sleep mode
//0b11:  In normal mode the sensor measures continually (default value)
bme1.parameter.sensorMode = 0b11;    //Setup Sensor mode for Sensor 1
bme2.parameter.sensorMode = 0b11;    //Setup Sensor mode for Sensor 2
bme3.parameter.sensorMode = 0b11;    //Setup Sensor mode for Sensor 3
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Great! Now set up the internal IIR Filter
//The IIR (Infinite Impulse Response) filter suppresses high frequency fluctuations
//In short, a high factor value means less noise, but measurements are also less responsive
//You can play with these values and check the results!
//In doubt just leave on default

//0b000:  factor 0 (filter off)
//0b001:  factor 2
//0b010:  factor 4
//0b011:  factor 8
//0b100:  factor 16 (default value)
bme1.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 1
bme2.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 2
bme3.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 3
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Next you'll define the oversampling factor for the humidity measurements
//Again, higher values mean less noise, but slower responses
//If you don't want to measure humidity, set the oversampling to zero
//0b000:  factor 0 (Disable humidity measurement)
//0b001:  factor 1
//0b010:  factor 2
//0b011:  factor 4
//0b100:  factor 8
//0b101:  factor 16 (default value)
bme1.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 1

```

```

bme2.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 3
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Now define the oversampling factor for the temperature measurements
//You know now, higher values lead to less noise but slower measurements
//0b000: factor 0 (Disable temperature measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 3
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Finally, define the oversampling factor for the pressure measurements
//For altitude measurements a higher factor provides more stable values
//On doubt, just leave it on default
//0b000: factor 0 (Disable pressure measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 3
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//For precise altitude measurements please put in the current pressure corrected for the sea level
//On doubt, just leave the standard pressure as default (1013.25 hPa);
bme1.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 1)
bme2.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 2)
bme3.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 3)
//Also put in the current average temperature outside (yes, really outside!)
//For slightly less precise altitude measurements, just leave the standard temperature as default (15°C);
bme1.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme2.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme3.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme1.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme2.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme3.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
//*****ADVANCED SETUP IS OVER - LET'S CHECK THE CHIP ID!*****
// Initialize Sensor 1
if (bme1.init() != 0x58)
{
Serial.println(F("Ops! First BME280 Sensor not found!"));
bme1Detected = 0;
}
else
{
Serial.println(F("First BME280 Sensor detected!"));
bme1Detected = 1;
}
// Initialize Sensor 2
if (bme2.init() != 0x58)
{
Serial.println(F("Ops! Second BME280 Sensor not found!"));
bme2Detected = 0;
}
else
{
Serial.println(F("Second BME280 Sensor detected!"));
bme2Detected = 1;
}
// Initialize Sensor 3
if (bme3.init() != 0x58)
{
Serial.println(F("Ops! Third BME280 Sensor not found!"));
bme3Detected = 0;
}
else
{

```

```

Serial.println(F("Third BME280 Sensor detected!"));
bme3Detected = 1;
}
if ((bme1Detected == 0)&(bme2Detected == 0)&(bme3Detected == 0))
{
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println(F("Troubleshooting Guide"));
  Serial.println(F("*****"));
  Serial.println(F("1. Let's check the basics: Are the VCC and GND pins connected correctly? If the BME280 is getting really hot, then the
wires are crossed."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("2. Did you connect the Chip Select (CS) pin from each sensor to a different digital pin on the Arduino?"));
  Serial.println();
  Serial.println(F("3. Are you using Hardware SPI? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins from your Arduino are on the ICSP
header."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("4. Are you using Software SPI instead? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins are regular digital pins chosen by
you."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("5. Did you connect the SDI pin from each sensor to the same MOSI pin from your Arduino? All sensors must share the
same MOSI pin."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("6. Did you connect the SDO pin from each BME280 sensor to the same MISO pin from your Arduino? All sensors must
share the same MISO pin."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("7. And finally, did you connect the SCK pin from each BME280 sensor to the same SCK pin from your Arduino? Yes, all
sensors must share the same SCK pin."));
  Serial.println();
  Serial.println();

  while(1);
}
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user..");
Serial.println("The First Data aquisition is to determine the atmospheric pressure to use it as a reference in the calculations.");
Serial.println("If you wish to begin the atmospheric measurement, send the following LETTER in the Serial Input.");
Serial.println("b (begin)");
//Obtain Atmospheric Pressure
while(controlWhile){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');

    if(command.equals("b")){
      controlWhile = 0;

      for(int i=0; i<10; i++){
        //Read Sensor 1
        if (bme1Detected)
        {
          bme1Temp = bme1Temp + bme1.readTempC();
          bme1Pres = bme1Pres + (bme1.readPressure()*100);
        }
        else
        {
          Serial.print(F("Null"));
          Serial.print(" ");
          Serial.print(F("Null"));
          Serial.print(" ");
        }
        //Read Sensor 2
        if (bme2Detected)
        {
          bme2Temp = bme2Temp + bme2.readTempC();
          bme2Pres = bme2Pres + (bme2.readPressure()*100);
        }
        else
        {
          Serial.print(F("Null"));
          Serial.print(" ");
          Serial.print(F("Null"));
          Serial.print(" ");
        }
        //Read Sensor 3
        if (bme3Detected)

```

```

        {
            bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
            bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
        }
    else
    {
        Serial.print(F("Null"));
        Serial.print(" ");
        Serial.print(F("Null"));
        Serial.print(" ");
    }
}
//Average from the Sum obtained in the previous for() function
bme1Pres = bme1Pres/10;
bme2Pres = bme2Pres/10;
bme3Pres = bme3Pres/10;
AtmosPres = (bme1Pres+bme2Pres+bme3Pres)/3;
}
else{
    Serial.println("Invalid command");
}
}
}
Serial.println();
Serial.println("Atmospheric Pressure collected");
Serial.println();
Serial.print("Atmospheric Pressure: ");
Serial.print(AtmosPres);
Serial.println("Pa");
controlWhile = 1;
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user...");
Serial.println("After the command, the data will be collected 10 times and then the software will stop, waiting for further instructions.");
Serial.println("The data collected 10 times is used to obtain the average which is shown in the Serial Input");
Serial.println("If you wish to begin, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("b (begin)");
Serial.println("Do you wish to begin Data acquisition?");
while(controlWhile){
    if(Serial.available()){
        command = Serial.readStringUntil('\n');
        if(command.equals("b")){
            controlWhile = 0;
        }
        else{
            Serial.println("Invalid command");
        }
    }
}
}

Serial.println("N; Time; TS1; PS1; TS2; PS2; TS3; PS3; DelU; rho; ReD; U; Del(1); Del(2); Del(3);");
Serial.println("-; s; C; Pa; C; Pa; C; Pa; Pa; kg/m3; -; m/s; Pa; Pa; Pa;");
Serial.println("-; -; -; -; -; -; -; -; -; -; -; -; -; -;");
}
//*****
//*****NOW LET'S START MEASURING*****
void loop() {
    bme1Temp = 0;
    bme2Temp = 0;
    bme3Temp = 0;
    bme1Pres = 0;
    bme2Pres = 0;
    bme3Pres = 0;
    Counter = Counter + 1;
    controlWhile = 1;
    controlWhile3 = 1;
    CounterControl = 0;
    Serial.print(Counter); //Measurement for a given Value
    Serial.print(" ");
    Serial.print(float(millis())/1000); //Time in seconds
    Serial.print(" ");
    for(int i=0; i<10; i++){
        //Read Sensor 1
        if (bme1Detected)
        {

```

```

    bme1Temp = bme1Temp + bme1.readTempC();
    bme1Pres = bme1Pres + (bme1.readPressure()*100);
}
else
{
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 2
if (bme2Detected)
{
    bme2Temp = bme2Temp + bme2.readTempC();
    bme2Pres = bme2Pres + (bme2.readPressure()*100);
}
else
{
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 3
if (bme3Detected)
{
    bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
    bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
}
else
{
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
}
}
//Average from the Sum obtained in the previous for() function
bme1Temp = bme1Temp/10;
bme1Pres = bme1Pres/10;
bme2Temp = bme2Temp/10;
bme2Pres = bme2Pres/10;
bme3Temp = bme3Temp/10;
bme3Pres = bme3Pres/10;
//*****ORIFICE PLATE*****
//Interpolation of Z
for(int i=0; i<3; i++){
    int j = 0;
    if(Values_Z[i][j].Pres > bme1Pres){
        if (Values_Z [i-1][j].Pres == bme1Pres){
            for(int j=0; j<4; j++){
                if(Values_Z[i-1][j].Temp > bme1Temp){
                    if(Values_Z [i-1][j-1].Temp == bme1Temp){ //When P and T are exactly the same as the Table
                        Z = Values_Z [i-1][j-1].Z;
                        i=j+100;
                    }
                    else{ //When P is the same but T isnt
                        Z = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
                        i=j+100;
                    }
                }
            }
        }
        else{
            for(int j=0; j<4; j++){
                if(Values_Z[i][j].Temp > bme1Temp){
                    if(Values_Z [i][j-1].Temp == bme1Temp){ //When T is the same but P isnt
                        Z = ((bme1Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres)*(Values_Z[i][j-1].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i][j-1].Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres))+Z_Pmin;
                        i=j+100;
                    }
                    else{ //When both P and T are different
                        Z_Pmin = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Z_Pmin;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
    Z_Pmax = ((bme1Temp-Values_Z[i][j-1].Temp)*(Values_Z[i][j].Z-Values_Z[i][j-1].Z)/(Values_Z[i][j].Temp-Values_Z[i][j-1].Temp))+Values_Z[i][j-1].Z;
    Z = (bme1Pres-Values_Z[i-1][j].Pres)*(Z_Pmax-Z_Pmin)/(Values_Z[i][j].Pres-Values_Z[i-1][j].Pres))+Z_Pmin;
    i=j=100;
    }
    }
    }
    }
}

//Interpolation of u

for(int i=0; i<9; i++){
    if(Values_u[i].Temp > bme1Temp){
        if(Values_u[i-1].Temp == bme1Temp){
            u = Values_u[i-1].u;
        }
        else{
            u = ((bme1Temp-Values_u[i-1].Temp)*(Values_u[i].u-Values_u[i-1].u)/(Values_u[i].Temp-Values_u[i-1].Temp))+Values_u[i-1].u;
            //Exit for() function
            break;
        }
    }
}

//Calculations of the Velocity of air U
//The initial value of C is 0.64. That is used as estimative to calculate U
//Then, U is used to recalculate C. That process is repeated until C doesnt change anymore
DeltaPres = bme1Pres - bme2Pres;
rho = (M*bme1Pres)/(R*Z*(273.15 +bme1Temp)*1000);
epsilon = 1-(epsilon1*(DeltaPres/bme1Pres));
C = 0.734;
/*
while (controlWhile3){
    CounterControl = CounterControl +1;
    Q = 1.1107 * Ci *E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
    U = Q/Ar;
    ReD = (U*rho*D)/u;
    // C calculation
    A = pow(((19000*B)/ReD),0.8);
    C = (0.216*pow(B,8))+0.000521*pow(((1000000*B)/ReD),0.7)+((0.188+(0.0063*A))*pow(B,3.5)*pow((1000000/ReD),0.3))+((0.043+(0.08*pow(2.71828483,(-10*L1)))-(0.123*pow(2.71828483,(-7*L1))))*(1-(11*A))*pow(B,4)/(1-pow(B,4)))-(0.031*(M2-0.8*pow(M2,1.1))*pow(B,1.3));
    //if D < 71.12 mm
    C = C + (0.011*(0.75-B)*(2.8-((D*1000)/25.4)));
    if (C-Ci>0.001 || Ci-C>0.001){

        Ci = C;
        controlWhile3 = 0;
    }
    if(CounterControl > 300){
        controlWhile3 = 0;
        Serial.println();
        Serial.println();
        Serial.println("Problem to calculate C");
        Serial.println();
        Serial.println();
    }
}
*/
Q = 1.1107 * C *E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
U = Q/Ar;
DeltaPres_BED = (bme3Pres - (AtmosPres));
Del_1 = (bme1Pres - (AtmosPres));
Del_2 = (bme2Pres - (AtmosPres));
Del_3 = (bme3Pres - (AtmosPres));
//Show the results in the Serial Screen
Serial.print(bme1Temp);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme1Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme2Temp);

```

```

Serial.print(" ");
Serial.print(bme2Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme3Temp);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme3Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(DeltaPres);
Serial.print(" ");
Serial.print(rho);
Serial.print(" ");
Serial.print(ReD);
Serial.print(" ");
Serial.print(U);
Serial.print(" ");
Serial.print(Del_1);
Serial.print(" ");
Serial.print(Del_2);
Serial.print(" ");
Serial.print(Del_3);
Serial.print(" ");
Serial.println();
delay(100);
//Control to check if the user wants to collect data again
while(controlWhile){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    if(command.equals("b")){
      controlWhile = 0;
    }
  }
  else{
    Serial.println("Invalid command");
  }
}
}
}

```

Programa 2: Obter o perfil da queda de pressão pela velocidade do ar no leito

```

#include <stdio.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include "BlueDot_BME280.h"
BlueDot_BME280 bme1;           //Object for Sensor 1
BlueDot_BME280 bme2;           //Object for Sensor 2
BlueDot_BME280 bme3;           //Object for Sensor 3
int bme1Detected = 0;          //Checks if Sensor 1 is available
int bme2Detected = 0;          //Checks if Sensor 2 is available
int bme3Detected = 0;          //Checks if Sensor 3 is available
int controlWhile = 1;          //Controls While function for Serial commands
int controlWhile1 = 1;         //Controls While function for Serial commands
int controlWhile2 = 1;         //Controls While function for Serial commands
int controlWhile3 = 1;         //Controls While function for Orifice Plate calculations
String command;                //String used for Serial commands
int Counter = 0;                //Counting the number of measurements
int CounterControl = 0;         //Counts while(controlWhile3) to avoid infinite loop
double bme1Temp = 0;
double bme2Temp = 0;
double bme3Temp = 0;
double bme1Pres = 0;
double bme2Pres = 0;
double bme3Pres = 0;
double DeltaPres_BED = 0;      //Delta Pressure of the fluidized bed (bme3Pres - atmospheric Pressure)
double AtmosPres = 0;          //Atmospheric Pressure
//*****ORIFICE PLATE*****
//Variables
double Z_Pmin = 0;              // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z_Pmax = 0;              // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z = 0.999732;            // Compression Factor [-] (105 kPa, 35 C)
double u = 0.00001775;          // Dinamic Viscosity [Pa s] (35 C)
double k = 1.41;                // Isentropic Factor [-]
double epsilon = 0;             // Isentropic Expansion Factor [-]
double d = 0.0099333;           // Diameter of the Orifice [m]

```



```

double D = 0.049; // Diameter of the tubulation (2") [m]
double Ar = (3.14159265359*(pow(D,2)))/4; // Area of the tubulation (2") [m2]
double Ar_Bed = (3.14159265359*(pow(0.156,2)))/4; // Area of the Bed [m2]
double B = d/D; // Beta [-]
double E = 1/(pow((1-(pow(B,4))),0.5)); // E [-]
double epsilon1 = (0.41+(0.35*(pow(B,4))))/k; // Part of the epsilon that is calculated before the loop [-]
double M = 28.9625; // Molar Mass of air [g/mol]
double R = 8.314462; // Gas Constant [J/mol K]
double C = 0; // Coefficient of Discharge [-]
double Ci = 0.64; // Initial Coefficient of Discharge [-]
double L1 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L1=0
double L2 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L2=0
double M2 = 2*L2/(1-B); // Used to Calculate C (ISO 5167)
double A = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167)
double DeltaPres = 0; // Pressure Difference [Pa]
double rho = 0; // Density of air [kg/m3]
double Q = 0; // Volumetric flow [m3/s]
double ReD = 0; // Reynolds Number for flow inside tubulation [-]
double U = 0; // Air Velocity [m/s]
//Tables for Z and u in Matrix form
typedef struct {
    double Pres;
    double Temp;
    double Z;
}Z_Table;
typedef struct {
    double Temp;
    double u;
}u_Table;
//***** Z *****
// P(Pa) T(C) T(C) T(C) T(C)
// 0 20 50 100
//
// 39 226.6 0.99977 0.99985 0.99995 1.00004
// 98 066.5 0.99941 0.99963 0.99987 1.00011
// 392 266 0.99763 0.99852 0.99948 1.00045
// P(kPa) T(C) Z
Z_Table Values_Z[3][4] = {
    {39226.6, 0, 0.99977}, // Values_Z [0][0]
    {39226.6, 20, 0.99985}, // Values_Z [0][1]
    {39226.6, 50, 0.99995}, // Values_Z [0][2]
    {39226.6, 100, 1.00004} }, // Values_Z [0][3]
    {98066.5, 0, 0.99941}, // Values_Z [1][0]
    {98066.5, 20, 0.99963}, // Values_Z [1][1]
    {98066.5, 50, 0.99987}, // Values_Z [1][2]
    {98066.5, 100, 1.00011} }, // Values_Z [1][3]
    {392266, 0, 0.99763}, // Values_Z [2][0]
    {392266, 20, 0.99852}, // Values_Z [2][1]
    {392266, 50, 0.99948}, // Values_Z [2][2]
    {392266, 100, 1.00045} } // Values_Z [2][3]
};
//***** u *****
// T(C) cP Pa s
// 0 0.0163 0.0000163
// 10 0.0166 0.0000166
// 20 0.017 0.000017
// 30 0.0175 0.0000175
// 40 0.018 0.000018
// 50 0.0185 0.0000185
// 60 0.019 0.000019
// 70 0.0194 0.0000194
// 80 0.0198 0.0000198
// T(C) u(Pa s)
u_Table Values_u[9] = {
    {0, 0.0000163}, // Values_u [0]
    {10, 0.0000166}, // Values_u [1]
    {20, 0.0000170}, // Values_u [2]
    {30, 0.0000175}, // Values_u [3]
    {40, 0.0000180}, // Values_u [4]
    {50, 0.0000185}, // Values_u [5]
    {60, 0.0000190}, // Values_u [6]
    {70, 0.0000194}, // Values_u [7]
    {80, 0.0000198} // Values_u [8]
};

```

```

/*****
INTERFACE AND THE HARDWARE SETUP
*****/
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("Pressure Measurements for a Bubbling Fluidized Bed - Umf"));
  /*****
  *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
  //Choose between Software and Hardware SPI protocol for all sensors
  //parameter.communication == 1 ----> Software SPI
  //parameter.communication == 2 ----> Hardware SPI
  bme1.parameter.communication = 1;
  bme2.parameter.communication = 1;
  bme3.parameter.communication = 1;
  /*****
  *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
  //Set the Chip Select pins for the SPI Communication.
  //Each sensor must have a different Chip Select pin.
  //Connect the Chip Select pins from the sensors to regular digital pins on the Arduino.
  //----->> CS = CSB
  bme1.parameter.SPI_cs = 5;           //Chip Select Pin for Sensor 1
  bme2.parameter.SPI_cs = 6;           //Chip Select Pin for Sensor 2
  bme3.parameter.SPI_cs = 7;           //Chip Select Pin for Sensor 3
  /*****
  *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
  //If you are using Hardware SPI, then the MOSI, MISO and SCK pins are predefined by the Arduino Board (ICSP Header).
  //The ICSP Header looks like this:
  //      ICSP
  //      MISO |x x| VCC
  //      SCK  |x x| MOSI
  //      /RESET |x x| GND
  //Connect the SDO (sensor) to MISO (Arduino).
  //Connect the SDI (sensor) to MOSI (Arduino).
  //Connect the SCK (sensor) to SCK (Arduino). This one was obvious!
  //In this case you can comment this section out.
  //But if you are using Software SPI you need to set the pins for the MOSI, MISO and SCK lines.
  //You may change those pins if you like, but remember to connect that pin to all sensors.
  //MOSI = SDA
  //MISO = SDO
  //SCK = SCL
  bme1.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme2.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme3.parameter.SPI_sck = 10;          //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme1.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme2.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme3.parameter.SPI_mosi = 9;          //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme1.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme2.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
  bme3.parameter.SPI_miso = 8;          //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
  /*****
  *****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
  //Now choose on which mode your device will run
  //On doubt, just leave on normal mode, that's the default value
  //0b00: In sleep mode no measurements are performed, but power consumption is at a minimum
  //0b01: In forced mode a single measured is performed and the device returns automatically to sleep mode
  //0b11: In normal mode the sensor measures continually (default value)
  bme1.parameter.sensorMode = 0b11;     //Setup Sensor mode for Sensor 1
  bme2.parameter.sensorMode = 0b11;     //Setup Sensor mode for Sensor 2
  bme3.parameter.sensorMode = 0b11;     //Setup Sensor mode for Sensor 3
  /*****
  *****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
  //Great! Now set up the internal IIR Filter
  //The IIR (Infinite Impulse Response) filter suppresses high frequency fluctuations
  //In short, a high factor value means less noise, but measurements are also less responsive
  //You can play with these values and check the results!
  //In doubt just leave on default
  //0b000: factor 0 (filter off)
  //0b001: factor 2
  //0b010: factor 4
  //0b011: factor 8
  //0b100: factor 16 (default value)
  bme1.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 1
  bme2.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 2
  bme3.parameter.IIRfilter = 0b100;     //IIR Filter for Sensor 3
  /*****
  *****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****

```

```

//Next you'll define the oversampling factor for the humidity measurements
//Again, higher values mean less noise, but slower responses
//If you don't want to measure humidity, set the oversampling to zero
//0b000: factor 0 (Disable humidity measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Now define the oversampling factor for the temperature measurements
//You know now, higher values lead to less noise but slower measurements
//0b000: factor 0 (Disable temperature measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Finally, define the oversampling factor for the pressure measurements
//For altitude measurements a higher factor provides more stable values
//On doubt, just leave it on default
//0b000: factor 0 (Disable pressure measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//For precise altitude measurements please put in the current pressure corrected for the sea level
//On doubt, just leave the standard pressure as default (1013.25 hPa);
bme1.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 1)
bme2.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 2)
bme3.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 3)
//Also put in the current average temperature outside (yes, really outside!)
//For slightly less precise altitude measurements, just leave the standard temperature as default (15°C);
bme1.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme2.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme3.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme1.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme2.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme3.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
//*****
//*****ADVANCED SETUP IS OVER - LET'S CHECK THE CHIP ID!*****
// Initialize Sensor 1
if (bme1.init() != 0x58)
{
Serial.println(F("Ops! First BME280 Sensor not found!"));
bme1Detected = 0;
}
else
{
Serial.println(F("First BME280 Sensor detected!"));
bme1Detected = 1;
}
// Initialize Sensor 2
if (bme2.init() != 0x58)
{
Serial.println(F("Ops! Second BME280 Sensor not found!"));
bme2Detected = 0;
}
else
{
Serial.println(F("Second BME280 Sensor detected!"));
}

```

```

    bme2Detected = 1;
}
// Initialize Sensor 3
if (bme3.init() != 0x58)
{
    Serial.println(F("Ops! Third BME280 Sensor not found!"));
    bme3Detected = 0;
}
else
{
    Serial.println(F("Third BME280 Sensor detected!"));
    bme3Detected = 1;
}
if ((bme1Detected == 0)&(bme2Detected == 0)&(bme3Detected == 0))
{
    Serial.println();
    Serial.println();
    Serial.println(F("Troubleshooting Guide"));
    Serial.println(F("*****"));
    Serial.println(F("1. Let's check the basics: Are the VCC and GND pins connected correctly? If the BME280 is getting really hot, then the wires are crossed."));
    Serial.println();
    Serial.println(F("2. Did you connect the Chip Select (CS) pin from each sensor to a different digital pin on the Arduino?"));
    Serial.println();
    Serial.println(F("3. Are you using Hardware SPI? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins from your Arduino are on the ICSP header."));
    Serial.println();
    Serial.println(F("4. Are you using Software SPI instead? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins are regular digital pins chosen by you."));
    Serial.println();
    Serial.println(F("5. Did you connect the SDI pin from each sensor to the same MOSI pin from your Arduino? All sensors must share the same MOSI pin."));
    Serial.println();
    Serial.println(F("6. Did you connect the SDO pin from each BME280 sensor to the same MISO pin from your Arduino? All sensors must share the same MISO pin."));
    Serial.println();
    Serial.println(F("7. And finally, did you connect the SCK pin from each BME280 sensor to the same SCK pin from your Arduino? Yes, all sensors must share the same SCK pin."));
    Serial.println();
    Serial.println();

    while(1);
}
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user...");
Serial.println("The First Data acquisition is to determine the atmospheric pressure to use it as a reference in the calculations.");
Serial.println("If you wish to begin the atmospheric measurement, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("b (begin)");
//Obtain Atmospheric Pressure
while(controlWhile){
    if(Serial.available()){
        command = Serial.readStringUntil('\n');

        if(command.equals("b"){
            controlWhile = 0;

            for(int i=0; i<10; i++){
                //Read Sensor 3
                if (bme3Detected)
                {
                    bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
                    bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
                }
                else
                {
                    Serial.print(F("Null"));
                    Serial.print(" ");
                    Serial.print(F("Null"));
                    Serial.print(" ");
                }
            }
            //Average from the Sum obtained in the previous for() function
            bme3Pres = bme3Pres/10;
            //Calibrating the system
            //Sensor 3: Y = 633.12 + 0.98585*X

```

```

        bme3Pres = 633.12 + (0.98585*bme3Pres);
        AtmosPres = bme3Pres;
    }
    else{
        Serial.println("Invalid command");
    }
}
}
}
/*****
                INFORM THE USER AND MEASURE ATMOSPHERIC PRESSURE
*****/
Serial.println();
Serial.println("Atmospheric Pressure collected");
Serial.println();
Serial.println();
Serial.print("Atmospheric Pressure: ");
Serial.print(AtmosPres);
Serial.println("Pa");
controlWhile = 1;
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user...");
Serial.println("After the command, the data will be collected 10 times and then the software will stop, waiting for further instructions.");
Serial.println("If you wish to begin, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("b (begin)");
Serial.println("When you wish to stop the Data aquisition, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("s (stop)");
Serial.println("Do you wish to begin Data acquisition?");
while(controlWhile){
    if(Serial.available()){
        command = Serial.readStringUntil("\n");
        if(command.equals("b")){
            controlWhile = 0;
        }
        else{
            Serial.println("Invalid command");
        }
    }
}
}
/*****
                COLLECT DATA AND DO CALCULATIONS
*****/
void loop() {
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("                Novo Experimento                ");
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("N; Time; TS1;  PS1;  TS2;  PS2;  TS3;  PS3; DelU;  Rho;  ReD;  U;  DelB;");
Serial.println("-;  s;  C;  Pa;  C;  Pa;  C;  Pa; Pa; kg/m3;  -;  m/s;  Pa;");
Serial.println("-;  -;  -;  -;  -;  -;  -;  -;  -;  -;  -;  -;");
controlWhile1 = 1;
controlWhile2 = 1;
while (controlWhile1){
    bme1Temp = 0;
    bme2Temp = 0;
    bme3Temp = 0;
    bme1Pres = 0;
    bme2Pres = 0;
    bme3Pres = 0;
    controlWhile3 = 1;
    CounterControl = 0;
    Counter = Counter + 1;
    Serial.print(Counter);          //Measurement for a given Value
    Serial.print(" ");
    Serial.print(float(millis())/1000); //Time in seconds
    Serial.print(" ");
    for(int i=0; i<10; i++){
//Read Sensor 1
        if (bme1Detected)
        {
            bme1Temp = bme1Temp + bme1.readTempC();
            bme1Pres = bme1Pres + (bme1.readPressure()*100);
        }
    }
}
}

```

```

else
{
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 2
if (bme2Detected)
{
  bme2Temp = bme2Temp + bme2.readTempC();
  bme2Pres = bme2Pres + (bme2.readPressure()*100);
}
else
{
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 3
if (bme3Detected)
{
  bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
  bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
}
else
{
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
}
}
//Average from the Sum obtained in the previous for() function
bme1Temp = bme1Temp/10;
bme1Pres = bme1Pres/10;
bme2Temp = bme2Temp/10;
bme2Pres = bme2Pres/10;
bme3Temp = bme3Temp/10;
bme3Pres = bme3Pres/10;
//Calibrating the system
//Sensor 1: Y = 738.15 + 0.98468*X
bme1Pres = 738.15 + (0.98468*bme1Pres);
//Sensor 2: Y = 789.24 + 0.984*X
bme2Pres = 789.24 + (0.984*bme2Pres);
//Sensor 3: Y = 633.12 + 0.98585*X
bme3Pres = 633.12 + (0.98585*bme3Pres);
//*****ORIFICE PLATE*****
//Interpolation of Z
for(int i=0; i<3; i++){
  int j = 0;
  if(Values_Z[i][j].Pres > bme1Pres){
    if (Values_Z [i-1][j].Pres == bme1Pres){
      for(int j=0; j<4; j++){
        if(Values_Z[i-1][j].Temp > bme1Temp){
          if(Values_Z [i-1][j-1].Temp == bme1Temp){ //When P and T are exactly the same as the Table

            Z = Values_Z [i-1][j-1].Z;
            i=j=100;
          }
          else{ //When P is the same but T isnt
            Z = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
            i=j=100;
          }
        }
      }
    }
  }
  else{
    for(int j=0; j<4; j++){
      if(Values_Z[i][j].Temp > bme1Temp){
        if(Values_Z [i][j-1].Temp == bme1Temp){ //When T is the same but P isnt
          Z = ((bme1Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres)*(Values_Z[i][j-1].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i][j-1].Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres))+Z_Pmin;

```

```

    i=j=100;

    }
    else{ //When both P and T are different

        Z_Pmin = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
        Z_Pmax = ((bme1Temp-Values_Z[i][j-1].Temp)*(Values_Z[i][j].Z-Values_Z[i][j-1].Z)/(Values_Z[i][j].Temp-Values_Z[i][j-1].Temp))+Values_Z[i][j-1].Z;
        Z = ((bme1Pres-Values_Z[i-1][j].Pres)*(Z_Pmax-Z_Pmin)/(Values_Z[i][j].Pres-Values_Z[i-1][j].Pres))+Z_Pmin;
        i=j=100;
    }
}
}
}
}
}
//Interpolation of u
for(int i=0; i<9; i++){
    if(Values_u[i].Temp > bme1Temp){
        if(Values_u[i-1].Temp == bme1Temp){
            u = Values_u[i-1].u;
        }
        else{
            u = ((bme1Temp-Values_u[i-1].Temp)*(Values_u[i].u-Values_u[i-1].u)/(Values_u[i].Temp-Values_u[i-1].Temp))+Values_u[i-1].u;
        }
        //Exit for() function
        break;
    }
}
//Calculations of the Velocity of air U
//The initial value of C is 0.64. That is used as estimative to calculate U
//Then, U is used to recalculate C. That process is repeated until C doesnt change anymore
DeltaPres = bme1Pres - bme2Pres;
rho = (M*bme1Pres)/(R*Z*(273.15 +bme1Temp)*1000);
epsilon = 1-(epsilon1*(DeltaPres/bme1Pres));
C = 0.734;
//Only for Standard Orifice Plates
/*
while (controlWhile3){
    CounterControl = CounterControl +1;
    Q = 1.1107 * C*E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
    U = Q/Ar;
    ReD = (U*rho*D)/u;
// C calculation
    A = pow(((19000*B)/ReD),0.8);
    C =
    (0.5961)+(0.0261*pow(B,2))-
    (0.216*pow(B,8))+0.000521*pow(((1000000*B)/ReD),0.7))+((0.188+(0.0063*A))*pow(B,3.5)*pow((1000000/ReD),0.3))+((0.043+(0.08*
    pow(2.71828483,(-10*L1)))-(0.123*pow(2.71828483,(-7*L1))))*(1-(11*A))*pow(B,4)/(1-pow(B,4)))-(0.031*(M2-
    0.8*pow(M2,1.1)))pow(B,1.3));
    //if D < 71.12 mm
    C = C + (0.011*(0.75-B)*(2.8-((D*1000)/25.4)));
    if (C-Ci>0.001 || Ci-C>0.001){
        Ci = C;
        controlWhile3 = 0;
    }
}
if(CounterControl > 300){
    controlWhile3 = 0;
    Serial.println();
    Serial.println();
    Serial.println("Problem to calculate C");
    Serial.println();
    Serial.println();
}
}
*/
Q = 1.1107 * C*E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
U = Q/Ar;
DeltaPres_BED = (bme3Pres - AtmosPres);
//Calibrating the Air Velocity
U = 0.08248 + (0.9851*U);
// Converting to Velocity at the Bed
// U = U*Ar/Ar_Bed;
//Show the results in the Serial Screen
Serial.print(bme1Temp);

```

```

Serial.print(" ");
Serial.print(bme1Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme2Temp);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme2Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme3Temp);
Serial.print(" ");
Serial.print(bme3Pres);
Serial.print(" ");
Serial.print(DeltaPres);
Serial.print(" ");
Serial.print(rho);
Serial.print(" ");
Serial.print(ReD);
Serial.print(" ");
Serial.print(U);
Serial.print(" ");
Serial.print(DeltaPres_BED);
Serial.print(" ");
Serial.println();
delay(50);
//Control to check if the user wants to stop the data aquisition
if(Serial.available()){
  command = Serial.readStringUntil('\n');
  if(command.equals("s")){
    controlWhile1 = 0;
  }
  else{
    Serial.println("Invalid command");
  }
}
//Control to check if the user wants to collect data again
while(controlWhile2){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    if(command.equals("b")){
      controlWhile2 = 0;
    }
    else{
      Serial.println("Invalid command");
    }
  }
}
}
}
}

```

Programa 3: Exibir velocidade momentânea do leito

```

#include <stdio.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include "BlueDot_BME280.h"
BlueDot_BME280 bme1; //Object for Sensor 1
BlueDot_BME280 bme2; //Object for Sensor 2
BlueDot_BME280 bme3; //Object for Sensor 3
int bme1Detected = 0; //Checks if Sensor 1 is available
int bme2Detected = 0; //Checks if Sensor 2 is available
int bme3Detected = 0; //Checks if Sensor 3 is available
int controlWhile = 1; //Controls While function for Serial commands
int controlWhile1 = 1; //Controls While function for Serial commands
int controlWhile2 = 1; //Controls While function for Serial commands
int controlWhile3 = 1; //Controls While function for Orifice Plate calculations
String command; //String used for Serial commands
int Counter = 0; //Counting the number of measurements
int CounterControl = 0; //Counts while(controlWhile3) to avoid infinite loop
double bme1Temp = 0; //Measured Temperature before Orifice plate
double bme2Temp = 0; //Measured Temperature after Orifice plate
double bme3Temp = 0; //Measured Temperature at the Fluidized bed
double bme1Pres = 0; //Measured Absolute Pressure before Orifice plate
double bme2Pres = 0; //Measured Absolute Pressure after Orifice plate
double bme3Pres = 0; //Measured Absolute Pressure at the Fluidized bed

```



```

double DeltaPres_BED = 0; //Delta Pressure of the fluidized bed (bme3Pres - atmospheric Pressure)
double AtmosPres = 0; //Atmospheric Pressure
//*****ORIFICE PLATE*****
//Variables
double Z_Pmin = 0; // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z_Pmax = 0; // Compression Factor [-] Table interpolation
double Z = 0.999732; // Compression Factor [-] (105 kPa, 35 C)
double u = 0.00001775; // Dinamic Viscosity [Pa s] (35 C)
double k = 1.41; // Isentropic Factor [-]
double epsilon = 0; // Isentropic Expansion Factor [-]
double d = 0.0099333; // Diameter of the Orifice [m]
double D = 0.049; // Diameter of the tubulation (2") [m]
double Ar = (3.14159265359*(pow(D,2)))/4; // Area of the tubulation (2") [m2]
double Ar_Bed = (3.14159265359*(pow(0.156,2)))/4; // Area of the Bed
double B = d/D; // Beta [-]
double E = 1/(pow((1-(pow(B,4))),0.5)); // E [-]
double epsilon1 = (0.41+(0.35*(pow(B,4))))/k; // Part of the epsilon that is calculated before the loop [-]
double M = 28.9625; // Molar Mass of air [g/mol]
double R = 8.314462; // Gas Constant [J/mol K]
double C = 0; // Coefficient of Discharge [-]
double Ci = 0.64; // Initial Coefficient of Discharge [-]
double L1 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L1=0
double L2 = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167) - For Corner Taps, L2=0
double M2 = 2*L2/(1-B); // Used to Calculate C (ISO 5167)
double A = 0; // Used to Calculate C (ISO 5167)
double DeltaPres = 0; // Pressure Difference [Pa]
double rho = 0; // Density of air [kg/m3]
double Q = 0; // Volumetric flow [m3/s]
double ReD = 0; // Reynolds Number for flow inside tubulation [-]
double U = 0; // Air Velocity [m/s]
//Tables for Z and u in Matrix form
typedef struct {
    double Pres;
    double Temp;
    double Z;
}Z_Table;
typedef struct {
    double Temp;
    double u;
}u_Table;
//***** Z *****
// P(Pa) T(C) T(C) T(C) T(C)
// 0 20 50 100
//
// 39 226.6 0.99977 0.99985 0.99995 1.00004
// 98 066.5 0.99941 0.99963 0.99987 1.00011
// 392 266 0.99763 0.99852 0.99948 1.00045
// P(kPa) T(C) Z
Z_Table Values_Z[3][4] = {
    {39226.6, 0, 0.99977}, // Values_Z [0][0]
    {39226.6, 20, 0.99985}, // Values_Z [0][1]
    {39226.6, 50, 0.99995}, // Values_Z [0][2]
    {39226.6, 100, 1.00004}, // Values_Z [0][3]
    {98066.5, 0, 0.99941}, // Values_Z [1][0]
    {98066.5, 20, 0.99963}, // Values_Z [1][1]
    {98066.5, 50, 0.99987}, // Values_Z [1][2]
    {98066.5, 100, 1.00011}, // Values_Z [1][3]
    {392266, 0, 0.99763}, // Values_Z [2][0]
    {392266, 20, 0.99852}, // Values_Z [2][1]
    {392266, 50, 0.99948}, // Values_Z [2][2]
    {392266, 100, 1.00045} // Values_Z [2][3]
};
//***** u *****
// T(C) cP Pa s
// 0 0.0163 0.0000163
// 10 0.0166 0.0000166
// 20 0.017 0.000017
// 30 0.0175 0.0000175
// 40 0.018 0.000018
// 50 0.0185 0.0000185
// 60 0.019 0.000019
// 70 0.0194 0.0000194
// 80 0.0198 0.0000198
// T(C) u(Pa s)
u_Table Values_u[9] = {
    {0, 0.0000163}, // Values_u [0]

```

```

        {10, 0.0000166}, // Values_u [1]
        {20, 0.0000170}, // Values_u [2]
        {30, 0.0000175}, // Values_u [3]
        {40, 0.0000180}, // Values_u [4]
        {50, 0.0000185}, // Values_u [5]
        {60, 0.0000190}, // Values_u [6]
        {70, 0.0000194}, // Values_u [7]
        {80, 0.0000198} // Values_u [8]
    };
}
/*****
INTERFACE AND THE HARDWARE SETUP
*****/
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("Pressure Measurements for a Bubbling Fluidized Bed"));
    /*****
    *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
    //Choose between Software and Hardware SPI protocol for all sensors
    //parameter.communication == 1 ----> Software SPI
    //parameter.communication == 2 ----> Hardware SPI
    bme1.parameter.communication = 1;
    bme2.parameter.communication = 1;
    bme3.parameter.communication = 1;
    /*****
    *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
    //Set the Chip Select pins for the SPI Communication.
    //Each sensor must have a different Chip Select pin.
    //Connect the Chip Select pins from the sensors to regular digital pins on the Arduino.
    //----->> CS = CSB
    bme1.parameter.SPI_cs = 5; //Chip Select Pin for Sensor 1
    bme2.parameter.SPI_cs = 6; //Chip Select Pin for Sensor 2
    bme3.parameter.SPI_cs = 7; //Chip Select Pin for Sensor 3
    /*****
    *****BASIC SETUP - READ BEFORE GOING ON!*****
    //If you are using Hardware SPI, then the MOSI, MISO and SCK pins are predefined by the Arduino Board (ICSP Header).
    //The ICSP Header looks like this:
    // ICSP
    // MISO |x x| VCC
    // SCK |x x| MOSI
    // /RESET |x x| GND
    //Connect the SDO (sensor) to MISO (Arduino).
    //Connect the SDI (sensor) to MOSI (Arduino).
    //Connect the SCK (sensor) to SCK (Arduino). This one was obvious!
    //In this case you can comment this section out.
    //But if you are using Software SPI you need to set the pins for the MOSI, MISO and SCK lines.
    //You may change those pins if you like, but remember to connect that pin to all sensors.
    //MOSI = SDA
    //MISO = SDO
    //SCK = SCL
    bme1.parameter.SPI_sck = 10; //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme2.parameter.SPI_sck = 10; //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme3.parameter.SPI_sck = 10; //The SCK signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme1.parameter.SPI_mosi = 9; //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme2.parameter.SPI_mosi = 9; //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme3.parameter.SPI_mosi = 9; //The SDA signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme1.parameter.SPI_miso = 8; //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme2.parameter.SPI_miso = 8; //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
    bme3.parameter.SPI_miso = 8; //The SDO signal must be connected to the same pin for all sensors
    /*****
    *****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
    //Now choose on which mode your device will run
    //On doubt, just leave on normal mode, that's the default value
    //0b00: In sleep mode no measurements are performed, but power consumption is at a minimum
    //0b01: In forced mode a single measured is performed and the device returns automatically to sleep mode
    //0b11: In normal mode the sensor measures continually (default value)
    bme1.parameter.sensorMode = 0b11; //Setup Sensor mode for Sensor 1
    bme2.parameter.sensorMode = 0b11; //Setup Sensor mode for Sensor 2
    bme3.parameter.sensorMode = 0b11; //Setup Sensor mode for Sensor 3
    /*****
    *****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
    //Great! Now set up the internal IIR Filter
    //The IIR (Infinite Impulse Response) filter suppresses high frequency fluctuations
    //In short, a high factor value means less noise, but measurements are also less responsive
    //You can play with these values and check the results!
    //In doubt just leave on default
    //0b000: factor 0 (filter off)

```

```

//0b001: factor 2
//0b010: factor 4
//0b011: factor 8
//0b100: factor 16 (default value)
bme1.parameter.IIRfilter = 0b100; //IIR Filter for Sensor 1
bme2.parameter.IIRfilter = 0b100; //IIR Filter for Sensor 2
bme3.parameter.IIRfilter = 0b100; //IIR Filter for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Next you'll define the oversampling factor for the humidity measurements
//Again, higher values mean less noise, but slower responses
//If you don't want to measure humidity, set the oversampling to zero
//0b000: factor 0 (Disable humidity measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.humidOversampling = 0b000; //Humidity Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Now define the oversampling factor for the temperature measurements
//You know now, higher values lead to less noise but slower measurements
//0b000: factor 0 (Disable temperature measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.tempOversampling = 0b010; //Temperature Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//Finally, define the oversampling factor for the pressure measurements
//For altitude measurements a higher factor provides more stable values
//On doubt, just leave it on default
//0b000: factor 0 (Disable pressure measurement)
//0b001: factor 1
//0b010: factor 2
//0b011: factor 4
//0b100: factor 8
//0b101: factor 16 (default value)
bme1.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 1
bme2.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 2
bme3.parameter.pressOversampling = 0b101; //Pressure Oversampling for Sensor 3
//*****
//*****ADVANCED SETUP - SAFE TO IGNORE*****
//For precise altitude measurements please put in the current pressure corrected for the sea level
//On doubt, just leave the standard pressure as default (1013.25 hPa);
bme1.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 1)
bme2.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 2)
bme3.parameter.pressureSeaLevel = 1013.25; //default value of 1013.25 hPa (Sensor 3)
//Also put in the current average temperature outside (yes, really outside!)
//For slightly less precise altitude measurements, just leave the standard temperature as default (15°C);
bme1.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme2.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme3.parameter.tempOutsideCelsius = 25; //default value of 15°C
bme1.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme2.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
bme3.parameter.tempOutsideFahrenheit = 77; //default value of 59°F
//*****
//*****ADVANCED SETUP IS OVER - LET'S CHECK THE CHIP ID!*****
// Initialize Sensor 1
if (bme1.init() != 0x58)
{
  Serial.println(F("Ops! First BME280 Sensor not found!"));
  bme1Detected = 0;
}
else
{
  Serial.println(F("First BME280 Sensor detected!"));
  bme1Detected = 1;
}

```

```

// Initialize Sensor 2
if (bme2.init() != 0x58)
{
  Serial.println(F("Ops! Second BME280 Sensor not found!"));
  bme2Detected = 0;
}
else
{
  Serial.println(F("Second BME280 Sensor detected!"));
  bme2Detected = 1;
}
// Initialize Sensor 3
if (bme3.init() != 0x58)
{
  Serial.println(F("Ops! Third BME280 Sensor not found!"));
  bme3Detected = 0;
}
else
{
  Serial.println(F("Third BME280 Sensor detected!"));
  bme3Detected = 1;
}
if ((bme1Detected == 0)&(bme2Detected == 0)&(bme3Detected == 0))
{
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println(F("Troubleshooting Guide"));
  Serial.println(F("*****"));
  Serial.println(F("1. Let's check the basics: Are the VCC and GND pins connected correctly? If the BME280 is getting really hot, then the
wires are crossed."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("2. Did you connect the Chip Select (CS) pin from each sensor to a different digital pin on the Arduino?"));
  Serial.println();
  Serial.println(F("3. Are you using Hardware SPI? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins from your Arduino are on the ICSP
header."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("4. Are you using Software SPI instead? In this case, the MOSI, MISO and SCK pins are regular digital pins chosen by
you."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("5. Did you connect the SDI pin from each sensor to the same MOSI pin from your Arduino? All sensors must share the
same MOSI pin."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("6. Did you connect the SDO pin from each BME280 sensor to the same MISO pin from your Arduino? All sensors must
share the same MISO pin."));
  Serial.println();
  Serial.println(F("7. And finally, did you connect the SCK pin from each BME280 sensor to the same SCK pin from your Arduino? Yes, all
sensors must share the same SCK pin."));
  Serial.println();
  Serial.println();

  while(1);
}
/*****
          INFORM THE USER AND MEASURE ATMOSPHERIC PRESSURE
*****/
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user...");
Serial.println("The First Data aquisition is to determine the atmospheric pressure to use it as a reference in the calculations.");
Serial.println("If you wish to begin the atmospheric measurement, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("b (begin)");
//Measure Atmospheric Pressure
while(controlWhile){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');

    if(command.equals("b")){
      controlWhile = 0;

      for(int i=0; i<10; i++){
        //Read Sensor 3
        if (bme3Detected)
        {
          bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
          bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
        }
      }
    }
  }
}

```

```

else
{
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
}
}
//Average from the Sum obtained in the previous for() function
bme3Pres = bme3Pres/10;
//Calibrating the system
//Sensor 3: Y = 633.12 + 0.98585*X
bme3Pres = 633.12 + (0.98585*bme3Pres);
AtmosPres = bme3Pres;
}
else{
  Serial.println("Invalid command");
}
}
}
Serial.println();
Serial.println("Atmospheric Pressure collected");
Serial.println();
Serial.print("Atmospheric Pressure: ");
Serial.print(AtmosPres);
Serial.println("Pa");
controlWhile = 1;
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println("In this Software version, the data collection will start after the correct command is input by the user...");
Serial.println("After the command, the data will be collected 10 times and then the software will stop, waiting for further instructions.");
Serial.println("If you wish to begin, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("b (begin)");
Serial.println("When you wish to stop the Data aquisition, send the following LETTER in the Serial Input:");
Serial.println("s (stop)");
Serial.println("Do you wish to begin Data acquisition?");
while(controlWhile){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    if(command.equals("b")){
      controlWhile = 0;
    }
    else{
      Serial.println("Invalid command");
    }
  }
}
}
}
/*****
COLLECT DATA AND DO CALCULATIONS
*****/
void loop() {
controlWhile1 = 1;
controlWhile2 = 1;
while (controlWhile1){
bme1Temp = 0;
bme2Temp = 0;
bme3Temp = 0;
bme1Pres = 0;
bme2Pres = 0;
bme3Pres = 0;
controlWhile3 = 1;
CounterControl = 0;
//Sum of 10 values of each Variable
for(int i=0; i<10; i++){
//Read Sensor 1
if (bme1Detected)
{
  bme1Temp = bme1Temp + bme1.readTempC();
  bme1Pres = bme1Pres + (bme1.readPressure()*100);
}
else
{
  Serial.print(F("Null"));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(F("Null"));
}
}
}
}

```

```

    Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 2
if (bme2Detected)
{
    bme2Temp = bme2Temp + bme2.readTempC();
    bme2Pres = bme2Pres + (bme2.readPressure()*100);
}
else
{
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
}
//Read Sensor 3
if (bme3Detected)
{
    bme3Temp = bme3Temp + bme3.readTempC();
    bme3Pres = bme3Pres + (bme3.readPressure()*100);
}
else
{
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(F("Null"));
    Serial.print(" ");
}
}
//Average from the Sum obtained in the previous for() function
bme1Temp = bme1Temp/10;
bme1Pres = bme1Pres/10;
bme2Temp = bme2Temp/10;
bme2Pres = bme2Pres/10;
bme3Temp = bme3Temp/10;
bme3Pres = bme3Pres/10;
//Calibrating the system
//Sensor 1: Y = 738.15 + 0.98468*X
bme1Pres = 738.15 + (0.98468*bme1Pres);
//Sensor 2: Y = 789.24 + 0.984*X
bme2Pres = 789.24 + (0.984*bme2Pres);
//Sensor 3: Y = 633.12 + 0.98585*X
bme3Pres = 633.12 + (0.98585*bme3Pres);
//*****ORIFICE PLATE*****
//Interpolation of Z
for(int i=0; i<3; i++){
    int j = 0;
    if(Values_Z[i][j].Pres > bme1Pres){
        if (Values_Z [i-1][j].Pres == bme1Pres){
            for(int j=0; j<4; j++){
                if(Values_Z[i-1][j].Temp > bme1Temp){
                    if(Values_Z [i-1][j-1].Temp == bme1Temp){ //When P and T are exactly the same as the Table
                        Z = Values_Z [i-1][j-1].Z;
                        i=j=100;
                    }
                    else{ //When P is the same but T isnt
                        Z = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
                        i=j=100;
                    }
                }
            }
        }
        else{
            for(int j=0; j<4; j++){
                if(Values_Z[i][j].Temp > bme1Temp){
                    if(Values_Z [i][j-1].Temp == bme1Temp){ //When T is the same but P isnt
                        Z = ((bme1Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres)*(Values_Z[i][j-1].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i][j-1].Pres-Values_Z[i-1][j-1].Pres))+Z_Pmin;
                        i=j=100;
                    }
                    else{ //When both P and T are different
                        Z_Pmin = ((bme1Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp)*(Values_Z[i-1][j].Z-Values_Z[i-1][j-1].Z)/(Values_Z[i-1][j].Temp-Values_Z[i-1][j-1].Temp))+Values_Z[i-1][j-1].Z;
                        Z_Pmax = ((bme1Temp-Values_Z[i][j-1].Temp)*(Values_Z[i][j].Z-Values_Z[i][j-1].Z)/(Values_Z[i][j].Temp-Values_Z[i][j-1].Temp))+Values_Z[i][j-1].Z;

```

```

        Z = ((bme1Pres-Values_Z[i-1][j].Pres)*(Z_Pmax-Z_Pmin)/(Values_Z[i][j].Pres-Values_Z[i-1][j].Pres))+Z_Pmin;
        i=j+100;
    }
}
}
}
}

//Interpolation of u
for(int i=0; i<9; i++){
    if(Values_u[i].Temp > bme1Temp){
        if(Values_u[i-1].Temp == bme1Temp){
            u = Values_u[i-1].u;
        }
        else{
            u = ((bme1Temp-Values_u[i-1].Temp)*(Values_u[i].u-Values_u[i-1].u)/(Values_u[i].Temp-Values_u[i-1].Temp))+Values_u[i-1].u;
        }
        //Exit for() function
        break;
    }
}
}

//Calculations of the Velocity of air U
//The initial value of C is 0.64. That is used as estimative to calculate U
//Then, U is used to recalculate C. That process is repeated until C doesnt change anymore
DeltaPres = bme1Pres - bme2Pres;
rho = (M*bme1Pres)/(R*Z*(273.15 +bme1Temp)*1000);
epsilon = 1-(epsilon1*(DeltaPres/bme1Pres));
C = 0.734;
//Only for Standard Orifice plate
/*
    while (controlWhile3){
        CounterControl = CounterControl +1;
        Q = 1.1107 * Ci*E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
        U = Q/Ar;
        ReD = (U*rho*D)/u;
        // C calculation
        A = pow(((19000*B)/ReD),0.8);
        C =
            (0.5961)+(0.0261*pow(B,2))-
            (0.216*pow(B,8))+0.000521*pow(((1000000*B)/ReD),0.7))+((0.188+(0.0063*A))*pow(B,3.5)*pow((1000000/ReD),0.3))+((0.043+(0.08*
            pow(2.71828483,(-10*L1)))-0.123*pow(2.71828483,(-7*L1))))*(1-(11*A))*((pow(B,4)/(1-pow(B,4))))-(0.031*(M2-
            (0.8*pow(M2,1.1))*pow(B,1.3)));
        //if D < 71.12 mm
        C = C + (0.011*(0.75-B)*(2.8-((D*1000)/25.4)));
        if (C-Ci>0.001 || Ci-C>0.001){
            Ci = C;
            controlWhile3 = 0;
        }
        if(CounterControl > 50){
            controlWhile3 = 0;
            Serial.println();
            Serial.println();
            Serial.println("Problem to calculate C");
            Serial.println();
            Serial.println();
        }
    }
}
*/
Q = 1.1107 * C*E*pow(B,2)*pow(D,2)*epsilon*pow((DeltaPres/rho),0.5);
U = Q/Ar;
DeltaPres_BED = (bme3Pres - AtmosPres);
//Calibrating the Air Velocity
U = 0.08248 + (0.9851*U);
// Converting to Velocity at the Bed
// U = U*Ar/Ar_Bed;
//Show the results in the Serial Screen
for (int i=0; i< 50; i++){
    Serial.println();
}
Serial.print("Temperature n1: (C)");
Serial.println(bme1Temp);
Serial.print("Pressure n1: (Pa)");
Serial.println(bme1Pres);
Serial.print("Temperature n2: (C)");
Serial.println(bme2Temp);
Serial.print("Pressure n2: (Pa)");

```

```

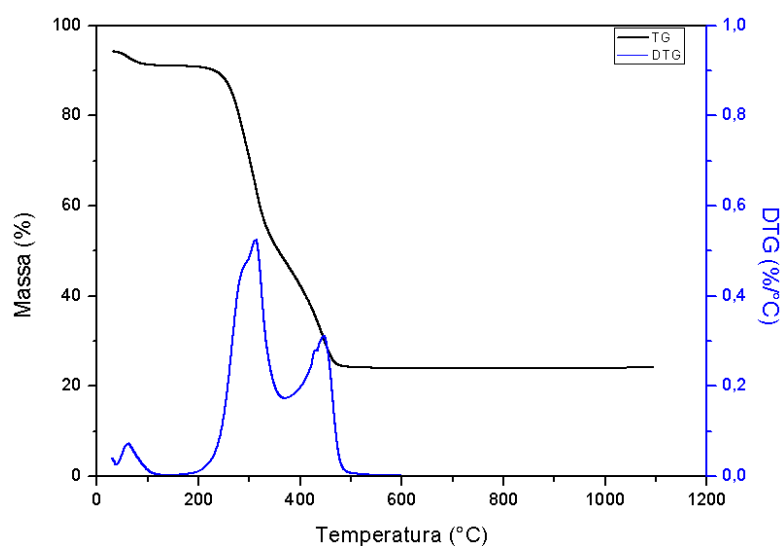
Serial.println(bme2Pres);
Serial.print("Temperature n3: (C)");
Serial.println(bme3Temp);
Serial.print("Pressure n3: (Pa)");
Serial.println(bme3Pres);
Serial.print("Delta Pressure of the Orifice Plate: (Pa)");
Serial.println(DeltaPres);
Serial.println();
Serial.print(" Air Velocity: (m/s)");
Serial.println(U);
Serial.print("Delta Pressure of the BED: (Pa)");
Serial.println(DeltaPres_BED);
Serial.println();
delay(2000);
if(Serial.available()){
  command = Serial.readStringUntil('\n');
  if(command.equals("s")){
    controlWhile1 = 0;
  }
  else{
    Serial.println("Invalid command");
  }
}
}
//Control to check if the user wants to collect data again
while(controlWhile2){
  if(Serial.available()){
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    if(command.equals("b")){
      controlWhile2 = 0;
    }
    else{
      Serial.println("Invalid command");
    }
  }
}
}
}

```


APÊNDICE B - DUPLICATAS DA CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS PARTICULADOS

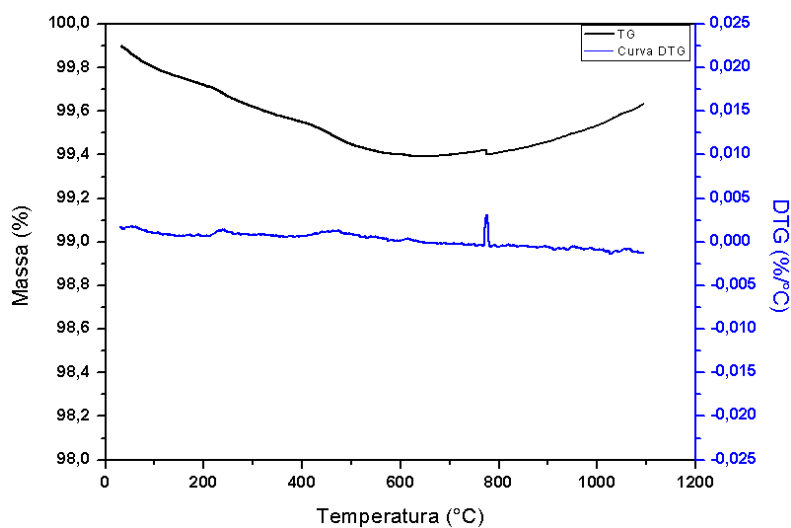
Nesse apêndice são apresentadas as duplicatas de cada um dos testes feitos para a caracterização dos materiais particulados. As escalas foram mantidas iguais apenas para o mesmo tipo de material (Casca de arroz, Areia ou Mistura de 10% Casca e 90% Areia) que foi colocado na balança termogravimétrica. Essa mudança de escala entre materiais foi feita para poder melhor avaliar os resultados específicos de cada um deles.

Figura 50 - Duplicata da casca de arroz em ar sintético



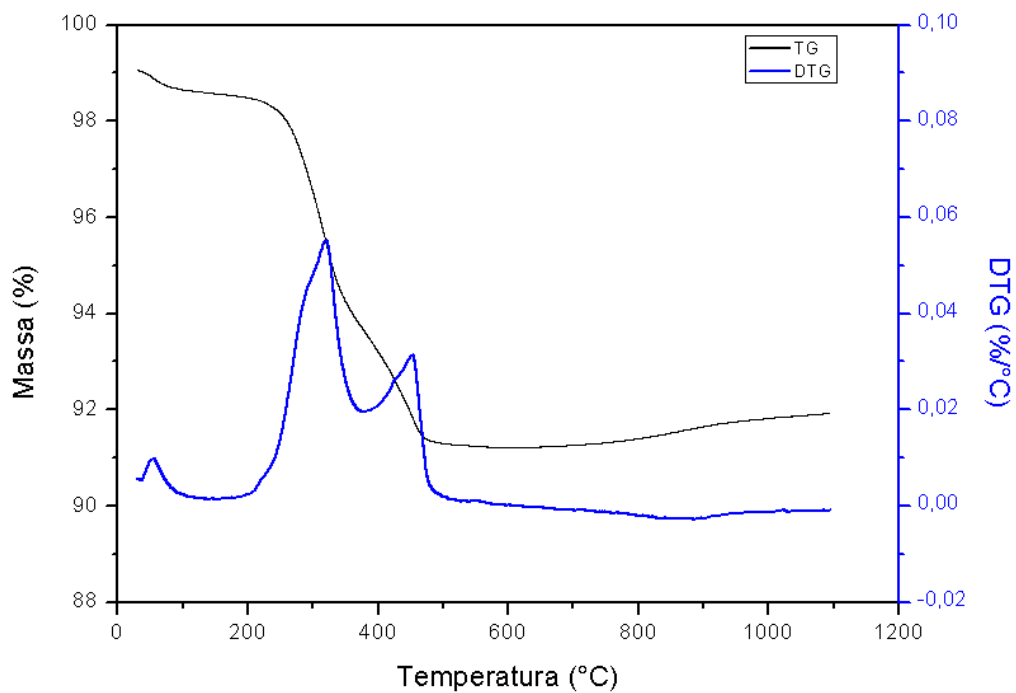
Fonte: Autoria Própria

Figura 51 - Duplicata da areia em ar sintético



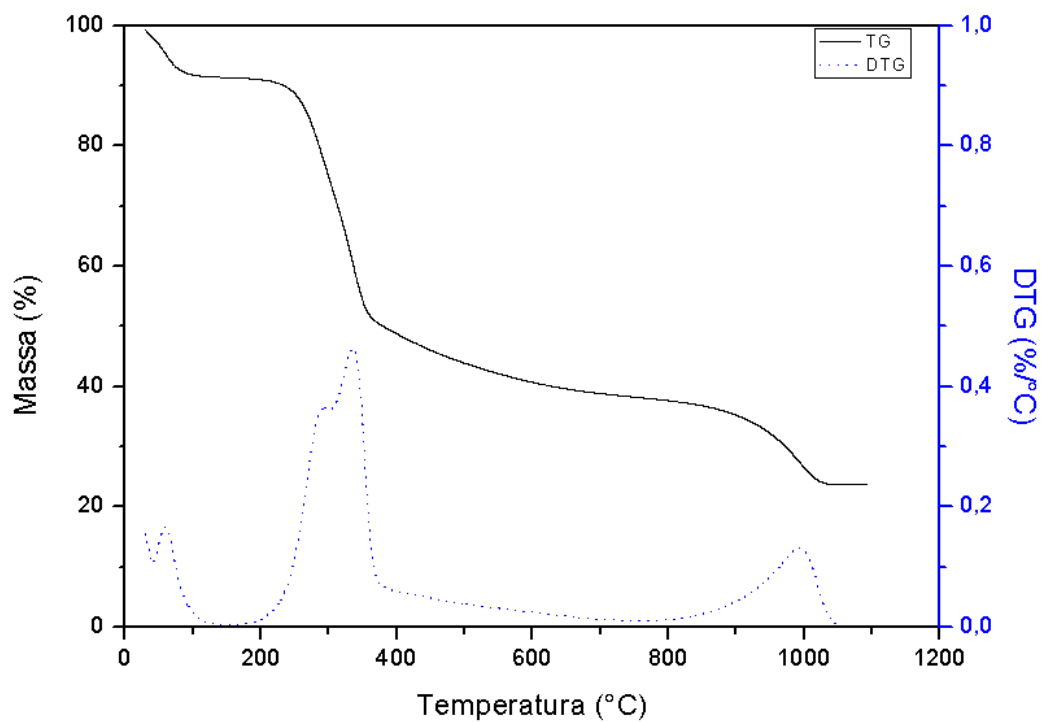
Fonte: Autoria Própria

Figura 52 - Duplicata da mistura de 10% casca de arroz e 90% areia em ar sintético



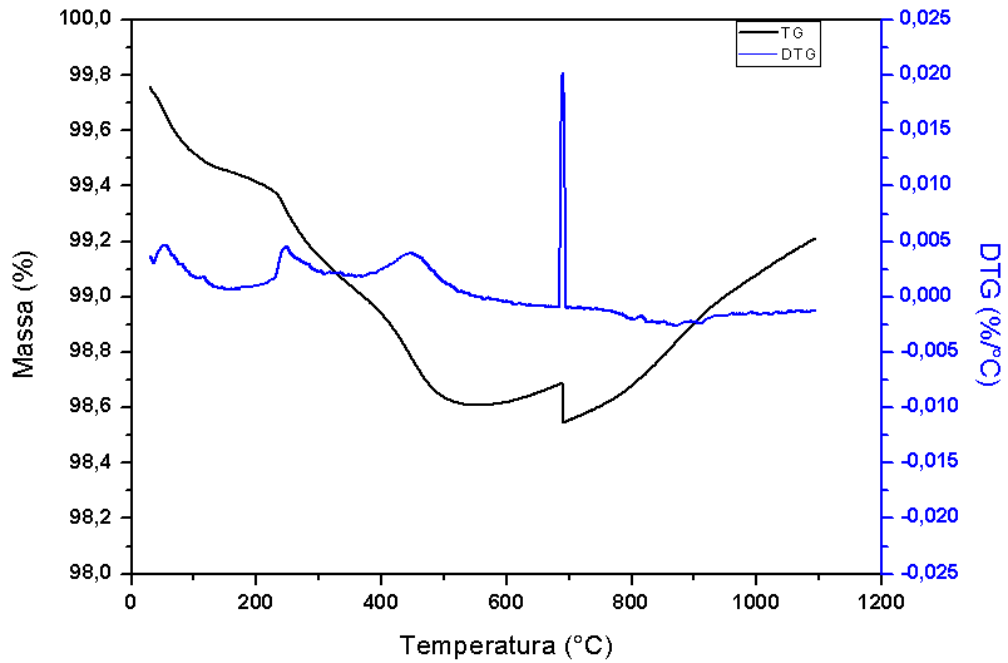
Fonte: Autoria Própria

Figura 53 - Duplicata da casca de arroz em Dióxido de Carbono



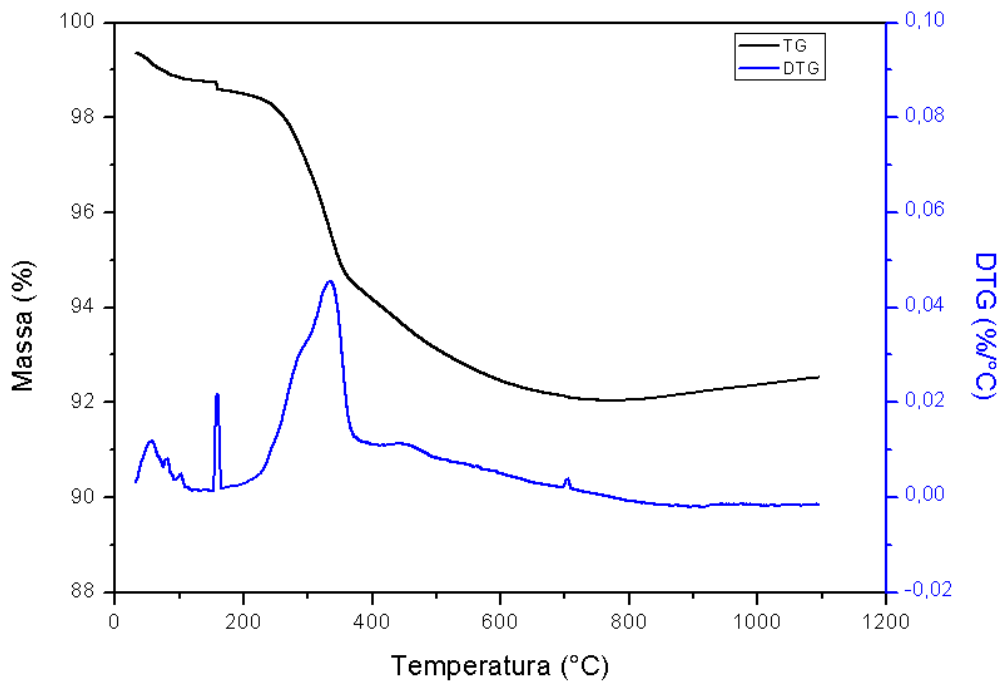
Fonte: Autoria Própria

Figura 54 - Duplicata da areia em Dióxido de Carbono



Fonte: Autoria Própria

Figura 55 - Duplicata da mistura de 10% casca de arroz e 90% areia em Dióxido de Carbono

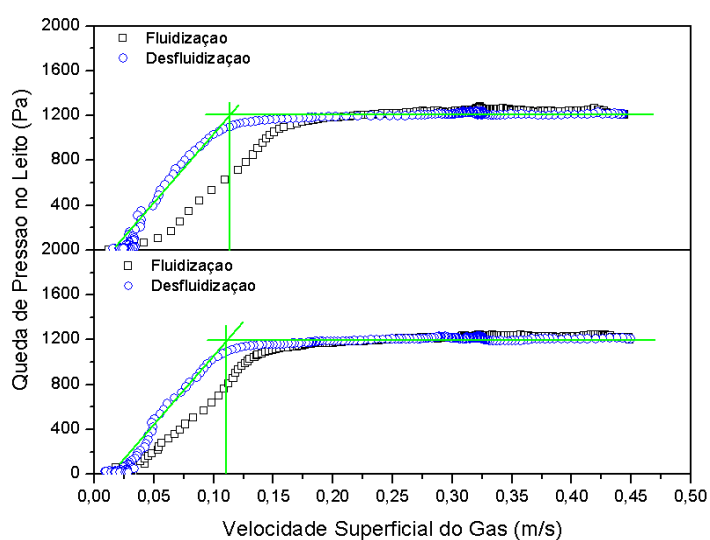


Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE C - PERFIS DE FLUIDIZAÇÃO – QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR

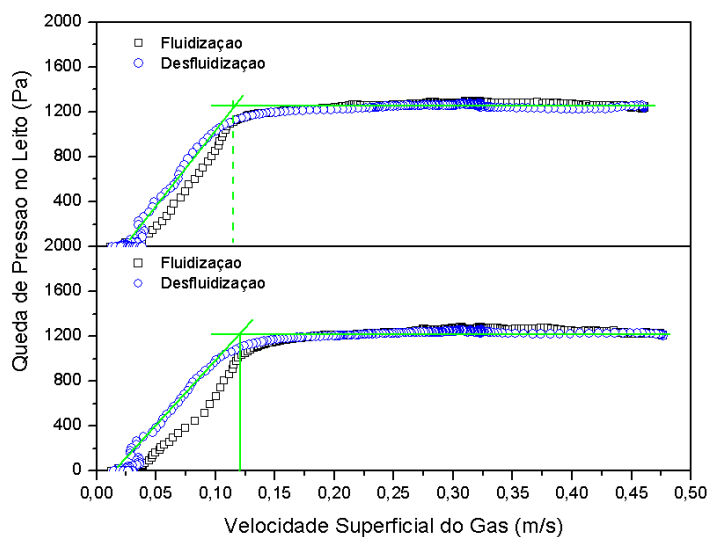
Neste apêndice são apresentados os perfis de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar para diferentes proporções de casca de arroz.

Figura 56 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 1% de Casca de arroz.



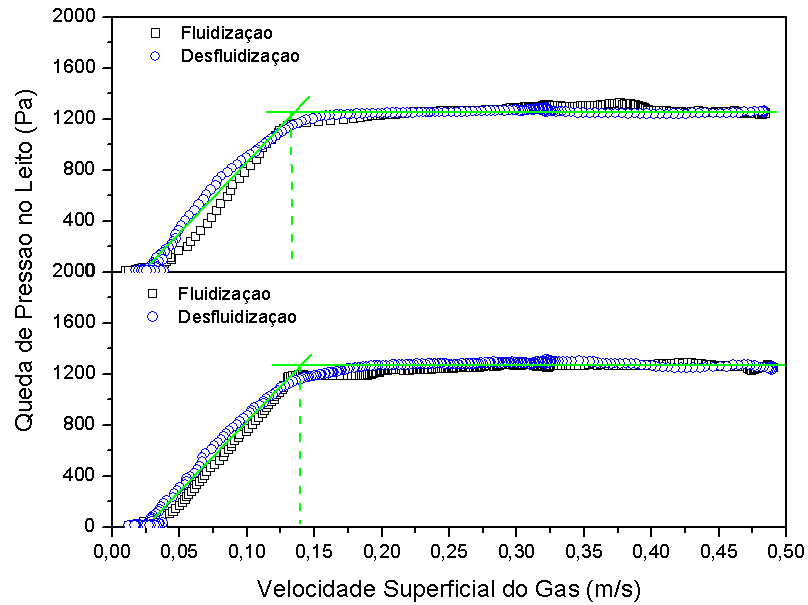
Fonte: Autoria Própria

Figura 57 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 2% de Casca de arroz.



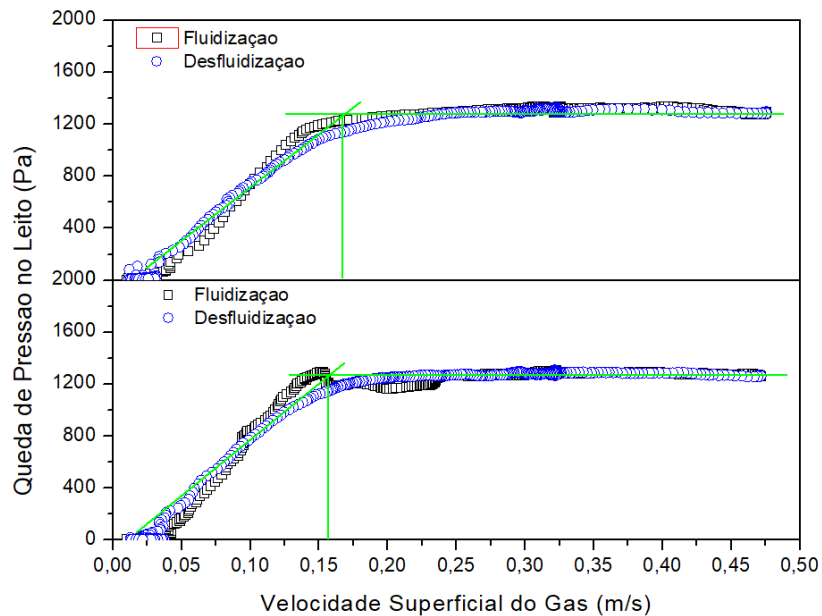
Fonte: Autoria Própria

Figura 58 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 3% de Casca de arroz.



Fonte: Autoria Própria

Figura 59 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 4% de Casca de arroz.



Fonte: Autoria Própria

Figura 60 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 5% de Casca de arroz.

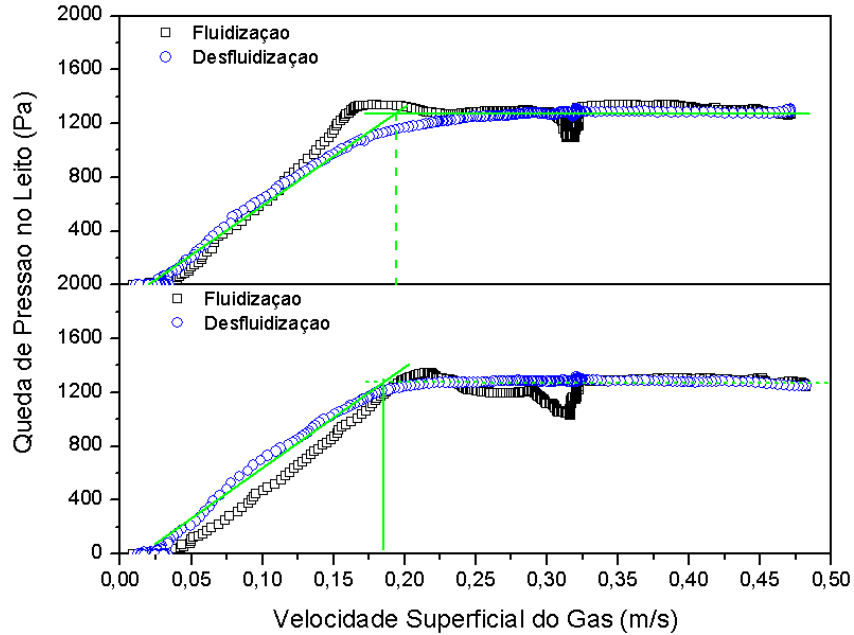


Figura 61 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 6% de Casca de arroz.

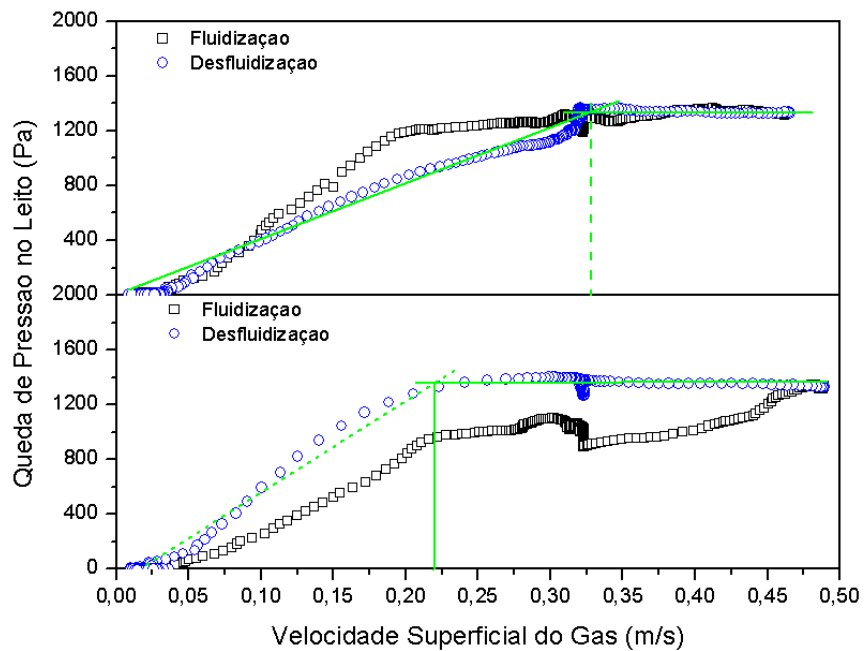


Figura 62 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 7% de Casca de arroz.

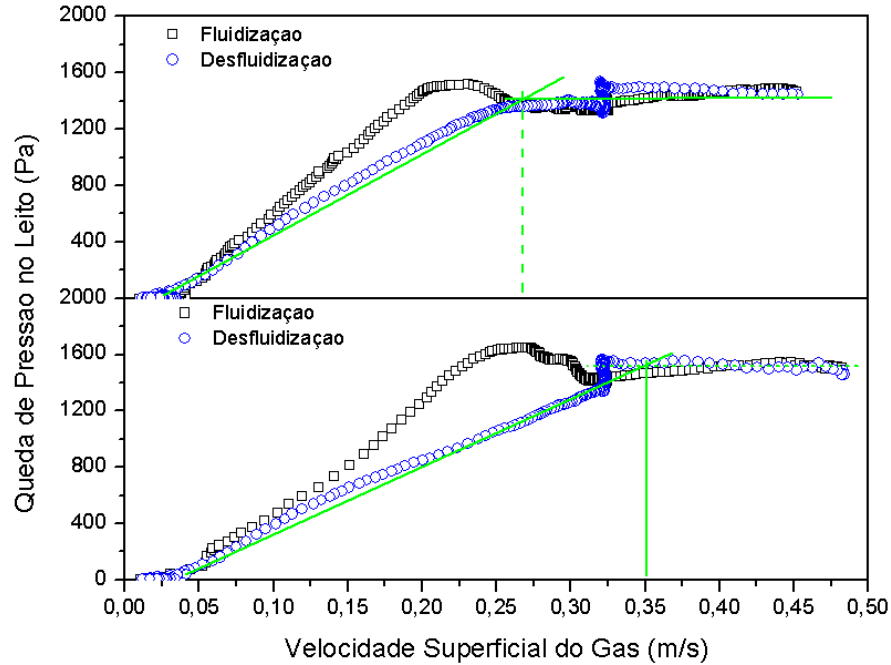


Figura 63 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 8% de Casca de arroz.

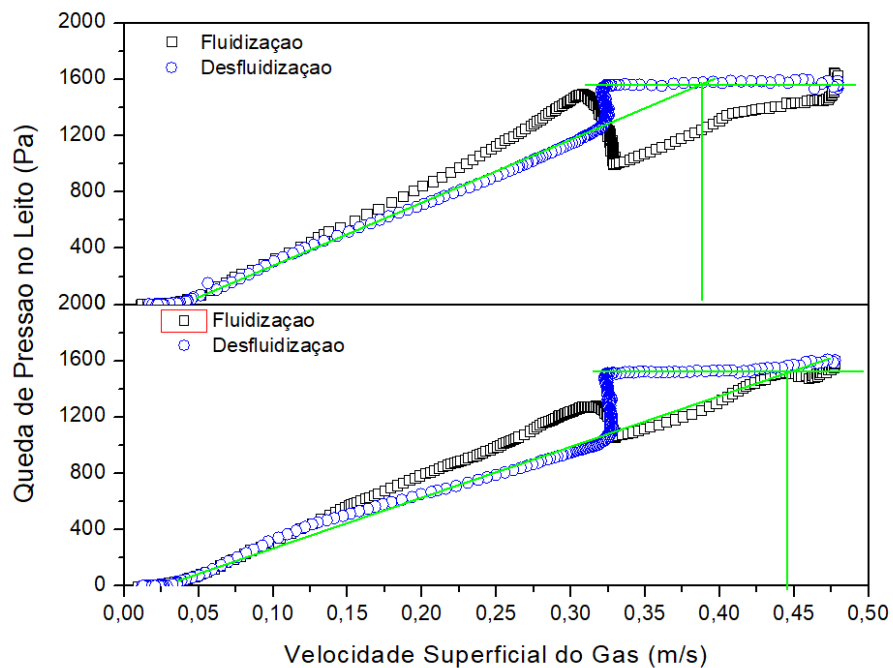
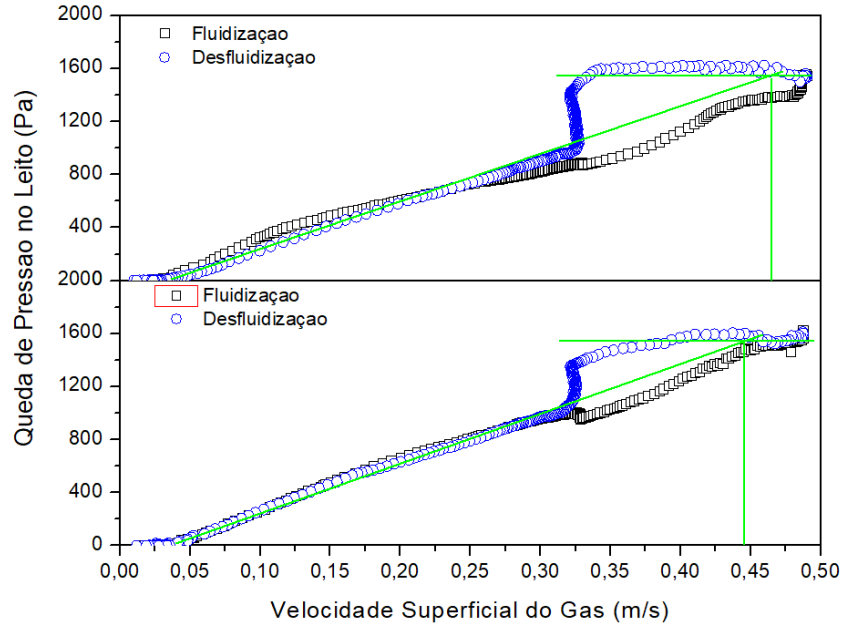
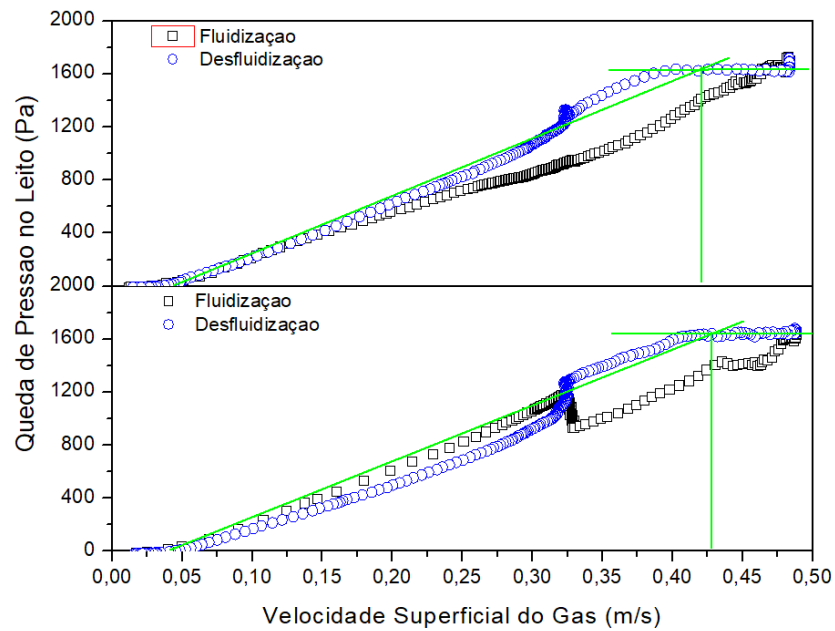


Figura 64 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 9% de Casca de arroz.



Fonte: Autoria Própria

Figura 65 – Experimento em Duplicata do perfil de queda de pressão do leito em função da velocidade do ar de fluidização para a seguinte configuração: Placa Perfurada; Areia 324 μm ; 10% de Casca de arroz.



Fonte: Autoria Própria