



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

PAULO EDUARDO RESENDE FILHO

FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS DE BAGAÇO DE LARANJA
ASSISTIDA PELO USO DE SÓLIDOS INERTES

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

2017

PAULO EDUARDO RESENDE FILHO

FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS DE BAGAÇO DE LARANJA
ASSISTIDA PELO USO DE SÓLIDOS INERTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Luanda Gimeno Marques

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

2017

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Resende Filho, Paulo Eduardo
R467f Fluidização de partículas de bagaço de laranja assistida pelo
 uso de sólidos inertes / Paulo Eduardo Resende Filho ; orientador
 Manoel Marcelo do Prado. - São Cristóvão, 2017.
 100 f. :il.

 Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade
 Federal de Sergipe, 2017.

 1. Engenharia química. 2. Biomassa. 3. Energia – Fontes
 alternativas. I. Prado, Manoel Marcelo do, orient. II. Título.

CDU 66.07

PAULO EDUARDO RESENDE FILHO

FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS DE BAGAÇO DE LARANJA
ASSISTIDA PELO USO DE SÓLIDOS INERTES

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe em 18 de dezembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

Orientador (PEQ/UFS)



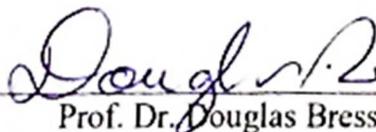
Prof.ª Dr.ª Luanda Gimeno Marques

Coorientadora (PEQ/UFS)



Prof. Dr. José Jailton Marques

(PEQ/UFS)



Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel

(DMEC/UFS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, Pai Criador de todos os seres e de todo o Universo, por esta oportunidade e pelas forças que tem me dado sempre.

Aos meus pais, Paulo Eduardo e Margarida, por todo amor e carinho de sempre. Minha existência atual não teria sentido sem ter vocês comigo. À minha madrinha e segunda mãe, Maria Nazaré, por ter me dado tanto apoio e auxílio, além dos bons conselhos e do carinho de sempre.

Às minhas irmãs, Quênnia e Laila, e ao meu primeiro sobrinho Theo, filho de Quênnia, pelos melhores momentos de alegria, amor e amizade, tanto dessa quanto de outras existências.

À minha noiva, Deisylaine Maria, que sem ela eu não teria superado muitas das dificuldades que passei. Você foi a peça principal na minha motivação em continuar e concluir. Obrigado, Amor, por tudo. Você é, com certeza, o que de melhor já existiu em minha vida.

Ao professor Dr. Manoel Marcelo do Prado e à professora Dr^a. Luanda Gimeno Marques, por terem aceitado em me orientar. Obrigado pelos conhecimentos passados, pela paciência, pela compreensão, pelos momentos de descontração e, principalmente, muito obrigado pela amizade de vocês.

Aos meus amigos da turma dos sobreviventes: George, Layane, Michel, Vinicius, José Aguiar e Raelson. Muitíssimo obrigado por todos os momentos que compartilhamos juntos. Com certeza é uma amizade que levarei por toda a vida.

Aos técnicos Diego, Rose, Danilo, Matheus, Bruno, Karina e, principalmente, ao técnico do laboratório de Fenômenos de Transporte: Marcos Fabio. Marcão, grande Mestre, te agradeço de coração por tudo, principalmente por sua amizade. Serei eternamente grato a você.

A todos que fizeram o LFTSP, como Thaís, Douglas, Karla e Renata, e aos que fazem o LFTSP, como o Leone, Albert, Fernanda, Renata, Pedro, Fernando, Raí, Daniela, Marcelo e, principalmente, à Bruno. Brunão, meu conterrâneo, muitíssimo obrigado por tudo, principalmente por sua amizade. Serei eternamente grato a você.

Aos meus amigos Diego Coelho, Enio e Leonardo, pela amizade de longos anos. O tempo e a distância não afetam a amizade verdadeira.

Aos professores do PEQ e do DEQ, pelo respeito e pelo conhecimento compartilhado.

Enfim, Deus abençoe a todos aqui citados e a todos que colaboraram e torceram para que eu lograsse êxito nessa etapa reencarnatória. Muito obrigado por fazerem parte de minha vida.

Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. (Chico Xavier)

RESUMO

A crescente demanda por energia é um forte indicador de desenvolvimento econômico e social de um país. Entretanto, para sua geração, em muitos casos, são utilizadas fontes não renováveis e de grande impacto ambiental, elevando o motivo de preocupação. Nesse panorama, como alternativa ecológica e renovável, os resíduos orgânicos advindos dos setores agroindustriais são vistos como forma alternativa de suprimento energético. O bagaço de laranja, gerado do processamento do suco da fruta, é um forte candidato à utilização como fonte de biomassa, especialmente no Brasil por ter uma das maiores produções mundiais de laranja e gerar toneladas de resíduo anualmente. Porém, para o seu aproveitamento como biomassa para geração de energia, o bagaço precisa passar por uma etapa que reduza o seu elevado teor de umidade inicial, já que o poder calorífico é influenciado diretamente por este parâmetro. Dentre as tecnologias de secagem existentes, a de leito fluidizado vem sendo bastante utilizada em processos de secagem de diferentes biomassas para fins energéticos. Para uso dessa tecnologia, há a necessidade de estudo prévio do comportamento fluidodinâmico do leito, a fim de estabelecer as condições mínimas de fluidização. Uma das características principais do leito fluidizado é promover um intenso contato entre o fluido e as partículas, intensificando, assim, as taxas de transferência de calor e massa envolvidas na secagem. Porém, leitos compostos por monopartículas de biomassa de laranja apresentam uma má qualidade de fluidização, devido à formação de caminhos preferenciais causada por fortes forças coesivas entre as partículas. Uma das formas de melhorar a fluidização de partículas de biomassa é a utilização de partículas inertes. Dentro desse contexto, o objetivo do trabalho foi estudar a fluidodinâmica de misturas binárias compostas por partículas de bagaço de laranja e partículas inertes de areia ou polietileno em leito fluidizado. Para determinação das curvas características foram utilizados transdutores de pressão diferencial piezo-resistivos MPX5010DP acoplados a um controlador programável Arduino Uno, devidamente calibrados e configurados. Um sistema de aquisição em Scilab foi desenvolvido para auxiliar na coleta e tratamento dos dados fornecidos pela plataforma. Os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos com base num planejamento fatorial 3^2 a fim de avaliar a influência da fração mássica de biomassa (5%, 10% e 15%) e do teor de umidade do bagaço (15%, 45% e 75% b.u.) sobre a vazão de ar e a queda de pressão nas condições de mínima fluidização. A massa total do leito foi fixada em 1400 g. As partículas se enquadraram no tipo D de Geldart e a fluidização foi classificada como agregativa com base no valor calculado do número de Froude. Apesar das misturas binárias com polietileno terem apresentado um maior índice de fluidização ($0,8452 \pm 0,0162$), as misturas binárias com areia de 0,93 mm como sólido inerte tiveram o menor valor médio de vazão de mínima fluidização ($45,50 \pm 7,30$) m^3/h , requerendo, portanto, um menor gasto de energia do compressor para fluidizar.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa; sólido inerte; mistura binária; leito fluidizado, bioenergia

ABSTRACT

The increasing energy demand is a strong indicator of a country's economic and social development. However, for its generation, in many cases, non-renewable sources of great environmental impact are used, raising the concern. In this scenario, as an ecological and renewable alternative, organic waste from the agro-industrial sectors is seen as an alternative form of energy supply. Orange bagasse, generated from the processing of orange juice, is a strong candidate for use as a source of biomass, especially in Brazil as it has one of the world's largest orange productions and generates tons of waste annually. However, to be used in this way, the bagasse has to go through a step that reduces its initial moisture content, since the calorific value is directly influenced by this parameter. Among the existing drying technologies, the fluidized bed has been widely used in biomass drying for energy purposes. To use this technology, it is needed previously to study the fluid dynamics of the bed, in order to establish the minimum fluidization conditions. One of the main characteristics of the fluidized bed is to promote intense contact between the fluid and the particles, thus intensifying the heat and mass transfer rates in drying. However, beds composed by monoparticles from orange biomass have poor fluidization quality, due to the channeling caused by strong cohesive interparticle forces. One way to improve the fluidization of biomass particles is to use inert particles. Thus, the objective of this work was to study the fluid dynamics of the binary mixture composed of orange bagasse particles and inert particles of sand or polyethylene in fluidized bed. To determine the characteristic curves, piezo-resistive MPX5010DP differential pressure transducers coupled with a properly calibrated and configured Arduino Uno programmable controller were used. A Scilab acquisition system was developed to assist in the collection and processing of data provided by the platform. The fluid dynamic tests were conducted based on a factorial design 3^2 , in order to evaluate the influence of the biomass mass fraction (5%, 10 % and 15%) and bagasse moisture (15%, 45% and 75%) on the air flow rate and pressure drop through the bed at the minimum fluidization conditions. The total bed mass was set at 1400 g. The particles were classified as Geldart D-type and the fluidization was classified as aggregative based on the calculated Froude number value. Although binary mixtures with polyethylene had the best average fluidization index (0.8452 ± 0.0162), binary mixtures with 0.93 mm sand as inert solid had the lowest mean minimum fluidization air flow rate ($45.50 \pm 7,30$) m^3/h , requiring thus a lower power consumption to pump the gas in the fluidized bed.

KEYWORDS: biomass; inert solid; binary mixture; fluidized bed; bionergy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características do Leito Fluidizado	22
Tabela 3.1 – Características das peneiras utilizadas na análise granulométrica.....	36
Tabela 3.2 – Classificação do leito quanto à escoabilidade	40
Tabela 3.3 – Variáveis avaliadas no estudo fluidodinâmico	42
Tabela 3.4 – Correlações para determinação da velocidade mínima de fluidização.....	47
Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica das partículas de bagaço de laranja úmido	49
Tabela 4.2 – Massas específicas real, aparente e de empacotamento das partículas de biomassa e de inertes.....	50
Tabela 4.3 – Porosidade intrapartícula, porosidade bulk e porosidade total dos leitos empacotados somente com partículas de biomassa em diferentes umidades ou somente com cada um dos sólidos inertes testados.....	51
Tabela 4.4 – Ângulo de repouso das partículas de biomassa e de inertes.	52
Tabela 4.5 – Propriedades térmicas dos inertes e do bagaço de laranja.....	53
Tabela 4.6 – Parâmetros fluidodinâmicos da mistura binária de bagaço de laranja e polietileno	56
Tabela 4.7 – Parâmetros Fluidodinâmicos da Mistura Binária de Bagaço e Areia de 0,93 mm	63
Tabela 4.8 – Parâmetros Fluidodinâmicos da Mistura Binária de Bagaço e Areia de 1,85 mm	72
Tabela 4.9 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com o polietileno.....	80
Tabela 4.10 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com a areia de 1,85 mm	80
Tabela 4.11 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com a areia de 0,93 mm	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Partes da laranja	19
Figura 2.2 – Regimes de um leito de partículas em diferentes velocidades de gás.....	23
Figura 2.3 – Regimes de fluidização para diferentes classes de partículas com o aumento da velocidade do gás	24
Figura 2.4 – Classificação de Geldart.....	24
Figura 3.1 – Partículas utilizadas para composição das misturas binárias	32
Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental.....	33
Figura 3.3 – Aparato para determinação do ângulo de talude	39
Figura 3.4 – Interface do sistema desenvolvido em Scilab para análise fluidodinâmica e secagem	43
Figura 3.5 – Exemplo da Determinação Gráfica da Velocidade Mínima de Fluidização	46
Figura 4.1 – Classificação de Geldart para as partículas de biomassa da laranja.....	52
Figura 4.2 - Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária biomassa-polietileno, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.	54
Figura 4.3 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização da mistura binária biomassa-polietileno.....	57
Figura 4.4 - Vazão de mínima fluidização em função do teor de umidade, em diferentes frações mássicas de biomassa na mistura binária com o polietileno.	58
Figura 4.5 - Vazão de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura binária com o polietileno, para diferentes teores de umidade do bagaço de laranja	59
Figura 4.6 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão de mínima de fluidização da mistura binária biomassa-polietileno	59
Figura 4.7 - Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária contendo biomassa e areia de 0,93 mm, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.	62

Figura 4.8 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização da mistura binária com areia de 0,93 mm	64
Figura 4.9 - Vazão de mínima fluidização em função do teor de umidade, em diferentes frações mássicas de biomassa na mistura binária com a areia de 0,93 mm.....	65
Figura 4.10 - Vazão de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura binária com a areia de 0,93 mm, para diferentes teores de umidade do bagaço de laranja	66
Figura 4.11 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão mínima de fluidização da mistura binária com areia 0,93 mm.....	67
Figura 4.12 - Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária contendo biomassa e areia de 1,85 mm, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.	71
Figura 4.13 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização na mistura binária com areia de 1,85 mm	73
Figura 4.14 – Avaliação dos efeitos da variação da fração mássica do bagaço na mistura sobre a vazão de mínima fluidização da mistura com a areia de 1,85 mm.....	74
Figura 4.15 – Avaliação dos efeitos da variação do teor de umidade inicial sobre a vazão de mínima fluidização da mistura com a areia de 1,85 mm.....	74
Figura 4.16 - Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão mínima de fluidização na mistura binária com areia de 1,85 mm	76
Figura 4.17 – Segregação nas misturas binárias do bagaço de laranja com (a) polietileno, (b) areia de 1,85 mm e (c) areia de 0,93 mm	82
Figura 4.18 – Caminhos preferenciais nas misturas binárias do bagaço de laranja areia de 1,85 mm.....	83

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal do leito	[L ²]
Ar	Número de Arquimedes	[-]
cp	Calor específico	[EM ⁻¹ θ ⁻¹]
d _b	Diâmetro médio das partículas de biomassa	[L]
d _i	Diâmetro médio das partículas de inerte	[L]
d _{mist}	Diâmetro médio efetivo das partículas na mistura binária	[L]
d _{mp}	Diâmetro médio de peneira das partículas	[L]
d _{sp}	Diâmetro médio de Sauter	[L]
Fr	Número de Froude	[-]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]
IF	Índice de fluidização	[-]
k	Condutividade térmica do sólido	[ET ⁻¹ L ⁻¹ θ ⁻¹]
L/D	Razão entre a altura e o diâmetro do leito	[-]
m _L	Massa do leito de partículas	[M]
PCI	Poder calorífico inferior	[ET ⁻¹]
PCS	Poder calorífico superior	[ET ⁻¹]
Q _{mf}	Vazão do ar na condição de mínima fluidização	[L ³ T ⁻¹]
Re _{mf}	Número de Reynolds na condição de mínima fluidização	[-]
w _b	Fração mássica de biomassa	[-]
w _i	Fração mássica de inerte	[-]
X	Teor de umidade em base úmida	[M _{água} M _{sól.úmido} ⁻¹]

Símbolos Gregos

α	Ângulo de repouso estático das partículas	[°]
ΔP	Queda de pressão na condição de mínima fluidização	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ε	Porosidade	[-]
ρ _b	Densidade aparente das partículas de biomassa	[ML ⁻³]
ρ _e	Densidade de empacotamento do leito	[ML ⁻³]
ρ _g	Densidade do ar de fluidização	[ML ⁻³]
ρ _i	Densidade aparente das partículas de inerte	[ML ⁻³]
ρ _{mist}	Densidade média efetiva das partículas da mistura	[ML ⁻³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
	2.1 Biomassa da laranja.....	17
	2.2 Fluidização em leito fluidizado.....	21
	2.3 Fluidização de misturas binárias.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
	3.1 Materiais.....	32
	3.2 Aparato Experimental.....	33
	3.3 Metodologia Experimental.....	36
	3.3.1 Preparação da biomassa.....	36
	3.3.2 Caracterização física do material.....	36
	3.3.3 Análise Fluidodinâmica.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
	4.1 Caracterização da Matéria-Prima.....	49
	4.1.1 Distribuição granulométrica das partículas da biomassa.....	49
	4.1.2 Umidade inicial da biomassa.....	50
	4.1.3 Massa específica real e aparente das partículas.....	50
	4.1.4 Ângulo de repouso.....	51
	4.1.5 Classificação de Geldart.....	52
	4.1.6 Poder Calorífico.....	53
	4.1.7 Propriedades térmicas dos inertes e do bagaço de laranja.....	53
	4.2 Análise Fluidodinâmica.....	54
	4.2.1 Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com o polietileno.....	54

4.2.2	Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com a areia de 0,93 mm.....	62
4.2.3	Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com a areia de 1,85 mm.....	70
4.2.4	Análise comparativa das misturas binárias com os diferentes inertes.....	77
4.3	Comparativo com correlações empíricas.....	79
4.4	Efeito da segregação.....	82
5	CONCLUSÃO.....	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A	98
	APÊNDICE B.....	100

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, a matriz energética mundial pode não suprir a demanda futura de energia. A busca por fontes alternativas e renováveis de energia cresce a cada dia, diante das preocupações com o contínuo aumento dos custos com a energia, com o aquecimento global e com o esgotamento dos combustíveis fósseis (SILVA e SILVA, 2016).

Nesse panorama, os resíduos orgânicos provenientes dos setores agroindustriais e alimentícios, por conta de sua elevada produção mundial, aparecem como uma alternativa ecológica e renovável de suprimento energético. A biomassa é uma das mais importantes fontes renováveis de energia primária. A presença de átomos de oxigênio em sua composição química a difere, por exemplo, dos combustíveis fósseis, mesmo sendo ela um hidrocarboneto como o petróleo. Isto faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar no processo de combustão, o que resulta em baixas emissões de poluentes (RENDEIRO *et al.*, 2008). A biomassa mostra grande potencial como fonte sustentável de matéria prima para a combustão e co-combustão com carvão, produção de gás de síntese por gaseificação, produção de bio-óleo por pirólise e produção de bioetanol por fermentação (VERMA *et al.*, 2017).

De acordo com Rendeiro *et al.* (2008), na maioria das agroindústrias são produzidos resíduos com valor energético que podem contribuir para reduzir a dependência de energia para geração de calor, de vapor ou de eletricidade. Os autores ressaltam que a agroindústria da laranja, no Brasil, está entre os setores que geram resíduos em larga escala e com elevada possibilidade de aproveitamento como biomassa para geração de energia.

Atualmente, o principal direcionamento do bagaço de laranja é para ração animal, porém já existem alguns trabalhos na literatura relatando seu potencial uso em outras aplicações, como na eliminação de alguns corantes provenientes de efluentes da indústria têxtil (FIORENTIN *et al.*, 2010), como carvão ativado (FERNANDEZ *et al.*, 2014), na adsorção de compostos fenólicos em solução aquosa e metais pesados (SANTOS *et al.* 2015) e como biocatalisador para a hidrólise de ésteres (SILVA *et al.*, 2016).

O bagaço gerado no processamento da laranja para a fabricação do suco representa de 40 a 60% do peso total da fruta (ZANELLA e TARANTO, 2015). No entanto, o seu teor de umidade é elevado, entre 75 e 82% b.u., o que limita seu reaproveitamento como combustível alternativo, devido às dificuldades de armazenamento e ao menor poder calorífico por ele apresentado (CAVICHIOLO, 2010). Ademais, um alto teor de umidade na biomassa reduz a

temperatura de combustão, causando combustão incompleta e produtos de reação indesejáveis, aumentando a emissão de gases poluentes (LIU *et al.*, 2017).

A secagem é, portanto, uma etapa essencial nas tecnologias de conversão térmica da biomassa proveniente do bagaço de laranja, atuando como pré-tratamento para os processos de pirólise, gaseificação e combustão, e para preservar a biomassa em períodos relativamente longos de armazenamento.

A tecnologia de leito fluidizado aparece como uma alternativa promissora tanto para a secagem como para os processos de conversão de energia das partículas de biomassa provenientes do bagaço de laranja. A tecnologia, além de ser de fácil operação, automação e manutenção, promove, através de um movimento aleatório, uma rápida mistura e um contato intenso entre o fluido e as partículas e, como consequência, entre as próprias partículas, o que acarreta em altas taxas de transferência de calor e massa. Além disso, ela também promove uma uniformidade quanto à distribuição de temperatura do meio e permite que uma alta capacidade de material seja processada, o que torna possível uma ampliação de escala. Essas características supracitadas são as principais vantagens pertinentes à tecnologia de leito fluidizado (LAW e MUJUMDAR, 2015).

A aplicação da técnica de leito fluidizado para a secagem (JIA *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; CARVALHO, 2016; POLANCO *et al.*, 2013; YUN *et al.*, 2013; PUSPASARI *et al.*, 2012; MEZIANE, 2011), bem como para os processos de combustão, pirólise e gaseificação de biomassa (MORIN *et al.*, 2018; SALATINO e SOLIMENI, 2017; GUO e ZHONG, 2017; NEVES *et al.*, 2017; ISMAIL *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017) vem sendo, nos últimos anos, amplamente investigada.

Tendo em vista a aplicação de um secador de leito fluidizado para a secagem de bagaço de laranja, no trabalho de Gomes et al. (2016) foram investigadas as características fluidodinâmicas de partículas de bagaço de diferentes diâmetros, com diferentes cargas de material alimentado ao leito. As partículas provenientes do bagaço de laranja, devido ao seu alto teor de umidade, apresentaram baixa qualidade de fluidização, a qual foi precedida pela formação de canais preferenciais. Altas vazões foram requeridas para desfazer tais canais e promover uma fluidização do tipo agregativa das partículas no leito. Uma fluidização inadequada leva a uma baixa eficiência do processo de secagem, devido às baixas taxas de transferência de calor e massa, provocadas por um baixo contato gás-sólido e a uma distribuição não uniforme de temperatura.

Para materiais de difícil fluidização, sistemas facilitadores tais como: vibração do leito, agitação do leito e uso de sólidos inertes, vêm sendo amplamente empregados. Nesses sistemas,

segundo Moreno *et al.* (2016), o uso de sólidos inertes é a alternativa que menos aumenta o custo do processo. Apesar de misturas binárias compostas por biomassa e sólidos inertes apresentarem uma fluidização mais estável, a fluidodinâmica de tais sistemas é complexa, com características bem distintas dos leitos formados por monopartículas.

Há, na literatura, uma carência de informações sobre as características fluidodinâmicas necessárias para projetar e operar um leito fluidizado com partículas de bagaço de laranja e de sólidos inertes, visando sua aplicação nos processos de secagem e de conversão termoquímica da biomassa.

Logo, o estudo do comportamento fluidodinâmico de misturas binárias de partículas de bagaço de laranja e de inertes em leito fluidizado é essencial para a obtenção de parâmetros de operação, tais como: queda de pressão máxima, queda de pressão no leito e velocidade do ar nas condições de mínima fluidização, os quais são necessários para determinar a menor vazão de ar capaz de fluidizar o sistema e, por conseguinte, a mínima energia a ser fornecida pelo compressor. Esses parâmetros são de fundamental importância para especificar as condições operacionais ótimas para os processos de secagem e de conversão termoquímica em leito fluidizado.

Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho foi estudar a fluidodinâmica de misturas binárias compostas por partículas de bagaço de laranja e de sólidos inertes em leito fluidizado convencional.

Para atingir o objetivo geral descrito, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física das partículas de biomassa provenientes do bagaço de laranja e das partículas de sólidos inertes;
- Implantar um aparato supervisorio utilizando uma plataforma de baixo custo e desenvolver um sistema a fim de auxiliar na coleta dos dados de queda de pressão no leito e de vazão volumétrica do ar de fluidização;
- Avaliar como os parâmetros de fluidização das misturas binárias são influenciados pelo tipo de inerte, pela fração mássica de biomassa na mistura e pela umidade inicial do bagaço de laranja.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Inicialmente, esta revisão da literatura aborda as principais informações da laranja quanto à sua produção de resíduos orgânicos nas indústrias de processamento de suco, bem como informações importantes que permitam compreender as particularidades do material que podem influenciar o comportamento quando submetidas ao processo de fluidização e secagem. Além disso, são apresentados também alguns trabalhos que agregam valor ao seu uso, tanto no aspecto econômico quanto no aspecto ambiental.

Logo após, são apresentados alguns trabalhos voltados à fluidização de leitos compostos por monopartículas de biomassa bem como da necessidade de se utilizar meios facilitadores para melhorarem a qualidade da fluidização, em alguns casos, quando são utilizadas biomassas úmidas.

2.1 Biomassa da laranja

O termo Biomassa refere-se a todo resíduo sólido gerado após o processamento de um determinado material orgânico (MEIRELLES, 1984). A agroindústria e a indústria de alimentos, no setor de frutas principalmente, geram quantidades consideráveis de resíduos geralmente destinados à reciclagem, incineração ou depositados em aterro sanitário (AGUIAR *et al.*, 2008). Entretanto, estudos têm sido realizados com o intuito de agregar mais valor a esses resíduos.

A biomassa possui, em sua composição química, átomos de oxigênio, o que a faz diferir dos combustíveis fósseis, mesmo sendo ela um hidrocarboneto como o petróleo. A presença desses átomos de oxigênio em sua composição faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar no processo de queima, o que leva, como consequência, a ter menos emissões de poluentes (RENDEIRO *et al.*, 2008).

Segundo Kok e Özgür (2013), utilizar esses resíduos pode ser uma forma de complementar a capacidade de geração e produção de energia elétrica, o que é um ponto positivo por ser uma alternativa sustentável, tornando a biomassa uma fonte de energia alternativa e renovável.

Além disso, nos últimos tempos, com as tecnologias de conversão de biomassa, como a pirólise e gaseificação, por exemplo, é possível também produzir e utilizar a bioenergia útil da biomassa como biocombustíveis (biodiesel e álcool etanol), biogás (resíduos agrícolas ou

urbanos), carvão vegetal ou mesmo como *brickets*, que são blocos aglomerados de resíduos vegetais para serem queimados e aproveitados como energia térmica em geradores a vapor (HUANG *et al.*, 2011; SILVA e SILVA, 2016; MIRAN *et al.*, 2016).

Com isso, há, então, um indicativo de um campo de pesquisas promissor. Segundo Santos *et al.* (2015), há diversos trabalhos publicados na literatura sobre a utilização de biomassas como fonte de energia, porém, pouco se tem publicado e estudado a respeito dos derivados de frutas cítricas, em especial dos resíduos gerados do processo de fabricação de suco de laranja, que é o foco deste trabalho.

A citricultura, quanto à produção de sucos e derivados, tem expandido ao longo dos anos (SILVA *et al.*, 2016). Das frutas cítricas existentes, a laranja é a fruta mais cultivada no mundo e, em 2010, sua produção foi de mais de 68 milhões de toneladas. Países como Estados Unidos, China e Brasil, sendo este o maior produtor de laranja do mundo atualmente, tem produção anual superior a 2 milhões de toneladas e, juntamente com a Índia, México, Espanha, Egito e Itália, cobrem mais de 60% da produção mundial (CALABRÒ *et al.*, 2016).

A laranja é consumida tanto no modo natural (descascada) quanto na forma, por exemplo, de doces e sucos (MIRAN *et al.*, 2016; CALABRÒ *et al.*, 2016), sendo este último o seu principal produto e o mais apreciado (FIORENTIN *et al.*, 2012), o que leva a fruta a desempenhar um papel importante na gastronomia e nutrição tanto nacional quanto internacional (BARBOSA *et al.*, 2015).

A laranja é uma fruta com alto teor de água, proteínas, açúcares, fibras, minerais e vitaminas, como a vitamina C (57 mg por 100 mL) e caroteno (120 mg por 100 mL), sendo este o responsável por sua coloração típica (BARBOSA *et al.*, 2015).

Quando as laranjas são processadas para se obter o suco, uma grande quantidade de resíduo é gerada, o qual é composto por resíduos líquidos (“água amarela”), poupa úmida, cascas e sementes (AGUIAR *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2015; ZANELLA e TARANTO, 2015), o que equivale entre 40 e 60% do peso total da fruta (ZANELLA e TARANTO, 2015). Isso significa que, em 2010, por exemplo, segundo dados informados por Calabrò *et al.* (2016), foi gerado cerca de 25-30 milhões de toneladas de resíduo de bagaço de laranja.

A Figura 2.1 mostra a estrutura física da laranja, sendo constituída, em sua maior parte, pelo endocarpo, epicarpo e mesocarpo.

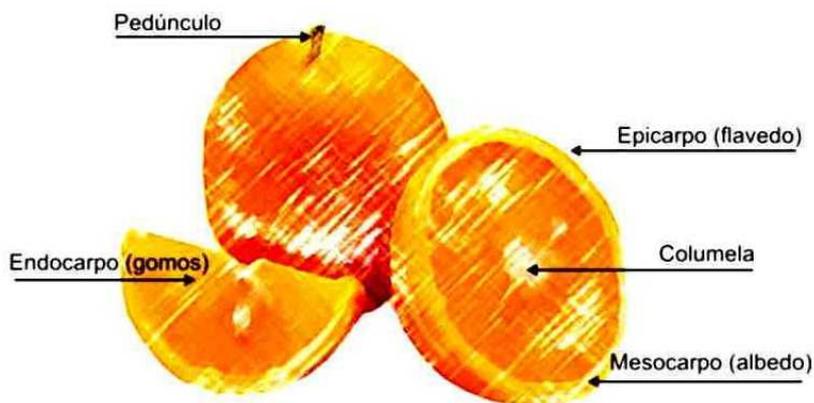


Figura 2.1 – Partes da laranja

Fonte: GESTÃO NO CAMPO, 2016

Se descartado de forma inadequada, esses resíduos podem causar grandes impactos ambientais, como a contaminação do solo e dos lençóis freáticos (MARTÍN *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2015). Por isso, a reutilização mais comum do bagaço da laranja, após a secagem em silos, é como ração para alimentação de animais (LIMA, 2001).

Há na literatura algumas pesquisas que, com o intuito de estudar seu potencial e agregar mais valor ao bagaço de laranja, comprovaram que o mesmo pode ser utilizado para outros fins e cujos resultados foram satisfatórios. Sua utilidade vai desde a obtenção de subprodutos com valor comercial, como, por exemplo, polpa cítrica, óleos essenciais, pectina e flavonoides, que conferem aos seus extratos propriedades antimicrobianas, anticancerígenas, anti-inflamatórias e antioxidantes, até a produção de fertilizantes ou adubo, enzimas industriais, proteínas de células vivas e absorventes de poluentes no tratamento de efluentes (MARTÍN *et al.*, 2010; M'HIRI *et al.*, 2015; MANTZOURIDOU *et al.*, 2015; ZANELLA e TARANTO, 2015; MIRAN *et al.*, 2016).

Montanher e Rolleberg (2010) estudaram a utilização da biomassa de bagaço de laranja *in natura* e modificada com solução de NaOH no tratamento de quatro tipos de efluentes industriais contendo íons metálicos: efluentes de indústria de produtos termoacústicos, de indústria de chapas metálicas, de galvanoplastia e de baterias automotivas. Inicialmente, o bagaço foi seco ao sol e triturado. O diâmetro médio da partícula utilizada foi 0,425 mm e, em seguida, posto em uma coluna, que foi preenchida com 3 gramas de bagaço. Essa etapa foi realizada tanto para o bagaço *in natura* quanto para o bagaço modificado. Os autores concluíram que o bagaço modificado apresentou maior redução da concentração dos íons metálicos. Além disso, concluíram que “(...) a eficiência do tratamento depende muito da matriz

do efluente e, principalmente, do pH.”. Com isso, uma análise prévia do pH do efluente se faz necessário, pois a faixa de pH ótima encontrada foi entre 4 e 7.

Fiorentin *et al.* (2010) estudaram a utilização do bagaço de laranja com uma alternativa para a remoção do corante reativo azul 5G a partir de uma solução aquosa e concluíram que o resíduo possui uma significativa capacidade de adsorver o corante. Apesar de terem utilizado partículas com diâmetro médio de 0,170 milímetros e informado que as melhores condições de adsorção foram em meio ácido (pH = 2) e a uma temperatura de 42°C, os autores afirmaram que os valores de pH e temperatura não influenciaram significativamente na adsorção.

Ströher *et al.* (2012) utilizaram o bagaço de laranja no tratamento de efluente têxtil proveniente da lavagem de jeans e, corroborando com Fiorentin *et al.* (2010), concluíram que, de fato, o bagaço apresenta grande capacidade de adsorção dos compostos poluentes, porém, eles afirmaram que o efluente deve ser previamente tratado, pois os testes com o efluente bruto não foram efetivos quanto à adsorção pelas partículas sólidas.

Fernandez *et al.* (2014) desenvolveram carvão ativado a partir da casca de laranja por ativação ácida de H_3PO_4 para remoção de azul de metileno (MB) e rodamina B (RhB), o que se mostrou efetivo nos resultados, com rápida cinética de adsorção de ambos os corantes e com possibilidade de substituição do carbono ativado no tratamento de efluentes com a presença desses poluentes.

Santos *et al.* (2015) estudaram a reutilização dos resíduos da casca de laranja para produção de biocombustível sólido a partir da pirólise e também como material bioissorvente de metais pesados. Os metais avaliados foram o chumbo, cobre, níquel, cádmio, zinco e alumínio, sendo que o primeiro foi o elemento que o bioissorvente mais teve afinidade e os dois últimos foram os de menor preferência pelo bioissorvente.

Cano *et al.* (2016) estudaram a obtenção de bioissorventes a partir da casca de laranja pelo método da queda de pressão instantânea controlada (DIC) com uma subsequente modificação química para remoção por adsorção de fenol e cobre em solução.

Silva *et al.* (2016) estudaram o desenvolvimento de biocatalisador da casca de diferentes tipos de laranja e avaliaram seu potencial para a hidrólise de ésteres, porém, apesar de terem alguns resultados, os autores informaram que os estudos ainda estão em progresso com objetivo de melhorar a eficiência do processo, avaliando a influência da temperatura e de outros parâmetros.

Miran *et al.* (2016) estudaram a conversão da biomassa da casca da laranja para produção de bioeletricidade utilizando células microbianas a combustível. Essas células são uma tecnologia alternativa renovável que é utilizada para capturar bioenergia (eletricidade) a

partir de fontes de carbono, através de microrganismos biocatalisadores. Segundo os autores, foi possível obter a bioenergia da casca da laranja sem qualquer tratamento químico prévio ou adição de mediadores. Os autores afirmaram que a tecnologia pode ser utilizada com outros subprodutos agrícolas, porém, mesmo tendo sucesso na geração de bioeletricidade, precisa ser aperfeiçoada tanto no custo quanto na eficiência em termos de quantidade de energia gerada.

Em geral, o bagaço de laranja apresenta teor de umidade entre 75 e 82% b.u. (GOMES *et al.*, 2016). Por isso, segundo Meirelles (1984) e Cavichiolo (2010), para que a bioenergia desse resíduo possa ser utilizada com maior efetividade, é imprescindível que o bagaço passe por uma etapa precípua de secagem, pois quanto maior o teor de umidade do material, menor será o potencial de queima do mesmo, por não ser possível a combustão completa, tendo como consequência a diminuição do poder calorífico, o que prejudica a sua reutilização como forma de energia alternativa.

Tendo em vista a aplicação de um secador de leito fluidizado para a secagem de bagaço de laranja, é preciso que, primeiramente, uma análise fluidodinâmica seja realizada, para, então, poder secar o material e avaliar seu potencial energético.

2.2 Fluidização em leito fluidizado

Devido ao movimento aleatório e à rápida mistura das partículas no leito, a fluidização promove altas taxas de transferência de calor e massa, pois esse movimento turbulento proporciona um contato intenso entre o fluido e as partículas e também, como consequência, entre as próprias partículas, além de permitir um tempo relativamente pequeno de operação, em relação a outros tipos de secadores, e uma alta eficiência energética (SRINIVASAKANNAN e BALASUBRAMANIAN, 2008; TREGAMBI *et al.*, 2016).

Algumas características do leito fluidizado, reportadas por Law e Mujumdar (2015), são listadas na Tabela 2.1.

Além da tecnologia ser de fácil operação, automação e manutenção, ela também promove uma uniformidade quanto à distribuição de temperatura no meio e permite que uma alta capacidade de material seja processada, o que torna possível uma ampliação de escala. Essas características supracitadas são as principais vantagens pertinentes à tecnologia de leito fluidizado (LAW e MUJUMDAR, 2015).

Há diversos tipos de leitos fluidizados existentes e que são relatados por Law e Mujumdar (2015), sendo um deles classificado como convencional.

Tabela 2.1 – Características do Leito Fluidizado

CRITÉRIOS	LEITO FLUIDIZADO CONVENCIONAL
Tamanho de Partícula	100 – 2000 μm
Distribuição de Tamanho de Partícula	Limitado
Tempo Aproximado de Secagem	Cerca de 60 minutos
Área Ocupada	Pequena
Rejeição	Pequena
Atrito	Alto
Consumo Elétrico	Mediano
Manutenção	Mediana
Eficiência Energética	Alta
Facilidade de Operação	Alta
Capacidade	Mediana

Fonte: LAW e MUJUMDAR, 2015

O leito fluidizado convencional possui uma passagem de gás a partir do fundo da coluna que comporta as partículas sólidas. Essas partículas ficam sobre uma placa distribuidora de gás, pelo qual o ar passa através e é uniformemente distribuído para o leito. A relação existente entre a queda de pressão e a velocidade do gás é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a velocidade do gás, maior é a queda da pressão na coluna. Em baixas velocidades de gás, o leito é tido como estático (leito fixo). A partir de certa velocidade do gás, a força de arraste do gás se iguala ao peso efetivo das partículas. Em outras palavras, é quando o gás consegue suportar o peso de todo o leito. A esse estado é dado o nome de Condição Mínima de Fluidização e à velocidade do gás que proporciona esse estado é dado o nome de Velocidade Mínima de Fluidização, v_{mf} (MEIRELLES, 1984; LAW e MUJUMDAR, 2015).

A Figura 2.2 ilustra as etapas anteriormente descritas pelas quais as partículas do leito passam, com o aumento da velocidade do gás, até chegar à fluidização propriamente dita (fluidização borbulhante).

Porém, não são todas as partículas que possuem o mesmo comportamento acima retratados. Law e Mujumdar (2015) afirmam que diferentes partículas podem promover diferentes regimes de fluidização, cuja pesquisa, realizada por Geldart (1971), classificou-as em 4 grupos, de acordo com seu comportamento na fluidização em diferentes diâmetros médios e densidades: A, B, C e D.

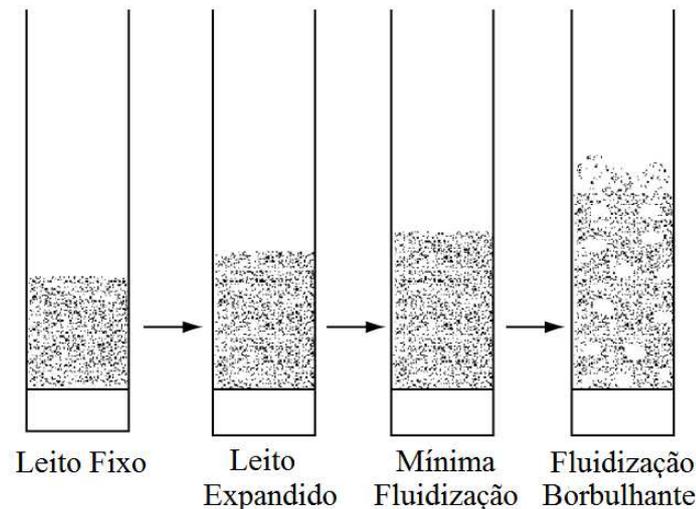


Figura 2.2 – Regimes de um leito de partículas em diferentes velocidades de gás

Fonte: LAW e MUJUMDAR, 2015 (*adaptado*).

Segundo Farias Júnior (2004), “as propriedades observadas para certas partículas podem ser estendidas, sem risco particular, para todos os sólidos do um mesmo grupo.”

A Figura 2.3 mostra as etapas de fluidização que ocorrem com o aumento da velocidade do gás para os diferentes grupos de partículas e a Figura 2.4 ilustra graficamente a classificação de Geldart.

No grupo A estão as partículas do tipo aeráveis. São partículas que possuem um diâmetro médio pequeno e/ou densidade baixa (menor que $1,4 \text{ g/cm}^3$). O leito de partículas desse grupo sofre uma expansão antes de começar o borbulhamento. Bolhas pequenas, com velocidade de subida maior que a velocidade intersticial do gás, vão sendo formadas e, com o aumento da velocidade do gás, elas tendem a coalescer e ficar com diâmetros maiores (maiores que 4 cm) (GELDART, 1971; GELDART, 1973; FARIAS JUNIOR, 2004; LAW e MUJUMDAR, 2015).

No grupo B estão a maioria das partículas com diâmetro médio entre 40 e $500 \mu\text{m}$ e densidade entre $1,4$ e 4 g/cm^3 . O leito inicia o borbulhamento a partir da velocidade mínima de fluidização. Semelhante às partículas do grupo A, são formadas bolhas pequenas, com velocidade de subida maior que a velocidade intersticial do gás, que tendem a aumentar o tamanho. A areia é um exemplo (GELDART, 1971; GELDART, 1973; FARIAS JUNIOR, 2004; LAW e MUJUMDAR, 2015).

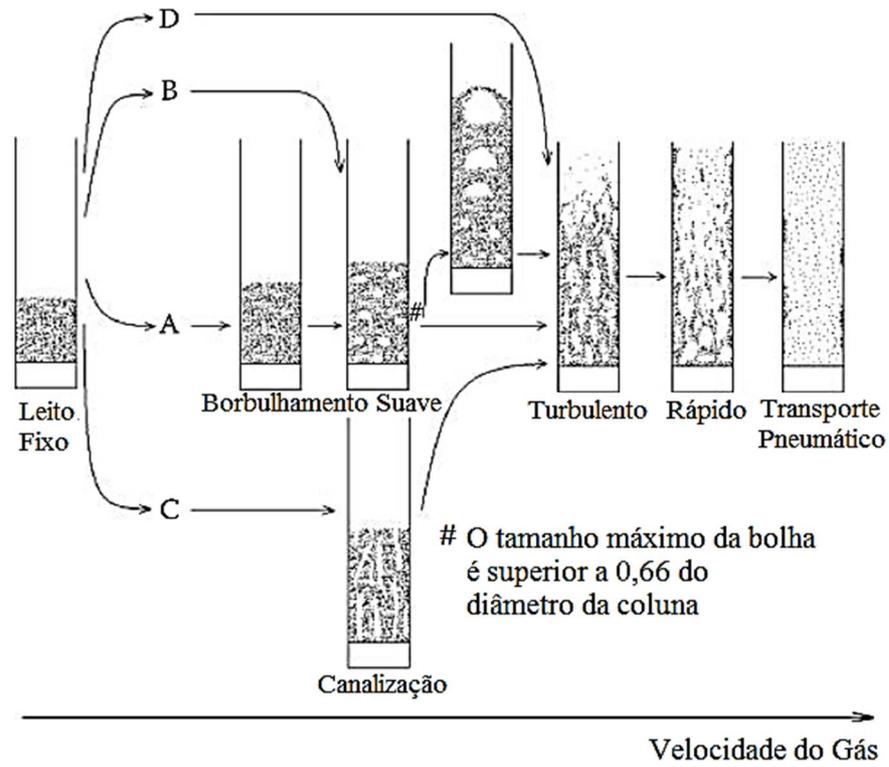


Figura 2.3 – Regimes de fluidização para diferentes classes de partículas com o aumento da velocidade do gás

Fonte: adaptado de Law e Mujumdar (2015)

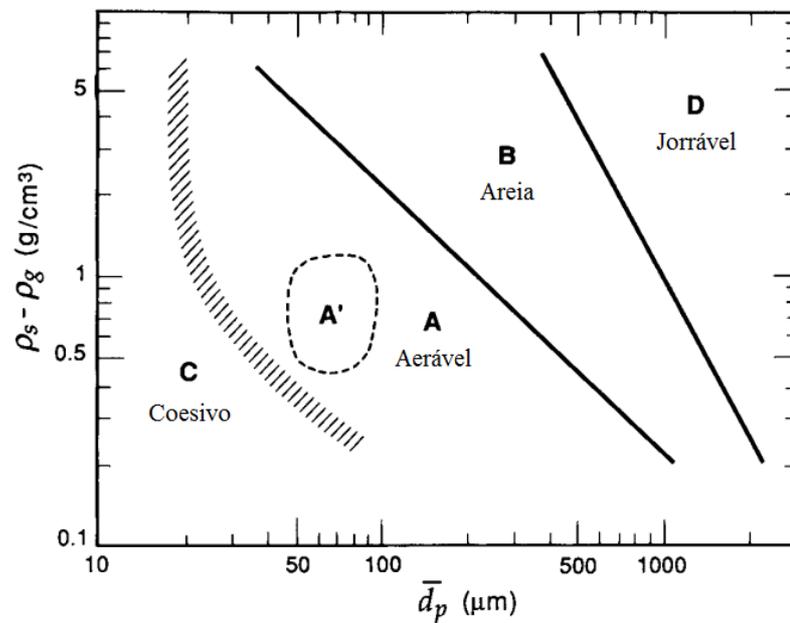


Figura 2.4 – Classificação de Geldart

Fonte: adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

No grupo C estão todas as partículas coesivas, com diâmetro menor que 30 μm . Uma fluidização normal é muito difícil de ser obtida. Por isso, o gás tende a formar canais preferenciais com uma grande probabilidade de surgirem bolhas muito grandes, conhecidas como *slugs*. Para partículas desse grupo é recomendável utilizar agitadores ou vibradores para quebrarem a coesividade entre as partículas e permitir, assim, a fluidização (GELDART, 1971; GELDART, 1973; FARIAS JUNIOR, 2004; LAW e MUJUMDAR, 2015).

No grupo D estão as partículas maiores, com diâmetro médio maior que 600 μm , e mais densas. Uma característica importante desse grupo é que a fluidização é tida como pobre em qualidade, por causa da formação de bolhas grandes no leito. Porém, é considerada como “jorrável” (GELDART, 1971; GELDART, 1973; FARIAS JUNIOR, 2004; LAW e MUJUMDAR, 2015).

A tecnologia de leito fluidizado vem sendo muito utilizada na secagem de diversos materiais, incluindo as biomassas provenientes de diferentes resíduos das agroindústrias e das indústrias de alimentos.

Meirelles (1984) estudou a secagem do bagaço de cana-de-açúcar em leito fluidizado, com diâmetro médio variando entre 0,48 e 0,98 mm. O autor constatou que o bagaço apresentou um comportamento coesivo devido à sua área específica e alta umidade superficial. Para contornar essa situação, um agitador de baixa rotação foi instalado no interior do leito para que a fluidização pudesse ocorrer.

Ustra (2005) utilizou partículas de grão de arroz com diâmetro equivalente variando entre 3,55 e 3,58 mm e, com densidades reais variando entre 1,159 a 1,217 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, classificando-as como partícula do tipo D de Geldart. O autor também constatou que, mesmo o arroz sendo fluidizável com velocidade mínima de fluidização entre 1,05 e 1,39 m/s, houve uma série de instabilidades do leito na fluidização e na secagem, tanto com formação de canais preferenciais quanto com as perdas de carga do leito.

Moreno *et al.* (2006) realizaram um estudo sobre a qualidade da fluidização durante a secagem de resíduos florestais em diferentes configurações de unidades de leito fluidizado: leito vibro-fluidizado, agitado e com sólidos inertes. Eles concluíram que, quando o leito é submetido sob algum tipo de vibração, há uma qualidade maior na sua fluidização e que, em relação à temperatura, comprovaram, para este trabalho, a grande vantagem do leito fluidizado que é a uniformidade da temperatura ao longo do leito. Uma constatação importante foi a respeito da influência positiva direta do aumento da velocidade superficial e do tamanho da partícula sob a fluidização, o que não ocorre com o teor de umidade do sólido, que tem, com seu aumento, uma forte influência negativa sob a fluidização.

Polanco *et al.* (2013) estudaram a fluidodinâmica e a secagem da beterraba e do seu bagaço. Apesar do diâmetro médio das partículas de beterraba (~ 3mm) ter sido três vezes maior que o diâmetro médio das partículas do bagaço (~ 1 mm), as velocidades de fluidização tiveram valor muito próximo (2,0 m/s e 1,8 m/s, respectivamente), para um teor de umidade de 50%. Também foi constatado pelos autores que houve arraste tanto das partículas pequenas quanto das partículas maiores, o que chamou a atenção para a necessidade de um sistema de coleta de pó.

Borel (2014) estudou a secagem de pólen apícola em leito fluidizado assistido por uma fonte de radiação infravermelha. O comportamento fluidodinâmico foi estudado em diferentes cargas do leito (100 a 1800 g) e a secagem em leito fluidizado convencional foi realizada com carga de 500 g, com temperaturas de ar na faixa 35, 45 e 55°C. Como o pólen possuía diâmetro médio de Sauter de 2,03 mm e densidade de 1.244,5 kg/m³, então o sólido foi considerado do tipo D de Geldart.

He *et al.* (2016) investigaram as características fluidodinâmicas do leito fluidizado e sua aplicabilidade no processo de secagem e separação da lignite. Por ter um elevado teor energético e ser abundante no mundo, a lignite possui um alto valor agregado no mercado. O desafio em sua fluidização foi devido ao elevado teor de umidade inicial e por sua rápida deterioração em presença de água. Os autores informaram que, devido a esse percalço, a fluidização apresentou uma certa instabilidade, o que influenciou na qualidade da mesma.

Para avaliar a qualidade de fluidização, são calculados dois parâmetros: o índice de fluidização (IF) e o número de Froude (Fr). O índice de fluidização determina o percentual do material particulado que efetivamente foi fluidizado. Com isso, altos valores de IF demonstram que o leito teve uma melhor fluidização. Já o número adimensional de Froude avalia se a fluidização foi do tipo particulada ou do tipo agregativa.

Em uma curva típica de leito fluidizado, até o ponto de máxima queda de pressão na fluidização, a equação de Ergun é válida. No entanto, após esse ponto, são caracterizados dois tipos de fluidização: a particulada e a agregativa (CARVALHO, 2016).

Segundo Borel (2014), se $Fr < 1$, a fluidização é classificada como particulada, com o leito apresentando certa fluidez com formação de microbolhas. Na fluidização particulada, o início do processo caracteriza-se por um rearranjo de partículas, de forma a oferecer maior área livre para o escoamento, porém sem que as partículas percam o contato entre si. Nesse tipo de fluidização, o leito expande-se com o aumento da velocidade do fluido, possuindo uma expansão praticamente uniforme tanto em baixa como em alta vazão, possuindo em altas vazões

maior agitação das partículas. Esse tipo de fluidização é comum quando o fluido contínuo é incompressível (CARVALHO, 2016).

Do contrário, se $Fr > 1$, a fluidização é classificada como agregativa, com o leito apresentando uma fluidez irregular. Nesse tipo de fluidização, o início do processo caracteriza-se por um fenômeno semelhante à ebulição, ou seja, bolhas de gás atravessam o sólido e rompem-se na superfície, empurrando as partículas do sólido para cima. Esse tipo de fluidização é característico por ser uniforme somente em baixas vazões. Em altas velocidades ou vazões, têm-se duas fases, emulsão (fase densa) e bolhas (fase descontínua), o que é comum quando o fluido contínuo é compressível (BOREL, 2014; CARVALHO, 2016).

Nitz e Taranto (2007) investigaram a secagem de feijões em leito pulso fluidizado. Segundo os autores, o índice de fluidização aumentou cerca de 22,64% com o aumento da altura inicial do leito, sob rotação de 200 rpm. O mesmo comportamento ocorreu com outras rotações, chegando a um aumento de 58,49%, quando a rotação estava a 950 rpm, em relação ao índice de fluidização sem rotação, que foi de 0,53.

Bezerra e Costa (2014), ao estudarem a hidrodinâmica da fluidização de sementes de gergelim em leito fluidizado, obtiveram uma faixa de índices de fluidização, que variou de 0,97 a 1,00, o que mostra que o leito foi praticamente suspenso de forma completa, promovendo uma boa movimentação dos sólidos no interior do leito.

Outro aspecto observado na fluidização é razão L/D do leito. De acordo com a literatura (WU e BAEYENS, 1998; FORMISANI *et al.*, 2001; CHOK *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PAUDEL e FENG, 2013;), é unânime a ideia que razões L/D de leito estático de 1 até um valor limite de 2 asseguram uma boa fluidização. Porém, cada material tem sua particularidade, podendo apresentar uma boa fluidização a partir de razões como 0,5 e 0,7, e até acima da razão 2.

Wu e Baeyens (1986) avaliaram a segregação por diferentes tamanhos de partículas em um leito fluidizado e operaram seus ensaios com uma razão de leito entre 1,2 e 1,3 para garantir uma boa fluidização. A justificativa dada pelos autores é que, para valores de razão de leito abaixo de 0,8 e acima de 1,9, houve uma grande influência no aspecto fluidodinâmico, principalmente no tocante à segregação do leito, onde as partículas mais leves foram carregadas para a superfície do leito, formando o *flotsam*, e as mais pesadas ficaram no fundo, formando o *jetsam*, o que comprometeria a boa fluidização da mistura.

Formisani *et al* (2001), por outro lado, avaliaram a influência da razão de leito sobre as velocidades de fluidização inicial e final e constataram que não houve influência significativa da razão de leito sobre elas na faixa de 0,67 a 2,4, o que foi corroborado por Borel (2014), que

avaliou o efeito da razão de leito sobre os parâmetros fluidodinâmicos na fluidização de pólen apícola e constatou que, entre as razões de leito 0,5 e 1,4, não houve uma variação significativa na velocidade de mínima fluidização.

De um modo geral, partículas de biomassa, em seu estado natural, são materiais de difícil fluidização que levam a uma fluidização de baixa qualidade ou simplesmente não fluidizam (SILVA, 2011), devido às suas formas, tamanhos e densidades peculiares (RAO E BHEEMARASETTI, 2000).

Gomes *et al.* (2016) investigaram as características fluidodinâmicas de partículas de bagaço de laranja de diferentes diâmetros, com diferentes cargas de material alimentado ao leito. As partículas provenientes do bagaço de laranja, devido ao seu alto teor de umidade, apresentaram baixa qualidade de fluidização, a qual foi precedida pela formação de canais preferenciais. Altas vazões foram requeridas para desfazer tais canais e promover uma fluidização do tipo agregativa das partículas no leito. Uma fluidização inadequada leva a uma baixa eficiência do processo de secagem, devido às baixas taxas de transferência de calor e massa, provocadas por um baixo contato gás-sólido e a uma distribuição não uniforme de temperatura.

Para materiais de difícil fluidização, sistemas facilitadores tais como: vibração do leito, agitação do leito e uso de sólidos inertes, vêm sendo amplamente empregados. Porém, desses sistemas, segundo Rao e Bheemarasetti (2000) e Moreno *et al.* (2016), o uso de sólidos inertes é a alternativa que menos encarece o custo do processo.

2.3 Fluidização de misturas binárias

A fluidização gás-sólido também pode envolver misturas heterogêneas de dois ou mais sólidos, diferindo em um ou mais características físicas ou químicas (SILVA, 2011). Os chamados sistemas polidispersos consistem em trabalhar com leitos formados por 2 ou mais componentes, o que leva à necessidade de um estudo individual das condições de mínima fluidização, a fim de tornar o contato fluido – partícula mais eficiente (FORMISANI *et al.*, 2001; SILVA, 2011).

Nos sistemas multicomponentes, cada fração de partícula de uma mesma espécie possui sua própria velocidade de mínima fluidização. Logo, os valores de velocidade mínima determinados experimentalmente para as misturas representam uma relação entre as v_{mf} de cada componente sólido e suas respectivas frações mássicas na mistura (REINA *et al.*, 2000; RAO E BHEEMARASETTI, 2000).

Rao e Bheemarasetti (2000) estudaram a fluidização de misturas compostas por areia de diâmetros médios (0,30 mm e 0,48 mm) e massas específicas (2,5 g/cm³ e 2,7 g/cm³) diferentes com partículas de biomassas diferentes, como a casca de arroz (0,90 mm), o pó de serragem (1,00 mm) e a casca de amendoim (1,00 mm), nas proporções mássicas de biomassa de 2%, 5%, 10% e 15%, em uma carga total de leito fixada em 200 g. Os autores concluíram que o aumento da fração mássica influenciou de forma positiva na velocidade mínima de fluidização.

Nascimento *et al.* (2001) estudaram a fluidodinâmica de uma mistura milho/areia em uma câmara de leito fluidizado. Segundo os autores, foi verificado que a velocidade mínima de fluidização aumentou com o aumento da fração mássica do milho. Já a porosidade, sofreu uma redução de aproximadamente 4% com o aumento da quantidade de milho na mistura.

Jena *et al.* (2008) avaliaram características fluidodinâmicas para uma mistura ternária de dolomita. Segundo os autores, as alturas iniciais de leito estático não afetaram significativamente a velocidade na condição de mínima fluidização, concluindo a existência de uma independência entre o parâmetro e a variável.

Oliveira e Tannous (2009) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias formado por casca de arroz (1,43 mm e 1,98 mm) e areia (0,36 mm), classificados como tipo D e B de Geldart, respectivamente, nas frações mássicas de 0 %, 2,5 %, 5,0 %, 7,5 % e 10 % de biomassa em relação a 1500 gramas de areia. Os autores constaram que, devido às características heterogêneas da casca de arroz, a fluidização do leito de monopartículas da biomassa foi caracterizado como de difícil fluidização, por causa da formação de canais preferenciais e do empacotamento do leito. Por isso, foi necessária a utilização de outro material sólido para facilitar a fluidização.

Karmakar *et al.* (2012) estudaram a fluidização de misturas de biomassa (casca de arroz, bagaço e pó de serragem) e dois diferentes tamanhos de areia. As frações mássicas de biomassa no leito adotadas pelos autores foram 2%, 5%, 10% e 15%. Eles concluíram que, o aumento da fração mássica aumentou a velocidade de mínima fluidização e houve uma certa formação de caminho preferencial, o que comprometeu o comportamento fluidodinâmico. Além disso, os modelos preditivos da velocidade mínima fluidização por eles utilizados geraram valores próximos dos dados obtidos experimentalmente.

Paudel e Feng (2013) avaliaram a validade de alguns modelos empíricos disponíveis na literatura por eles citados de predição da velocidade mínima de fluidização para misturas binárias de biomassa (espiga de milho e casca de noz) e inerte (areia) e constataram que, devido à peculiaridade de cada modelo quanto ao tipo de partícula utilizada, houve certa dificuldade

no ajuste aos seus dados experimentais e propôs um novo modelo envolvendo as frações mássicas que cada partícula ocupava na mistura.

Guo et al. (2015) investigaram a influência da fração mássica de biomassa de casca de arroz em mistura binária com carvão na fluidização. Os autores observaram que, em frações inferiores a 10%, o leito se comportou como o esperado em um leito fluidizado convencional. Além disso, eles notaram que o aumento da fração de biomassa no leito provocou uma instabilidade no leito durante a fluidização, ocasionando formação de canais preferenciais e rachaduras.

Segundo Reina *et al.* (2000) e Silva (2011), existe uma relação de dependência dos modelos empíricos de leitos de monopartículas com o método utilizado para determiná-los. Por isso, é importante entender que cada modelo prevê de acordo com as características físico-químicas das partículas envolvidas.

Além disso, ao utilizar um leito composto por uma mistura de duas ou mais partículas diferentes em densidade ou geometria, no momento que a velocidade mínima de fluidização é atingida, surge a probabilidade de segregação (SILVA, 2011).

A segregação é um fenômeno que tem duas causas: quando há diferença entre os diâmetros e quando há diferença entre as massas específicas das partículas envolvidas no processo. Wu e Baeyens (1998) explicam que, como no leito fluidizado a mistura é produzida pela passagem ascendente do ar pelo leito, o carregamento das partículas é feito pelas bolhas formadas quando as vazões de ar superam a vazão de mínima fluidização, fazendo com que as partículas menores em diâmetro ou massa específica migrem para a superfície, formando o *flotsam*, e as partículas maiores migrem para o fundo do leito, formando o *jetsam*.

Segundo Formisani *et al.* (2001), a segregação é um dos fatores que dificultam a determinação da velocidade de mínima fluidização, pois, muitas vezes, o início da fluidização é acompanhado com o fenômeno de separação, o que já afeta na leitura da queda de pressão no leito.

Chiba *et al.* (1979) e Formisani *et al.* (2001) classificam o leito em 3 tipos: completamente misturado, formada por uma única fase, onde não há formação de *flotsam* e *jetsam*; parcialmente misturada, onde são observadas 3 fases distintas, com formação inicial de *flotsam* e *jetsam* e uma zona intermediária completamente misturada; e a completamente segregada, onde o meio é composto por 2 fases bem definidas de monopartículas.

Geldart *et al.* (1973), ao utilizarem partículas do grupo D a altas velocidades superficiais de ar, concluíram que a segregação por diferentes tamanhos parece intrinsicamente ligada à geometria e às dimensões das partículas. Segundo os autores, esse efeito fica mais

evidente quando: (i) quando há diminuição do tamanho das partículas, (ii) a fração de partículas no leito aumenta e (iii) quando o gás ultrapassa a velocidade mínima de fluidização, principalmente quando a diferença entre as velocidades de ar e de mínima fluidização é maior que 1.

Nienow *et al.* (1987) investigaram a fluidização de misturas binárias, ternárias e quaternárias com partículas de diferentes tamanhos, porém de igual densidade, e observaram que a segregação por diferentes tamanhos e mesma massa específica nas misturas ternárias e quaternárias apresentou mesmo comportamento que a mistura binária. Os autores também concluíram que a conformação da placa distribuidora pode afetar consideravelmente no comportamento fluidodinâmico e na formação de leito segregado.

Segundo Silva (2011), diversos autores, ao estudarem a segregação, utilizam o trabalho de Chiba *et al.* (1979) como referência, porém, Clarke *et al.* (2005), ao estudarem a fluidização da mistura binária de serragem úmida e esferas de vidro, não alcançaram bons resultados ao utilizarem seu modelo.

Formisani *et al.* (2001), ao estudarem a fluidização de esferas de vidro de mesma densidade e tamanhos diferentes, verificaram que a composição inicial do leito afeta significativamente a segregação de partículas e a velocidade mínima de fluidização, e apresentaram um modelo para determinação da mesma com base na variação axial da porosidade e do diâmetro médio da partícula. Os autores concluem que não necessariamente os modelos empíricos de leitos compostos por monopartículas tem aplicabilidade em leitos multicomponentes.

Diante do exposto, o desafio do estudo das características fluidodinâmicas em misturas que envolvam o uso de sólidos inertes e biomassas (RAO E BHEEMARASETTI, 2000; OLIVEIRA E TANNOUS, 2009; CHOK *et al.*, 2010; KARMAKAR *et al.*, 2012) está ligada não somente à composição química dos materiais envolvidos, mas também das características físicas das partículas que irão compor o leito. O uso dos sólidos inertes, visando a aplicação em um secador de leito fluidizado, pode contribuir para uma melhora no rendimento do processo, promovendo um efetivo contato entre o fluido que escoar e as partículas orgânicas. Ademais, não foram encontrados na literatura trabalhos que visem o uso de biomassa derivada da citricultura com foco na sua utilização como fonte de energia alternativa, principalmente com o uso de sólidos inertes, cujo conhecimento é de grande interesse técnico-científico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados, o equipamento e as metodologias experimentais empregadas para a caracterização física das partículas de bagaço de laranja e das partículas inertes e para os estudos da fluidodinâmica, bem como o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados utilizando uma placa Arduino UNO e implementado em Scilab, versão 5.5.2.

3.1 Materiais

No presente trabalho foram utilizadas como biomassa partículas provenientes do bagaço, resíduo da produção de suco de laranja, fornecido pelo Pimenta's Restaurante, localizado em São Cristóvão. Como sólidos inertes, foram testadas partículas de polietileno, com diâmetro médio de 2,58 mm, e partículas de areia, com diâmetros médios de 1,85 mm (areia 10) e de 0,93 mm (areia 20). As partículas de biomassa e as partículas inertes são mostradas na Figura 3.1.

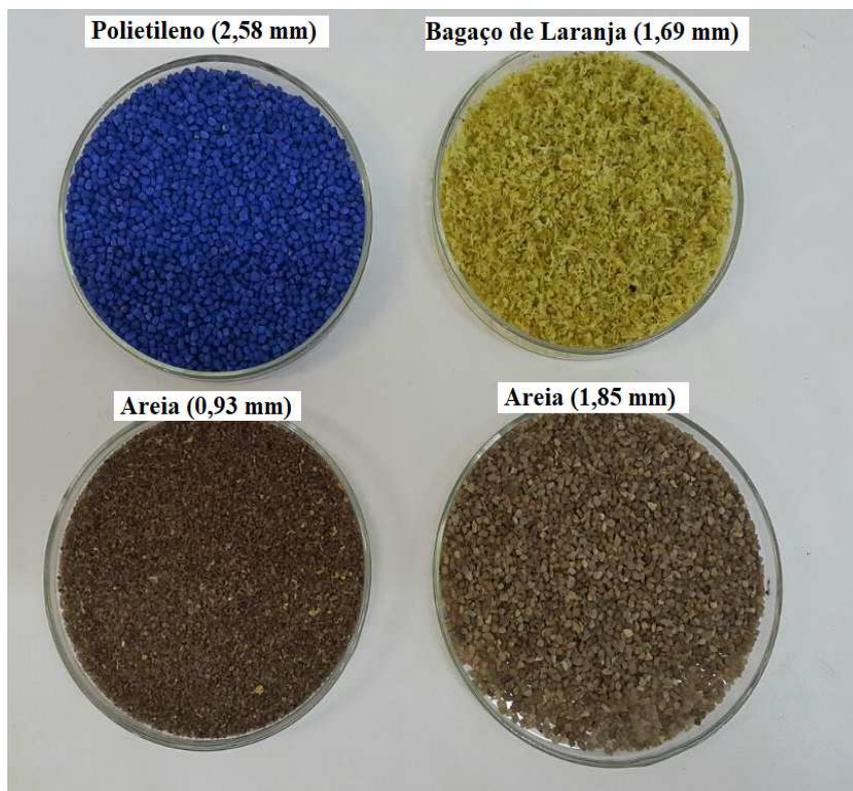


Figura 3.1 – Partículas utilizadas para composição das misturas binárias

3.2 Aparato Experimental

Para o estudo experimental proposto foi utilizada uma unidade de leito fluidizado convencional, esquematizada na Figura 3.2.

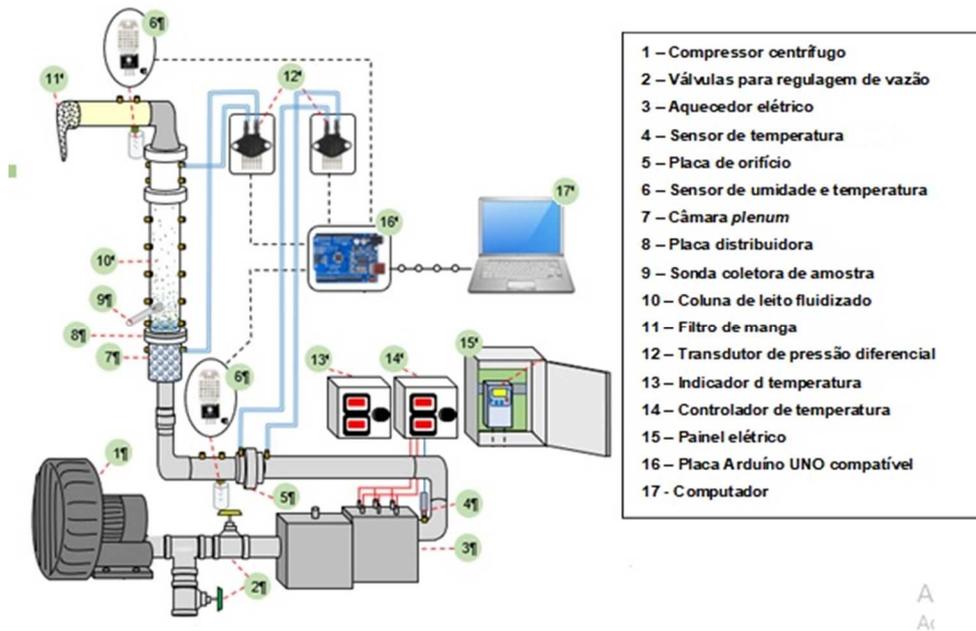


Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental

Nesta unidade, o ar para fluidizar as partículas é fornecido por um compressor centrífugo (1) B100 da Eberle, de 4 cv e 3470 rpm, escoando no interior de uma tubulação de aço de 2 in de diâmetro.

Com o intuito de evitar o superaquecimento do compressor, o condicionador de ar era mantido na sua menor temperatura de refrigeração (16°C) para que a temperatura do ambiente se mantivesse entre 22°C e 24°C .

Há duas válvulas do tipo gaveta (2) para regular a velocidade do ar que sai do compressor, sendo que uma das válvulas (90° em relação à tubulação) é utilizada como purga e a outra como válvula de alimentação, propriamente dita, do sistema.

Antes de ligar o compressor, é feita a verificação se a válvula de alimentação está fechada e a da purga aberta, pois, com o acionamento do compressor, o deslocamento abrupto de ar na tubulação poderia causar danos aos sensores de pressão.

O módulo de aquecimento (3) é composto por um conjunto de resistências elétricas de 4500 W que fornece energia térmica ao ar. Um sistema de controle (14) regula a quantidade de

calor fornecida pelas resistências e, por conseguinte, a temperatura do fluido na saída do aquecedor, medida por meio de um termopar tipo T (4).

Nos experimentos de calibração e ensaios fluidodinâmicos as resistências ôhmicas não foram acionadas, para que a temperatura do ar de fluidização permanecesse praticamente a ambiente. O aquecedor é somente utilizado em experimentos que visem a secagem, o que não foi objeto de investigação deste trabalho.

Uma placa de orifício encontra-se instalada num trecho reto da tubulação para determinação da vazão de escoamento, com base na queda de pressão imposta pelo dispositivo. Essa queda de pressão foi medida, durante os experimentos, por um transdutor de pressão diferencial (12) piezo-resistivo da série MPX5010DP acoplado à placa. Segundo informações obtidas do *datasheet* do sensor, ele opera na faixa de leitura de 0 a 10 kPa ou 1024 mm H₂O, funciona com alimentação entre 4,75 e 5,25 volts (V) em corrente contínua, com tempo de resposta de 1 milissegundo (ms) e acurácia na diferença de pressão de 1 mmH₂O para uma faixa de temperatura que vai de 0 a 85°C.

As informações fornecidas pelo sensor são captadas por uma placa de aquisição de dados (Arduino Uno SMD) e enviadas ao sistema desenvolvido em Scilab, versão 5.5.2.

A equação de calibração da placa de orifício relacionando a vazão do ar e a queda de pressão é apresentada no anexo A.

Antes da coluna de fluidização (10) há uma câmara *plenum* (7), que tem por finalidade assegurar uma distribuição uniforme do ar na entrada do leito de partículas. O *plenum* é de acrílico, com mesmo diâmetro da coluna do leito fluidizado e 3,5 cm de altura, preenchida com partículas sólidas de polietileno, com diâmetro médio de 1,85 mm, e acoplada ao leito por meio de flanges de acrílico, confeccionadas especialmente para este fim.

Localizada no flange de acrílico que une a câmara *plenum* à coluna do leito fluidizado, há uma placa distribuidora (8) do tipo placa perfurada, com arranjo triangular e recoberta com uma tela de nylon reforçado (32 mesh) para evitar a passagem de partículas muito finas para dentro da câmara *plenum*, que podem ser geradas devido ao intenso choque mecânico partícula-partícula e partícula-parede do leito e à contração volumétrica das partículas quando secas.

A equação de calibração do distribuidor é também apresentada no apêndice A deste documento.

O leito fluidizado da unidade é do tipo convencional, constituído por uma coluna cilíndrica (10), com diâmetro interno de 10,9 cm e altura de 50 cm, com prolongador de 10 cm, feita de acrílico transparente para facilitar a visualização dos regimes de fluidização durante todos os ensaios.

Uma sonda coletora de amostras (9) do leito encontra-se localizada a uma distância de 3 cm da entrada inferior da coluna. A mesma não foi utilizada neste trabalho.

No topo da coluna de acrílico, é acoplado um prolongador de acrílico com 10 cm de altura e mesmo diâmetro interno da coluna. Conectado a esse prolongador, há um cone de aço com o topo curvado e rosca interna para ser conectado a uma tubulação de PVC, que serve como suporte para o sensor de temperatura e umidade do ar na saída, com um filtro manga (11) ao final para coletar as partículas arrastadas.

4 (quatro) tomadas de pressão são distribuídas uniformemente ao longo da coluna, enquanto 1 (uma) tomada de pressão é situada na câmara *plenum*, 3 cm abaixo da placa perfurada. Durante a realização dos experimentos, a queda de pressão no leito foi medida utilizando-se o ponto de tomada de pressão da câmara *plenum* e o ponto de tomada de pressão mais distante do leito, localizado a 45 cm acima da placa distribuidora, empregando-se um transdutor de pressão diferencial (12) piezo-resistivo da série MPX5010DP.

A temperatura e a umidade relativa do ar na entrada e na saída do leito são medidas por meio de sensores DHT22 (6). 3 (três) termoresistores, do tipo PT-100, podem também ser inseridos ao longo da coluna para medida da temperatura do ar.

Esses termoresistores são acoplados a uma placa arduino uno SMD, que interpreta os sinais elétricos através de uma placa específica para cada tipo de termoresistor, e transmite as informações ao computador, cujos dados foram processados em linguagem Scilab 5.5.2.

Por meio de um indicador de temperatura (13) é possível o monitoramento das temperaturas na entrada, no interior e na saída do leito, bem como acompanhar a temperatura do ar na saída do módulo de aquecimento.

Toda a parte elétrica fica acomodada em um painel de metal colocado na bancada acima do módulo de aquecimento.

O acionamento do compressor é feito por uma chave trifásica de partida direta e o das resistências, que não foram utilizadas neste trabalho, é feito por um disjuntor bifásico, assistido por um controlador de temperatura.

No painel, são aferidas as amperagens e voltagens das fases de alimentação com o uso de um amperímetro tipo alicate *true* RMS, para posterior obtenção da energia elétrica consumida no processo nas etapas de análise fluidodinâmica e de secagem.

Há também, no painel, um relé térmico, a fim de garantir a segurança em casos de aquecimento ou curto-circuito, um relé falta de fase, para garantir a proteção do compressor trifásico em casos de queda de alguma das fases de alimentação, e um contator, para controlar as cargas direcionadas ao compressor.

3.3 Metodologia Experimental

3.3.1 Preparação da biomassa

Os resíduos do processamento de laranjas utilizadas na produção de sucos *in natura* foram adquiridos no comércio local e triturados em um multiprocessador Mondial e em um liquidificador comum Mondial. Em seguida, foram selados em sacos plásticos comuns e armazenados em um freezer à temperatura de -5°C até o seu uso nos experimentos.

3.3.2 Caracterização física do material

i) Granulometria

Para a análise granulométrica da biomassa e dos inertes, foi utilizado um conjunto de peneiras Tyler da BERTEL, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 – Características das peneiras utilizadas na análise granulométrica

Tyler (mesh)	Abertura (mm)	Faixa de diâmetro (mm)	Diâmetro médio das partículas (D_{mp}) (mm)
7	2,80	$x \geq 2,80$	-
8	2,36	$2,80 > x \geq 2,36$	2,58
9	2,00	$2,36 > x \geq 2,00$	2,18
10	1,70	$2,00 > x \geq 1,70$	1,85
12	1,40	$1,70 > x \geq 1,40$	1,55
14	1,18	$1,40 > x \geq 1,18$	1,29
16	1,00	$1,18 > x \geq 1,00$	1,09
20	0,85	$1,00 > x \geq 0,85$	0,925
Fundo	-	$x < 0,85$	-

Para realizar tal operação, as peneiras foram empilhadas em ordem decrescente de diâmetro ou crescente na escala Tyler com um recipiente fechado ao final (fundo) para recolher as partículas mais finas do material que não ficaram retidas em nenhuma das outras peneiras. Ao término do processo, as massas das amostras retidas em cada peneira e da retida no fundo foram pesadas e, com isso, foi possível calcular as frações mássicas ou porcentagens retidas em cada peneira. Foram utilizadas amostras de, aproximadamente, 1000 gramas e, periodicamente,

as determinações foram realizadas com o objetivo de observar se haveria alguma variação da proporção durante o período de realização deste trabalho.

A partir das frações mássicas retidas em cada peneira e dos correspondentes diâmetros médios de partículas, foi calculado o diâmetro de Sauter para toda a amostra, utilizando a equação (GAUTHIER *et al.*, 1999):

$$D_{sp} = \frac{1}{\sum \frac{x_p}{D_{mp}}} \quad (3.1)$$

onde D_{sp} é o diâmetro médio de Sauter em milímetros, x_p é a fração mássica retida na peneira “p” e D_{mp} é o diâmetro médio das partículas retidas entre uma peneira “p” e que passaram na peneira “p-1”, em milímetros.

O diâmetro médio das misturas foi calculado através de uma relação entre as massas específicas aparentes individuais da biomassa e do inerte que compõem a mistura e suas respectivas frações mássicas e diâmetros médios de partículas, conforme sugerido por Paudel e Feng (2013), pela equação:

$$d_{mist} = d_b \cdot d_i \left(\frac{w_b \cdot \rho_i + w_i \cdot \rho_b}{w_b \cdot \rho_i \cdot d_i + w_i \cdot \rho_b \cdot d_b} \right) \quad (3.2)$$

onde ρ é a massa específica aparente média em kg/m³, w é a fração mássica do componente na mistura e d é o diâmetro médio em mm. Os subscritos “mist”, “i” e “b” referem-se à mistura, inerte e biomassa, respectivamente.

ii) Umidade inicial

Para a determinação do teor de umidade inicial da biomassa, foi utilizado o método gravimétrico, secando-se as amostras em estufa à temperatura de $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 horas, conforme norma do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

iii) Massa específica real e aparente das partículas, densidade de empacotamento e massa específica média da mistura

Os valores de densidade real da biomassa em diferentes teores de umidade e dos sólidos inertes foram determinados pelo método da picnometria a gás hélio, utilizando o

equipamento AccuPyc II 1340 da Micromeritics, localizado no Laboratório Multiusuário do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe.

Para determinação da massa específica aparente da biomassa, foram utilizados o método da permeamtria proposto por Geldart (1990), que faz uso da condição de leito fixo em regime laminar e/ou turbulento, e o método proposto por Margiotto e Siegel (1983), que utiliza as condições de mínima fluidização. Já a massa específica aparente do inerte foi determinada por picnometria líquida, tendo a água destilada como líquido de referência.

As densidades de empacotamento, tanto das misturas quanto dos componentes individualmente, foram determinadas adicionando-se uma quantidade específica em massa da amostra na coluna do leito fluidizado. Com o valor da altura que a massa atingiu no leito e com o diâmetro interno da coluna, o volume do material foi determinado e a densidade de empacotamento foi calculada pela razão entre a massa adicionada e o volume ocupado por ela, utilizando a equação:

$$\rho_e = \frac{m_{biomassa}}{V_{leito}} \quad (3.3)$$

onde ρ_e é a densidade de empacotamento da amostra em g/cm³, $m_{biomassa}$ é a massa total em gramas e o V_{leito} é o volume ocupado pelas partículas na coluna, em cm³.

Por se tratar de uma mistura binária, Paudel e Feng (2013) sugerem que a massa específica a ser utilizada nas equações que se utilizem dessa propriedade seja calculada através de uma relação entre as massas específicas aparentes individuais da biomassa e do inerte que compõem a mistura e suas respectivas frações mássicas. A seguinte equação foi utilizada para calcular a massa específica média das misturas:

$$\rho_{mist} = \frac{\rho_i \cdot \rho_b}{w_b \cdot \rho_i + w_i \cdot \rho_b} \quad (3.4)$$

onde ρ é a massa específica aparente média em kg/m³ e w é a fração mássica do componente na mistura. Os subscritos “mist”, “i” e “b” referem-se à mistura, inerte e biomassa, respectivamente.

iv) Porosidade do leito

Com os valores da densidade de empacotamento (*bulk*) e da massa específica aparente da mistura, a porosidade do leito foi calculada utilizando a equação:

$$\varepsilon_L = 1 - \frac{\rho_e}{\rho_{mist}} \quad (3.5)$$

onde ε_L é porosidade do leito (adimensional), ρ_e é a densidade de empacotamento em kg/m^3 e o ρ_{mist} é a massa específica aparente média da mistura em kg/m^3 .

v) *Ângulo de repouso*

Para determinação do ângulo de repouso dos componentes individualmente e das misturas binárias foi utilizado o método estático, que consiste em descarregar uma determinada massa de partículas através de um funil com 20 cm de diâmetro maior, 1,5 cm de diâmetro menor e altura de 32 cm, suspenso a uma distância de 15 cm da superfície plana da bancada, conforme esquematizado na Figura 3.3.

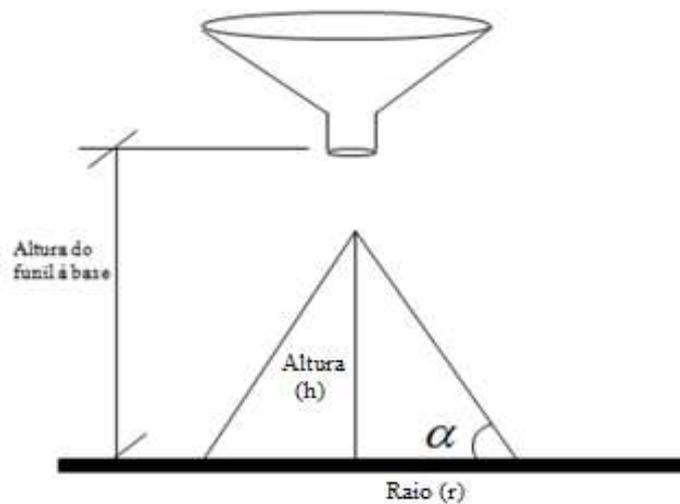


Figura 3.3 – Aparato para determinação do ângulo de talude

Fonte: CARVALHO, 2016

Para os leitos compostos por monopartículas a carga foi fixada em 500 g, enquanto para as misturas binárias foi utilizada uma massa total de 1400 g. A partir do cone formado pela aglomeração de partículas, foi possível determinar o ângulo estático de talude (α) utilizando a equação:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \cdot \text{arctg} \left(\frac{h}{r} \right) \quad (3.6)$$

A escoabilidade das partículas foi classificada com base na Tabela 3.2, conforme reportado por Lobato (2013).

Tabela 3.2 – Classificação do leito quanto à escoabilidade

Ângulo de repouso (°)	Escoabilidade
25 – 30	Livre
30 – 38	Fácil
38 – 45	Instável
45 – 55	Coesivo
55 – 70	Muito coesivo

Fonte: LOBATO, 2013

vi) *Poder calorífico*

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado pelo método da Bomba Calorimétrica. O equipamento utilizado para realizar esse procedimento com amostras de diferentes teores de umidade foi o calorímetro adiabático IKA, modelo C200, localizado no Laboratório Multiusuário do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe.

Uma amostra de aproximadamente 0,25 g do bagaço a ser analisado foi colocada no reator do calorímetro (bomba calorimétrica). Após o fechamento da bomba, o sistema foi pressurizado a aproximadamente 30 bar com oxigênio. A bomba foi colocada no calorímetro adiabático com camisa de água e a ignição da amostra se deu eletricamente. Os valores do PCS foram expressos em kJ/kg.

O PCI (Poder Calorífico Inferior) foi determinado a partir da equação proposta por Ferreira *et al.* (2014):

$$PCI = PCS - (600.0,09.H) \quad (3.7)$$

onde **H** o teor de hidrogênio presente no bagaço de laranja.

O valor de referência adotado para a quantidade de hidrogênio no bagaço da laranja foi baseado em Benevides (2015), que obteve um valor de **5,0 ± 0,4 %**.

vii) Propriedades térmicas da biomassa, dos inertes e da mistura binária

As propriedades térmicas foram determinadas por meio do analisador KD2 Pro (Decagon), localizado no Laboratório de Tecnologia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe. O sensor tipo agulha presente no equipamento pode ser utilizado para a determinação da condutividade, difusividade e resistividade térmica.

A calibração do sensor foi realizada pela determinação da condutividade térmica da água destilada. Se o valor estimado da condutividade térmica da água destilada estiver próximo de $0,61 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, com uma precisão de $\pm 5\%$, o KD2 está calibrado.

Para determinar as propriedades térmicas dos materiais, a agulha foi inserida em três posições diferentes e, após compactação manual da amostra para diminuir os vazios entre o sensor e as partículas, o aparelho foi acionado e os valores da condutividade, da resistividade e da difusividade térmica foram exibidos. Com isso, foi possível estimar o calor específico dos materiais, de acordo com a equação:

$$c_p = \frac{k}{\rho \cdot \alpha_T} \quad (3.8)$$

onde k é a condutividade térmica do material em $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, ρ é a massa específica “bulk” em kg.m^{-3} e α_T é a difusividade térmica em $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$.

3.3.3 Análise Fluidodinâmica

Os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos à temperatura ambiente e pressão atmosférica, utilizando ar como gás de fluidização.

Partículas de areia e de polietileno foram testadas como sólidos inertes, tendo em vista a composição de misturas binárias com bagaço de laranja com diferentes razões de densidade e tamanho entre seus componentes, permitindo assim um estudo comparativo dos comportamentos fluidodinâmicos apresentados.

Com base na análise granulométrica efetuada, dois diâmetros médios de areia foram considerados os mais representativos em termos de fração mássica: 1,85 mm e 0,93 mm. O valor de diâmetro médio de 2,58 mm das partículas de polietileno foi escolhido pelo mesmo motivo.

O diâmetro médio das partículas de biomassa utilizado nos ensaios foi calculado com base na definição de Sauter, a partir dos resultados de distribuição granulométrica, que serão apresentados no Capítulo 4.

A carga do leito foi fixada em 1400 g. Essa massa foi determinada para garantir que a razão de leito da mistura ficasse entre 1 e 2, em todas as condições experimentais com os diferentes inertes, a fim de assegurar uma boa fluidização.

O tipo de empacotamento adotado para todos os ensaios foi o frouxo, obtido por meio da alimentação através da abertura superior da coluna, de forma paulatina para que as partículas se acomodassem de forma natural no leito.

O estudo consistiu em avaliar a influência de diferentes inertes (com diâmetros e massas específicas diferentes), tendo como variáveis investigadas a fração mássica de biomassa (w) em % e o teor de umidade inicial da biomassa em base úmida (X_u). As condições operacionais empregadas para cada partícula de inerte, definidas com base num planejamento fatorial completo 3^2 com réplica em todos os pontos e triplicata no ponto central, são apresentadas na Tabela 3.3. No apêndice B são apresentadas as tabelas com o planejamento de cada etapa.

Tabela 3.3 – Variáveis avaliadas no estudo fluidodinâmico

Inerte	w_b (%)	X_u (% b.u.)
Areia (0,93 mm)	5, 10 e 15	15, 45 e 75
Areia (1,85 mm)	5, 10 e 15	15, 45 e 75
Polietileno (2,58 mm)	5, 10 e 15	15, 45 e 75

onde w é a fração mássica de biomassa em porcentagem e X_u é o teor de umidade em base úmida em porcentagem.

As quantidades dos componentes individuais na mistura binária foram determinadas em termos de frações mássicas, cujos valores adotados para a biomassa foram de 5%, 10% e 15%, os quais foram definidos a partir de uma série de testes preliminares. Nestes ensaios, proporções mássicas acima de 20% não obtiveram êxito na fluidização. A maior fração de bagaço na mistura que propiciou uma melhor fluidização, após uma rápida presença de caminhos preferenciais, foi a de 15%. Além disso, os valores estão na faixa do recomendado por Rao e Bheemarasetti (2000), Chok *et al.* (2010), Silva (2011), Karmakar *et al.* (2012) e Oliveira *et al.* (2013).

A fim de avaliar a influência do teor de umidade da biomassa sobre o comportamento fluidodinâmico da mistura, ensaios foram realizados com diferentes teores de umidade inicial: 75%, 45% e 15% em base úmida. A umidade do bagaço, antes e após cada fluidização, foi determinada pelo método gravimétrico utilizando-se uma estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 horas, para

avaliar a perda de umidade durante o experimento. Buscou-se realizar os ensaios fluidodinâmicos num tempo suficiente para a coleta de dados representativos de queda de pressão em função da vazão, mas que assegurasse uma perda de umidade da biomassa inferior a 5%, a fim de não afetar significativamente a fluidodinâmica do leito.

i) Desenvolvimento do Sistema em Scilab

O sistema desenvolvido em Scilab, versão 5.5.2, especificamente para este trabalho, foi responsável por todo o tratamento dos dados informados pelas plataformas Arduino conectadas aos termoresistores e aos transdutores de pressão diferencial. As equações pertinentes foram implementadas e o *software* foi responsável pelo cálculo, tabulação e representação gráfica dos dados fluidodinâmicos de queda de pressão no leito em função da vazão, bem como dos dados de secagem. A interface do sistema é mostrada na Figura 3.4.

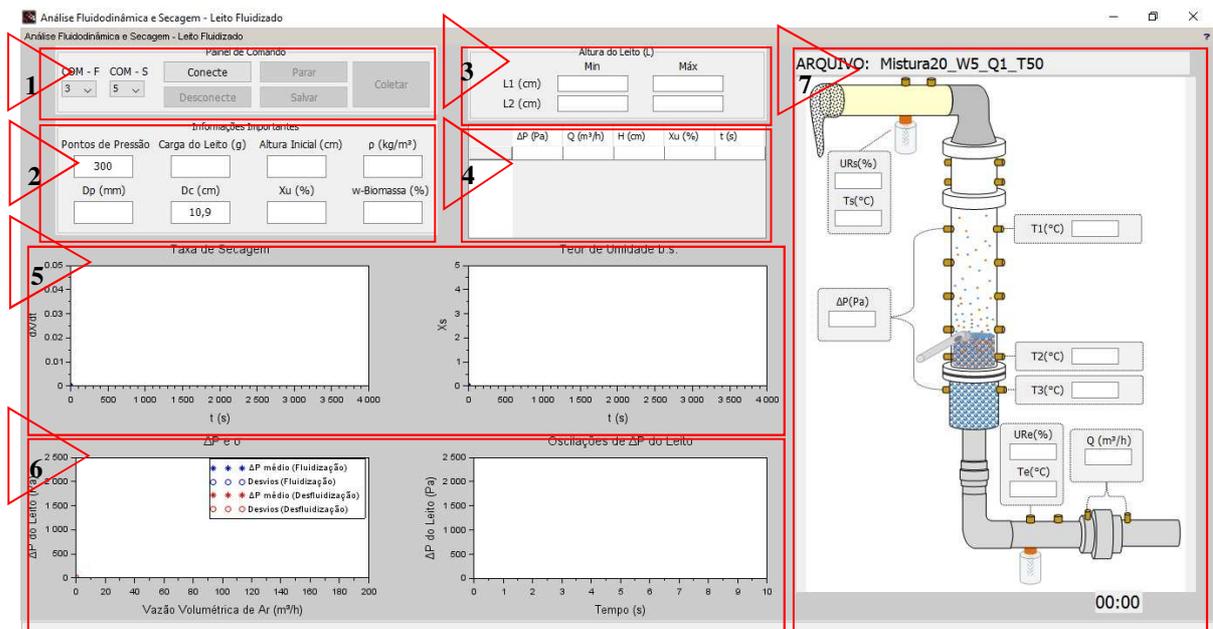


Figura 3.4 – Interface do sistema desenvolvido em Scilab para análise fluidodinâmica e secagem

(1) Painel de comando: No painel de comando, ficam os botões responsáveis pela inicialização do processo de coleta de dados. Os menus de títulos “COM-F” e “COM-S” correspondem à porta serial nas quais estão configurados o arduino com os transdutores de pressão diferencial MPX5010DP e o arduino com os sensores de umidade relativa DHT22 e os termoresistores, respectivamente.

Entenda-se “COM-F” como “COMunicação para Fluidodinâmica” e “COM-S” como “COMunicação para Secagem”.

(2) Informações importantes: Esta região da interface é destinada para a inserção de informações relevantes tanto para a análise fluidodinâmica quanto para a secagem, tais como: carga do leito inicial em gramas, altura inicial do leito em centímetros, massa específica em kg/m^3 , diâmetro médio da partícula em milímetros, diâmetro da coluna em centímetros, teor de umidade inicial da biomassa em base úmida e fração mássica da biomassa no leito.

Além disso, deve-se informar, no item “Pontos de Pressão”, quantos pontos das oscilações de queda de pressão no leito se deseja obter para que o programa calcule a média e o desvio padrão populacional.

(3) Altura do leito (cm): Nesse item, são informados 4 valores de altura do leito estático, aferidos por duas réguas graduadas acopladas na coluna do leito fluidizado.

(4) Tabulação de dados: Nesta região da interface são tabelados os valores médios de queda de pressão no leito e altura do leito em função da vazão volumétrica do ar, bem como os dados do teor de umidade em base úmida e o tempo do processo.

(5) Gráficos de cinética de secagem: Com a comunicação na porta COM-S, o sistema recebe os valores decimais fornecidos pelos termoresistores PT-100 e os sensores DHT22 e, realizando uma série de operações aritméticas, com base em modelos implementados, calcula e plota a taxa de secagem (dX/dt) em função do teor de umidade em base seca (X_s), além da curva característica de secagem.

(7) Representação gráfica do comportamento fluidodinâmico: Com a comunicação na porta COM-F, o sistema recebe os valores fornecidos pelos transdutores de pressão MPX5010DP e, realizando uma série de operações aritméticas, com base nas equações de calibração do apêndice A, calcula a queda de pressão média do leito e a vazão volumétrica do ar, plotando a curva fluidodinâmica característica. Nos experimentos de secagem é possível plotar também o comportamento da queda de pressão no leito durante a remoção de umidade.

Como informado no item (2), com base na quantidade de pontos desejados, o sistema faz a média apenas dos sensores de pressão, já que os sensores de umidade relativa e os termoresistores apenas fornecem seus valores a cada 2 segundos.

(8) *Acompanhamento em tempo real das variáveis*: No esboço do leito fluidizado, mostrado na Figura 3.1, são informados, de forma *online*, os valores calculados e lidos pelos sensores de pressão e de umidade.

Vale ressaltar que, a cada nova leitura, o sistema realiza a limpeza das portas seriais, a fim de excluir qualquer resquício de informações antigas. Essa etapa é imprescindível para evitar problemas de erro de leitura por parte do sistema.

ii) Procedimento operacional padrão para os ensaios fluidodinâmicos

Com as equações de calibração da placa de orifício e da placa distribuidora, os experimentos puderam ser realizados.

Antes de começar qualquer etapa, primeiramente eram verificadas a tensão da rede elétrica, a integridade das conexões das mangueiras conectadas aos sensores, e conferindo se a válvula de alimentação estava completamente fechada, a fim de evitar que o sensor fosse danificado, e se a válvula da purga estava completamente aberta, a fim de evitar danos ao compressor.

A fim de assegurar uma condição inicial de leito sem segregação, as quantidades de partículas de bagaço e de inertes necessárias para atingir a carga do leito, nas frações mássicas especificadas, foram perfeitamente misturadas, antes de serem alimentadas à coluna de fluidização.

A alimentação da coluna foi feita de forma gradativa, a fim de garantir que o empacotamento fosse do tipo frouxo. Após a alimentação da mistura binária, a altura inicial do leito foi medida por uma escala graduada acoplada à parede externa da coluna. Em seguida, o compressor foi posto em funcionamento. Para a determinação das curvas fluidodinâmicas características, a vazão de ar foi aumentada gradualmente até a fluidização completa do material (até que a queda de pressão no leito ficasse praticamente constante) e, posteriormente, reduzida até a condição de leito fixo ser restabelecida. Para cada vazão crescente e decrescente do ar, foram registrados os valores de altura do leito e das quedas de pressão na placa de orifício e no leito de partículas. Essas quedas de pressão foram medidas por meio de transdutores de pressão diferencial MPX5010DP que captam os sinais analógicos da placa de orifício e do leito, os quais são direcionados para uma placa de aquisição de dados Arduino Uno, conectada a um microcomputador, que permite o processamento e armazenamento dos dados por um programa de aquisição de dados desenvolvido em linguagem de programação gráfica Scilab 5.5.2.

O experimento findava quando a válvula de regulação da vazão era completamente fechada. Com isso, nova leitura era feita na altura do leito e todo o material era retirado de dentro da coluna por um aspirador de pó Eletrolux com câmara removível.

iii) Determinação dos parâmetros nas condições mínimas de fluidização

A vazão (Q_{mf}) e a queda de pressão no leito (ΔP_{mf}) nas condições de mínima fluidização foram determinadas experimentalmente pelo método gráfico, a partir da interseção da curva de queda de pressão para leito fixo e a curva horizontal correspondente à região de leito fluidizado (PEÇANHA, 2014), como ilustrado na Figura 3.5.

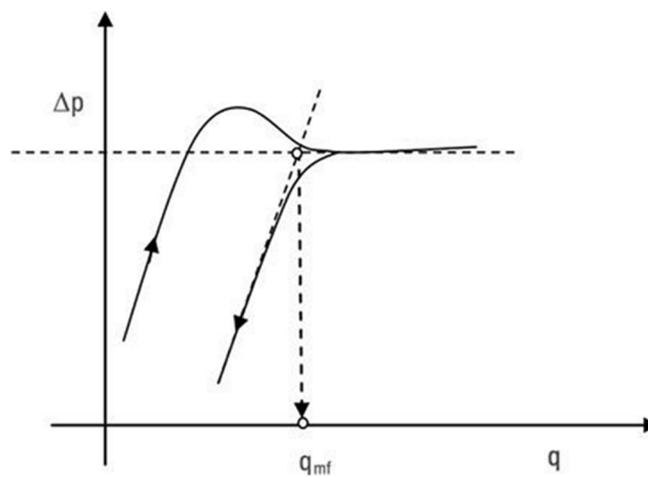


Figura 3.5 – Exemplo da Determinação Gráfica da Velocidade Mínima de Fluidização

Fonte: adaptado de Peçanha (2014)

O ponto de intersecção entre os dois segmentos de reta é conhecido como a velocidade mínima de fluidização no eixo das abcissas e a queda de pressão mínima de fluidização no eixo das ordenadas.

Segundo Peçanha (2014), com esse valor é possível também obter a porosidade mínima de fluidização (ϵ_{mf}) e a altura mínima de fluidização (H_{mf}), obtida na leitura da escala graduada da coluna durante o acompanhamento do comportamento do leito na desfluidização.

Além do método gráfico, há também, na literatura, correlações empíricas que visam estimar a vazão de mínima fluidização. Os dados experimentais obtidos foram comparados com os valores previstos pelas correlações listadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Correlações para determinação da velocidade mínima de fluidização

AUTOR(ES)	CORRELAÇÃO
Leva (1959)	$v_{mf} = \frac{0,0093 d_{mist}^{1,82} (\rho_{mist} - \rho_{ar})^{0,94}}{\mu^{0,88} \cdot \rho_{ar}^{0,06}} \quad (3.9)$
Wen e Yu (1966)	$Re_{mf} = (33,7^2 + 0,0408 Ar)^{0,5} - 33,7 \quad (3.10)$
Thonglimp (1985)	$Re_{mf} = 0,000754 Ar^{0,98} \quad (3.11)$
Subramani <i>et al.</i> (2007)	$Re_{mf} = 0,00108 Ar^{0,947} \quad (3.12)$
Paudel (2011)	$Re_{mf} = (33,7^2 + 0,108 Ar)^{0,5} - 33,7 \quad (3.13)$

Fonte: adaptado de Paudel (2011)

Na correlação de Leva (1959), as unidades estão no Sistema Internacional, onde v_{mf} é a velocidade de mínima fluidização (m/s), d_{mist} é o diâmetro médio efetivo da mistura (m), ρ é a massa específica média efetiva da mistura (kg/m³) e μ é a viscosidade absoluta do ar (Pa.s).

O número de Reynolds na condição de mínima fluidização (Re_{mf}) e o número de Arquimedes (Ar) foram determinados pelas Equações (3.14) e (3.15), respectivamente.

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g \cdot v_{mf} \cdot d_{mist}}{\mu} \quad (3.14)$$

$$Ar = \frac{d_{mist}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_{mist} - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (3.15)$$

onde ρ_g é a massa específica do ar em kg/m³, v_{mf} é a velocidade mínima de fluidização em m/s, d_{mist} é o diâmetro médio da mistura em m, μ é a viscosidade absoluta do ar em Pa.s, ρ_{mist} é a massa específica média da mistura em kg/m³ e g é a aceleração da gravidade em m/s².

Porém, Law e Mujumdar (2015) chamam a atenção de que essas correlações possuem restrições quanto à sua utilização, pois as mesmas, além de não incluírem o efeito da umidade das partículas, foram obtidas para determinados tamanhos de partícula, dimensões da coluna e parâmetros operacionais, o que pode restringir o seu uso e sua validade.

iv) Avaliação da qualidade de fluidização

Para avaliar a qualidade de fluidização, foram calculados o índice de efetividade da fluidização (IF) e o número de Froude (Fr), utilizando as Equações (3.16) e (3.17), respectivamente.

$$IF = \frac{-\Delta P_{mf}}{g \cdot m_L} \cdot A \quad (3.16)$$

$$FR = \frac{v_{mf}^2}{\sqrt{d_{mist} \cdot g}} \quad (3.17)$$

onde **A** é área da seção transversal do leito (m²), **g** é aceleração da gravidade (m²/s), **m_L** é a carga do leito e **ΔP_{mf}** é a queda de pressão na mínima de fluidização (Pa), **v_{mf}** é velocidade mínima de fluidização (m/s), **g** é aceleração da gravidade (m²/s) e **d_{mist}** é o diâmetro médio da mistura binária.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados, inicialmente, os resultados quanto à caracterização física das partículas de bagaço de laranja e de sólidos inertes. Logo após, são apresentadas e discutidas as características fluidodinâmicas das misturas binárias de bagaço de laranja com as partículas inertes de polietileno de 2,58 mm, areia de 1,85 mm e areia de 0,93 mm, em diferentes condições de operação.

4.1 Caracterização da Matéria-Prima

4.1.1 Distribuição granulométrica das partículas da biomassa

A distribuição granulométrica das partículas úmidas resultante do processamento do bagaço encontra-se compilada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica das partículas de bagaço de laranja úmido

Peneira (#Tyler)	Faixa de diâmetro (mm)	Diâmetro médio (mm)	Massa retida (kg)	Fração mássica (%)
7	$x > 2,80$	3,075	0,808	22,73
8	$2,80 > x > 2,36$	2,58	0,830	23,35
9	$2,36 > x > 2,00$	2,18	0,462	13,00
10	$2,00 > x > 1,70$	1,85	0,614	17,28
12	$1,70 > x > 1,40$	1,55	0,468	13,17
14	$1,40 > x > 1,18$	1,29	0,367	10,33
Fundo	$x < 1,18$	1,09	0,005	0,14
TOTAL	-	-	3,554	100

Apesar das maiores quantidades de partículas terem sido retidas nas peneiras de Tyler 7 e 8, as escolhidas para os ensaios fluidodinâmicos foram aquelas retidas nas peneiras de Tyler 10, 12 e 14, a fim de atender o tamanho de partícula recomendado para leito fluidizado, que deve ser igual ou inferior a 2,0 mm (LAW e MUJUMDAR, 2015).

O tamanho médio das partículas na faixa selecionada foi calculado pela definição de Sauter, a partir da Equação 3.1, e o resultado obtido foi de **(1,61 ± 0,20) mm** para a amostra de bagaço de laranja.

4.1.2 Umidade inicial da biomassa

O valor médio obtido para o teor de umidade inicial do bagaço de laranja utilizado foi de $(77,5 \pm 0,1)\%$ em base úmida (kg de água/kg de sólido úmido) ou $(3,45 \pm 0,03)$ em base seca (kg de água por kg de sólido seco).

Gonçalves (1996) obteve um valor médio de teor de umidade de $68,1\%$ em base úmida (b.u.). Já Cavichiolo (2010), obteve o valor de $69,5\%$ b.u. Ambos os autores obtiveram a matéria prima já processada de uma mesma indústria. Entretanto, Gomes *et al.* (2016) obteve o resíduo no comércio local próximo ao seu ambiente de trabalho, cujo valor médio aproximado foi 75% em base úmida, estando próximo do obtido neste trabalho.

4.1.3 Massa específica real e aparente das partículas

Os resultados de massa específica real e aparente das partículas, bem como da densidade de empacotamento, obtidos para a biomassa em três diferentes teores de umidade e para os sólidos inertes testados são apresentados na Tabela 4.2, expressos em termos dos valores médios das medidas realizadas em triplicata, à temperatura média de 24°C . Os valores calculados de porosidade intrapartícula, porosidade bulk (excluindo vazios intra-partículas) e porosidade total do leito (levando em conta vazios intra e interpartículas) são listados na Tabela 4.3. As densidades de empacotamento das misturas binárias compostas por bagaço + areia e bagaço + polietileno serão apresentadas no item que trata da fluidodinâmica desses leitos particulados;

Tabela 4.2 – Massas específicas real, aparente e de empacotamento das partículas de biomassa e de inertes

Material	ρ_{real} (kg/m ³)	ρ_{aparente} (kg/m ³)	ρ_e (kg/m ³)
Bagaço (X = 75% b.u.)	1213,5	792,8	385,7
Bagaço (X = 45% b.u.)	1296,6	634,6	312,8
Bagaço (X = 15% b.u.)	1501,9	446,1	288,5
Polietileno (dp = 2,58 mm)	1488,0	1300,0	786,8
Areia 10 (dp = 1,85 mm)	2668,0	2602,0	1336,0
Areia 20 (dp = 0,93 mm)	2517,1	2461,0	1363,2

Da Tabela 4.2, pode-se constatar que a diminuição do teor de umidade do bagaço de laranja de 75 para 15% b.u. provocou um aumento em torno de 24% na sua massa específica real. Isso pode ser justificado pelo fato de que a maioria dos componentes dos sólidos remanescentes, com exceção da gordura a qual está em pequenas quantidades na biomassa

estudada, tem uma densidade de sólido que é maior que 1000 kg/m^3 (gordura $900\text{-}970 \text{ kg/m}^3$, carboidratos $1500\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$, enquanto que a densidade da proteína é variável, mas considera-se um valor médio de 1250 kg/m^3), (MARQUES, 2008). Assim, a densidade real global tende a aumentar com a remoção de umidade.

Por sua vez, tanto a densidade aparente como a densidade de empacotamento das partículas de biomassa diminuíram com a redução do teor de umidade, devido principalmente ao aumento da porosidade intrapartícula, que contribuiu efetivamente para o aumento da porosidade total do leito, conforme pode ser verificado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Porosidade intrapartícula, porosidade bulk e porosidade total dos leitos empacotados somente com partículas de biomassa em diferentes umidades ou somente com cada um dos sólidos inertes testados

Material	$\epsilon_{\text{intrapart}} (-)$	$\epsilon_{\text{bulk}} (-)$	$\epsilon_{\text{total}} (-)$
Bagaço (X = 75% b.u.)	0,35	0,51	0,68
Bagaço (X = 45% b.u.)	0,51	0,51	0,76
Bagaço (X = 15% b.u.)	0,70	0,35	0,81
Polietileno (dp = 2,58 mm)	0,13	0,39	0,47
Areia 10 (dp = 1,85 mm)	0,02	0,49	0,50
Areia 20 (dp = 0,93 mm)	0,02	0,45	0,46

A razão entre as densidades da biomassa e do material inerte variou de 2,25, utilizando areia, para 1,26, utilizando polietileno como inerte. Por sua vez, os resultados mostram que as razões entre os diâmetros de partículas dos inertes e da biomassa variaram entre 1,53, para o polietileno, 1,1 para a areia de 1,85 mm e 0,55 para a areia de 0,93 mm. Essas diferenças na densidade e tamanho das partículas que compõem a mistura binária permitem avaliar a influência de uma possível segregação no leito sobre o comportamento fluidodinâmico apresentado (NODA *et al.*, 1986).

4.1.4 Ângulo de repouso

Na Tabela 4.4 são listados os ângulos de repouso estático das partículas de sólidos inertes e de bagaço de laranja com umidade de 75% b.u. e diferentes diâmetros de partícula.

Com base nos ângulos de repouso apresentados e de acordo com a classificação proposta por Lobato (2013), apresentada na Tabela 3.2, as partículas do bagaço de laranja mostram instabilidade de fluxo, o que indica dificuldade de fluidização. Isto pode ser atribuído ao elevado teor de umidade da biomassa, o qual facilita a formação de aglomerados e o aumento

do coeficiente de atrito, provocando, dessa forma, um efeito adverso sobre a fluidez. Além disso, uma alta umidade aliada a uma maior quantidade de biomassa favorece a formação de pontes líquidas que intensificam as forças interpartículas e dificultam o fluxo.

Tabela 4.4 – Ângulo de repouso das partículas de biomassa e de inertes.

MATERIAL	ÂNGULO DE REPOUSO (°)
Polietileno	24,2
Areia (1,85 mm)	29,9
Areia (0,93 mm)	25,7
Bagaço de laranja (2,58 mm)	46,7
Bagaço de laranja (2,18 mm)	45,4
Bagaço de laranja (1,85 mm)	36,7
Bagaço de laranja (1,69 mm)	40,1

Por sua vez, as partículas de polietileno e de areia apresentam a característica de fluxo livre, com uma escoabilidade elevada, o que é desejado para utilização em leitos móveis. Desta forma, justifica-se o uso desses sólidos inertes com o propósito de assistir à fluidização das partículas do bagaço de laranja.

4.1.5 Classificação de Geldart

Na Figura 4.1 é apresentado o diagrama de Geldart e a localização das partículas de biomassa e de sólidos inertes na sua região de classificação. Tanto as partículas de inertes quanto as partículas de bagaço de laranja foram classificadas como do tipo **D** de Geldart.

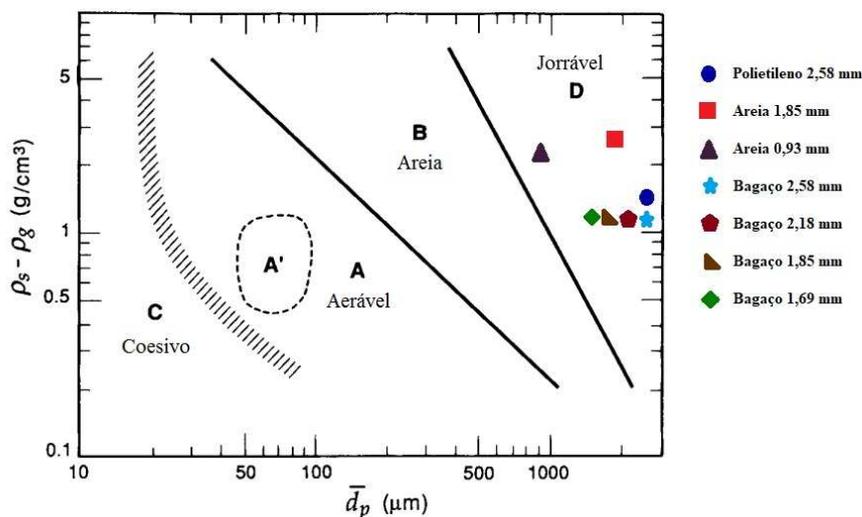


Figura 4.1 – Classificação de Geldart para as partículas de biomassa da laranja.

Fonte: adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

As partículas do tipo D são caracterizadas por regimes de fluidização com formação de canais preferenciais e baixa expansão do leito, além de promoverem a formação de bolhas no processo de fluidização. Com base na classificação de Geldart e nos valores do ângulo de repouso estático, um leito de monopartículas de bagaço tendem a apresentar dificuldades para fluidizar sem o auxílio de sólidos inertes.

4.1.6 Poder Calorífico

Os valores determinados para o poder calorífico superior e para o poder calorífico inferior do bagaço de laranja seco foram de 16.715,7 kJ/kg e 16.445,7 kJ/kg, respectivamente. O valor do PCS obtido apresenta desvios inferiores a 3% quando comparado com os resultados reportados por Cavichiolo (2010), de 16.232,2 kJ/kg, e por Gonçalves (1996), de 16.361,0 kJ/kg.

4.1.7 Propriedades térmicas dos inertes e do bagaço de laranja

A Tabela 4.5 apresenta os valores das propriedades térmicas: difusividade, condutividade, resistividade térmica e do calor específico, além da massa específica de empacotamento para das partículas de inertes e de bagaço de laranja.

Tabela 4.5 – Propriedades térmicas dos inertes e do bagaço de laranja

Material	K (W/(m.°C))	α (m ² /s)	R ((m.°C)/W)	ρ_e (kg/m ³)	Cp (J/(kg.°C))
Polietileno	0,063 ± 0,004	1,2 x 10 ⁻⁷	16,2 ± 0,8	786,8	662,0 ± 45,9
Areia 10	0,090 ± 0,007	1,0 x 10 ⁻⁷	11,8 ± 0,9	1336,0	673,7 ± 52,9
Areia 20	0,115 ± 0,005	1,0 x 10 ⁻⁷	8,8 ± 0,3	1363,2	843,7 ± 36,7
Bagaço (X _u = 75%)	0,100 ± 0,007	1,1 x 10 ⁻⁷	10,1 ± 0,6	385,7	2357,0 ± 166,7
Bagaço (X _u = 45%)	0,058 ± 0,004	1,3 x 10 ⁻⁷	17,9 ± 0,6	312,8	1441,8 ± 134,0
Bagaço (X _u = 15%)	0,048 ± 0,004	1,6 x 10 ⁻⁷	21,8 ± 0,4	288,5	1045,4 ± 108,3

Ao reduzir o teor de umidade das partículas de bagaço de 75% para 15% verifica-se reduções em torno de 52% e 56% na condutividade térmica e calor específico do bagaço de laranja, respectivamente.

De acordo com Yu *et al.* (2015), o comportamento observado para a condutividade térmica se deve ao fato de que em materiais com maiores teores de umidade há uma maior quantidade de íons e dipolos. Ademais, um maior teor de umidade, em razão do alto calor

específico da água ($4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), contribui para um maior valor de calor específico da biomassa (SANTOS JUNIOR, 2017).

Por sua vez a difusividade térmica do bagaço de laranja variou de $1,1 \times 10^{-7} \text{ W/m }^\circ\text{C}$ a $1,6 \times 10^{-7} \text{ W/m }^\circ\text{C}$, apresentando um aumento de aproximadamente 45% à medida que a umidade é reduzida de 75 para 15% b.u.

4.2 Análise Fluidodinâmica

4.2.1 Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com o polietileno

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas características típicas da mistura de bagaço e partículas de polipropileno, obtidas na fluidização e na desfluidização, relacionando a queda de pressão no leito em função das vazões crescente e decrescente, respectivamente, para um teor de umidade da biomassa de 75% e fração mássica de biomassa de 10%.

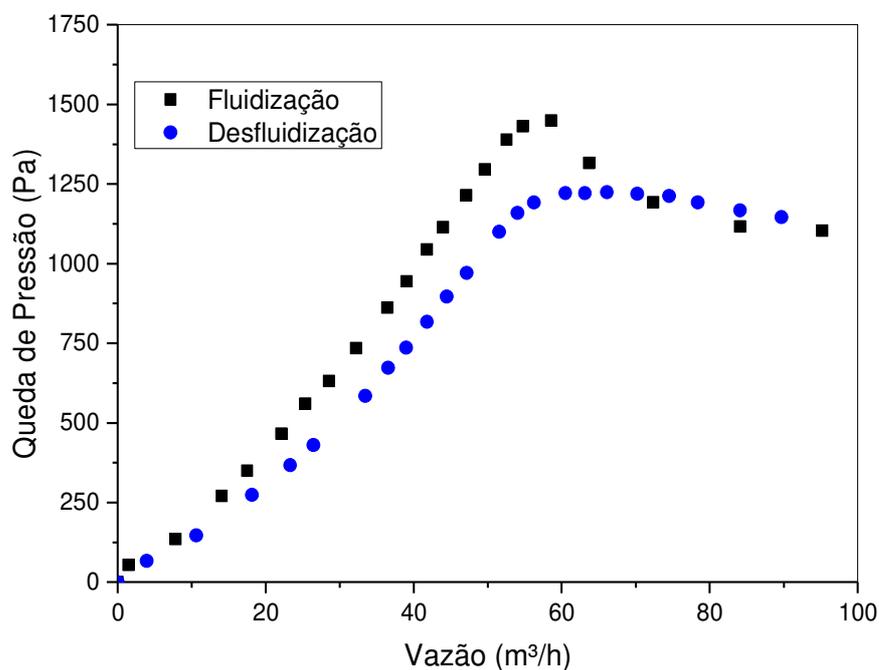


Figura 4.2 – Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária biomassa-polietileno, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.

A mistura binária de bagaço com polietileno apresentou comportamento de fluidização típico, conforme descrito em Kunii e Levenspiel (1991). Verifica-se uma região de leito fixo

bem definida, caracterizada pelo aumento da queda de pressão no leito com a vazão de ar, seguida por um pico de queda de pressão no leito, representando o momento que o ar vence as forças resistivas de coesão entre as partículas, e uma região de leito fluidizado, na qual a queda de pressão no leito permanece praticamente constante. Na desfluidização, os valores de queda de pressão na região de leito fixo são menores que os medidos na fluidização, o que pode ser explicado pela acomodação das partículas, característica do leito expandido, com porosidade maior do que aquela da região de leito fixo inicial, ocasionando a histerese existente entre as duas regiões. Vale ressaltar que a existência de um pico de queda de pressão na fluidização, o que se deve ao fato de que houve uma influência da compactação inicial do leito, característico de empacotamentos do tipo denso (RHODES, 1998).

Verificou-se também que houve uma leve mudança na inclinação dos primeiros pontos. Esse comportamento é típico de leito fixo, correspondendo ao momento em que o termo turbulento da equação de Ergun passa a ter efeito significativo. Gomide (1980) ratifica essa afirmação dizendo que, a partir desse momento, o escoamento deixa de ser laminar e passa a ser turbulento.

Na Tabela 4.6 são listados os principais parâmetros fluidodinâmicos obtidos para misturas de partículas de polipropileno e bagaço de laranja, em diferentes frações mássicas e teores de umidade.

i) Efeitos sobre a queda de pressão na mínima fluidização e o índice de fluidização

De acordo com os dados listados na Tabela 4.6, não houve efeito significativo das variáveis estudadas sobre os valores de queda de pressão na mínima fluidização, cujo valor médio foi **(1.243,5 ± 24,1) Pa**. Isso pode ser explicado pelo fato de que, para todas as condições de operação, a carga do leito foi fixada no valor de **1400 g**. Logo, a força exercida pelo ar para colocar em suspensão todo o leito foi praticamente constante em todos os ensaios.

Esse mesmo comportamento foi observado por Borel (2014) que, ao utilizar uma carga de 500 g para todas as condições, observou que o valor médio da queda de pressão na condição de mínima fluidização ficou com valor médio de 448,82 Pa.

Da mesma forma, Gomes *et al.* (2016) observaram o mesmo comportamento ao avaliarem a fluidodinâmica do leito de monopartículas de bagaço de laranja. Em uma mesma carga de 400 g, a queda de pressão ficou em torno de um valor médio de 278,67 Pa, para todas as condições de operação.

Tabela 4.6 – Parâmetros fluidodinâmicos da mistura binária de bagaço de laranja e polietileno

X (%b.u)	w _b (%)	- ΔP _{mf} (Pa)	Q _{mf} (m ³ /h)	d _{mist} (mm)	ρ _{mist} (kg/m ³)	IF	α (°)	Fr	L/D	Re _{mf}	Ar x 10 ⁻⁵	ρ _e (kg/m ³)	ε ₀
75	15	1236,9 ± 8,9	54,2 ± 5,7	2,38	1291,8	0,84 ± 0,01	36,1 ± 0,6	17,1 ± 3,6	1,81 ± 0,01	247 ± 26	5,78	761,6 ± 2,7	0,410 ± 0,002
75	10	1228,8 ± 8,9	54,3 ± 4,3	2,45	1294,5	0,84 ± 0,01	35,6 ± 0,1	16,9 ± 2,6	1,73 ± 0,01	254 ± 20	6,24	797,4 ± 0,9	0,384 ± 0,001
75	5	1239,2 ± 12,2	50,6 ± 3,4	2,51	1297,3	0,85 ± 0,01	33,8 ± 0,4	14,5 ± 1,9	1,65 ± 0,01	243 ± 16	6,74	834,7 ± 1,6	0,357 ± 0,001
45	15	1241,2 ± 32,9	47,1 ± 0,4	2,39	1301,8	0,85 ± 0,02	33,4 ± 0,2	12,8 ± 0,2	1,96 ± 0,01	216 ± 2	6,14	703,9 ± 0,7	0,459 ± 0,001
45	10	1274,9 ± 44,8	50,7 ± 0,3	2,45	1301,2	0,87 ± 0,03	33,3 ± 0,1	14,7 ± 0,2	1,85 ± 0,03	238 ± 2	6,61	744,6 ± 10,4	0,428 ± 0,008
45	5	1266,8 ± 8,9	46,5 ± 2,4	2,51	1300,6	0,86 ± 0,01	32,3 ± 0,8	12,2 ± 1,3	1,75 ± 0,01	223 ± 12	7,12	785,5 ± 2,9	0,396 ± 0,002
15	15	1220,2 ± 21,1	46,9 ± 0,8	2,41	1328,3	0,83 ± 0,01	32,1 ± 0,2	12,7 ± 0,4	1,87 ± 0,06	217 ± 4	7,27	737,1 ± 24,8	0,445 ± 0,019
15	10	1230,9 ± 11,8	51,1 ± 2,1	2,47	1318,7	0,84 ± 0,01	33,3 ± 0,2	14,9 ± 1,2	1,72 ± 0,02	241 ± 10	7,77	800,7 ± 9,7	0,393 ± 0,007
15	5	1240,3 ± 27,0	49,6 ± 0,4	2,52	1309,3	0,84 ± 0,01	30,0 ± 0,3	13,8 ± 0,2	1,63 ± 0,01	239 ± 2	8,31	843,4 ± 6,0	0,356 ± 0,005

A fim de atestar a existência dos efeitos significativos sobre a queda de pressão na condição de mínima fluidização, foi gerado o diagrama de Pareto das misturas contendo polietileno, com valor-p menor que 5%, o qual está ilustrado na Figura 4.3.

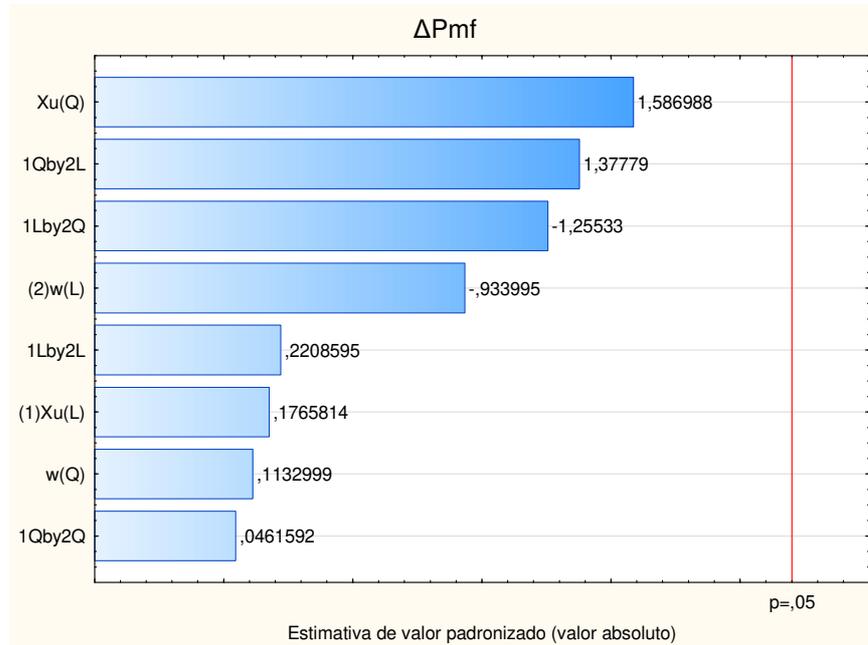


Figura 4.3 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização da mistura binária biomassa-polietileno.

Por ser uma função da queda de pressão na mínima fluidização, o índice de fluidização das misturas também não sofreu uma variação significativa, tendo valor médio de **(84,5 ± 1,6)%**. Em comparação aos índices de fluidização obtidos por Gomes *et al.* (2016), que avaliaram o comportamento fluidodinâmico do leito de monopartículas de biomassa de laranja, cujos valores ficaram entre 63% e 68%, houve uma significativa melhora na qualidade da fluidização.

Apesar do resultado ser satisfatório, o valor médio do índice obtido no atual trabalho indica que houve uma fluidização parcial do leito, onde aproximadamente 15% do leito está expandido e o restante está efetivamente fluidizado.

ii) *Efeitos sobre a vazão de mínima fluidização e o número de Froude*

Na Figura 4.4, são apresentados os valores e desvios médios das vazões de mínima fluidização em função do teor de umidade da biomassa, parametrizados na fração mássica de biomassa na mistura.

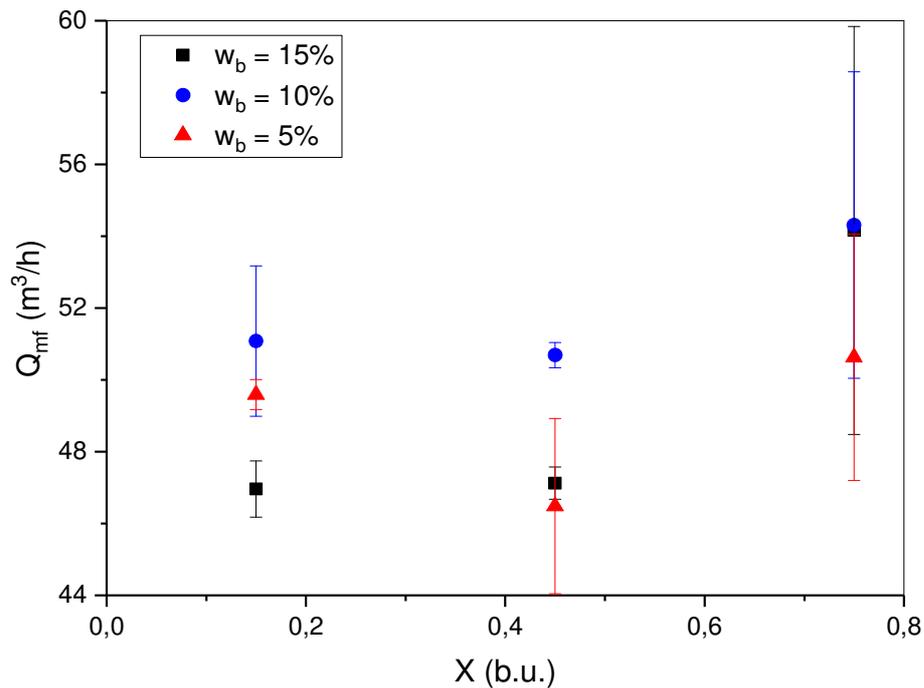


Figura 4.4 – Vazão de mínima fluidização em função do teor de umidade, em diferentes frações mássicas de biomassa na mistura binária com o polietileno.

Pode ser observada na Figura 4.4 uma tendência de influência da umidade entre 0,45 e 0,75 b.u., em todas as frações mássicas investigadas. Mas cabe ressaltar que mesmo nessa faixa as vazões determinadas experimentalmente estão dentro das incertezas das medidas. Logo, na faixa de umidade investigada, os resultados não são estatisticamente diferentes.

Na Figura 4.5 são apresentados os valores e desvios médios das vazões de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura, parametrizados no teor de umidade do bagaço de laranja.

Como os valores da vazão nas condições de fração mássica a 5% e 10% de biomassa na mistura estão englobados pelos erros experimentais, as vazões possuem valor estatístico igual. Na proporção de 15%, houve o destaque quando o teor de umidade estava a 75%, não englobando, em seus desvios, os valores referentes aos teores de umidade de 45% e 15%.

Com isso, conclui-se que a vazão de mínima fluidização não sofreu efeitos significativos nem do teor de umidade inicial da biomassa, nem da quantidade de biomassa na mistura, cujo valor médio ficou em $(49,91 \pm 3,52) m^3 \cdot h^{-1}$.

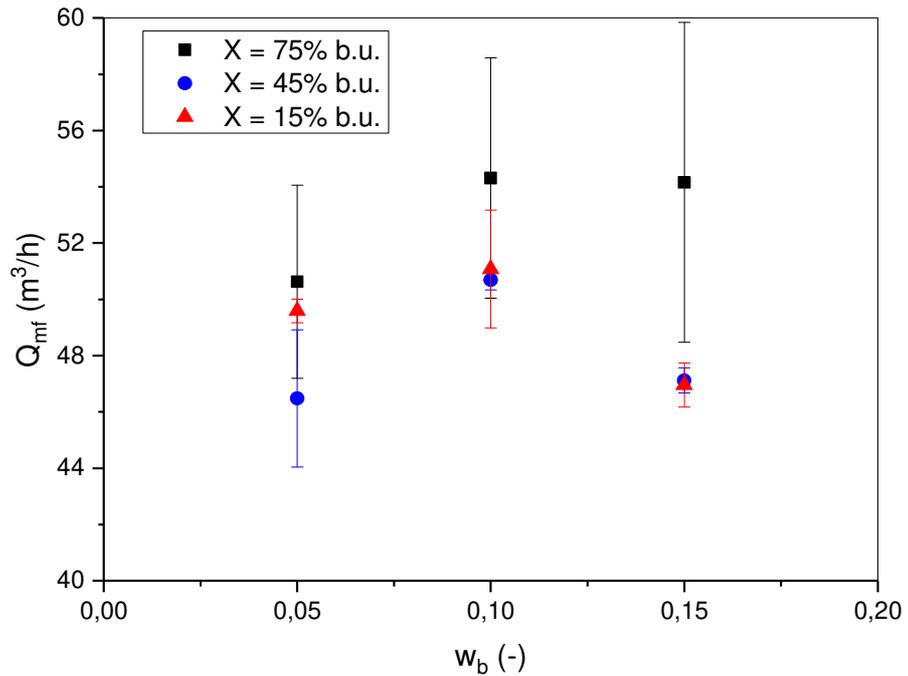


Figura 4.5 – Vazão de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura binária com o polietileno, para diferentes teores de umidade do bagaço de laranja.

A fim de atestar a não existência dos efeitos significativos sobre a vazão na condição de mínima fluidização, foi gerado o diagrama de Pareto das misturas contendo polietileno, com valor-p menor que 5%, o qual está ilustrado na Figura 4.6.

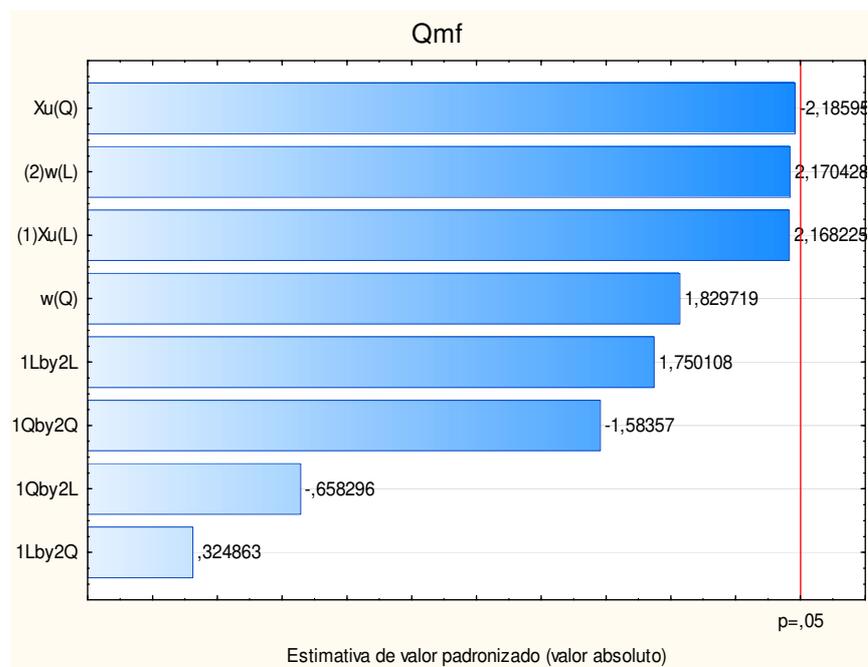


Figura 4.6 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão de mínima de fluidização da mistura binária biomassa-polietileno

Através da Equação 3.12, foi possível calcular o número de Froude para cada condição experimental, podendo, assim, identificar o tipo de fluidização. Como os valores obtidos, em todos os casos, foi acima de 1, então a fluidização foi classificada como do tipo agregativa, caracterizada pela formação de bolhas e “*sluggings*”. Além disso, verificou-se que os valores calculados ficaram em torno de um valor médio de **(14,3 ± 2,11)**.

iii) Efeitos sobre o ângulo de repouso

Ao avaliar a influência da fração mássica sobre o ângulo de repouso, constatou-se que para as frações mássicas de 15% e 10%, não houve diferença significativa quando os teores de umidade foram 75% e 45%. Devido aos desvios experimentais calculados, ambas as condições apresentaram, estatisticamente, os mesmos valores de ângulo de repouso, com média de **(35,85 ± 0,35)** e **(33,34 ± 0,05)**, respectivamente. O destaque é para a condição de composição da mistura com 5% de biomassa, que apresentou em toda a faixa de umidade investigada, os menores valores de ângulo de repouso e, portanto, maior escoabilidade.

Ao comparar a influência da variação do teor de umidade da biomassa sobre o ângulo de talude, constatou-se que o mesmo foi influenciado significativamente pela variável, principalmente quando o leito foi composto por 15% de biomassa e a umidade inicial da biomassa foi de 75%. Ao aumentar o teor de umidade, juntamente com a quantidade de bagaço na mistura, houve um aumento de 6% a 12% no valor do ângulo de repouso, denotando uma piora na escoabilidade da mistura binária.

Isso se dá pelo fato de que, quanto maior a quantidade de biomassa úmida no meio, maior a probabilidade das partículas formarem aglomerados, dificultando sua escoabilidade.

A melhor condição de escoabilidade foi na combinação de 15% de teor de umidade inicial da biomassa e 5% de biomassa, classificando-o, nessa condição, como de escoabilidade **livre**. O valor médio do ângulo de repouso foi **(33,33 ± 1,75)°** e sua classificação geral foi de escoabilidade **fácil**, com o ângulo médio das misturas maior que o ângulo de polietileno (24,2°), denotando que houve uma melhora na escoabilidade ao comparar com o ângulo formado pelo leito de monopartículas de bagaço de laranja, cujo valor foi de 40,1°.

iv) Efeitos sobre a razão L/D inicial do leito

Ao correlacionar a altura de leito estático, representada pela razão de leito L/D, com as variáveis estudadas, constata-se que tanto a fração mássica quanto o teor de umidade da biomassa influenciaram significativamente em seus valores. Isso se explica pela necessidade de se ter um maior volume de partículas de polietileno para se atingir a carga total de 1400 g, que

foi a utilizada para todos os ensaios. Cerca de 40% das condições analisadas tiveram razões L/D superiores a 1,85, possibilitando a observação da formação de *slugs* durante a fluidização.

Esse mesmo comportamento foi observado por Borel (2011), ao fluidizar pólen apícola, com altos valores da razão de leito, caracterizados como leitões profundos. Tal fenômeno ocasiona uma instabilidade no leito, sendo percebido pelos transdutores de pressão, nas oscilações informadas ao sistema, causando altos valores de desvio padrão entre as leituras de queda de pressão no leito, conforme também reportado por Kashaninejad *et al.* (2010).

Ademais, como as partículas de polietileno são maiores que as de bagaço, os espaços vazios promovidos entre as partículas do inerte são preenchidas pelas menores partículas de biomassa. Daí que, quanto maior a quantidade de biomassa, maior será a quantidade de vazios preenchidos e, conseqüentemente, maior será a expansão do leito causada pela presença destes.

Na condição de teor de umidade inicial de 75%, o aumento da fração mássica de 5% para 15%, acarretou num aumento de 9,70% na razão de leito. Já na condição de umidade de 15%, o aumento foi de 14,72%. Isso se dá pelo fato de que, a partícula com menor umidade requer um maior volume para atingir o valor da massa correspondente aos 15% de fração mássica (210 g), levando a um preenchimento mais intensificado dos vazios do leito.

Comportamento similar foi observado por Oliveira *et al.* (2013), ao manter a massa do leito constante e variar a fração mássica de biomassa na mistura. Os autores observaram que, dadas essas condições, a variação da altura do leito refletia no aumento da porosidade do leito.

v) *Efeitos sobre a porosidade inicial do leito*

Relacionando a porosidade inicial do leito com o teor de umidade, verificou-se que, quando a quantidade de biomassa na mistura correspondeu a 15%, os valores médios de porosidade do leito nos teores de umidade de 45% e de 15% (b.u.) estão dentro dos desvios experimentais, tornando-os estatisticamente iguais. O mesmo comportamento é observado para as demais frações mássicas, porém quando as umidades estão a 75 e 15% b.u..

Ao avaliar a influência da fração mássica de biomassa, constata-se que quanto maior a fração de biomassa na mistura, maior é valor médio de porosidade do leito, chegando a aumento de aproximadamente 25%, quando as partículas de bagaço são alimentadas com o menor teor de umidade (15% b.u.), concordando com o observado por Nascimento *et al.* (2001).

Como explicado anteriormente, as partículas mais secas são mais leves e menores em volume que as mais úmidas, exigindo uma maior quantidade de partículas das primeiras para atingirem o valor mínimo da carga inicial, que foi fixada em 1400 g. Isso é ilustrado pela

diferença existente entre as massas específicas e a dependência com o teor de umidade da biomassa, conforme reportado na Tabela 4.2.

4.2.2 Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com a areia de 0,93 mm

Na Figura 4.7, são apresentadas as curvas características típicas da mistura de bagaço e areia com diâmetro médio de 0,93 mm, relacionando a queda de pressão no leito em função das vazões crescente (fluidização) e decrescente (desfluidização), respectivamente, para um teor de umidade inicial da biomassa de 75% e fração mássica de biomassa de 10%.

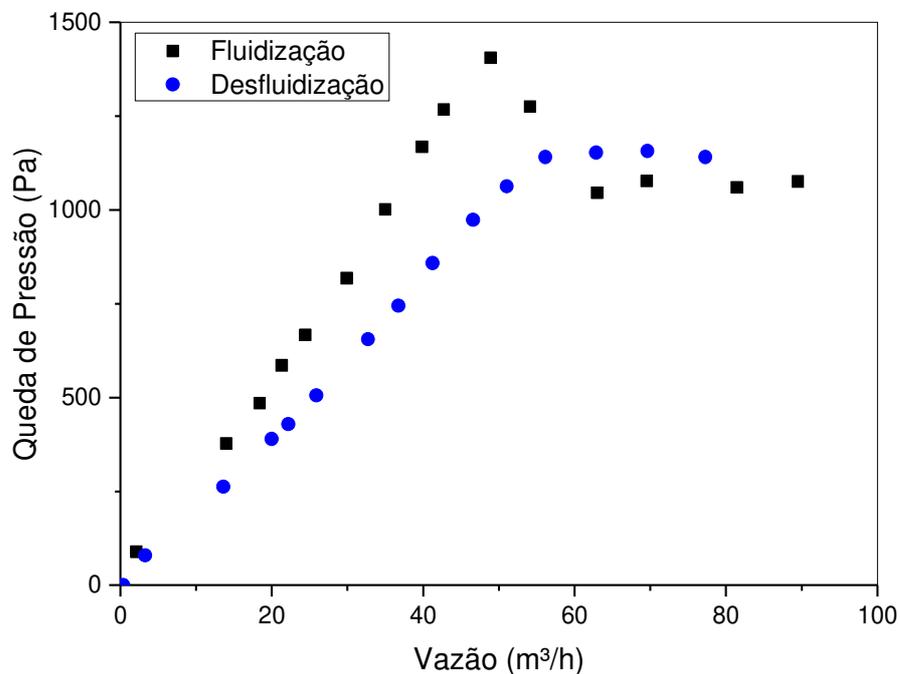


Figura 4.7 – Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária contendo biomassa e areia de 0,93 mm, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.

A partir da Figura 4.7, verifica-se que o comportamento fluidodinâmico foi similar ao apresentado pela mistura com o polietileno, com região de leito fixo bem definida e queda de pressão praticamente constante na região de leito fluidizado. Também é evidente a histerese entre as regiões de leito fixo para vazões crescentes e decrescentes, caracterizando a influência do empacotamento mais frouxo do leito na desfluidização.

Na Tabela 4.7, são apresentados os parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as misturas binárias de bagaço de laranja e partículas de areia de 0,93 mm, em diferentes frações mássicas da biomassa (w_b) e umidades do bagaço (X).

Tabela 4.7 – Parâmetros Fluidodinâmicos da Mistura Binária de Bagaço e Areia de 0,93 mm

X (%b.u)	w _b (%)	- ΔP _{mf} (Pa)	Q _{mf} (m ³ /h)	d _{mist} (mm)	ρ _{mist} (kg/m ³)	IF (%)	α (°)	Fr	L/D	Re _{mf}	Ar x 10 ⁻⁴	ρ _e (kg/m ³)	ε ₀
75	15	1205,5 ± 17,5	53,2 ± 2,5	1,05	2147,6	0,82 ± 0,01	38,4 ± 0,4	24,7 ± 2,3	1,35 ± 0,03	107,1 ± 4,9	4,96	1019,8 ± 21,4	0,53 ± 0,01
75	10	1186,6 ± 50,8	55,9 ± 2,3	1,01	2242,8	0,81 ± 0,03	36,0 ± 0,3	27,8 ± 2,3	1,21 ± 0,03	108,1 ± 4,5	4,41	1137,9 ± 26,6	0,49 ± 0,01
75	5	1218,2 ± 11,8	54,2 ± 1,8	0,97	2346,8	0,83 ± 0,01	33,6 ± 0,8	26,6 ± 1,7	1,07 ± 0,01	100,6 ± 3,3	3,90	1286,5 ± 17,0	0,45 ± 0,01
45	15	1195,2 ± 2,9	46,8 ± 1,6	1,05	2175,4	0,81 ± 0,01	36,9 ± 0,6	19,2 ± 1,3	1,48 ± 0,03	93,8 ± 3,1	5,14	930,2 ± 17,8	0,57 ± 0,01
45	10	1140,2 ± 62,6	43,9 ± 0,9	1,01	2262,9	0,77 ± 0,04	34,1 ± 0,6	17,2 ± 0,7	1,39 ± 0,01	84,8 ± 1,7	4,59	990,3 ± 10,1	0,56 ± 0,01
45	5	1216,1 ± 32,5	45,2 ± 0,8	0,97	2357,8	0,83 ± 0,02	32,6 ± 0,8	18,6 ± 0,7	1,16 ± 0,01	83,8 ± 1,5	4,08	1186,7 ± 14,5	0,50 ± 0,01
15	15	1224,3 ± 26,9	37,3 ± 1,7	1,03	2250,4	0,83 ± 0,02	34,4 ± 0,8	12,3 ± 1,1	1,5 ± 0,01	73,7 ± 3,3	5,71	917,7 ± 8,6	0,59 ± 0,01
15	10	1218,2 ± 11,8	37,5 ± 0,3	1,00	2316,5	0,83 ± 0,01	32,2 ± 0,9	12,6 ± 0,2	1,48 ± 0,01	71,6 ± 0,5	5,15	930,1 ± 8,9	0,60 ± 0,01
15	5	1226,6 ± 30,1	36,2 ± 2,6	0,96	2386,5	0,83 ± 0,02	30,2 ± 0,9	11,9 ± 1,7	1,22 ± 0,01	66,7 ± 4,9	4,64	1128,3 ± 13,1	0,53 ± 0,01

i) *Efeitos sobre a queda de pressão na mínima fluidização e o índice de fluidização*

A partir dos dados da Tabela 4.7, infere-se que os valores de queda de pressão na mínima fluidização não sofreram efeito significativo das variáveis estudadas, pois os resultados obtidos estão dentro das faixas dos desvios experimentais, cujo valor médio foi de **(1.200,92 ± 36,35) Pa**.

Esse mesmo comportamento foi observado por Borel (2014) e Gomes *et al.* (2016), além de estar de acordo com o comportamento das misturas com o polietileno.

Com isso, o diagrama de Pareto foi gerado com o intuito de averiguar a ausência de efeitos significativos tanto do teor de umidade inicial quanto da fração de biomassa na mistura, com valor-p menor que 5%, sobre a queda de pressão na condição de mínima fluidização nas misturas contendo areia de 0,93 mm, o qual está ilustrado na Figura 4.8.

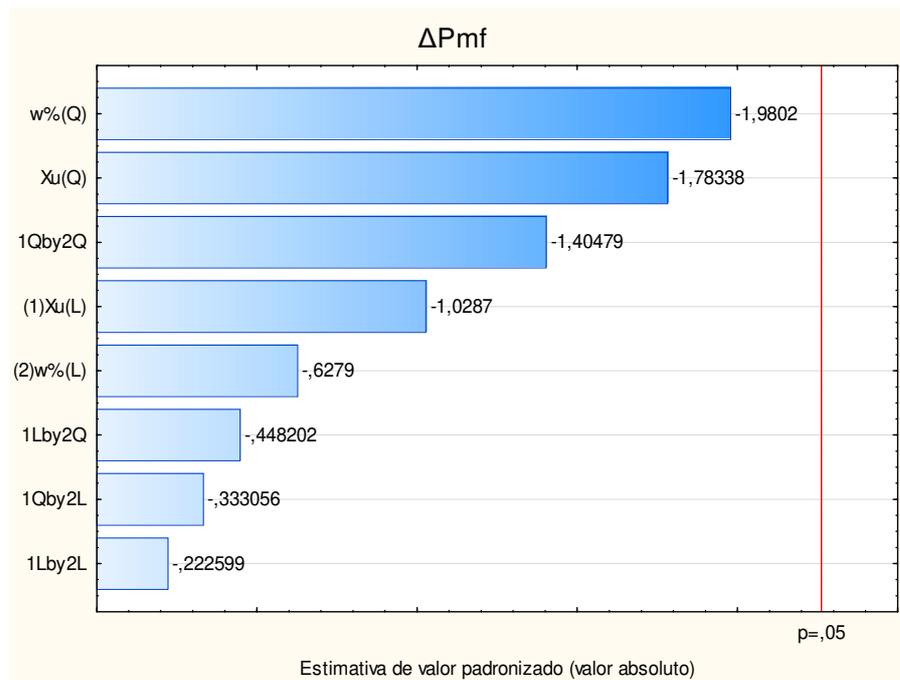


Figura 4.8 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização da mistura binária com areia de 0,93 mm

O índice de fluidização das misturas também não sofreu uma variação significativa, tendo valor médio de **(81,62 ± 2,47)%**, caracterizando uma melhora na fluidização em comparação aos índices obtidos por Gomes *et al.* (2016). Do mesmo modo que o polietileno, esse valor médio indica que não houve uma completa fluidização do leito.

ii) *Efeitos sobre a vazão de mínima fluidização e o número de Froude*

Na Figura 4.9 são apresentados os valores e desvios médios das vazões de mínima fluidização, listados na Tabela 4.7, em função do teor de umidade do bagaço, parametrizados na fração mássica de biomassa na mistura binária com areia de 0,93 mm.

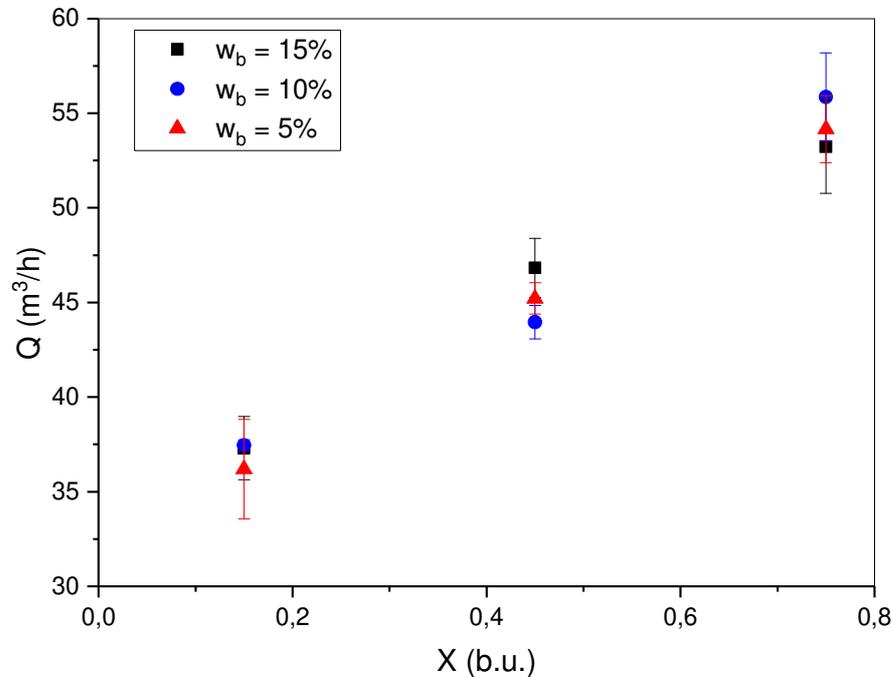


Figura 4.9 – Vazão de mínima fluidização em função do teor de umidade, em diferentes frações mássicas de biomassa na mistura binária com a areia de 0,93 mm.

Os desvios entre os dados experimentais obtidos em diferentes frações mássicas de biomassa foram menores que os erros de medida, indicando que, na faixa investigada, a fração mássica de biomassa teve um efeito negligenciável sobre Q_{mf} . Assim, Q_{mf} , pode ser correlacionada como função apenas do teor de umidade do bagaço. Para teores de umidade de 75%, 45% e 15%, as vazões de mínima fluidização obtidas foram de **$(54,42 \pm 1,33) m^3 \cdot h^{-1}$** , **$(45,33 \pm 1,44) m^3 \cdot h^{-1}$** e **$(36,98 \pm 0,69) m^3 \cdot h^{-1}$** , respectivamente.

Na Figura 4.10 são apresentados os valores e desvios médios da vazão de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura com areia de 0,93 mm, parametrizada na umidade do bagaço.

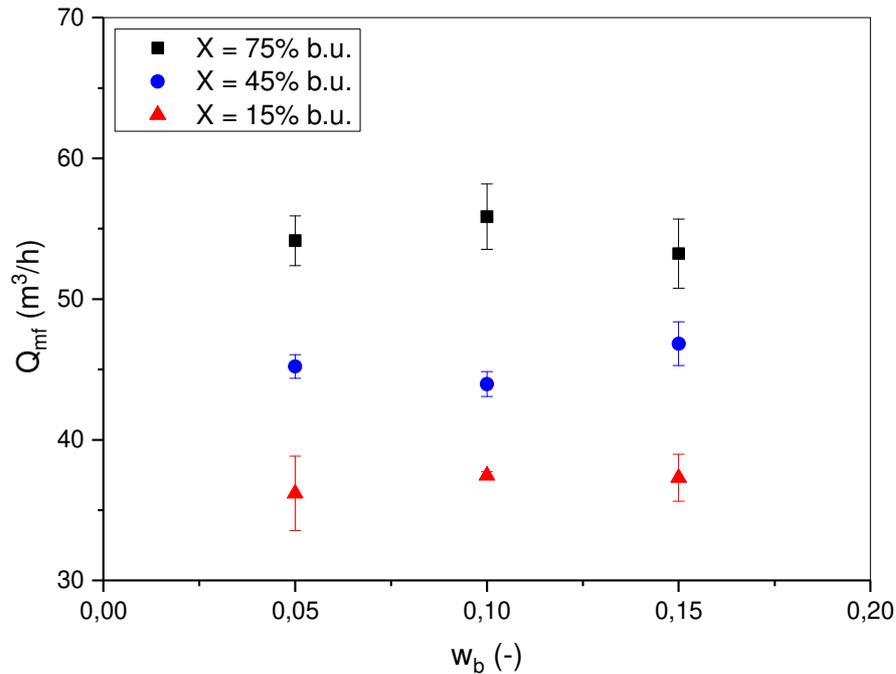


Figura 4.10 – Vazão de mínima fluidização em função da fração mássica de biomassa na mistura binária com a areia de 0,93 mm, para diferentes teores de umidade do bagaço de laranja.

Ao fixar o valor de umidade da biomassa, verifica-se que as vazões obtidas para cada fração mássica estão dentro da faixa de incertezas, denotando que a fração mássica não afetou de forma significativa a vazão de mínima fluidização,

Como os valores das vazões nas condições de mesma fração mássica de biomassa na mistura não estão englobados pelos erros experimentais umas das outras, logo é visível o efeito significativo por parte da variação do teor de umidade sobre a vazão de mínima fluidização da mistura binária.

A justificativa é dada pelo fato de que partículas úmidas criam maior resistência ao movimento devido às pontes líquidas por elas criadas que intensificam as forças interpartículas, aumentando a coesão do leito. Além disso, partículas úmidas, devido ao seu alto teor de umidade superficial, criam aglomerados que irão dificultar o desprendimento das partículas que a compõem, individualmente, o que leva ao atraso da fluidização (CHOK *et al.*, 2010).

Silva (2011), ao fluidizar resíduo de madeira derivado da indústria de papel em uma mistura binária com areia com diâmetros e massas específicas diferentes, também observou esse fenômeno. A autora informa que, devido ao teor de umidade em algumas amostras estar relativamente maior que em outras, houve um emaranhamento de algumas fibras no leito, os quais, ao se agregarem com a areia de partículas menores, promoveram uma maior resistência ao fluxo de ar, exigindo do mesmo uma maior força para desfazer o emaranhado e poder

fluidizar. Esse mesmo fenômeno também foi observado por Kashaninejad *et al.* (2010), ao fluidizar pistache.

Seguindo o mesmo raciocínio, Silva (2011) afirma ainda que, mesmo com esse emaranhamento, não houve efeito da fração mássica sobre a velocidade mínima de fluidização, o que pode ser justificado pelo fato de que como as partículas de biomassa que compõem o leito são heterogêneas e, além disso, há uma agregação por parte da areia às partículas do resíduo, promovendo uma variação muito pequena na velocidade de fluidização entre as condições de operação. E complementa informando que cada partícula, em sistemas polidispersos, possui sua própria característica de mínima fluidização, o que também justifica o porquê da fração mássica não ter tido um efeito significativo na mistura binária com bagaço e areia de 0,93 mm, pois as partículas do leito devem possuir valores próximos de vazões de mínima fluidização.

A partir do diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.11, pode-se constatar que o termo linear da umidade do bagaço teve efeito significativo, com valor-p menor que 5%.

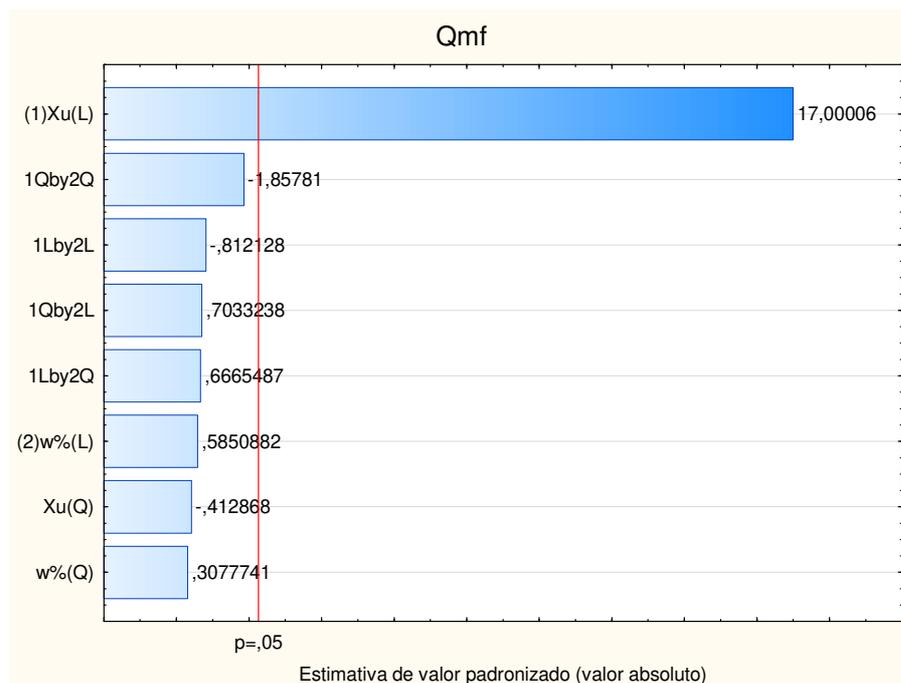


Figura 4.11 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão mínima de fluidização da mistura binária com areia 0,93 mm.

A vazão de mínima fluidização foi então correlacionada com o teor de umidade por uma relação empírica linear, expressa por:

$$Q_{mf} = (29,5 \pm 0,08). X + (35,3 \pm 0,04) \quad R^2 = 0,991 \quad (4.1)$$

O número de Froude foi então calculado para cada condição experimental, através da Equação 3.12, permitindo a identificação do tipo de fluidização. Assim como no polietileno, os valores obtidos, em todos os casos, foi acima de 1, classificando, então, a fluidização como agregativa, com formação de bolhas e “*sluggings*”.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.7, constata-se que houve uma influência significativa por parte do teor de umidade sobre o número de Froude. Em todas as condições, o aumento do teor de umidade da biomassa ocasionou um aumento superior a 100% nos valores médios de Fr, contribuindo assim para que a fluidização da mistura binária com areia de 0,93 mm fosse caracterizada por uma mais intensa formação de bolhas e “*sluggings*”.

iii) Efeitos sobre o ângulo de repouso

Ao avaliar a influência da fração mássica de biomassa sobre o ângulo de repouso das misturas contendo areia de 0,93 mm, para um mesmo teor de umidade do bagaço, constata-se que os desvios experimentais não englobam os valores médios calculados, denotando que houve influência significativa da fração mássica sobre o ângulo de repouso. O aumento da fração mássica, em todas as condições de teor de umidade inicial, causou um aumento entre 13% e 14% no o ângulo de repouso. A justificativa para este fenômeno é a mesma apresentada anteriormente para as misturas binárias com polietileno: formação de aglomerados por conta da maior quantidade de biomassa, o que leva a uma menor escoabilidade da mistura binária.

Já ao avaliar a influência do teor de umidade da biomassa sobre o ângulo de talude, verifica-se que, para uma mesma fração mássica, ao aumentar o teor de umidade, houve um aumento de 11 a 12% no valor do ângulo de repouso, denotando que o aumento do teor de umidade promoveu uma maior resistência ao escoamento. A justificativa é a mesma apresentada para as misturas binárias com polietileno: o filme líquido externo à partícula de biomassa aumenta o coeficiente de atrito, o que dificulta à escoabilidade dos mesmos. Além disso, um maior aglomerado de partículas úmidas promove a formação de um cone com diâmetro de base menor e uma altura maior e, conseqüentemente, um maior ângulo de talude.

Em todas as condições experimentais, a que apresentou melhor escoabilidade foi na combinação de 15% de teor de umidade da biomassa e 5% de biomassa, classificando-o, nessa condição, como de escoabilidade entre **livre** e **fácil**. Porém, a classificação geral das misturas é de escoabilidade **fácil**, que é a mesma classificação das demais condições, tendo como valor médio do ângulo de repouso de $(34,26 \pm 2,44)^\circ$. Apesar do valor médio ter sido maior que o do ângulo do leito de monopartículas de areia de 0,93 mm $(25,7^\circ)$, ele apresentou valor menor que

o formado pelo leito de monopartículas de bagaço de laranja, cujo valor foi de 40,1°, denotando uma melhora na escoabilidade.

Ao estudar a influência do teor de umidade sobre a qualidade da escoabilidade da biomassa, Guo *et al.* (2015) constatou que o alto teor de umidade da partícula ocasionou um aumento na resistência mecânica do leito ao escoamento, o que, conseqüentemente, proporcionou a formação de aglomerados de partículas, resultando em um aumento do coeficiente de atrito o que leva a um efeito negativo sobre a fluidez.

iv) Efeitos sobre a razão L/D inicial de leito

Pode ser notado a partir dos resultados listados na Tabela 4.7 que a razão L/D do leito composto pela mistura binária biomassa-areia de 0,93 mm mostrou-se também dependente tanto da fração mássica como do teor de umidade das partículas de bagaço, conforme ocorreu com as misturas binárias com polietileno, corroborando ainda com o observado por Kashaninejad *et al.* (2010), Borel (2011) e Oliveira *et al.* (2013).

Ao aumentar a fração mássica de 5% para 15%, em um mesmo teor de umidade, a razão L/D do leito aumentou entre 22% e 27%. A razão desse comportamento está ligada à quantidade em volume de partículas presentes. Quanto maior a quantidade de massa exigida para se atingir um valor correspondente à porcentagem da condição experimental, maior será o volume de partículas de biomassa. Na condição de teor de umidade inicial de 75%, o aumento da fração mássica de 5% para 15%, acarretou um aumento de 26,2% na razão de leito. Já na condição de umidade de 15%, o aumento foi de 22,9%.

O aumento na razão L/D também ocorreu ao se reduzir o teor de umidade da biomassa. Como justificado anteriormente, cada condição experimental tem uma condição de mistura em termos mássicos: 5%, 10% e 15%. Como a perda de umidade acarreta na perda de massa, uma maior quantidade (em volume) de partículas com baixo teor de umidade é requerida para atingir o valor em massa correspondente à proporção na mistura. A diminuição do teor de umidade do bagaço de 75% para 15%, a uma fração de 15% de biomassa na mistura, ocasionou um aumento de aproximadamente 11% na razão L/D do leito. Similar comportamento foi observado para frações mássicas de 10% e 5%.

v) Efeitos sobre a porosidade inicial do leito

Para umidades das partículas de bagaço de 45 e 15%, as porosidades das misturas binárias contendo 15 e 10% de biomassa não se mostraram estatisticamente diferentes. Por sua

vez, para $X = 75\%$ b.u., pode ser verificada na Tabela 4.7 uma diferença significativa entre valores de porosidade do leito correspondentes a cada uma das frações mássicas utilizadas.

De um modo geral, o aumento da fração de biomassa de 5 para 15% levou a aumentos de porosidade do leito em torno de 18, 14 e 11%, para teores de umidade do bagaço de laranja de 75, 45 e 15% b.u., respectivamente.

Tal resultado pode ser explicado pelo fato de uma maior quantidade de biomassa na mistura binária aumentar a possibilidade de formação de aglomerados no leito, sejam eles somente de partículas de biomassa ou também biomassa-areia. Esses aglomerados podem ter diâmetro médio muito maior que o diâmetro das partículas individualmente, contribuindo para a formação de espaços vazios no leito. Por outro lado, reduzir a fração de biomassa na mistura favorece uma maior acomodação das partículas de inertes.

A redução do teor de umidade das partículas de bagaço de laranja ocasionou, em toda a faixa de composição da mistura binária empregada, aumentos de 11 a 22% na porosidade do leito. Partículas secas de biomassa são menos densas que as mais úmidas, conforme dados de densidade aparente apresentados na Tabela 2, de modo que para atingir uma dada fração mássica na mistura acabam ocupando um maior volume no leito. Isso contribui para os efeitos de aglomeração que resultam num maior espaçamento entre as partículas no leito.

4.2.3 Análise do comportamento fluidodinâmico das misturas binárias de partículas de bagaço de laranja com areia de 1,85 mm

Na Figura 4.12, são apresentadas as curvas características típicas, que relacionam a queda de pressão no leito em função da vazão, para um teor de umidade inicial da biomassa de 75% e fração mássica de biomassa de 10%.

Tanto na fluidização quanto na desfluidização, o comportamento fluidodinâmico da mistura com areia de 1,85 mm foi similar, na região de leito fixo, ao da mistura com polietileno e ao da mistura com areia de 0,93 mm. Entretanto, na região de leito fluidizado, a queda de pressão permaneceu decaindo para as misturas contendo partículas de bagaço com teores de umidade de 45 e 75% b.u.. Isso ocorreu devido à presença prolongada de caminhos preferenciais durante a fluidização, o que prejudicou a efetividade da fluidização durante a operação.

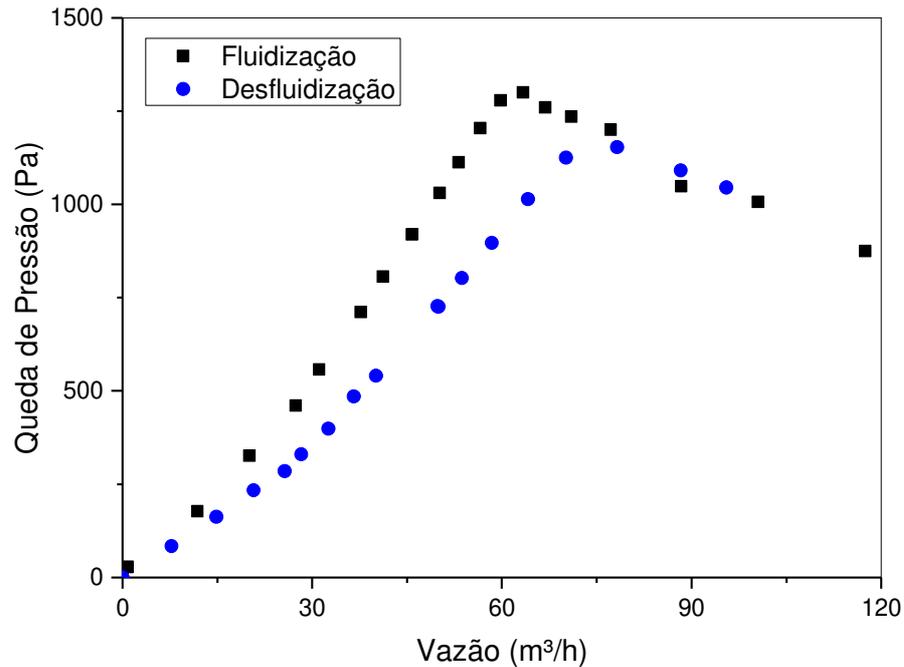


Figura 4.12 – Queda de pressão no leito em função da vazão do ar na fluidização e na desfluidização da mistura binária contendo biomassa e areia de 1,85 mm, $w_b = 0,10$ e $X = 0,75$ b.u.

Na Tabela 4.8, são listados os principais parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as misturas de partículas de areia de 1,85 mm com o bagaço de laranja, em diferentes composições mássicas do leito (w_b) em % p/p e a umidade inicial do bagaço (X) em % b.u.

i) *Efeitos sobre a queda de pressão na mínima fluidização e o índice de fluidização*

Conforme o ocorrido com as misturas binárias biomassa-polietileno e biomassa-areia de 0,93 mm e reportado nos trabalhos de Borel (2014) e Gomes *et al.* (2016), não houve uma variação significativa entre os valores de queda de pressão na mínima fluidização, cujo valor médio foi **(1.190,46 ± 32,42) Pa**. Isto se deve ao fato da carga total do leito ter sido em **1400 g**.

A fim de atestar que não houve efeitos significativos sobre a queda de pressão na condição de mínima fluidização, foi gerado o diagrama de Pareto das misturas contendo areia de 1,85 mm, com valor-p menor que 5%, o qual está ilustrado na Figura 4.13.

Como esperado, o índice de fluidização teve valor médio de **(80,9 ± 2,2)%**, indicando uma melhora na qualidade da fluidização, da mesma forma que os apresentados pelas misturas anteriormente discutidas, em comparação aos índices obtidos por Gomes *et al.* (2016), denotando uma fluidização parcial.

Tabela 4.8 – Parâmetros Fluidodinâmicos da Mistura Binária de Bagaço e Areia de 1,85 mm

X (%b.u)	w _b (%)	- ΔP _{mf} (Pa)	Q _{mf} (m ³ /h)	d _{mist} (mm)	ρ _{mist} (kg/m ³)	IF	α (°)	Fr	L/D	Re _{mf}	Ar x 10 ⁻⁵	ρ _c (kg/m ³)	ε ₀
75	15	1177,9 ± 27,6	83,3 ± 1,8	1,80	2237,5	0,80 ± 0,02	36,2 ± 0,7	46,3 ± 1,9	1,27 ± 0,04	287,6 ± 6,1	2,50	1084,4 ± 36,2	0,52 ± 0,02
75	10	1190,9 ± 26,8	72,5 ± 0,2	1,82	2347,1	0,81 ± 0,02	35,3 ± 0,8	34,9 ± 0,2	1,13 ± 0,04	252,3 ± 0,6	2,56	1218,9 ± 45,8	0,48 ± 0,02
75	5	1169,8 ± 15,0	71,6 ± 5,1	1,83	2468,0	0,80 ± 0,01	34,7 ± 0,9	33,9 ± 4,9	1,05 ± 0,01	251,0 ± 18,0	2,62	1311,0 ± 17,7	0,47 ± 0,01
45	15	1156,9 ± 26,9	70,5 ± 4,5	1,81	2267,7	0,79 ± 0,02	36,1 ± 0,8	33,2 ± 4,3	1,26 ± 0,04	243,6 ± 15,7	2,64	1093,0 ± 36,8	0,52 ± 0,02
45	10	1178,2 ± 3,2	70,2 ± 4,9	1,82	2369,2	0,80 ± 0,01	33,2 ± 2,7	32,8 ± 4,6	1,09 ± 0,09	244,4 ± 17,3	2,70	1273,2 ± 99,9	0,46 ± 0,05
45	5	1205,6 ± 35,4	67,2 ± 0,6	1,83	2480,1	0,82 ± 0,02	33,1 ± 1,1	29,8 ± 0,6	1,08 ± 0,02	235,6 ± 2,2	2,76	1280,7 ± 25,3	0,48 ± 0,01
15	15	1205,5 ± 71,2	59,8 ± 1,1	1,81	2349,3	0,82 ± 0,05	36,1 ± 0,8	23,8 ± 0,8	1,25 ± 0,01	207,0 ± 3,7	3,07	1101,2 ± 12,5	0,53 ± 0,01
15	10	1197,2 ± 17,9	61,4 ± 0,3	1,82	2427,9	0,81 ± 0,01	33,5 ± 0,6	24,9 ± 0,3	1,1 ± 0,01	213,9 ± 1,2	3,13	1251,4 ± 16,1	0,48 ± 0,01
15	5	1239,2 ± 12,2	62,4 ± 3,0	1,84	2511,9	0,84 ± 0,01	29,7 ± 0,6	25,7 ± 2,5	1,02 ± 0,01	219,1 ± 10,7	3,20	1349,6 ± 18,7	0,46 ± 0,01

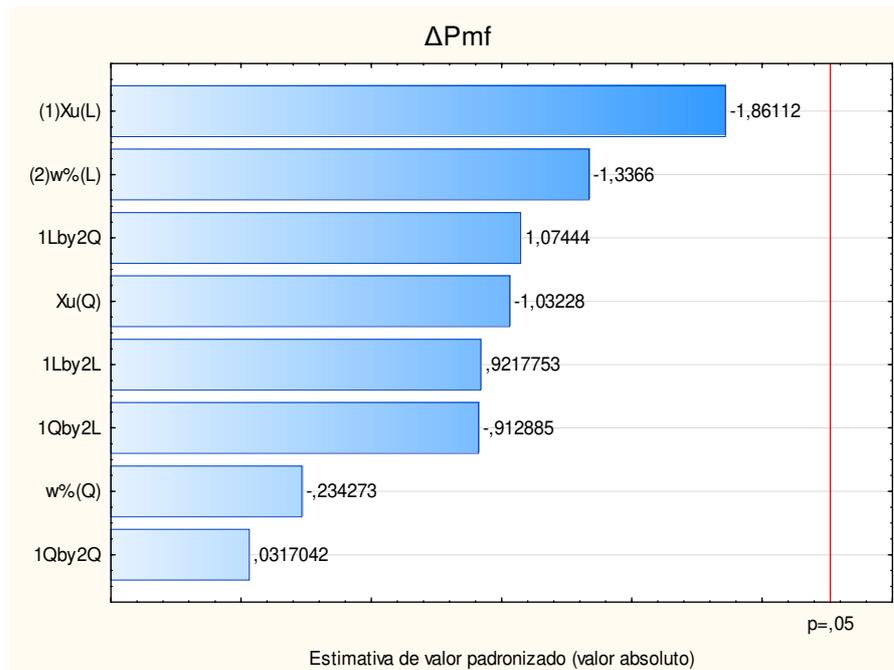


Figura 4.13 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a queda de pressão mínima de fluidização da mistura binária com areia de 1,85 mm

ii) *Efeitos sobre a vazão de mínima fluidização e o número de Froude*

Na Figura 4.14 são apresentados os valores e desvios médios das vazões de mínima fluidização, listados na Tabela 4.8, em função do teor de umidade do bagaço, parametrizados na fração mássica de biomassa na mistura com areia de 1,85 mm.

Nas condições de teor de umidade em 45% e 15%, não houve efeito significativo da fração mássica de biomassa, pois os valores estão sendo englobados pelos desvios experimentais. A vazão de mínima fluidização variou de $(69,31 \pm 1,86) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, na umidade de 45% b.u., para $(61,18 \pm 1,32) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, em 15% b.u. Já na condição de teor de umidade de 75%, a influência da maior quantidade de biomassa na mistura se mostrou presente e condizente com a literatura, demandando um maior valor de vazão $(82,31 \pm 1,21) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para quebrar os canais preferenciais formados, como resultado da coesão causada pela umidade superficial das partícula úmidas. Já ao reduzir a fração mássica para 10 e 5% o valor médio de Q_{mf} foi de $(72,07 \pm 0,68) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Na Figura 4.15 são apresentados os valores e desvios médios das vazões de mínima fluidização em função da fração mássica do bagaço na mistura binária com areia de 1,85 mm, em diferentes teores de umidade da biomassa.

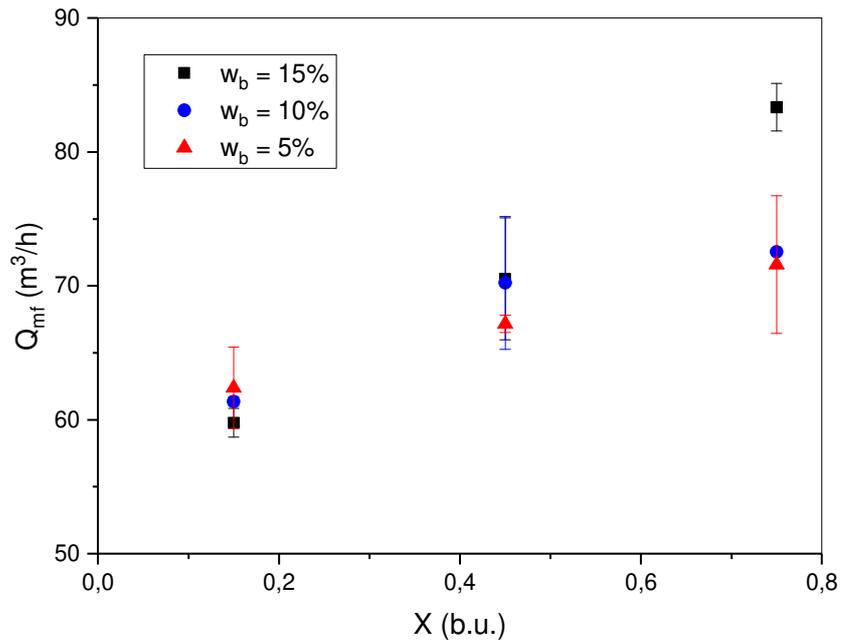


Figura 4.14 – Vazão de mínima fluidização em função do teor de umidade, em diferentes frações mássicas de biomassa na mistura binária com a areia de 1,85 mm.

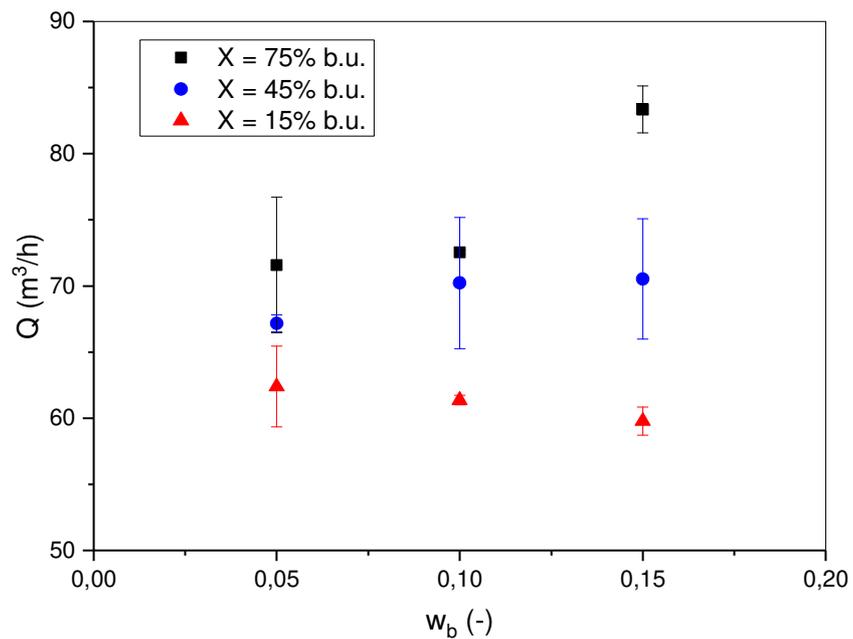


Figura 4.15 – Vazão de mínima fluidização em função fração mássica da biomassa, parametrizada no teor de umidade do bagaço na mistura binária com areia de 1,85 mm

O teor de umidade teve um maior efeito significativo principalmente na condição de 15% de fração mássica de biomassa na mistura, cuja justificativa é a mesma que aquelas dadas anteriormente para as misturas com polietileno e com areia de 0,93 mm, com o comportamento estando de acordo com a literatura (KASHANINEJAD *et al.*, 2010; SILVA, 2011).

No entanto, quando a biomassa está com o teor de umidade de 15%, o que se observa é o aumento na vazão de mínima fluidização com a diminuição da fração mássica de bagaço. Isso se justifica por dois motivos: o primeiro é que a partícula com menor teor de umidade exige uma menor quantidade de energia para entrar em movimento, pois a mesma estará com menor peso do que quando úmida; o segundo é que o inerte possui maior diâmetro e maior massa específica que a biomassa, de modo que uma redução da fração de biomassa leva a um maior diâmetro médio das partículas da mistura binária (SILVA, 2011).

Chok *et al.* (2010), ao fluidizar misturas binárias contendo areia de diferentes tamanhos e partículas de folhas de palma de diferentes tamanhos, observou que a velocidade de mínima fluidização aumentou com o aumento da fração mássica, ocasionado pelo aumento do diâmetro efetivo da mistura. De uma fração mássica de 2% para uma fração mássica de 15%, os autores obtiveram valores de velocidade de mínima fluidização de $8,4 \text{ cm.s}^{-1}$ e $10,6 \text{ cm.s}^{-1}$, tendo um aumento de aproximadamente 26%.

Karmakar *et al.* (2012), ao fluidizar areia com dois diferentes diâmetros em mistura binária com casca de arroz, bagaço e pó de serragem, observaram também que houve um aumento da velocidade de mínima fluidização com o aumento da fração mássica, de até 178%. Da mesma forma, Rao e Bheemarasetti (2000) também obtiveram aumentos acentuados, chegando a até 288%, por conta do aumento da fração mássica.

Por fim, o diagrama de Pareto foi gerado, com valor-p menor que 5%, a fim de verificar os principais efeitos sobre a vazão de mínima fluidização, o que levou à constatação de que a mistura binária com areia de 1,85 mm teve efeitos dos termos lineares do teor de umidade inicial da biomassa e da fração mássica de biomassa na mistura, bem como da interação dos termos lineares entre ambas as variáveis independentes, como está ilustrado na Figura 4.16.

Através da Equação 3.12, o adimensional de Froude foi calculado para cada condição experimental, e, assim como na mistura com polietileno e na mistura com areia de 0,93 mm, os valores obtidos, em todos os casos, foram acima de 1, classificando, então, a fluidização como agregativa.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.8, constata-se que não houve, de um modo geral, uma influência significativa por parte do teor de umidade e da fração mássica sobre o número de Froude. Porém, assim como na mistura com areia de 0,93 mm, o aumento do teor de umidade inicial da biomassa, na condição de fração mássica de 15%, ocasionou um aumento superior a 100% entre os valores médios, que se justifica pelo mesmo motivo anteriormente descrito. Nas demais condições de fração mássica, apenas no teor de umidade de 15% os valores do número de Froude não foram abrangidos pelos desvios dos demais.

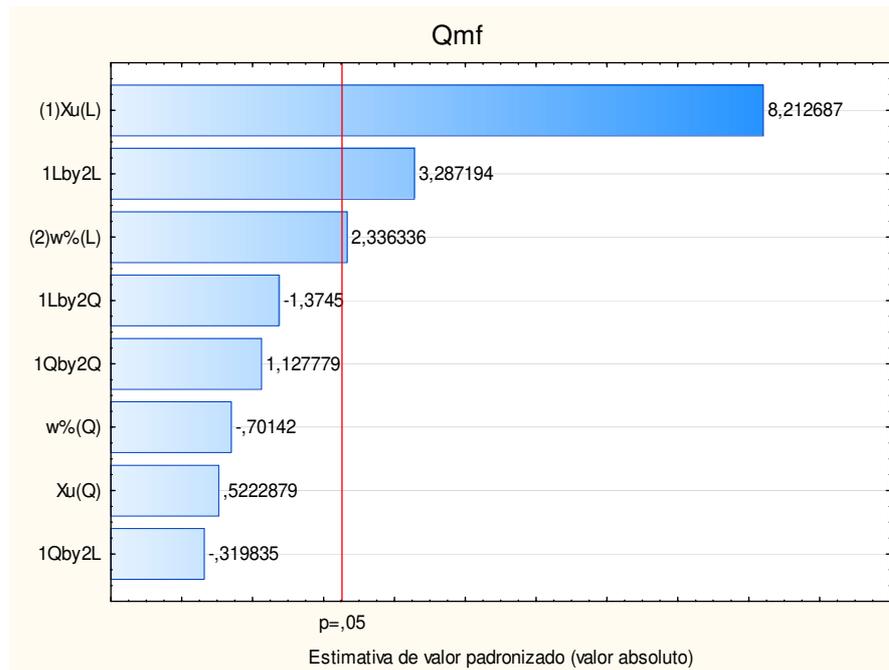


Figura 4.16 – Diagrama de Pareto com efeitos sobre a vazão mínima de fluidização na mistura binária com areia de 1,85 mm

iii) Efeitos sobre o ângulo de repouso

De um modo geral, o ângulo de repouso não foi afetado significativamente nem pelo teor de umidade, nem pela fração mássica, indo de encontro, nas condições aqui estudadas, às afirmações de Chok *et al.* (2010), Silva (2011) e Guo *et al.* (2015).

Assim como nas misturas binárias com polietileno e com areia de 0,93 mm, a condição de teor de umidade a 15% e fração mássica a 5% foi a que gerou o menor valor médio do ângulo, sendo classificado como de escoabilidade **livre**, enquanto que todo o leito foi classificado como de escoabilidade **fácil**, tendo como valor médio (**34,23 ± 2,16**)°.

iv) Efeitos sobre a razão inicial de leito

Ao correlacionar-se a razão de leito L/D com as variáveis estudadas, constata-se que, não houve uma influência significativa por parte da variação do teor de umidade inicial, diferentemente do ocorrido com as misturas binárias com o polietileno e areia de 0,93 mm e também do observado por Kashaninejad *et al.* (2010), Borel (2011) e Oliveira *et al.* (2013).

O único valor que não está envolvido pelo desvio dos valores de uma mesma fração volumétrica é a condição quando a biomassa está a 15%. Os valores médios apresentados foram (**1,27 ± 0,01**), (**1,11 ± 0,03**) e (**1,07 ± 0,02**), para as condições de 15%, 10% e 5%, respectivamente.

Ao aumentar a fração mássica de 5% para 15%, em um mesmo teor de umidade, o leito sofreu aumentos entre 16% e 23%. Do mesmo modo como ocorreu com as misturas anteriores, a razão desse comportamento se deve à quantidade em volume de partículas presentes, relacionado à perda de umidade e à perda de massa, consequentemente. Na condição de teor de umidade inicial de 75%, o aumento da fração mássica de 5% para 15%, acarretou em um aumento de aproximadamente 21% na razão de leito. Já na condição de umidade de 15%, o aumento foi de 22,5%, o que justifica a afirmação anterior.

v) *Efeitos sobre a porosidade inicial do leito*

Tanto a porosidade inicial quanto a razão inicial de leito estático não sofreram efeito da variação de teor de umidade, porém ambas sofreram efeito da variação da fração mássica no leito. Como as partículas do inerte são maiores que as do bagaço, os espaços vazios entre as partículas de areia puderam ser preenchidos pelas de biomassa, o que levou a porosidade a se manter com um valor médio de **(0,49 ± 0,03)**. Uma maior quantidade de biomassa levou a um maior volume ocupado pelo bagaço, preenchendo um maior espaço no interior da coluna, levando a aumento da razão de leito em até 24%.

4.2.4 Análise comparativa das misturas binárias com os diferentes inertes

i) *Queda de pressão na mínima fluidização e o índice de fluidização*

Os valores médios de queda de pressão de mínima fluidização foram **(1243,6 ± 23,8) Pa**, **(1200,9 ± 36,3) Pa** e **(1190,5 ± 32,4) Pa** para a mistura binária contendo polietileno de 2,58 mm, areia de 0,93 mm e areia de 1,85 mm, respectivamente.

De um modo geral, a queda de pressão na mínima fluidização não apresentou uma diferença significativa das misturas binárias compostas pelos diferentes inertes, cujo valor médio foi de **(1211,6 ± 28,1) Pa**, com índice de fluidização médio global de **(0,82 ± 0,02)**.

Com isso, os índices de fluidização médios das misturas binárias contendo partículas de bagaço de laranja e de areia, em ambos os tamanhos, e das misturas binárias contendo partículas de bagaço de laranja e de polietileno, ficaram entre **81% e 85%**, denotando uma melhora na qualidade de fluidização quando comparado com os índices de fluidização das monopartículas de biomassa de laranja, determinados por Gomes et al. (2016), que ficaram na faixa de 63% a 68%.

ii) *Vazão de mínima fluidização e o número de Froude*

Os valores médios de vazão de mínima fluidização foram $(68,7 \pm 7,2) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $(50,3 \pm 3,3) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e $(45,5 \pm 7,3) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para as misturas binárias contendo como sólido inerte areia de 1,85 mm, polietileno de 2,58 e areia de 0,93 mm, respectivamente.

Apesar do diâmetro médio efetivo das misturas com areia de 1,85 mm ter sido o intermediário $(1,82 \pm 0,01 \text{ mm})$ entre o das misturas com polietileno $(2,46 \pm 0,05 \text{ mm})$ e o das misturas com areia de 0,93 mm $(1,01 \pm 0,03 \text{ mm})$ e seu valor médio de massa específica efetiva $(2383,53 \pm 89,73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ter sido próximo do valor médio das misturas com areia de 0,93 mm $(2275,61 \pm 77,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$ e maior que o das misturas com polietileno $(1304,66 \pm 11,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$, os valores médios de vazão de mínima fluidização foram **51%** maiores que os valores das misturas com areia de 0,93 mm e **36%** maiores que as com polietileno.

Logo, o uso de partículas de areia de 1,85 mm como sólido inerte tende a aumentar a energia requerida para operar secadores e/ou gaseificadores da biomassa em leito fluidizado.

Comportamentos similares foram observados por Noda *et al.* (1986), Gauthier *et al.* (1999), Freire *et al.* (2008), Paudel e Feng (2013), Oliveira *et al.* (2013) e Gomes *et al.* (2016).

Através da equação para determinação do número de Froude (Fr), foi possível identificar o tipo de fluidização em cada condição de operação. Todos os valores calculados indicaram que a fluidização foi do tipo **agregativa**, pois $Fr > 1$. Porém, na mistura binária com areia de 1,85 mm, o número de Froude foi o que apresentou maior valor médio $(31,68 \pm 6,80)$, seguido do valor da mistura com areia de 0,93 mm $(18,91 \pm 5,96)$ e da mistura com polietileno $(14,50 \pm 1,92)$. Segundo Borel (2014), quanto mais agregativa for a fluidização, mais indicada fica a sua aplicação em leito de jorro, já que essa tecnologia foi criada para suprir essa limitação do leito fluidizado.

iii) *Ângulo de repouso, porosidade inicial do leito e razão inicial de leito*

Os valores médios de ângulo de repouso foram $(34,3 \pm 2,4)^\circ$, $(34,2 \pm 2,2)^\circ$ e $(33,3 \pm 1,7)^\circ$ para as misturas binárias contendo areia de 0,93 mm, areia de 1,85 mm e polietileno, respectivamente. Apesar do menor valor de ângulo promovido pelo polietileno, de um modo geral, o ângulo de repouso não sofreu uma diferença significativa, ficando o valor médio do ângulo de talude em $(33,9 \pm 0,5)^\circ$.

Já em relação à porosidade inicial do leito, houve uma diferença significativa. As misturas contendo partículas de areia de 0,93 mm apresentaram valor médio maior $(0,54 \pm 0,048)$ que o da areia de 1,85 mm $(0,49 \pm 0,03)$ e do polietileno $(0,40 \pm 0,04)$. Isso se justifica pela relação entre os diâmetros médios das partículas inertes e o diâmetro médio das partículas de biomassa. Como o leito composto por areia de 0,93 mm possui espaços de vazios menores

que o diâmetro médio da biomassa (1,69 mm), então houve uma leve expansão do leito por conta desse preenchimento forçado ao se promover a mistura antes de inseri-la na coluna. Para vazão de mínima fluidização, quanto maior o valor da porosidade, menos esforço terá o ar para fluidizar o leito, pois a resistência à sua passagem será menor, conseqüentemente terá menores valores de vazão de mínima fluidização.

Os valores médios da razão de leito estático foram $(1,78 \pm 0,10)$, $(1,32 \pm 0,15)$ e $(1,14 \pm 0,10)$ para as misturas binárias contendo polietileno, areia de 0,93 mm e areia de 1,85 mm. Além do polietileno ter o maior diâmetro médio (2,58 mm), sua massa específica é a menor de todas, o que levou à necessidade de se ter uma maior quantidade de partículas para atingir a carga total adotada de 1400 g. Como já exposto anteriormente, razões de leito altas levam à formação de *sluggins*, comprometendo a fluidização. Além disso, quanto mais profundo o leito, maior será a necessidade que o ar vai demandar de energia para fluidizá-lo e pô-lo em regime de fluidização.

4.3 Comparativo com correlações empíricas

Nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 são listados os valores do Número de Reynolds na mínima fluidização determinados experimentalmente nos ensaios com o polietileno, areia de 1,85 mm e areia de 0,93 mm, respectivamente, em comparação aos valores obtidos pelas correlações empíricas apresentadas na Tabela 3.3.

Dos modelos empíricos, o modelo de Paudel (2011) foi o que melhor previu os dados experimentais da mistura binária com o polietileno. Já o modelo de Thonglimp (1985), teve maiores desvios médios em relação aos valores experimentais, seguido pelo modelo de Subramani *et al.* (2007).

Já na mistura binária com areia de 1,85 mm, o modelo de Leva (1959) foi o que apresentou melhor previsão, enquanto que o de Wen e Yu (1966) apresentou maiores desvios médios em relação aos valores experimentais.

O modelo de Paudel (2011) foi o que apresentou os menores desvios para as misturas binárias com areia de 0,93 mm, porém seu desempenho foi melhor em menores teores de umidade da biomassa, seguido por Thonglimp (1985) e Subramani *et al.* (2007). O modelo de Leva (1959) foi o que apresentou maiores desvios médios em relação aos valores experimentais.

Por fim, não houve uma correlação que predissesse valores próximos do experimental de todas as misturas. Vale salientar que os inertes não possuem características físico-químicas próximas. Portanto, cada uma vai se comportar de acordo com suas particularidades.

Tabela 4.9 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com o polietileno

Xu (%)	w (%)	Experimental		Leva (1959)		Wen e Yu (1966)		Thonglimp (1985)		Subramani <i>et al</i> (2007)		Paudel (2011)	
		Ar (10^5)	Rmf_exp	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)
75	15	5,78	247,1	291,2	22,1	123,5	61,8	334,1	43,5	308,9	30,9	218,4	14,4
75	10	6,24	254,2	316,7	31,3	129,3	62,4	360,0	52,9	332,0	38,9	228,0	13,1
75	5	6,74	243,2	339,7	48,3	135,6	53,8	388,8	72,8	357,7	57,2	238,3	2,5
45	15	6,14	215,6	296,9	40,6	128,1	43,8	354,5	69,4	327,1	55,7	225,9	5,2
45	10	6,61	237,7	318,2	40,2	133,9	51,9	381,0	71,6	350,7	56,5	235,5	1,1
45	5	7,12	223,5	340,5	58,5	140,1	41,7	410,2	93,3	376,6	76,5	245,7	11,1
15	15	7,27	216,8	309,7	46,5	141,8	37,5	418,5	100,9	384,0	83,6	248,5	15,9
15	10	7,77	241,0	329,7	44,3	147,5	46,8	446,6	102,8	408,9	83,9	257,9	8,4
15	5	8,31	239,3	346,5	53,6	153,5	42,9	476,9	118,8	435,7	98,2	267,7	14,2

Tabela 4.10 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com a areia de 1,85 mm

Xu (%)	w (%)	Experimental		Leva (1959)		Wen e Yu (1966)		Thonglimp (1985)		Subramani <i>et al</i> (2007)		Paudel (2011)	
		Ar (10^5)	Rmf_exp	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)
75	15	2,50	287,6	222,1	32,8	72,8	107,4	147,0	70,3	139,8	73,9	134,1	76,8
75	10	2,56	252,3	239,7	6,3	73,9	89,2	150,3	51,0	142,8	54,7	135,9	58,2
75	5	2,62	251,0	255,2	2,1	75,1	88,0	154,1	48,5	146,2	52,4	137,9	56,5
45	15	2,64	243,6	228,5	7,6	75,4	84,1	155,0	44,3	147,0	48,3	138,4	52,6
45	10	2,70	244,4	241,8	1,3	76,5	83,9	158,3	43,0	150,1	47,1	140,3	52,1
45	5	2,76	235,6	256,4	10,4	77,7	79,0	162,1	36,7	153,6	41,0	142,3	46,7
15	15	3,07	207,0	236,2	14,6	83,2	61,9	179,8	13,6	169,7	18,7	151,5	27,8
15	10	3,13	213,9	247,4	16,8	84,3	64,8	183,3	15,3	173,0	20,5	153,3	30,3
15	5	3,20	219,1	263,5	22,2	85,4	66,8	187,3	15,9	176,6	21,3	155,3	31,9

Tabela 4.11 - Comparativo dos dados obtidos experimentalmente com os preditos por correlações empíricas das misturas binárias com a areia de 0,93 mm

Xu (%)	w (%)	Experimental		Leva (1959)		Wen e Yu (1966)		Thonglimp (1985)		Subramani <i>et al</i> (2007)		Paudel (2011)	
		Ar (10 ⁴)	Rmf_exp	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)	Rmf	DVM (%)
75	15	4,96	107,1	222,1	57,5	22,5	42,3	30,1	38,5	30,2	38,5	46,9	30,1
75	10	4,41	108,1	239,7	65,8	20,5	43,8	26,9	40,6	27,0	40,5	43,1	32,5
75	5	3,90	100,6	255,2	77,3	18,5	41,0	23,8	38,4	24,1	38,3	39,4	30,6
45	15	5,14	93,8	228,5	67,3	23,2	35,3	31,2	31,3	31,3	31,3	48,1	22,8
45	10	4,59	84,8	241,8	78,5	21,2	31,8	27,9	28,4	28,1	28,4	44,4	20,2
45	5	4,08	83,8	256,4	86,3	19,2	32,3	24,9	29,5	25,1	29,4	40,7	21,5
15	15	5,71	73,8	236,2	81,2	25,2	24,3	34,6	19,6	34,5	19,6	51,8	11,0
15	10	5,15	71,6	247,4	87,9	23,2	24,2	31,3	20,1	31,3	20,1	48,2	11,7
15	5	4,64	66,8	263,5	98,4	21,3	22,7	28,2	19,3	28,3	19,2	44,7	11,0

4.4 Efeito da segregação

A Figura 4.17 ilustra o estado do leito após a análise fluidodinâmica nas condições de maior teor de umidade da biomassa, tendo como inertes o polietileno de 2,58 mm, a areia de 1,85 mm e a areia de 0,93 mm, ficando evidenciado a ocorrência dos 3 tipos de segregação.

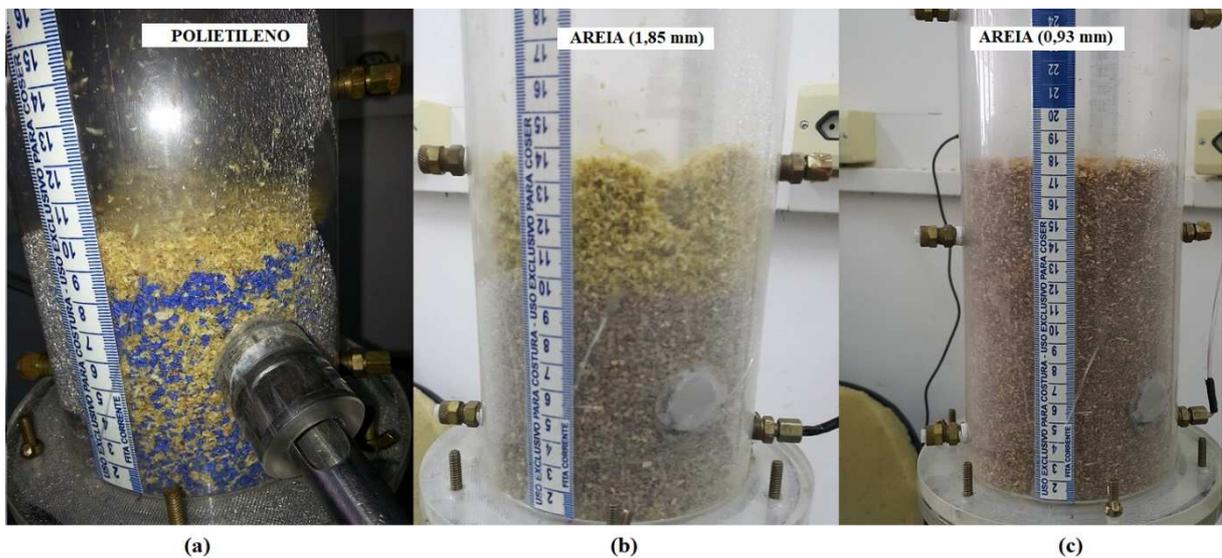


Figura 4.17 – Segregação nas misturas binárias do bagaço de laranja com (a) polietileno, (b) areia de 1,85 mm e (c) areia de 0,93 mm

Com o polietileno, Figura 4.17 (a), houve a segregação parcial, com o topo do leito sendo ocupado por parte da biomassa (*flotsam*) e o restante do leito estando completamente misturado. Essa mistura pode ser explicada pela proximidade das densidades das partículas que compõem o leito. A presença do *flotsam* pode ser atribuída ao menor tamanho das partículas de biomassa frente ao do sólido inerte. A segregação se acentuou com a redução do teor de umidade do bagaço, devido à redução da densidade aparente da biomassa.

Com a areia de 1,85 mm, Figura 4.17 (b), houve segregação total do leito, em todas as condições de operação. Isso pode ser explicado pelo fato de ter havido a influência tanto da diferença de tamanho entre as partículas (cerca de **10%** de diferença) bem como a diferença de densidade (um pouco mais que o dobro da massa específica do inerte em relação à biomassa), o que favoreceu a segregação.

Com a areia de 0,93 mm, Figura 4.17 (c), não houve segregação. Isso pode ser justificado pela compensação entre as características físicas do material envolvido, pois o diâmetro do inerte equivale a **55%** do diâmetro médio das partículas, apesar de possuir um

pouco mais que o dobro da massa específica da partícula de biomassa. Esse fenômeno é justificado por Chiba *et al* (1980, *apud* Yang, 2003), que explica que quando o diâmetro médio da partícula de biomassa é maior que o diâmetro médio da partícula inerte e, somado a essa condição, a massa específica do inerte é muito maior que a massa específica da biomassa, a segregação pode ou não ocorrer obedecendo a regra. O mesmo fenômeno foi observado por Chok *et al.* (2010), quando a fluidização ocorreu com uma mistura onde o diâmetro médio das partículas de folha de palma eram maiores que o diâmetro médio da areia utilizada.

De todos os ensaios, envolvendo as misturas de bagaço com polietileno e de bagaço com areia, apenas as misturas que continham areia de 0,93 mm em sua composição não apresentaram um fenômeno de canalização tão acentuado, o qual é ilustrado na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Caminhos preferenciais nas misturas binárias do bagaço de laranja areia de 1,85 mm

Apesar de todas misturas binárias aqui estudadas terem apresentado uma rápida formação de caminhos preferenciais na fluidização, houve uma forte presença dos canais no processo de desfluidização nas misturas com bagaço de laranja a 75% de umidade e areia de 1,85 mm e nas misturas com bagaço de laranja a 75% e polietileno. Como o leito, na desfluidização, já estava totalmente segregado e a biomassa, ao final do processo, estava ainda com alto teor de umidade, logo, cada fase do leito se comportou de maneira independente.

A presença de canais preferenciais na fluidização de bagaço de laranja foi relatada por Gomes *et al.* (2016).

5 CONCLUSÕES

A fluidização de partículas de bagaço de laranja assistida pelo uso de sólidos inertes como areia e partículas de polipropileno foi investigada neste estudo.

As misturas binárias foram classificadas como pertencente ao grupo D de Geldart. Além disso, com a determinação do ângulo de repouso foi possível identificar que as misturas apresentaram uma fácil escoabilidade e um bom índice médio de fluidização, o que favorece a utilização da combinação da biomassa com os inertes aqui estudados em leitos móveis.

O aparato supervisor para a aquisição de dados foi implantado e o sistema foi desenvolvido em Scilab. Ambos cumpriram satisfatoriamente com suas respectivas funções.

Em comparação com informações encontradas na literatura, o uso de partículas inertes, tanto de polietileno como de areia, contribuiu efetivamente para a melhora da qualidade de fluidização das partículas de bagaço de laranja em toda a faixa operacional investigada.

A queda de pressão de mínima fluidização das misturas de biomassa da laranja com os diferentes inertes apresentaram um valor médio de $(1211,65 \pm 28,13)$ Pa, refletindo em um índice de fluidização médio de $(82,35 \pm 1,91)\%$.

O ângulo de repouso, a razão de leito e a porosidade se mostraram, em boa parte das condições experimentais, nas diversas misturas binárias, dependentes das variáveis estudadas.

A vazão de mínima fluidização das misturas de biomassa da laranja e partículas de polietileno não se mostrou dependente do teor de umidade e da fração mássica, apresentando valores médios de 46,48 a 54,31 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com valor médio de $(49,91 \pm 3,52)$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

A vazão de mínima fluidização das misturas de biomassa da laranja e partículas de areia de 1,85 mm mostrou-se dependente dos termos lineares do teor de umidade e da fração mássica da biomassa, bem como da combinação linear entre os dois fatores, apresentando valores na faixa de 59,78 a 83,34 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com valor médio de $(68,75 \pm 7,16)$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

A vazão de mínima fluidização das misturas de biomassa da laranja e partículas de areia de 0,93 mm mostrou-se dependente do termo linear do teor de umidade, apresentando valores na faixa de 36,19 a 55,86 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com valor médio de $(45,5 \pm 7,3)$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Por fim, a avaliação fluidodinâmica das misturas binárias aqui estudadas servirá de base para a continuidade da pesquisa, envolvendo a aplicação da técnica para a secagem da biomassa da laranja, tendo como valores-referência as condições de mínima fluidização utilizando a areia de 0,93 mm por ter apresentado melhor comportamento fluidodinâmico, apresentando menores valores de vazão de mínima fluidização, o que denota uma menor

demanda de energia para fluidizar, e de índices de fluidização acima de 0,8, refletindo numa boa qualidade de fluidização, com a ausência de canais preferenciais e de segregação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- O estudo do comportamento fluidodinâmico da mistura ternária de partículas de bagaço de laranja com diferentes inertes de diferentes características físicas;
- O estudo da secagem de misturas binárias em leito fluidizado e em leito de jorro com diferentes diâmetros de partícula de biomassa e de partículas inertes, visando as avaliações energéticas e exergéticas (análise termoeconômica);
- O estudo aprofundado (quantitativo) do fenômeno de segregação destas misturas;

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L.; MONTESINOS, F. M.; GONZALO, A.; SÁNCHEZ, J. L.; ARAUZO, J. Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 83, p. 124-130, 2008.

BARBOSA, J.; BORGES, S.; AMORIM, M.; PEREIRA, M. J.; OLIVEIRA, A.; PINTADO, M. E.; TEIXEIRA, P. Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder. **Journal of Functional Foods**, v. 17, p. 340-351, 2015.

BASU, P. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Press. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006, 467 p.

BENEDETTI, B. C. **Influência do Teor de Umidade sobre Propriedades Físicas de Vários Grãos**. 1987. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 1987.

BENEVIDES, L. C. **Pirólise do Bagaço de Laranja: Análise Cinética dos Estágios de Secagem e Devolatização**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus – ES, Brasil, 2015.

BEZERRA, R. S.; COSTA, C. M. L. Hidrodinâmica da Fluidização de sementes de gergelim em leito fluidizado. 14º CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2014.

BITTENCOURT, J. **Avaliação de um Secador de Bananas do Tipo Cabine com Bandejas**. 2001. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 2001.

BORBA, M. C. V.; GASPAR, N. F. **Um Futuro com Energia Sustentável: Iluminando o Caminho**, 1 ed. São Paulo: FAPESP, 2010. 301 p.

BOREL, L. D. M. S. **Aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para o beneficiamento de pólen apícola**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, 2014.

BORINI, G. B. **Revestimento de Partículas por Solidificação de Material Fundido em Leitões de Jorro e Fluidizado: Estudo do Processo, Caracterização das Partículas e Preparo de Comprimidos**. 2007. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto – SP, Brasil, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: MAPA/ACS, 2009.

CALABRÒ, P. S.; PONTONI, L.; PORQUEDDU, I.; GRECO, R.; PIROZZI, F.; MALPEI, F. Effect of the concentration of essential oil on orange peel waste biomethanization: Preliminary batch results. **Waste Management**, v. 48, p. 440-447, 2016.

CANO, L. A. R.; GUTIERREZ, L. V. G.; PEREZ, L. A. B. Biosorbents prepared from orange peels using Instant Controlled Pressure Drop for Cu(II) and phenol removal. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 344-349, 2016.

CARVALHO, T. E. A. **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de bagaço de laranja em leito fluidizado**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, 2016.

CAVICHIOLO, J. R. **Secagem do Bagaço de Laranja em Secador Tipo Flash**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 2010.

CAVICHIOLO, J. R.; BIAGI, J. D.; MARSAIOLI JUNIOR, A. Caracterização do bagaço de laranja úmido e seco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2014.

CHIBA, S. The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. **Powder Technology**, v. 22, p. 255 – 269, 1979.

CHOK, V. S.; GORIN, A.; CHUA, H. B. Minimum and complete fluidization velocity for sand-palm shell mixtures, part I: fluidization behavior and characteristic velocities. **American Journal of Applied Sciences**, v. 7, p. 763-772, 2010.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

FARIAS JUNIOR, F. S. **Modelagem e Simulação Dinâmica de um Combustor de Gás Natural em Leito Fluidizado**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2004.

FERNANDES, C. H. P.; CORADI, P. C.; HELMICH, J. C. Contração volumétrica de grãos de soja submetidas à secagem com diferentes temperaturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO AGRÍCOLA, 42., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2014.

FERNANDEZ, M. E.; NUNELL, G. V.; BONELLI, P. R.; CUKIERMAN, A. L. Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. **Industrial Crops and Products**, v. 62, p. 437-445, 2014.

FERREIRA, I. T. M.; SCHIRMER, W. N.; MACHADO, G. O.; GUERI, M. V. D. Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 284 – 297, 2014.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. M.; MODENES, A. N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 1., p. 22-33, 2012.

FIORENTIN, L. D.; TRIGUEROS, D. E. G.; MÓDENES, A. N.; QUIÑONES, F. R. E.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D.; SANTOS, O. A. A. Biosorption of reactive blue 5G dye onto drying orange bagasse in batch system: Kinetic and equilibrium modeling. **Chemical Engineering Journal**, v. 163, p. 68-77, 2010.

FORMISANI, B.; DE CRISTOFARO, G.; GIRIMONTE, R. A fundamental approach to the phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 109 – 119, 2001.

GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. **Chemical Engineering Journal**, v. 74, p. 181-196, 1999.

GELDART, D. The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behaviour of Gas-Fluidised Beds. **Powder Technology**, v. 6, p. 201-215, 1971.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.

GELDART, D. Estimation of Basic Particle Properties for Use in Fluid-Particle Process Calculations. **Powder Technology**, v. 60, p. 1 – 13, 1990.

GESTÃO NO CAMPO, disponível em: <
<http://www.gestaonocampo.com.br/biblioteca/variedades-mais-comuns-da-laranja/>>,
consultado em 01/03/2016

GOMES, T. L. C.; LOBO, J. S.; CARVALHO, T. E. A.; PRADO, M. M. Estudo experimental da fluidodinâmica do bagaço de laranja em leito fluidizado. **Scientia Plena**, v. 12, n. 5, 2016.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias**. São Paulo: R. Gomide, 1980.

GONÇALVES, E. C. **Secagem Ciclônica do Resíduo da Indústria Processadora de Laranja**. 1996. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil, 1996.

GUO, P. ZHONG, Z. Experimental studies on combustion of composite biomass pellets in fluidized bed. **Science of The Total Environment**, v. 599 – 600, p. 926 – 933, 2017

GUO, Z.; CHEN, X.; XU, Y.; LIU, H. Study of flow characteristics of biomass and biomass coal blends. **Fuel**. v. 141, p. 207-213, 2015.

HE, J.; TAN, M.; ZHAO, Y.; DUAN, C.; HE, Y.; LUO, Z. Fluidization characteristics and density-based separation of dense-medium gas–solid fluidized bed: An experimental and simulation study. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. v 61, p.223-233, 2016.

HELMICH, J. C.; CORADI, P. C.; FERANDES, C. H. P. Temperatura do ar de secagem e as alterações causadas na contração volumétrica de sementes de girassol. In: CONGRESSO BRASILEIRO AGRÍCOLA, 42., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2014.

HUANG, Y.F.; KUAN, W.H.; CHIUEH, P.T.; LO, S.L. Pyrolysis of biomass by thermal analysis-mass spectrometry (TA-MS). **Bioresource Technology**, v. 102, p. 3527-3534, 2011.

IONASHIRO, M. GIOLITO: **Princípios Básicos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**. Araraquara: Giz Editorial, 2004. 96 p.

ISMAIL, T. M.; EL-SALAM, M. A.; MONTEIRO, E.; ROUBOA, A. Fluid dynamics model on fluidized bed gasifier using agro-industrial biomass as fuel. **Waste Management**, 2017.

JENA, H. M.; ROY, G. K.; BISWAL, K. C. Studies on pressure drop and minimum fluidization velocity of gas–solid fluidization of homogeneous well-mixed ternary mixtures in un-promote and promoted square bed. **Chemical Engineering Journal**. v.145, p.16-24, 2008.

JIA, D.; BI, X.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S.; TSUTSUMI, A. Gas-solid mixing and mass transfer in a tapered fluidized bed of biomass with pulsed gas flow. **Powder Technology**, v. 316, p. 373-387, 2017

KARMAKAR, M.K.; HALDAR, S.; CHATTERJEE, P.K. Fluidization behavior of binary mixtures using sand and biomass. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 2, i. 11, p. 651-657, 2012.

KASHANINEJAD, M.; MAGHSOUDLOU, Y.; KHOMEIRI, M.; TABIL, L.G. Resistance to airflow through bulk pistachio nuts (Kalleghochi variety) as affected by moisture content, airflow rate, bed depth and fill method. **Powder Technology**, v. 203, 2010, p.359 – 364.

KEMP, I. C. Fundamentals of Energy Analysis of Dryers. In: TSOTSAS, E.; MUJUMDAR, A. S. (eds) **Modern Drying Technology**, v. 4, cap. 1, Weinheim: Wiley-VCH, 2012.

KOK, M.V.; ÖZGÜR, E.. Thermal analysis and kinetics of biomass samples. **Fuel Processing Technology**, v. 106, p. 739-743, 2013.

KOURIS, D. M.; MAROULIS, Z. B. Transport Properties in the Drying of Solids. In: MUJUMDAR, A. S. (ed) **Handbook of Industrial Drying**, 4 ed., chap. 4, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 1991. 497 p.

LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized Bed Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed) **Handbook of Industrial Drying**, 4 ed., chap. 8, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

LIANG, X.; ZHOU, Y.; ZOU, L.; KONG, J.; WANG., J.; ZHOU, T. Fluidization behavior of binary iron-containing nanoparticle mixtures in a vibro-fluidized bed. **Powder Technology**, v. 304, p. 101 – 107, 2016.

LIMA, J. O. A. A. **A Laranja e seus Subprodutos na Alimentação Animal**. 1 ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. 50 p.

LINHARES, M. C.; SANTOS, L. D. M.; PRADO, M. M. Estudo do comportamento fluidodinâmico de grãos de pólen apícola em leito fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2014.

LIU, B.; PAPADIKIS, K.; GU, S.; FIDALGO, B.; LONGHURST, P.; LI, Z.; KOLIOS, A. CFD modelling of particle shrinkage in a fluidized bed for biomass fast pyrolysis with quadrature method of moment. **Fuel Processing Technology**, v. 164, p. 51 – 68, 2017.

LOBATO, J. C. M. **Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos – aplicação para tremonhas cônicas**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil, 2013.

LUZ, C. DA; BAUDET, L.; TROGER, F. Comparação de métodos diretos para determinação do teor de água de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v.15, n. 2, p.157-163, 1993.

M’HIRI, N.; IOANNOU, I.; BOUDHRIOUA, N. M.; GHOUL, M. Effect of different operating conditions on the extraction of phenolic compounds in orange peel. **Food and Bioproducts Processing**, v. 96, p. 161-170, 2015.

MANTZOURIDOU, F. T.; PARASKEVOPOULOU, A.; LALOU, S. Yeast flavour production by solid state fermentation of orange peel waste. **Biochemical Engineering Journal**, v. 101, p. 1-8, 2015.

MARGIOTTO, C. A.; SIEGELL, J. H. Determination of Porous Particle Density. **Powder Technology**, v. 34, p. 105 – 106, 1983.

MARQUES, L.G. **Liofilização de frutas tropicais**. 2008. 293 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil, 2008.

MARTÍN, M. A.; SILES, J. A.; CHICA, A. F.; MARTÍN, A. Biomethanization of orange peel waste. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 8993-8999, 2010.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p. 301–306, 2007.

MASSARANI, G.; SILVA TELLES, A. Aspectos da Secagem de Material Sólido Particulado. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. (eds.) **Tópicos Especiais em Secagem**, v. 1, São Carlos: UFSCAR, p. 1-39, 1992.

MEIRELLES, A. J. A. **Secagem de Bagaço de Cana em Leito Fluidizado**. 1984. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, 1984.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p.1644-1649, 2011.

MIRAN, W.; NAWAZ, M.; JANG, J.; LEE, D. S. Conversion of orange peel waste biomass to bioelectricity using a mediator-less microbial fuel cell. **Science of the Total Environment**, v. 547, p. 197-205, 2016.

MONTANHER, S. F.; ROLLEMBERG, M. C. E. **Utilização da biomassa de bagaço de laranja no tratamento de efluentes industriais**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

MORENO, R., ANTOLIN, G., REYES, A. Quality of fluidisation for the drying of forestry biomass particles in a fluidised bed. **Biosystems Engineering**, v. 94, n.1, p. 47-56, 2006.

MORENO, R., ANTOLIN, G., REYES, A. Heat transfer during forest biomass particles drying in an agitated fluidised bed. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 65-71, 2016.

MORIN, M.; PÉCATE, S.; HÉMATI, M. Kinetic study of biomass char combustion in a low temperature fluidized bed reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 331, p. 265 – 277, 2018.

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus*. **Silva Lusitana**, v. 10, n. 2, p. 207 – 216, 2002.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed) **Handbook of Industrial Drying**, 4 ed., chap. 1, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

NASCIMENTO, F. R.; GOMES, A. P. S.; ALMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Fluidodinâmica de uma mistura de partículas em leito fluidizado. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 3, n. 1, p. 7 – 12, 2001.

NAZGHELICHI, T.; KIANMEHR, M. H.; AGHBASHLO, M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. **Energy**, v. 35, p. 4679-4684, 2010.

NEVES, D.; MATOS, A.; TARELHO, L.; THUNMAN, H.; LARSSON, A.; SEEMANN, M. The effects of potassium on distributions of bio-oils obtained from fast pyrolysis of agricultural and forest biomass in a fluidized bed. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 127, p. 57 – 67, 2017.

NIENOW, A.W.; NAIMER, N.S.; CHIBA, T. Studies of segregation/mixing in fluidised beds of different size particles. **Chemical Engineering Communications**, v. 62, p. 53-66, 1987.

NITZ M.; TARANTO, O. P. Drying of beans in a pulsed fluid bed: Drying Kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization. **Journal of food engineering**, v. 80, p. 249-256, 2007.

NODA, K.; UCHIDA, S.; MAKINO, T.; KAMO, H. Minimum fluidization velocity of binary mixture of particles with large size ratio. **Powder Technology**, v. 46, p. 149-154, 1986.

NUNES, A. S. **Determinação das Propriedades Térmicas de Grãos de Soja**. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, 2000.

OLIVEIRA, C. R. M.; TANNOUS, K. Fluidodinâmica de Biomassa em Leito Fluidizado Gasoso. 2009. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2009, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2009.

OLIVEIRA, M. T. R. **Secagem e Qualidade do Óleo Essencial de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip.** 2011. 213 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, 2011.

OLIVEIRA, T. J. P.; CARDOSO, C. R.; ATAÍDE, C.H. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 72, p. 113-121, 2013.

OLIVEIRA JUNIOR, A. B. **Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibro-Fluidizado**. 2003. 243 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil, 2003.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. Basic Process Calculations and Simulations in Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed) **Handbook of Industrial Drying**, 4 ed., chap. 3, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

PARK, K. J. B. **Construção de um Software de Simulação e Seleção de Equipamentos para Processos de Secagem**. 2008. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, 2008.

PAUDEL, B. **Experimental Study on Fluidization of Biomass, Inert Particles and Biomass/Sand Mixtures**. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Energia), Universidade do Norte do Texas, EUA, 2011.

PAUDEL, B.; FENG, Z. G. Prediction of Minimum Fluidization Velocity for Binary Mixtures of Biomass Inert Particles. **Powder Technology**, v. 237, p. 134-140, 2013.

PEÇANHA, R. P. **Sistemas Particulados: Operações Unitárias Envolvendo Partículas e Fluidos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014, 424 p.

PEREIRA, T. M. M. **Caracterização Térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual) de Hormônios Bioidênticos (Estríol e Estradiol)**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, Brasil, 2013.

POLANCO, L.; KOCHERGIN, V.; ALVAREZ, J. F. Fluidized bed superheated steam dryer for bagasse: Effects of particle size distribution. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**. v.3, n. 4, p. 265-271, 2013.

PRADO, M. M. **Secagem em Leito Fixo de Sementes de Mucilagem**. 2004. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil, 2004.

PUSPASARI, I.; TALIB, M. Z. M.; DAUD, W. R. W.; TASIRIN, S. M. Drying kinetics of oil palm frond particles in an agitated fluidized bed dryer. **Drying Technology**. v. 30, p. 619-630, 2012.

RAO, T.R.; BHEEMARASETTI, J.V.R. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands. *Energy*, v. 26, p. 633-644, 2000.

REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles. **Powder Technology**, v. 111, p. 245 – 251, 2000.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. Princípios para Uso de Biomassa como Combustível. In: NOGUEIRA, M. F. M. (ed) **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**, 1 ed., chap. 3, Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RHODES, M. J. **Introduction to particle technology**, John Wiley & Sons Chichester, England, 1998, 320p.

RIZZI, A. C. J. **Secagem de semente de gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em leito fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, 2008, São Carlos, SP.

ROJAS, S. P. **Análise Exergética, Termoeconômica e Ambiental de um Sistema de Geração de Energia. Estudo de Caso: Usina Termoelétrica UTE – Rio Madeira**. 2007. 195 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil, 2007.

SALATINO, P.; SOLIMENE, R. Mixing and segregation in fluidized bed thermochemical conversion of biomass. **Powder Technology**, v. 316, p. 29 – 40, 2017.

SANTOS, C. M.; DWECK, J.; VIOTTO, R. S.; ROSA, A. H.; MORAIS, L. C. Application of orange peel waste in the production of solid biofuels and biosorbents. **Bioresource Technology**, v. 196, p. 469-479, 2015.

SANTOS JUNIOR, J. A. **Desenvolvimento de um secador tipo esteira circular assistido por aquecimento infravermelho para a secagem de bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Processos Químicos), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, 2017

SILVA, J. B. **Hidrodinâmica da Fluidização de Biomassa e Inertes em Leito Fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2011. Curitiba, PR.

SILVA, F. F. M.; FERREIRA, D. A.; MONTE, F. J. Q.; MATTOS, M. C.; LEMOS, T. L. G. The orange peel as biocatalyst for the hydrolysis of esters. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 22-27, 2016.

SILVA, R. L.; SILVA, A. M. P. Bioenergia da Biomassa Residual: Potencial Energético da Combustão da Casca de Arroz em Dourados-MS e Região. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, p. 91-105, 2016.

SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. An Analysis on Modeling of Fluidized Bed Drying of Granular Material. **Advanced Powder Technology**, v. 19, p. 73-82, 2008.

STRÖHER, A. P.; MENEZES, M. L.; FIORENTIN, L. D.; PEREIRA, N. C. Utilização do bagaço de laranja no tratamento de efluente proveniente da lavagem de jeans. **E-xacta**, v. 5, n. 1, p. 27-37, 2012.

SUBRAMANI, H.J.; BALAIYYA, M.B.M.; MIRANDA, L.R. Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, p.166-173, 2007.

TALENS, C.; GIRALDEZ, M. C.; FITO, P. J. A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel. **Journal of Food Engineering**, v. 175, p. 33-42, 2016.

THONGLIMP, V. **Fluidization**. Academic Press, London, v. 2, p. 31-33, 1985

TREGAMBI, C.; CHIRONE, R.; MONTAGNARO, F.; SALATINO, P.; SOLIMENE, R. Heat transfer in directly irradiated fluidized beds. **Solar Energy**, v. 129, p. 85-100, 2016.

USTRA, L. A. R. **Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, 2005. Pelotas, RS.

VERMA, Y.; KAURASE, K. P. Exergy Analysis of Thermal Power Plant. **International Journal of Engineering & Science Research**, v. 4, p. 940-945, 2014.

WEB, C.Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, **AIChE Journal**, v. 12, p. 610-612, 1966.

WU, S. Y.; BAEYENS, J. Segregation by size difference in gas fluidized beds. **Powder Technology**, v. 98, p. 139 – 150, 1998.

YU, D. U.; SHERESTHA, B. L.; BAIK, D. Radio Frequency Dielectric Properties of Bulk Canola Seeds under different temperatures, moisture contents, and frequencies for feasibility of radio frequency disinfection. **International Journal of Food Properties**, v. 18, p. 2746-2763, 2015.

YUN, T. M.; PUSPASARI, I. TASIRIN, S. M.; TALIB, M. Z. M.; DAUD, W. R. W.; YAAKOB, Z. Drying of Oil Palm Frond Particles in a Fluidized Bed Dryer with Inert Medium. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, v. 19, p. 593-603, 2013.

ZANELLA, K.; TARANTO, O. P. Influence of the drying operating conditions on the chemical characteristics of the citric acid extracted pectins from 'pera' sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) albedo and flavedo. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 111-118, 2015.

ZHANG, H.; MA, Y.; SHAO, S.; XIAO, R. The effects of potassium on distributions of bio-oils obtained from fast pyrolysis of agricultural and forest biomass in a fluidized bed. **Applied Energy**, v. 208, p. 867 – 877, 2017.

APÊNDICE A

A.1 Calibração da Placa de Orifício

A partir dos dados obtidos do Sensor 2 (queda de pressão na placa de orifício) na calibração da placa de orifício, foi possível, através de regressão linear, obter a equação A.1, que é a equação de calibração que relaciona a velocidade do ar e a queda de pressão proporcionada pela placa de orifício.

$$v = 0,1723 \cdot (\Delta P_{placa_orificio})^{0,5} \quad (A.1)$$

Com a leitura da pressão fornecida pelo sensor ligado à placa de orifício, foi possível determinar a vazão volumétrica do ar que escoava por toda a tubulação e coluna.

A.2 Calibração da Coluna do Leito

A partir dos dados obtidos pelo Sensor 1 (ΔP do conjunto) e pelo Sensor 2 (ΔP na placa de orifício) na calibração do conjunto câmara *plenum* + distribuidor + coluna vazia, foi possível, através de regressão linear, obter a equação A.2, que é a equação de calibração que relaciona a queda de pressão no conjunto e a queda de pressão proporcionada pela placa de orifício.

$$\Delta P_{conjunto_vazio} = 0,5057 \cdot \Delta P_{placa_orificio} \quad (A.2)$$

A equação acima foi implementada na placa de aquisição de dados para obter o valor fornecido pelos sensores e calcular a queda de pressão apenas no leito, que é o resultado da subtração da queda de pressão total promovida pelo conjunto câmara *plenum*, coluna e o leito (mistura binária biomassa + inerte) com a queda de pressão total promovida pelo conjunto câmara *plenum* e coluna vazia, como é mostrado na equação E.3.

$$\Delta P_{leito} = \Delta P_{conjunto_com_leito} - \Delta P_{conjunto_vazio} \quad (E.3)$$

A.3 Procedimento para calibração

Tanto para a calibração da placa de orifício quanto da coluna do leito fluidizado, primeiramente, foi conferida a integridade das mangueiras das tomadas de pressão da coluna e da câmara *plenum* e averiguado se a válvula de alimentação estava completamente fechada e a válvula da purga estava completamente aberta.

Feito isso, o compressor foi acionado e a válvula de regulação da vazão foi aberta de forma lenta até atingir seu limite. A cada abertura da válvula, tanto a queda de pressão na placa de orifício quanto a queda de pressão na coluna eram averiguadas nos sensores correspondentes. Ao mesmo tempo, a amperagem e a voltagem das fases de alimentação do equipamento eram conferidas e registradas em ata, juntamente com os valores da queda de pressão e da velocidade do ar.

Ao atingir o limite de medição do sensor, a válvula de alimentação foi lentamente fechada e o procedimento de obtenção dos dados foi o mesmo: queda de pressão da placa de orifícios, queda de pressão na coluna do leito, amperagem e voltagem. Esse procedimento foi necessário para que o efeito de histerese no sistema pudesse ser analisado posteriormente.

Assim como na calibração da placa de orifício, o módulo de aquecimento deve estar desligado durante todo o processo de calibração.

APÊNDICE B**Tabela B.1 - Planejamento Experimental para a Fluidodinâmica**

Condição	w %	Xu (% b.u.)
1	5	15
2	5	45
3	5	75
4	10	15
5	10	45
6	10	75
7	15	15
8	15	45
9	15	75
10	5	15
11	5	45
12	5	75
13	10	15
14	10	45
15	10	75
16	15	15
17	15	45
18	15	75
19	10	45