

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

RAQUEL ESTEVEZ ROCHA

**CARACTERÍSTICAS DE FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS CONTENDO
CASCA RESIDUAL DE MANDIOCA E AREIA**

São Cristóvão (SE)

2023

RAQUEL ESTEVEZ ROCHA

**CARACTERÍSTICAS DE FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS
CONTENDO CASCA RESIDUAL DE MANDIOCA E AREIA**

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

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

São Cristóvão (SE)

2023

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

R672c Rocha, Raquel Estevez
Características de fluidização de misturas binárias contendo casca residual de mandioca e areia / Raquel Estevez Rocha ; orientador Manoel Marcelo do Prado. - São Cristóvão, 2023.
140 f. :il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2023.

1. Mandioca. 2. Biomassa. 3. Resíduos orgânicos. I. Prado, Manoel Marcelo do orient. II. Título.

CDU 66

RAQUEL ESTEVEZ ROCHA

CARACTERÍSTICAS DE FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS CONTENDO
CASCA RESIDUAL DE MANDIOCA E AREIA

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de Sergipe em 28 de fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL MARCELO DO PRADO**
Data: 08/08/2024 14:30:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado – Orientador
(DEQ/UFS)

Documento assinado digitalmente
 **PAULO HENRIQUE LEITE QUINTELA**
Data: 08/08/2024 15:38:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Henrique Leite Quintela – Membro Interno ao PEQ/UFS
(DEQ/UFS)

Documento assinado digitalmente
 **LUANDA GIMENO MARQUES**
Data: 10/08/2024 14:07:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Luanda Gimeno Marques – Membro Externo ao PEQ/UFS
(DEQ/UFS)

Documento assinado digitalmente
 **LIDJA DAHIANE MENEZES SANTOS BOREL**
Data: 08/08/2024 14:03:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Lidja Dahiane Menezes Santos Borel – Membro Externo à Instituição
(DQM/UFLA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me sustentado e me dado forças para percorrer esse caminho até aqui.

À minha família por todo apoio e dedicação em todos os momentos da minha vida, minha mãe Elaine e meu pai Francisco, e em especial à minha avó Doralice por ter contribuído na formação da pessoa que me tornei hoje. Agradeço a meu irmão Paulino por todas as conversas e desabafos, e suporte em tudo que eu preciso.

Agradeço a meu marido Jhonata por todo apoio, dedicação, suporte e companheirismo não só nesse momento da minha vida, mas em todos que passamos juntos. Não poderia ter escolhido pessoa melhor para dividir a vida comigo. Agradeço também à família que ganhei de presente, meus sogros Jean e Andréia, e minha cunhada Karol, por todo acolhimento e apoio que sempre recebo.

Ao meu orientador, professor Manoel Marcelo do Prado, pela paciência, orientação, incentivo e apoio, pelo ser humano ímpar que o senhor é, e por se preocupar tanto com nosso aprendizado e construção de um pensamento crítico. Além de todas as conversas e momentos de descontração.

Ao técnico Marcos por não medir esforços para auxiliar todos no laboratório e aos meus companheiros de laboratório, Keyse, Gabriel, Ítalo, Gustavo, Felipe, Rafael, Kescia, e Vivian por todos os momentos descontraídos e risadas no laboratório que foram imprescindíveis durante essa fase.

Agradeço a todos os professores do DEQ e PEQ pela contribuição na minha formação acadêmica, em especial aos professores Roberto Rodrigues e Marcelo Souza que contribuíram para esse trabalho na etapa do projeto de dissertação, e à professora Luanda Gimeno e professor Paulo Quintela por suas contribuições na etapa de qualificação da dissertação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me apoiaram e me incentivaram nesse momento da minha vida. Muito obrigada!

RESUMO

O melhor gerenciamento de recursos naturais se tornou uma pauta global, e nos últimos anos, tem havido uma tendência mundial de aumento no uso de fontes renováveis de energia. Nesse contexto, a conversão de biomassa em energia vem crescendo em importância, tendo em vista substituir a demanda por combustíveis fósseis, além de diversificar as fontes de energia. A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das lavouras temporárias de maior destaque no Brasil, com mais de 18,1 milhões de toneladas produzidas somente no ano de 2021. Toda essa produtividade gera resíduos, que na maioria das vezes, não têm um descarte adequado. Dentre os resíduos sólidos, a casca da mandioca, devido às suas características lignocelulósicas, constitui uma valiosa fonte de biomassa para a produção de bioenergia. A tecnologia de leito fluidizado apresenta-se como potencial alternativa, tanto para a secagem, como operação de pré-tratamento da biomassa, a fim de reduzir seu elevado teor de umidade, como para os processos de conversão termoquímica. Essa tecnologia, ao promover uma intensa mistura entre as partículas e o fluido, intensifica as taxas de transferência de calor e massa, e de conversão. Para auxiliar na fluidização de diferentes biomassas, partículas inertes têm sido comumente empregadas. Logo, diante da escassez de informações na literatura sobre a aplicação da técnica de leito fluidizado para o processamento da casca residual da mandioca, o objetivo deste trabalho foi investigar os comportamentos fluidodinâmicos de componentes individuais e misturas binárias contendo partículas da biomassa da casca de mandioca e areia quartzosa em leito fluidizado. Os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos em uma típica unidade experimental de leito fluidizado com ar à temperatura ambiente. Foram utilizadas misturas binárias de biomassa de 1,29 mm com areia quartzosa, obedecendo um planejamento fatorial 3^3 , a fim de avaliar além da influência do diâmetro da partícula de inerte (1,29 mm e 0,93 mm), os efeitos da razão L/D de leito estático (1, 1,5 e 2), da fração volumétrica (25%, 50% e 75%) e do teor de umidade da biomassa (10%, 42,5% e 75% b.u.) sobre os parâmetros de fluidização. Os dados de queda de pressão e velocidade foram coletados através de um manômetro diferencial do tipo tubo em U e um anemômetro, respectivamente. Os resultados para as misturas binárias mostraram que a razão L/D de leito estático influenciou o comportamento das velocidades incipiente e de completa fluidização. Já a umidade das partículas afetou significativamente todas as velocidades, incluindo a de mínima fluidização, principalmente à medida que a proporção volumétrica da biomassa e a razão de leito estático aumentaram. A proporção de biomassa afetou de maneiras diferentes a biomassa úmida e seca e as velocidades aumentaram de forma geral para o inerte de maior diâmetro. O fenômeno de *slugging* observado nos leitos com biomassa pura, não ocorreu com as misturas binárias, indicando uma melhora da qualidade de fluidização da mistura com o uso da areia como inerte, em consonância com os dados de ângulo de repouso obtidos. Com base na análise fluidodinâmica realizada, as condições mais adequadas para se obter maiores qualidade e estabilidade de fluidização, tanto para secagem da casca de mandioca úmida (75% b.u.), como para os processos de conversão termoquímica da biomassa desidratada (10% b.u.), foram aquelas empregando a mistura binária com a areia de menor diâmetro de partícula (0,93 mm), com 75% de fração volumétrica de biomassa e razão L/D de 1,5. Para perspectivas de estudos decorrentes desta linha de pesquisa tem-se, portanto, a definição das condições de operação ótimas para aumentar a eficiência térmica de um secador de leito fluidizado tendo como referência os dados fluidodinâmicos aqui determinados, bem como para a aplicação da casca de mandioca e areia quartzosa em um reator de leito fluidizado.

PALAVRAS-CHAVES: *Manihot esculenta* C., resíduo, biomassa, leito fluidizado, parâmetros fluidodinâmicos.

ABSTRACT

The better management of natural resources has become a global agenda and in recent years there is a global trend towards an increase in the use of renewable energy sources. In this context, the conversion of biomass into energy has grown in importance, in order to replace the demand for fossil fuels, as well as to diversify energy sources. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is one of the most prominent temporary crops in Brazil, with more than 18.1 million tons produced in 2021. All this productivity generates waste that most often does not have proper disposal. Among solid residues, the cassava peel represents a valuable source of biomass for the production of bioenergy due to its lignocellulosic characteristics. Fluidized bed technology appears as a potential alternative, both for drying as biomass pre-treatment, in order to reduce its high moisture content, and for thermochemical conversion processes. This technology, by promoting an intense mixing between the particles and the fluid, intensifies the rates of heat and mass transfer, and of conversion. To assist in the fluidization of different biomasses, inert particles have been commonly used. Therefore, given the scarcity of information in the literature on the application of the fluidized bed technique for the processing of residual cassava husk, the objective of this work was to investigate the fluid dynamic behavior of single components and binary mixtures containing biomass particles from cassava peel and sand particles in fluidized bed. The fluid dynamic tests were carried out in a typical fluidized bed with air at room temperature, binary mixtures of 1.29 mm biomass with sand of 1.29 mm and 0.93 mm, following a 3³ factorial design, in order to evaluate the effects of the bed aspect ratio L/D (1, 1.5 and 2), of the volumetric fraction (25%, 50% and 75%) and of the moisture content of the biomass (10%, 42.5% and 75% b.u.), in addition to influence of the inert particle diameter on the fluidization parameters. Pressure drop and velocity data were measured using an U-tube differential manometer and an anemometer, respectively. The results for the binary mixtures showed that the bed aspect ratio influenced the behavior of the incipient and complete fluidization velocities. The moisture of the particles significantly affected all velocities, including the minimum fluidization, mainly as the volumetric proportion of biomass and the bed aspect ratio increased. The proportion of biomass affected moist and dried biomass in different ways and the velocities generally increased for the larger diameter inert. The *slugging* phenomenon seen for pure biomass beds did not occur with the binary mixtures, indicating an improvement in the fluidization quality of the mixture with the use of sand as inert, in line with the angle of repose data obtained. Based on the fluid dynamic analysis carried out, the most suitable operating conditions to obtain greater fluidization quality and stability, both for drying the wet cassava peel (75% b.u.) and for the thermochemical conversion processes of the dehydrated biomass (10% b.u.), were those using the binary mixture with the sand having the smallest particle diameter (0.93 mm), with 75% volumetric fraction of biomass and L/D ratio of 1.5. For perspectives of studies resulting from this line of research, there is the definition of the optimal operating conditions to increase the thermal efficiency of a fluidized bed dryer, having as reference the fluid dynamic data determined here, in addition to the application of cassava peel and quartz sand in a fluidized bed reactor.

KEYWORDS: *Manihot esculenta* C., residue, biomass, fluidized bed, fluid dynamics parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais partes da mandioca. Fonte: Autoria Própria.	23
Figura 2.2 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para partículas homogêneas. Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).	28
Figura 2.3 - Regimes de Fluidização. Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)	30
Figura 2.4 - Classificação de Geldart. Fonte: Cremasco (2014)	31
Figura 2.5 - Regime Fluidodinâmico e classificação de Geldart. Fonte: Adaptado de Zhang <i>et al.</i> (2021)	32
Figura 2.6 - Curvas de fluidização em leitos com baixa qualidade devido à presença de (a) <i>slugging</i> (b) canais preferenciais. Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).	33
Figura 2.7 - Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos para misturas binárias. Fonte: Adaptado de Wu <i>et al.</i> (2019)	38
Figura 2.8 - Estados de mistura para a mistura binária: (a) completamente misturado, (b) completamente segregado e (c) parcialmente misturado. Adaptado de Chiba <i>et al.</i> (1979). ...	39
Figura 3.1 - Resíduo de mandioca coletado em feira livre.....	45
Figura 3.2 - Areia quartzosa (a) $d_p = 0,93 \text{ mm}$ (b) $d_p = 1,29 \text{ mm}$	46
Figura 3.3 - Esquema do aparato experimental.....	46
Figura 3.4 - Casca de mandioca após a lavagem.....	48
Figura 3.5 - Tambor rotativo utilizado para determinação do ângulo de repouso.....	51
Figura 3.6 - Quarteamento para homogeneização e seleção de amostras.....	52
Figura 3.7 - Exemplo de determinação do ângulo de repouso dinâmico por meio do software <i>Image J</i>	53
Figura 3.8 - Análise gráfica para determinação dos parâmetros fluidodinâmicos das misturas binárias.....	56
Figura 4.1 - Curva de frequência simples para o diâmetro das partículas de biomassa.....	60
Figura 4.2 - Casca de mandioca utilizada nos experimentos em diferentes umidades (a) 10% b.u. (b) 42,5% b.u. (c) 75% b.u.	62
Figura 4.3 - Classificação de Geldart das partículas de areia, de biomassa e das misturas binárias biomassa-areia.....	71
Figura 4.4 - Queda de pressão em função da velocidade do ar, para leitos de partículas de areia em diferentes razões L/D: (a) $d_p = 0,93 \text{ mm}$ e (b) $d_p = 1,29 \text{ mm}$	72
Figura 4.5 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para leitos de monopartículas de biomassa em diferentes umidades e razões de leito estático: (a) $X_{bu} = 10\%$; (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	74
Figura 4.6 - Escoamento do tipo <i>slug</i> para biomassa com $X_{bu} = 75\%$ e $L/D = 2$	77

Figura 4.7 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a queda de pressão de mínima fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.....	81
Figura 4.8 - Superfícies de resposta para a queda de pressão de mínima fluidização da MB093 como função (a) da razão L/D do leito e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D do leito e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$, e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa com L/D = 1.....	82
Figura 4.9 - Superfícies de resposta para a queda de pressão de mínima fluidização da MB129 como função (a) da razão L/D do leito e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D do leito e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$, e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa, para L/D = 1.....	83
Figura 4.10 - Leito completamente segregado: MB093 e L/D = 1,5. (a) $x_v = 25\%$, $X_{bu} = 10\%$; (b) $x_v = 50\%$, $X_{bu} = 10\%$	84
Figura 4.11 - Leito parcialmente misturado: MB093 e L/D = 1,5. (a) $x_v = 75\%$, $X_{bu} = 75\%$ (b) $x_v = 50\%$, $X_{bu} = 75\%$	85
Figura 4.12 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre o índice de fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.....	88
Figura 4.13 - Velocidades fluidodinâmicas em função do diâmetro do inerte, para misturas binárias com L/D = 1,5. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$	91
Figura 4.14 - Velocidades fluidodinâmicas em função da razão L/D, para MB093. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$	93
Figura 4.15 - Velocidades fluidodinâmicas em função da razão L/D, para MB129. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$	94
Figura 4.16 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade de mínima fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.....	95
Figura 4.17 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade incipiente de fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.....	97
Figura 4.18 - Superfícies de resposta para a velocidade incipiente de fluidização da MB093 como função (a) da razão L/D e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$; e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa com L/D = 1.....	97
Figura 4.19 - Superfícies de resposta para a velocidade incipiente de fluidização da MB129 como função (a) da razão L/D e do teor de umidade, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D e da fração volumétrica de biomassa. para $X_{bu} = 10\%$; e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa com L/D = 1.....	98
Figura 4.20 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com L/D = 1 e (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$	99
Figura 4.21 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com L/D = 1,5: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$	99

Figura 4.22 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 2$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$	100
Figura 4.23 - Curvas características da MB093 na razão $L/D = 1,5$ e $x_v = 25\%$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ (c) $X_{bu} = 75\%$	101
Figura 4.24 - Caminho preferencial observado após ensaio com a mistura binária composta por biomassa de $X_{bu} = 75\%$ e $x_v = 50\%$, e areia de 0,93 mm de diâmetro.....	103
Figura 4.25 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$	103
Figura 4.26 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1,5$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$	104
Figura 4.27 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 2$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$	104
Figura 4.28 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade de completa fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.....	106
Figura 4.29 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 1$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	106
Figura 4.30 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 1,5$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	107
Figura 4.31 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 2$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	107
Figura 4.32 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	109
Figura 4.33 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1,5$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	109
Figura 4.34 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 2$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$	109
Figura E.1 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas no teor de umidade da biomassa, em diferentes frações volumétricas e razões L/D do leito estático.....	133
Figura E.2 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas no teor de umidade da biomassa, em diferentes frações volumétricas e razões L/D do leito estático.....	134
Figura E.3 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas na fração volumétrica da biomassa, em diferentes teores de umidade e razões L/D do leito estático.....	135
Figura E.4 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas na fração volumétrica da biomassa, em diferentes teores de umidade e razões L/D do leito estático.....	136

Figura E.5 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas na razão de leito estático, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.....137

Figura E.6 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas na razão de leito estático, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.....138

Figura F.1 - Velocidades incipiente, mínima e de completa fluidização em função do diâmetro do inerte, para razão $L/D = 1$, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.....139

Figura F.2 - Velocidades incipiente, mínima e de completa fluidização em função do diâmetro do inerte, para razão $L/D = 1$, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.....140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Quantitativo aproximado em milhões de toneladas da produção de mandioca por continente no ano de 2020 e 2021.	23
Tabela 2.2 - Relação entre a escoabilidade do material e o ângulo de repouso.	36
Tabela 3.1 - Peneiras Tyler utilizadas na análise granulométrica.....	49
Tabela 3.2 - Planejamento fatorial adotado com os respectivos fatores codificados e decodificados.....	57
Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica da casca de mandioca <i>in natura</i>	60
Tabela 4.2 - Teores de umidade das partículas de biomassa determinados por diferentes métodos	61
Tabela 4.3 - Massa específica aparente dos materiais utilizados.....	63
Tabela 4.4 - Densidade de empacotamento e porosidade dos leitos de monopartículas em diferentes razões L/D, teor de umidade e diâmetro de partícula.....	65
Tabela 4.5 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão L/D=1,5.....	67
Tabela 4.6 - Ângulo de repouso dinâmico para os componentes individuais e misturas binárias.....	69
Tabela 4.7 - Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos de monopartículas de areia obtidos em diferentes razões L/D e diâmetros de partículas	73
Tabela 4.8 - Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos de monopartículas de biomassa em diferentes umidades e razões L/D de leito estático.....	75
Tabela 4.9 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para a MB093 na razão L/D = 1,5, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.....	80
Tabela 4.10 - Razões entre os diâmetros (dp_j/dp_f) e densidades ($\rho_{p,j}/\rho_{p,f}$) de partículas <i>jetsam</i> e <i>flotsam</i>	86
Tabela 4.11 - Percentagem de biomassa elutriada em L/D = 1.....	89
Tabela 4.12 - Percentagem de biomassa elutriada em L/D = 1,5.....	89
Tabela 4.13 - Percentagem de biomassa elutriada em L/D = 2.....	90
Tabela 4.14 - Comparação entre as velocidades de mínima fluidização obtidas experimentalmente e previstas por correlações empíricas para as misturas binárias na razão L/D = 1,5.....	111
Tabela A.1 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leito, para L/D = 1.....	124
Tabela A.2 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leito, para L/D = 1,5.....	125

Tabela A.3 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leite, para $L/D = 2$	126
Tabela B.1 - Densidade aparente e diâmetro efetivos das misturas binárias.....	127
Tabela C.1 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão $L/D = 1$	128
Tabela C.2 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão $L/D = 2$	129
Tabela D.1 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 1$	130
Tabela D.2 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 1,5$	131
Tabela D.3 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 2$	132

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal do leito	$[L^2]$
d_p	Diâmetro de partícula	$[L]$
d_{p_a}	Diâmetro médio das partículas de areia	$[L]$
d_{p_b}	Diâmetro médio das partículas de biomassa	$[L]$
$d_{p_{ef}}$	Diâmetro médio efetivo das partículas na mistura binária	$[L]$
d_{p_f}	Diâmetro médio de partículas <i>flotsam</i>	$[L]$
d_{p_j}	Diâmetro médio de partículas <i>jetsam</i>	$[L]$
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
IF	Índice de fluidização	$[-]$
L/D	Razão entre a altura e o diâmetro do leito	$[-]$
m_p	Massa de partículas no leito	$[M]$
Q_{mf}	Vazão do ar na condição de mínima fluidização	$[L^3T^{-1}]$
Re_{mf}	Número de Reynolds na condição de mínima fluidização	$[-]$
v	Velocidade superficial do fluido	$[LT^{-1}]$
v_{if}	Velocidade de fluidização incipiente	$[LT^{-1}]$
v_{cf}	Velocidade de completa fluidização	$[LT^{-1}]$
v_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	$[LT^{-1}]$
V_l	Volume do leito particulado	$[L^3]$
w_b	Massa de biomassa	$[M]$

w_i	Massa de areia	[M]
x_a	Fração mássica de areia	[-]
x_b	Fração mássica de biomassa	[-]
x_v	Fração volumétrica	[-]
X_{bu}	Teor de umidade em base úmida	$[M_{\text{água}}M_{\text{sól,úmido}}^{-1}]$
X_1, X_2 e X_3	Variáveis codificadas do modelo de regressão	[-]

Símbolos Gregos

α	Ângulo de repouso dinâmico das partículas	[°]
ΔP	Queda de pressão no leito	$[ML^{-1}T^{-2}]$
ΔP_{mf}	Queda de pressão na condição de mínima fluidização	$[ML^{-1}T^{-2}]$
ε	Porosidade do leito	[-]
φ	Esfericidade da partícula	[-]
μ	Viscosidade do ar de fluidização	$[ML^{-1}T^{-1}]$
ρ_l	Densidade de empacotamento do leito	$[ML^{-3}]$
ρ_g ou ρ	Massa específica do ar de fluidização	$[ML^{-3}]$
ρ_p	Densidade aparente da partícula	$[ML^{-3}]$
$\rho_{p,a}$	Densidade aparente das partículas de areia	$[ML^{-3}]$
$\rho_{p,b}$	Densidade aparente das partículas de biomassa	$[ML^{-3}]$

$\rho_{p,ef}$	Densidade média efetiva das partículas da mistura	[ML ⁻³]
$\rho_{p,f}$	Densidade média de partículas <i>flotsam</i>	[ML ⁻³]
$\rho_{p,j}$	Densidade média de partículas <i>jetsam</i>	[ML ⁻³]

Abreviaturas

MB093	Mistura binária contendo biomassa e areia de 0,93 mm
MB129	Mistura binária contendo biomassa e areia de 1,29 mm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 Mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz).....	22
2.1.1 Aproveitamento de subprodutos da mandioca	24
2.2 Fluidização	26
2.2.1 Leito Fluidizado.....	26
2.2.2 Comportamento Fluidodinâmico para um Leito de Monopartículas.....	27
2.2.3 Regimes de Fluidização e Classificação Geldart.....	29
2.2.4 Qualidade da Fluidização - Índice de Fluidização.....	33
2.2.5 Influência das Propriedades das Partículas.....	35
2.2.6 Comportamento de Fluidização para Misturas Binárias.....	37
2.2.7 Correlações empíricas da literatura para estimar os parâmetros fluidodinâmicos de misturas binárias.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 Materiais	45
3.2 Equipamento.....	46
3.3 Metodologia Experimental	47
3.3.1 Preparo da biomassa	47
3.3.2 Caracterização física das partículas.....	48
3.3.3 Ensaio Fluidodinâmico.....	53
3.3.4 Análise estatística	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Caracterização Física das Partículas.....	59
4.1.1 Distribuição Granulométrica	59
4.1.2 Teor de Umidade	61
4.1.3 Massa Específica das Partículas	63
4.1.4 Densidade de Empacotamento e Porosidade do Leito.....	64

4.1.5	Ângulo de Repouso Dinâmico (α).....	68
4.1.6	Classificação de Geldart	70
4.2	Análise Fluidodinâmica	72
4.2.1	Fluidodinâmica dos leitos de monopartículas de inerte e de biomassa.....	72
4.2.2	Fluidodinâmica de misturas binárias.....	79
 5 CONCLUSÕES.....		115
 6 REFERÊNCIAS.....		118
 APÊNDICE A.....		124
 APÊNDICE B.....		127
 APÊNDICE C.....		128
 APÊNDICE D.....		130
 APÊNDICE E.....		133
 APÊNDICE F.....		139

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa atualmente a 5ª posição como produtor mundial de mandioca, e é líder de produção no continente americano (FAO, 2021). O agronegócio brasileiro é movimentado por diversas culturas e tratando-se de lavouras temporárias, a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) possuiu no ano de 2021 destaque de produção no país, ocupando a 4ª posição após cana-de-açúcar, soja e milho. Neste mesmo ano, foram produzidas aproximadamente 18,1 milhões de toneladas que corresponde a cerca de 1,2 milhões de hectares de área colhida. A espécie é cultivada em todas as regiões do Brasil, e o Nordeste representa 19,89% dessa produção total, tendo o estado de Sergipe produzido mais de 135 mil toneladas (IBGE, 2021).

Toda essa produtividade gera resíduos, que na maioria das vezes não dispõem do descarte adequado, resultando em um problema ambiental. A mandioca possui uma casca grossa, composta pelo córtex e por uma fina camada marrom chamada de periderme, que representa cerca de 11 a 20% do seu peso total (IDRIS *et al.*, 2020; PANGHAL *et al.*, 2021). Ao ser processada, a casca é descartada como lixo nos solos, causando riscos ambientais e para a saúde, devido à contaminação pela presença de glicosídeos cianogênicos (FARROW *et al.*, 2018).

O melhor gerenciamento do uso dos recursos naturais está entre os principais problemas enfrentados por países desenvolvidos e em desenvolvimento (OKUDOH *et al.*, 2014). É notório a crescente preocupação mundial com a utilização de energias renováveis. O comitê executivo da *International Energy Agency* (IEA) planeja até 2025 uma contribuição significativa da bioenergia na demanda energética global visando a diminuição de gases do efeito estufa em prol da sustentabilidade e bioeconomia (IEA, 2019).

Estudos recentes mostram que uma das alternativas para o reaproveitamento e valorização dos resíduos de biomassa é explorar o seu potencial para a produção de bioenergia (DUAN *et al.*, 2019; ADAMU *et al.*, 2020; ZHONG *et al.*, 2020). E dentro desse contexto, a casca de mandioca tem sido considerada uma excelente biomassa residual para geração de energia. De acordo com Cruz *et al.* (2021) que investigaram o comportamento térmico dos

resíduos da colheita da mandioca, a utilização desses resíduos pode contribuir para o desenvolvimento dos diversos setores industriais, auxiliando no desenvolvimento sustentável do sistema energético. Além disso, uma energia bruta de 4666,5 cal/g foi encontrada por Idris *et al.* (2020) em um estudo sobre a composição físico-química das partes da mandioca que incluíam além da periderme, a polpa, o tubérculo descartado, folhas, tronco e o córtex. Um valor muito próximo, de 4090,90 cal/g, foi reportado por Chen *et al.* (2012) para o poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar. E ao comparar com combustíveis tradicionais, o etanol e a gasolina automotiva possuem um poder calorífico de 7090 e 11220 cal/g, respectivamente, de acordo com os dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Reatores de leito fluidizado são comumente empregados nos processos de geração de energia a partir de biomassa, devido principalmente às altas taxas de transferência de calor e massa ocasionadas pela mistura intensa das partículas dentro do leito (JIA *et al.*, 2016). Porém, antes de ser alimentada no reator, seja ele de combustão, gaseificação ou pirólise, a biomassa necessita ser submetida a um processo de secagem para reduzir seu elevado teor de umidade de 50-70% b.u. para 8-12% b.u., tendo em vista aumentar o rendimento dos processos de conversão termoquímica e a qualidade dos biocombustíveis produzidos (KALIYAN & MOREY, 2009; BRIDGWATER, 2012; LIU *et al.*, 2014). Por promover um maior contato entre o sólido e o ar de secagem, a técnica de leito fluidizado mostra-se também particularmente interessante para a operação de pré-tratamento da biomassa.

Os leitos formados por partículas de biomassa estão sujeitos a fenômenos de canalização, dificultando a fluidização mesmo em altas velocidades do gás. Assim, partículas inertes, a exemplo da areia, são geralmente empregadas para auxiliar na fluidização, bem como na transferência de calor e dispersão de partículas (LIU *et al.*, 2014; KANG *et al.*, 2017).

A fluidização de partículas de biomassa não pode ser comparada à de partículas inertes devido às características inerentes à partícula, como a sua geometria complexa. Dessa forma, compreender os fenômenos relacionados à fluidização e determinar os parâmetros fluidodinâmicos da mistura binária composta por biomassa e inertes é de fundamental importância para o projeto de leito fluidizado e estabelecimento de condições operacionais que garantam seu maior desempenho quando aplicado a processos de secagem e termoconversão (PAUDEL & FENG, 2013).

A queda de pressão e a velocidade nas condições de mínima fluidização (ΔP_{mf} e v_{mf}) são parâmetros fluidodinâmicos que possuem uma grande importância do ponto de vista prático

para aplicações industriais, por isso vêm sendo extensivamente estudados pela literatura, para diferentes tipos de biomassa e seus resíduos, como por exemplo, resíduos de beterraba (SOZZI *et al.*, 2021), resíduos de açaí (TARGINO *et al.*, 2021), pinheiro-larício (BAI & SI, 2020), bagaço de cana-de-açúcar (PÉREZ *et al.*, 2017), bagaço de sorgo, resíduo de fumo e casca de soja (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Porém, estudos fluidodinâmicos relacionados à casca de mandioca em leito fluidizado ainda não foram encontrados na literatura.

Ao comparar com o sistema monocomponente, o sistema binário tem características diferentes e envolve um conceito de faixa de velocidades para a compreensão do seu comportamento fluidodinâmico: as velocidades incipiente (v_{if}), de mínima (v_{mf}) e de completa (v_{cf}) fluidização. Diversos autores vêm utilizando esse conceito para descrever um sistema binário de forma mais completa (FORMISANI *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PÉREZ *et al.*, 2017; VASCONCELOS *et al.*, 2018; FU *et al.*, 2019; EMIOLA-SADIQ *et al.*, 2021).

O levantamento do estado da arte mostra que diversos estudos vêm sendo realizados na literatura para estudar a fluidodinâmica de diferentes tipos de biomassa e inertes em leito fluidizado, analisando a influência de variáveis como razão L/D de leito estático, fração de biomassa e diâmetro do inerte utilizado sobre os parâmetros fluidodinâmicos (OLIVEIRA *et al.*, 2013; PÉREZ *et al.*, 2017; VASCONCELOS *et al.*, 2018; BAI & SI, 2020). Porém, poucos estudos têm avaliado a influência da umidade na fluidização das partículas de biomassa, principalmente em teores mais elevados. Além disso, apesar da literatura apresentar estudos relacionados ao potencial energético de queima das partes da mandioca, não há estudos relacionados à fluidodinâmica da mistura da casca da mandioca e inertes em leito fluidizado.

Diante desse cenário, a fim de contribuir para o reaproveitamento da casca residual do processamento da mandioca, em especial a parte mais externa (periderme), como biomassa para geração de energia, o objetivo deste trabalho foi investigar a fluidização de partículas de casca de mandioca em leitos contendo apenas a biomassa e em leitos contendo misturas binárias biomassa-areia.

Para tanto, foi feita a caracterização física das partículas de biomassa da casca de mandioca e de inerte (areia quartzosa) e avaliados os efeitos da razão L/D de leito estático, diâmetro do inerte utilizado, fração volumétrica e teor de umidade da biomassa sobre os parâmetros fluidodinâmicos das partículas empacotadas individualmente e/ou na forma de misturas binárias. Realizou-se também uma comparação entre os dados experimentais obtidos para velocidade de mínima fluidização com aqueles previstos por correlações empíricas existentes na literatura.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por finalidade apresentar o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento desta pesquisa, além do levantamento do estado da arte com os trabalhos mais relevantes encontrados na literatura referentes ao tema deste estudo.

Inicialmente, são apresentados os aspectos gerais da cultura da mandioca, incluindo desde aspectos morfológicos do tubérculo, produtividade no Brasil e no mundo, até as principais formas de reaproveitamento, reportadas na literatura, para seus resíduos sólidos. Em seguida, é abordado o processo de fluidização, com aplicações do leito fluidizado e os fenômenos envolvidos, além dos aspectos fluidodinâmicos característicos de sistemas monocomponentes e de misturas binárias. Por fim, algumas correlações empíricas para determinação da velocidade de mínima fluidização são elencadas.

2.1 Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é considerada uma cultura adaptada à seca e produtiva em solos deficientes em nutrientes. A raiz pode ser transformada em uma grande variedade de produtos alimentícios, como chips, flocos e farinha, além de servir como matéria prima para produção de várias indústrias como, de alimentos e bebidas, produção de adesivos, farmacêutica e químicas (ANYANWU *et al.*, 2015).

O tubérculo possui três partes principais, sendo a parênquima (polpa), periderme (casca) e o córtex (entrecasca). A Figura 2.1 apresenta as partes desta raiz:

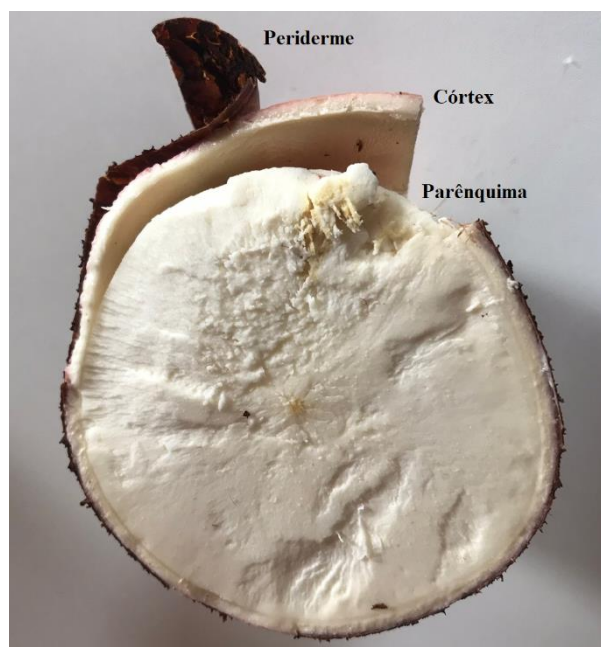


Figura 2.1 - Principais partes da mandioca. Fonte: Autoria Própria.

O tubérculo é uma cultivar de suma importância socioeconômica mundial. De acordo com a *Food and Agricultural Organization* (FAO) foram produzidos em todo o mundo mais de 314 milhões de toneladas em 2021. A Tabela 2.1 apresenta a quantidade produzida da raiz por continente em milhões de toneladas nos anos de 2020 e 2021:

Tabela 2.1 – Quantitativo aproximado em milhões de toneladas da produção de mandioca por continente no ano de 2020 e 2021.

Ano	Mundo	Continente			
		África	Américas	Ásia	Oceania
2020	303,75	193,88	26,77	82,84	0,251
2021	314,81	203,57	26,71	84,25	0,266

Fonte: FAO (2020); FAO (2021).

O Brasil ocupa atualmente a 5ª posição como produtor mundial de mandioca, atrás da Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia e Gana, sendo líder de produção no

continente americano (FAO, 2021). No Brasil, a mandioca ocupa a 4ª posição em quantidade produzida de cultura de lavoura temporária, após a cana-de-açúcar, soja e milho (IBGE, 2021).

A maioria dos métodos de processamento da mandioca começa a partir da remoção da casca, a qual representa de 11 a 20% do peso total da raiz (PANGHAL *et al.*, 2021). De posse da quantidade da raiz produzida mundialmente, Tabela 2.1, é possível fazer uma estimativa dos resíduos da casca gerados. Ao considerar um valor médio de 15% do peso da casca em relação à raiz, tem-se um total de 47,22 milhões de toneladas de resíduos de casca gerados no ano de 2021 em todo mundo.

De acordo com Sharma *et al.* (2020), os resíduos sólidos são considerados um problema global. Essa grande produtividade da cultura gera impactos negativos na natureza com o grande volume de resíduos que são gerados no seu processamento e são descartados de forma inadequada (IDRIS *et al.*, 2020).

A composição físico-química das partes da mandioca (folhas, polpa, tubérculo descartado, caule, córtex e periderme) foi estudada por Idris *et al.* (2020). Para a periderme foram encontrados 4,08% de proteína bruta, 24,49% de fibra bruta (celulose e lignina), 14,59% de cinzas e 4666,5 cal/g de energia bruta, ficando atrás somente das folhas com 4824,3 cal/g. Valor muito próximo ao poder calorífico superior de 4090,90 cal/g encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar por Chen *et al.* (2012). E ao comparar com combustíveis tradicionais, o etanol e a gasolina automotiva possuem um poder calorífico de 7090 e 11220 cal/g, respectivamente, de acordo com os dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Biomassas lignocelulósicas, incluindo resíduos agrícolas e agroindustriais, além de resíduos florestais, madeira, bagaços, resíduos de papel, sólidos urbanos, resíduos de colheita, entre outros (SHAH *et al.*, 2018), são matérias-primas abundantes que têm sido consideradas fontes para produção de biocombustíveis como hidrogênio, metano e etanol, bem como bio-óleo, biocarvão e bioenergia (SOARES *et al.*, 2020; RUEANGSAN *et al.*, 2021).

2.1.1 Aproveitamento de subprodutos da mandioca

Atualmente, em busca do reaproveitamento desses resíduos agroindustriais, as cascas de mandioca vêm sendo amplamente utilizadas como alimentação animal (SIVAMANI *et al.*, 2018; AGUSTIN *et al.*, 2020), produção de bioetanol a partir das cascas e bagaço (AMALIA

et al., 2021), além de coagulante no tratamento de efluentes líquidos (MOHD-SALLEH *et al.*, 2021).

Porém, o reaproveitamento das cascas de mandioca em ração animal sem um processamento adequado desses resíduos pode levar os animais à morte por envenenamento devido ao cianeto presente (IDRIS *et al.*, 2020). Além disso, é necessário uma etapa de pré-tratamento a mais para reduzir os níveis de cianeto presentes quando a casca é utilizada para produção de biocombustíveis (SIVAMANI *et al.*, 2018).

Outro reaproveitamento dessa biomassa visto na literatura é o uso como adsorvente para remoção de metais pesados. Villabona-Ortíz *et al.* (2021) otimizou a adsorção de cádmio em biomassas residuais de cacau, milho, bagaço de dendê e cascas de inhame e mandioca. O autor concluiu que todos os bioadsorventes têm bom potencial para adsorção de cádmio, tendo a casca de mandioca obtido a terceira melhor performance para as condições otimizadas. Para a reutilização desses resíduos como adsorventes, foi necessário o pré-tratamento, que incluiu lavagem e secagem ao sol até massa constante. O artigo não deixou claro o tempo total exposto ao sol, mas é sabido que a secagem natural apresenta algumas desvantagens quanto à qualidade, precisão e eficiência do processo (RENZO *et al.*, 2021).

Estudos recentes mostram que uma das alternativas para o reaproveitamento e valorização dos resíduos de biomassa é explorar o seu potencial para a produção de bioenergia (DUAN *et al.*, 2019; ADAMU *et al.*, 2020; ZHONG *et al.*, 2020). E dentro desse contexto, a casca de mandioca tem sido considerada uma excelente biomassa residual para geração de energia. De acordo com Cruz *et al.* (2021) que investigaram o comportamento térmico dos resíduos da colheita da mandioca, a utilização desses resíduos pode contribuir para o desenvolvimento de diversos setores industriais, auxiliando no desenvolvimento sustentável do sistema energético. Além disso, Ighalo e Adeniyi (2021) avaliaram a potencial valorização de casca de mandioca via pirólise e reforma a vapor através da modelagem, confirmando seu grande potencial de valorização por esses processos.

A biomassa de forma geral é um recurso energético abundante que tem sido cada vez mais utilizado para produção de energia e/ou biocombustíveis. Vários processos de conversão térmica de baixo custo se mostraram muito promissores, como a pirólise e gaseificação. Para isso, reatores de leito fluidizado são empregados devido principalmente às altas taxas de transferência de calor e massa. E para garantir uma fluidização estável, partículas inertes, como a areia, são frequentemente empregadas (JIA *et al.*, 2016). O uso de partículas de areia reduz a

ocorrência de fenômenos indesejados como a canalização, que é a passagem do gás através de caminhos preferenciais (KARMAKAR *et al.*, 2013).

2.2 Fluidização

2.2.1 Leito Fluidizado

Secadores e reatores em leito fluidizado oferecem, de forma geral, grandes vantagens em comparação àqueles tradicionais de leito fixo, dentre elas, maiores taxas de transferência de calor e massa, devido à uma maior área superficial de contato do sólido e fluido, bem como distribuições de temperatura e umidade uniformes, proporcionadas pela intensa mistura dada pela movimentação aleatória e rápida das partículas dentro do leito (SOZZI *et al.*, 2021).

Devido a essas vantagens, reatores de leito fluidizado são comumente utilizados para conversão da biomassa em energia (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). De acordo com Paudel e Feng (2013), a importância da fluidização de partículas de biomassa pode ser verificada na gaseificação, pirólise e combustão da biomassa para extração de energia.

O leito fluidizado vem sendo utilizado na literatura de diversas formas. No beneficiamento a seco de carvão, Fu *et al.* (2019) propuseram uma nova correlação para prever a velocidade de mínima fluidização de misturas binárias contendo partículas de magnetita e areia, carvão ou gangue em leito fluidizado. Sun *et al.* (2022) também utilizaram a tecnologia de leito fluidizado gás-sólido com dois sistemas de misturas binárias de partículas de magnetita e areia de diferentes diâmetros e composições para determinar a condição ótima de fluidização.

Gupta e De (2021) utilizaram a tecnologia de leito fluidizado duplo, que emprega dois reatores separados para combustão e gaseificação para avaliar as características fluidodinâmicas e de segregação da mistura binária composta de carvão e areia. Os autores enfatizam que o uso de inertes no leito facilita a transferência de calor para o combustível sólido, já que mantém a fluidização uniforme das partículas de combustível. A exemplo de outra aplicação muito importante, a pirólise, Soria-Verdugo *et al.* (2023) avaliaram o efeito da forma da partícula de madeira de faia com mesma massa durante a pirólise em leito fluidizado borbulhante. As medidas de massa liberadas durante a pirólise e registradas em balança analítica de alta precisão foram utilizadas para avaliar o efeito da forma das partículas na evolução temporal do grau de conversão.

Na secagem, diversos autores também utilizaram a tecnologia de leito fluidizado, principalmente utilizando diferentes tipos de biomassa (LIU *et al.*, 2014; JIA *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2020). Sozzi *et al.* (2021) estudaram a cinética de secagem de resíduos de beterraba em diferentes temperaturas do ar de secagem. Os autores concluíram que o uso dessa tecnologia permitiu que esses resíduos fossem secos sem danos consideráveis ao produto, além de permitir uma redução no tempo de secagem em comparação aos dispositivos convencionais.

O leito fluidizado possui uma ampla aplicação no processamento de biomassas, mais especificamente para resíduos de mandioca, algumas aplicações foram encontradas para o talo e rizoma. Pattiya (2011) investigou o rendimento e propriedades dos produtos da pirólise produzidos a partir de resíduos de mandioca (talo e rizoma) em um reator de leito fluidizado para produção de bio-óleo. Zhang *et al.* (2017) utilizaram resíduo de talo de milho e rizoma de mandioca para produzir bio-óleo por meio da pirólise em um reator de leito fluidizado. Enquanto que Kuprianov *et al.* (2019) avaliaram as características de combustão de rizoma de mandioca peletizado co-queimado com casca de eucalipto utilizando areia e alumina para inibir a aglomeração do leito em um combustor de leito fluidizado.

O levantamento do estado da arte mostra que o leito fluidizado tem sido vastamente empregado para o beneficiamento do carvão, pirólise, gaseificação e combustão de combustíveis sólidos, além da operação de secagem. Portanto, entender o comportamento fluidodinâmico e suas características, bem como a determinação de parâmetros, tais como a queda de pressão e velocidade de mínima fluidização, é de suma importância para o projeto e operação de reatores ou secadores de leito fluidizado.

2.2.2 Comportamento Fluidodinâmico para um Leito de Monopartículas

É necessário estabelecer bem os conceitos envolvidos na fluidodinâmica de partículas homogêneas para compreender o comportamento fluidodinâmico de um leito composto por misturas de partículas com diferentes densidades e/ou diâmetros.

De acordo com Cremasco (2014) um leito denominado fixo é composto por uma coluna preenchida por partículas que continuam imóveis quando percoladas pelo fluido. Durante esse fenômeno, a queda de pressão do leito (ΔP) é diretamente proporcional à velocidade superficial do gás (v), como mostra a Equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu v}{(\phi d_p)^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho_f v^2}{\phi d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

em que d_p e ϕ são o diâmetro médio e esfericidade da partícula, respectivamente, L e ε são a altura e porosidade do leito, e μ a viscosidade do gás.

O fenômeno de fluidização ocorre quando um fluido passa através de um leito de partículas, percolando com velocidade suficiente para a força de atrito entre a partícula e o fluido ser contrabalanceada pelo peso das partículas, resultando em sua suspensão. Neste ponto, a velocidade do fluido é chamada de velocidade de mínima fluidização (v_{mf}). Em sistemas gás-sólido, é possível observar bolhas e canalizações do gás, quando há um aumento significativo do fluxo (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). Na Figura 2.2 é mostrada uma típica curva de fluidização.

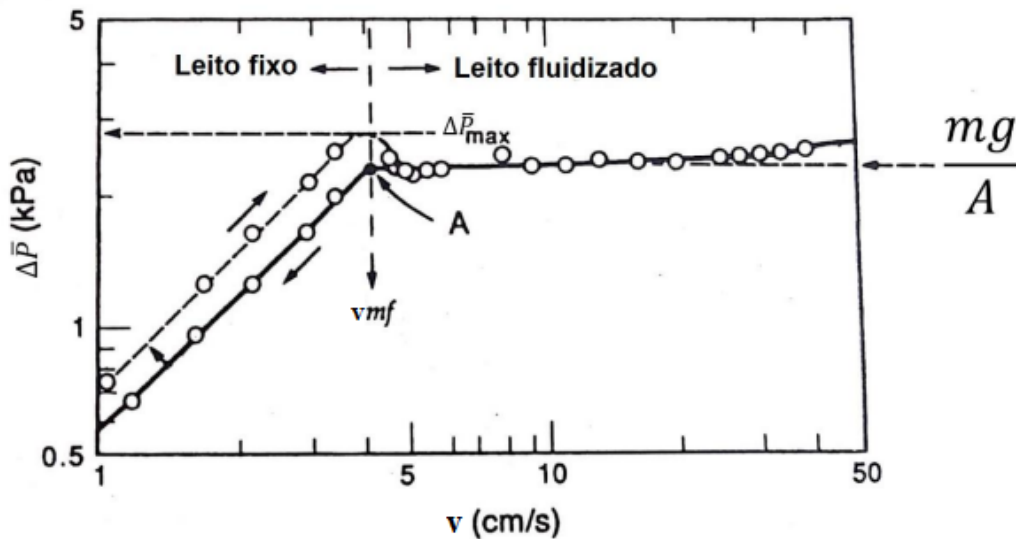


Figura 2.2 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás para partículas homogêneas. Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

A Figura 2.2 ilustra graficamente a passagem do leito fixo para o leito fluidizado. Na região de leito fixo, a queda de pressão no leito de partículas aumenta à medida que a velocidade do gás aumenta, conforme representado pela curva da seta crescente. Uma pressão extra é necessária para vencer a compactação das partículas e iniciar a fluidização, então a pressão no leito atinge um $\Delta P_{máx}$. Nesse momento, o leito já possui uma porosidade maior que a porosidade característica do leito fixo, o que leva a uma posterior redução da queda de pressão que se torna constante, quando se iguala ao peso do leito por unidade de área, representada pela região após o ponto A. Esse ponto representa a transição entre os estados fixo e fluidizado. Na curva de

desfluidização, caracterizada por velocidades do gás decrescentes, é notório uma menor queda de pressão fixando a velocidade superficial do gás, que é devido justamente ao aumento da porosidade do leito após a passagem inicial do fluido (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

A velocidade de mínima fluidização (v_{mf}) pode ser obtida experimentalmente através da interseção das curvas que representam os regimes de leito fixo e leito fluidizado representado pelo ponto A na Figura 2.2. Esse parâmetro fluidodinâmico possui uma grande importância do ponto de vista prático para aplicações industriais, por isso vem sendo extensivamente estudado pela literatura, principalmente para os diferentes tipos de biomassa e seus resíduos, como por exemplo, resíduos de beterraba (SOZZI *et al.*, 2021), resíduos de açaí (TARGINO *et al.*, 2021) e pinheiro-larício (BAI & SI, 2020).

Targino *et al.* (2021) investigaram os fatores que influenciam na velocidade de mínima fluidização de resíduos de açaí. A temperatura do ar, altura de leito estático e rugosidade das partículas foram analisadas na determinação da v_{mf} e predição por equações presentes na literatura e por abordagem neural. A correlação de Ergun previu valores de v_{mf} muito diferentes dos resultados experimentais e a explicação foi atribuída ao fato dessa equação depender fortemente das diferentes características de fluidização como a mudança na estrutura do leito durante a fluidização, interações partícula-partícula e as contribuições de temperatura do ar. Os autores enfatizam a dificuldade em encontrar uma única correlação que possa descrever as condições de mínima fluidização para a biomassa. De modo geral, as correlações propostas pela literatura não foram adequadas para prever a v_{mf} por serem muito específicas para o tipo de biomassa e condições de fluidização. Por outro lado o modelo neural desenvolvido no trabalho apresentou ótima correlação com os dados experimentais, apresentando erros menores que 10%.

Sozzi *et al.* (2021) primeiramente estimaram a velocidade de mínima fluidização para os resíduos de beterraba para então avaliar a cinética de secagem em leito fluidizado. Os autores utilizaram uma relação proposta por Paudel e Feng (2013) apenas para partículas de biomassa para estimar a velocidade de mínima fluidização dos resíduos. Um valor operacional de 6 m/s e superior à v_{mf} foi utilizado para garantir a fluidização adequada das partículas.

2.2.3 Regimes de Fluidização e Classificação Geldart

Ao controlar a velocidade do gás é possível definir o regime de fluidização. De acordo com Cremasco (2014), esse regime depende das características físicas da fase particulada

(distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas, forma, massa específica), da fase fluida (viscosidade, massa específica) e condições operacionais da coluna (temperatura e vazão da fase fluida, compactação, altura efetiva e diâmetro). A Figura 2.3 apresenta mais detalhadamente os regimes de fluidização existentes.

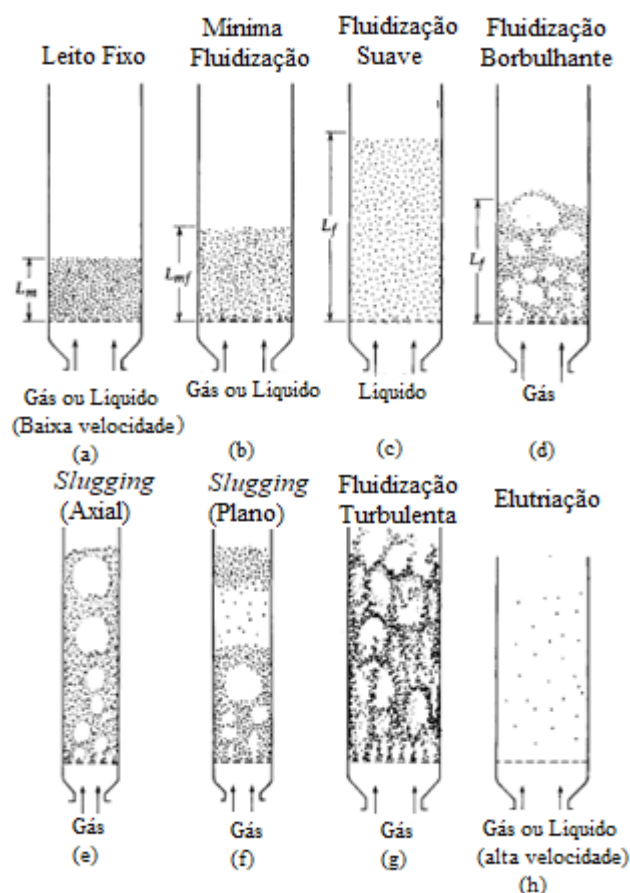


Figura 2.3 - Regimes de Fluidização. Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

É possível visualizar através da Figura 2.3 as mudanças no comportamento de um leito preenchido de partículas à medida que a velocidade do fluido é aumentada. Inicialmente o leito encontra-se estagnado, Figura 2.3 (a), e com o incremento de velocidade expande-se até a condição de mínima fluidização, Figura 2.3 (b). A depender do fluido utilizado, ao continuar aumentando a velocidade, o leito tende-se a se comportar como uma fluidização denominada suave ou homogênea, Figura 2.3 (c), ou borbulhante e heterogênea, Figura 2.3 (d). No primeiro, o leito continua a se expandir uniformemente, já no segundo, o fluido passa através do leito em forma de bolhas que atravessam o leito até estourarem na superfície e as partículas são misturadas aleatoriamente e de forma severa.

A depender do tipo de partículas utilizadas, e em velocidades superiores às aquelas em que ocorrem a fluidização borbulhante, a fluidização do tipo *slugging* pode acontecer, Figuras 2.3 (e) e (f). Esse fenômeno que acontece especialmente em leitos mais profundos e estreitos onde o ar encontra mais resistência ao escoamento, consiste em bolhas de ar que aumentam de tamanho à medida que sobem na coluna e empurram essas partículas do leito, aumentando consideravelmente a queda de pressão do mesmo.

Quando o fluxo de gás é suficientemente alto para exceder a velocidade terminal dos sólidos, a fluidização turbulenta é atingida, Figura 2.3 (g), caracterizada por esse movimento aleatório e turbulento de partículas. Se a velocidade do fluido continuar a aumentar começa a ocorrer o arraste de partículas para fora do leito, a elutriação, visualizada na Figura 2.3 (h).

Como a fluidização é influenciada pelas características das partículas, a classificação de Geldart auxilia nesse entendimento, separando as partículas de acordo com seu comportamento fluidodinâmico em quatro grupos distintos. A Figura 2.4 apresenta detalhes quanto essa classificação.

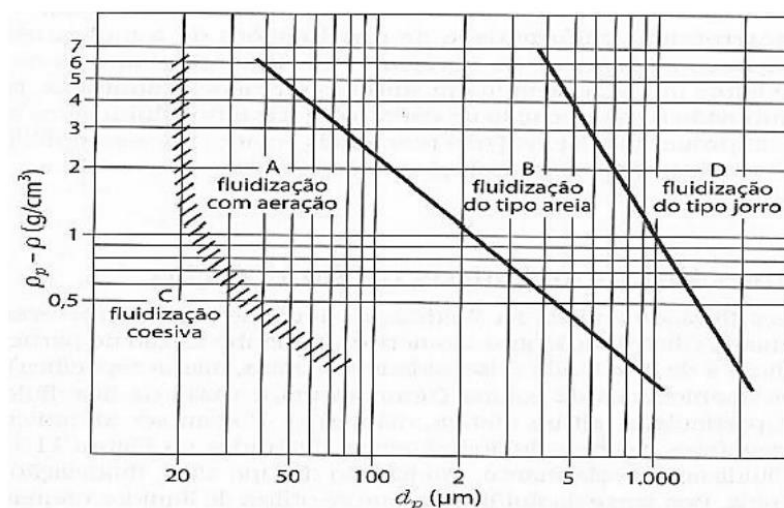


Figura 2.4 - Classificação de Geldart. Fonte: Cremasco (2014)

As partículas pertencentes ao grupo A possuem diâmetros pequenos, na faixa de 30-150 μm , e baixas densidades ($<1,4 \text{ g/cm}^3$). Possuem uma fluidização fácil e suave em baixas velocidades do gás. Já o grupo B, apresenta uma boa fluidização em maiores velocidades do gás e seu diâmetro varia na faixa entre 40-500 μm com densidade entre 1,4 e 4 g/cm^3 . O grupo C é formado por pós muito finos ($d_p < 30 \mu\text{m}$) que exibem um forte caráter coeso que dificultam

a fluidização devido às forças interpartículas. Enquanto que partículas pertencentes ao grupo D apresentam maiores diâmetros ($d_p > 500 \mu\text{m}$), são mais largas e densas e possuem um comportamento jorrável, de difícil fluidização (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Partículas finas apresentam elevadas forças coesivas, sendo susceptível à aglomeração. É possível utilizar o leito fluidizado, mas essas partículas pertencentes ao grupo C da classificação de Geldart não são capazes de fornecer um leito homogêneo além de não ter uma secagem eficiente devido a fenômenos de canalização. Para resolver esse problema nos secadores de leito fluidizado, partículas inertes são usadas como agentes de fluidização, de transferência de calor e de dispersão de partículas (KANG *et al.*, 2017).

A Figura 2.5 relaciona o regime fluidodinâmico com a classificação de Geldart:

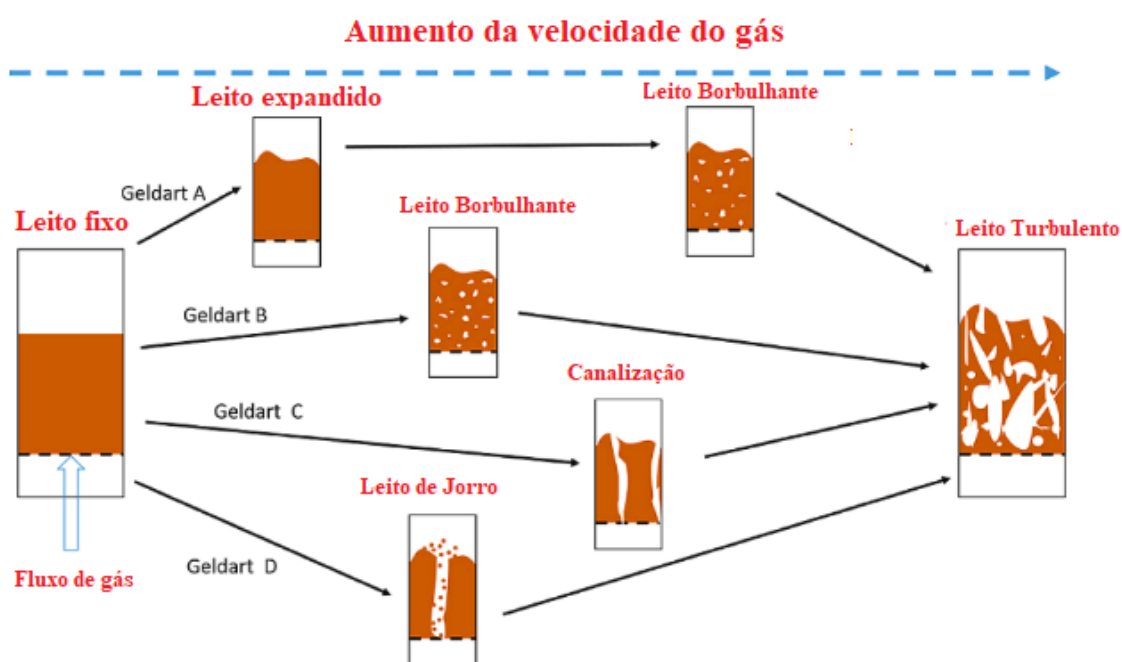


Figura 2.5 - Regime Fluidodinâmico e classificação de Geldart. Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2021)

A transição do regime de leito fixo até o fluidizado para um leito composto por partículas de Geldart do grupo A passa por uma expansão do leito até se tornar um leito borbulhante à medida que a velocidade do gás aumenta. Enquanto que um leito composto pelo grupo B passa diretamente do leito fixo para o leito borbulhante até alcançar uma fluidização turbulenta. Já o leito composto por partículas do grupo C estão sujeitos a fenômenos de

canalização, enquanto partículas do grupo D experimentam um leito de jorro antes de atingirem a fluidização turbulenta (ZHANG *et al.*, 2021).

Shaul *et al.* (2014) analisaram as curvas características de fluidização correspondentes às partículas pertencentes aos grupos A, B e D de Geldart e puderam visualizar que na região de leito fixo, a queda de pressão exibe um comportamento linear à medida que a velocidade do gás aumenta para partículas pertencentes ao grupo A, porém apresenta um comportamento parabólico para partículas do grupo D. Para partículas pertencentes ao grupo B esse comportamento pode variar de acordo com a proximidade com os grupos A ou D. Além disso, o formato da curva de fluidização foi afetado pela razão de leito estático (L/D) nas partículas pertencentes ao grupo B e D.

2.2.4 Qualidade da Fluidização - Índice de Fluidização

De acordo com Kunni e Levenspiel (1991), a qualidade de fluidização do leito pode ser afetada pelo tamanho e distribuição das partículas, além da geometria do vaso, arranjo de entrada do gás, e tipo de sólido que é utilizado. Em leitos contendo biomassa, a baixa qualidade é causada provavelmente por sua baixa densidade aparente, formas irregulares e alto teor de umidade que levam a fortes forças interparticulares (JIA *et al.*, 2016). As Figura 2.6 (a) e (b) apresentam exemplos de curvas características correspondentes a leitos que apresentam uma baixa qualidade de fluidização devido à ocorrência de *slugging* e canais preferenciais, respectivamente.

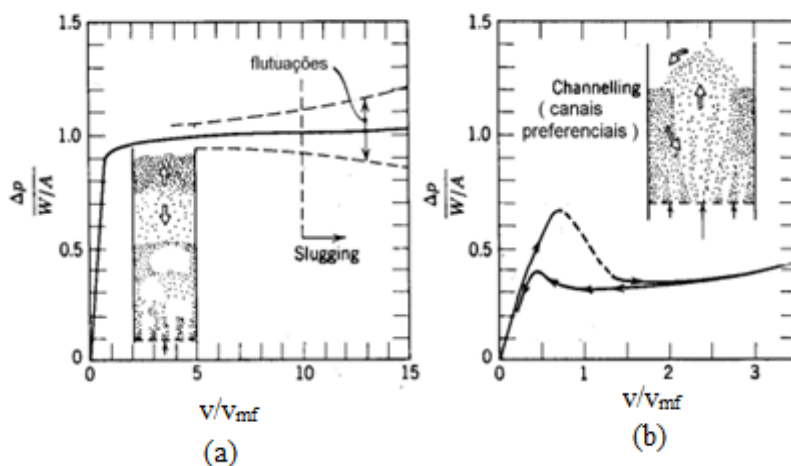


Figura 2.6 - Curvas de fluidização em leitos com baixa qualidade devido à presença de (a) *slugging* (b) canais preferenciais. Fonte: Adaptado de Kunni e Levenspiel (1991).

A primeira curva apresentada pela Figura 2.6 (a) é representativa da fluidização do tipo *slugging*, onde existem flutuações de pressão após a condição de mínima fluidização. Já a segunda, Figura 2.6 (b), é característica de partículas do grupo C da Classificação de Geldart, que por serem coesivas, tendem a se aglomerar e facilitar o surgimento de canais preferenciais para o fluido (CREMASCO, 2014).

Porém, o *slugging* também foi visualizado por Shaul *et al.* (2014) utilizando partículas pertencentes ao grupo A, B e D de Geldart durante os ensaios em leito fluidizado. As partículas pertencentes ao grupo A apresentaram o tipo de *slugging* axial, representado pela Figura 2.3 (e). Uma leve saliência foi observada na curva característica dessas partículas devido à coesão apresentada pelas partículas de menores diâmetros. Já as partículas pertencentes ao grupo B e D, apresentaram o tipo de *slugging* plano, Figura 2.3 (f), em que as partículas sobem no leito como pistão, separados por vazios.

Para evitar a formação de canais preferenciais e a ocorrência de fenômenos como o *slugging*, a adição de partículas inertes, como a areia, em misturas binárias com biomassa vem sendo extensivamente utilizada por diversos autores na literatura (OLIVEIRA *et al.*, 2013; PÉREZ *et al.*, 2017; VASCONCELOS *et al.*, 2018; BAI & SI, 2020). De acordo com o último, o uso de partículas inertes na mistura binária com biomassa pode aumentar a troca de momento entre as diferentes partículas, prevenir a aglomeração e melhorar a qualidade de fluidização.

Uma forma de avaliar quantitativamente a qualidade de fluidização é através do cálculo do índice de fluidização (IF) que quantifica a efetividade da fluidização mediante as condições do ensaio fluidodinâmico. O IF pode ser calculado através da equação (2):

$$IF = \frac{\Delta P \cdot A}{m_{bulk} g} \quad (2)$$

em que m_{bulk} representa a massa alimentada ao leito em kg, g a aceleração gravitacional em m/s^2 e A a área da seção transversal da coluna do leito em m^2 .

Bai e Si (2020) avaliaram o efeito da altura de leito estático, umidade e diâmetro de partícula na qualidade de fluidização de inertes (areia de quartzo) e biomassa (pinheiro-larício) e suas misturas binárias com diferentes proporções no leito fluidizado. Em seus estudos verificaram que as partículas estavam completamente fluidizadas quando o índice de fluidização era superior a 0,95. Para uma mesma velocidade superficial do gás, observou-se

também que esse índice foi inversamente proporcional à umidade das partículas de biomassa e diâmetro da partícula de areia.

2.2.5 Influência das Propriedades das Partículas

Como visto anteriormente, o regime fluidodinâmico é fortemente afetado pelas características das partículas, portanto é de suma importância conhecê-las. Além disso, de acordo com Paudel e Feng (2013), a fluidização das partículas de biomassa pode ser significativamente diferente de partículas inertes devido à geometria complexa e às propriedades físicas que as partículas de biomassa possuem. Dentro desse contexto, o conhecimento de propriedades como tamanho, densidade e ângulo de repouso auxilia no entendimento da fluidez dessas partículas.

A fluidez é afetada pela distribuição do tamanho, forma e densidade das partículas, sua composição química, umidade, temperatura, entre outros fatores. A quantidade de umidade presente no material pode alterar suas características de fluxo e estabilidade de armazenamento. À medida que o material absorve a umidade do ambiente, sua fluidez diminui porque o aumento da espessura da camada líquida absorvida do material aumenta a resistência das pontes líquidas desenvolvidas entre as partículas (CHINWAN & CASTELL-PEREZ, 2019).

Nos estudos realizados por Guo *et al.* (2015) para avaliar a fluidez de partículas de biomassa e *blends* de biomassa e carvão, os autores inferiram que altos teores de umidade da biomassa resultam no aumento da resistência mecânica do leito e formação de aglomerados, o que leva ao aumento do coeficiente de atrito. A presença de umidade tem um efeito adverso na fluidez, a qual pode diminuir à medida que a umidade aumenta, devido ao aumento das forças interpartículas.

De acordo com Seville *et al.* (2000), as interações das partículas afetam consideravelmente o comportamento do leito fluidizado, podendo levar à aglomerações e até mesmo a desfluidização, devido ao equilíbrio de forças que ocorre. As forças interpartículas podem ocorrer dentre tantas outras formas, devido às interações de van der Waals, pontes líquidas e sinterização. A adição de uma camada de líquido possui um efeito de estabilização de partículas, as tornando mais coesas e aumentando assim a velocidade de mínima fluidização.

Seville e Clift (1984) verificaram em seus estudos que a adição de pequenas quantidades de um líquido não volátil em um material do grupo B de Geldart o faz apresentar

um comportamento de fluidização pertinente ao grupo C. Essa adição promoveu um aumento das forças interparticulares que afetaram drasticamente as características de fluidização.

Para auxiliar na caracterização da fluidez das partículas, a determinação do ângulo de repouso torna-se uma boa alternativa. De acordo com Al-hashemi e Al-amoudi (2018), a literatura dispõe de várias definições para esse parâmetro, sendo uma das mais comumente utilizadas, a medida da maior inclinação de um material não confinado, a partir de um plano horizontal no qual o material pode ser empilhado sem entrar em colapso.

De forma geral, quanto mais coesas forem as partículas, maior será o ângulo medido, pois partículas com baixa fluidez tendem a se aglomerar uma sobre as outras. Já partículas menos coesas, propiciam interações menos efetivas, resultando em um ângulo de repouso menor, devido a uma maior capacidade de movimentação. Além desse fator, inúmeros outros afetam o ângulo de repouso, como: ângulo de atrito interno, tamanho do grão e forma, densidade, teor de umidade, massa do material, entre outros (AL-HASHEMI & AL-AMOUDI, 2018).

A Tabela 2.2 traz a relação entre a fluidez das partículas e o ângulo de repouso medido.

Tabela 2.2 - Relação entre a escoabilidade do material e o ângulo de repouso.

Ângulo de Repouso (°)	Escoamento
< 30	Muito Livre
30 – 38	Livre
38 – 45	Moderado
45 – 55	Coesivo
> 55	Muito Coesivo

Fonte: Adaptado de Al-hashemi e Al-amoudi (2018)

Ângulos abaixo de 30° indicam uma boa fluidez, que vai diminuindo à medida que o ângulo de repouso vai aumentando. Ângulos maiores que 45° já são indicativos de partículas coesivas. Existem vários métodos para determinação para o ângulo de repouso estático ou dinâmico, dentre eles, o método da caixa inclinada, do funil fixo, do tambor giratório, do cilindro oco, entre outros. Entretanto, valores um pouco diferentes podem ser observados a depender do método utilizado (GELDART *et al.*, 2006).

Cheng e Zhao (2017) avaliaram o ângulo de repouso dinâmico em sedimentos de 0,28 a 4,38 mm em um tambor giratório com 50% da sua capacidade em volume. Os autores observaram a formação de um ângulo superior à medida que os grãos de sedimentos se movimentavam junto com o tambor rotativo. Ao continuar girando e atingir esse ângulo máximo um movimento de queda em que os autores denominaram de “avalanche” ocorreu, formando um ângulo inferior. Ao realizar os testes com uma maior velocidade de rotação do tambor perceberam que os ângulos superior e inferior se aproximavam de um ângulo constante (ângulo dinâmico) e os sedimentos eram transportados de forma contínua pela parede do tambor. Esse ângulo constante foi tomado como a média dos ângulos superior e inferior formados e foi observado que a diferença entre eles aumenta com o tamanho do sedimento utilizado.

Ao analisar a influência de partículas compostas por uma ampla distribuição granulométrica no leito fluidizado, de acordo com Kunni e Levenspiel (1991), esse leito tende a apresentar uma fluidização parcial, em que partículas menores deslizam pelos espaços vazios entre as partículas maiores e fluidizam enquanto as partículas maiores continuam estacionárias. Além disso, se o leito é composto por partículas muito grandes o fenômeno de segregação pode ocorrer. Esse comportamento se assemelha com o exibido em misturas binárias, abordado a seguir.

2.2.6 Comportamento de Fluidização para Misturas Binárias

Em comparação com o sistema monocomponente, o sistema binário tem características diferentes e envolve um conceito de faixa de velocidades para representá-lo: as velocidades inicial ou incipiente (v_{if}), de mínima (v_{mf}) e de completa (v_{cf}) fluidização. De acordo com Formisani *et al.* (2008), essas velocidades estão relacionadas com a fenomenologia da fluidização binária e além deles, diversos autores vêm utilizando esse conceito para descrever um sistema binário de forma mais completa (OLIVEIRA *et al.*, 2013; PÉREZ *et al.*, 2017; FU *et al.*, 2019; EMIOLA-SADIQ *et al.*, 2021).

A Figura 2.7 ilustra o método utilizado para determinar as velocidades incipiente, de mínima e completa fluidização do sistema de partículas binárias.

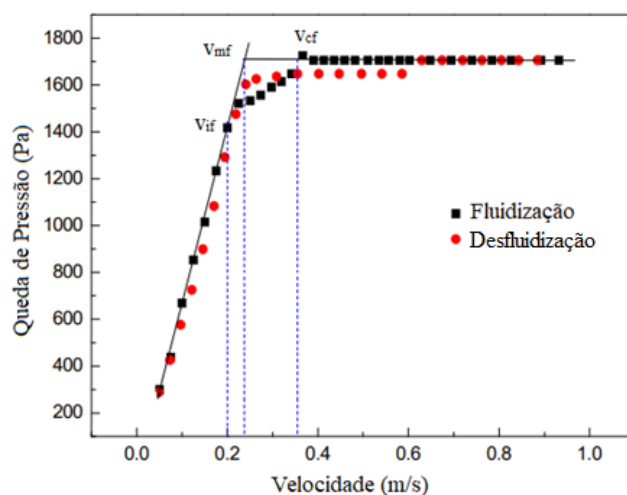


Figura 2.7 - Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos para misturas binárias. Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2019)

Ao observar a Figura 2.7 é possível visualizar que a curva está definida em três regiões: de leito fixo, de transição e de leito totalmente fluidizado. A região de transição é caracterizada pela fluidização parcial do leito, cujo início e fim são definidos pelas velocidades incipiente e de completa fluidização (VASCONCELOS *et al.*, 2018).

A velocidade incipiente de fluidização, como demonstra a Figura 2.7, se localiza no primeiro ponto onde a queda de pressão se desvia da curva de leito fixo, enquanto que a velocidade de completa fluidização corresponde ao ponto em que a queda de pressão se estabiliza pela primeira vez. A velocidade de mínima fluidização é determinada da mesma forma para leitos monocomponentes, porém, de acordo Formisani *et al.* (2008) a velocidade de mínima fluidização varia para qualquer mistura binária de dada composição de acordo com a distribuição de sólidos no leito fixo como também com o procedimento seguido nos experimentos ao analisar a fluidização (velocidades do gás crescentes) ou desfluidização (velocidades do gás decrescentes).

O equilíbrio entre mistura e segregação é abordado por Chiba *et al.* (1979) como dinâmico e dependente principalmente da densidade e tamanho das partículas, além da velocidade do gás. De forma geral, um componente na mistura binária terá v_{mf} menor que o outro e a segregação é função das diferenças de densidade e tamanho entre as partículas. Quando há uma diferença entre densidades e/ou diâmetro, o componente mais pesado é denominado de *jetsam* e possui tendência de afundar no leito, enquanto o componente mais leve é denominado de *flotsam* e tende a ficar no topo do leito. Quando os componentes diferem

apenas em tamanho, a partícula maior será chamada de *jetsam*. Os autores ainda descrevem três estados de mistura para os sistemas binários: completamente misturado, completamente segregado e parcialmente misturado, como ilustrado na Figura 2.8:

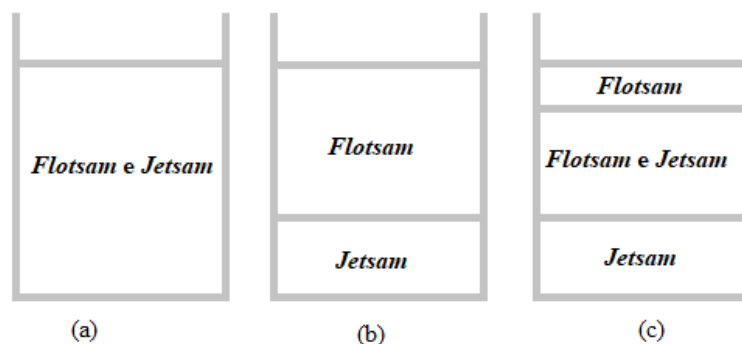


Figura 2.8 - Estados de mistura para a mistura binária: (a) completamente misturado, (b) completamente segregado e (c) parcialmente misturado. Adaptado de Chiba *et al.* (1979).

Em um leito completamente misturado, não há variação de concentração entre os componentes ao longo do leito, enquanto que um leito completamente segregado é composto puramente de partículas *flotsam* e *jetsam* no topo e fundo do leito, respectivamente. Já no leito parcialmente misturado, há um equilíbrio intermediário de mistura/segregação em que a parte superior é formada de partículas *flotsam* e inferior de *jetsam* enquanto o meio é composto das duas partículas misturadas.

Emiola-Sadiq *et al.* (2021) investigaram a mistura e segregação de misturas binárias envolvendo biomassa (casca de aveia, casca de soja e serragem) e areia de sílica objetivando melhorar o desempenho de reatores de leito fluidizado. Os pesquisadores observaram que o valor de índice de mistura (variação entre o perfil de concentração da biomassa na segregação total e na mistura perfeita) diminuiu com o aumento da carga de biomassa e aumentou com a elevação da velocidade superficial do gás.

O fenômeno de segregação também foi observado por Vasconcelos *et al.* (2018) durante os ensaios fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduos de sisal e areia em frações mássicas de biomassa superiores a 10%. Abaixo dessa fração, a segregação foi observada à medida que a razão entre os diâmetros biomassa/areia variou entre 0,4 e 2,5.

Pérez *et al.* (2017) em seus estudos para avaliar a influência do tamanho e fração mássica de partículas de bagaço de cana-de-açúcar misturadas com areia sobre a velocidade de

mínima fluidização em leito fluidizado, também avaliou o fenômeno de mistura e segregação. Durante seus experimentos em diferentes razões de diâmetro e massa específica de biomassa/areia visualizaram uma tendência de diminuição da segregação à medida que a velocidade superficial do gás aumentava utilizando misturas binárias com razões de diâmetro biomassa/inerte variando entre 3,2 e 42,2. Neste arranjo, as partículas de areia que possuíam um menor diâmetro começaram a se mover entre os espaços vazios no leito, enquanto as partículas de biomassa permaneciam estáticas. Após um incremento da velocidade, as partículas de biomassa começam a se mover em direção ao topo do leito e segregar, apresentando um comportamento de *flotsam* devido a diferença entre as densidades das partículas de biomassa e inerte. Após a diminuição da segregação os autores concluíram que as bolhas de ar auxiliaram na melhor mistura e homogeneização do leito. Para uma razão de diâmetros igual ou menor que 1 o comportamento observado foi totalmente diferente. Com uma menor influência do diâmetro, a segregação por densidade prevaleceu, visto que a razão entre as densidades das partículas de biomassa/areia foi superior a 4,27. Uma segregação severa aconteceu, de modo que as partículas de areia permaneceram em estado de leito fixo na parte inferior do leito (*jetsam*), enquanto as partículas de biomassa fluidizavam na parte superior da coluna. Com o incremento da velocidade do gás ambas as partículas fluidizavam separadamente.

Além do conhecimento dos parâmetros fluidodinâmicos, a avaliação das variáveis de operação é um fator chave na otimização para determinar a melhor condição de operação do leito fluidizado, seja como reator ou secador. Nesse contexto, diversos estudos vêm sendo realizados na literatura para estudar a fluidodinâmica de diferentes tipos de biomassa e inertes em leito fluidizado, analisando a influência de variáveis como razão L/D de leito estático, fração de biomassa e diâmetro do inerte utilizado sobre os parâmetros fluidodinâmicos.

De acordo com Oliveira *et al.* (2013), compreender a velocidade mínima de fluidização de misturas de biomassa e areia é fundamental para garantir o desempenho ideal de leitos fluidizados em um processo de termoconversão, como a pirólise rápida. Dessa forma, os autores determinaram a velocidade de mínima fluidização de misturas binárias compostas por três tipos de biomassa (bagaço de sorgo, resíduo de fumo e casca de soja) e areias de diferentes tamanhos, e avaliaram o efeito dos diâmetros médios dos componentes na qualidade da fluidização, além da influência da fração mássica de biomassa, que variou entre 5 e 15%. A velocidade de mínima fluidização aumentou à medida que a fração mássica dos resíduos de fumo e casca de soja aumentaram, enquanto houve uma diminuição desse parâmetro para o bagaço de sorgo nessa condição. Essa diferença foi atribuída à alta irregularidade das partículas do bagaço de sorgo

que possuíam um formato mais alongado e os autores chegaram à conclusão que o comportamento fluidodinâmico está relacionado diretamente ao tamanho e forma da biomassa. Além disso, uma menor segregação foi observada quando se utilizou uma areia de menor diâmetro, indicando uma melhora na qualidade de fluidização.

Já os estudos desenvolvidos por Pérez *et al.* (2017), além da segregação das partículas, avaliaram também a influência do tamanho e fração mássica de partículas de bagaço de cana-de-açúcar no comportamento fluidodinâmico de misturas binárias com areia. Uma tendência de aumento na velocidade de mínima fluidização com a elevação da fração mássica e diâmetro da biomassa foi verificada pelos autores. Esse resultado foi justificado pelo diâmetro efetivo da mistura que aumentou conforme a fração de biomassa aumentou. Além disso, não foi verificada influência da razão de leito estático sobre a velocidade de mínima fluidização.

Vasconcelos *et al.* (2018) investigaram os principais fatores que influenciam a velocidade completa de fluidização de uma mistura binária de resíduo de sisal seco e areia para prever um modelo representativo dessas variáveis. A fração mássica de biomassa foi variada entre 5 a 8% e causou uma diminuição da velocidade de completa fluidização à medida que aumentou. Além disso, houve um aumento nessa velocidade à medida que o diâmetro do inerte aumentou e o diâmetro de sisal diminuiu, devido à maior força peso exercida por um inerte de maior diâmetro e à redução de porosidade do leito causada pela redução granulométrica do sisal.

Estudos fluidodinâmicos realizados por Bai e Si (2020) para analisar o comportamento da biomassa de pinheiro-larício, areia e suas misturas binárias envolveram a análise da influência da altura de leito estático, diâmetro do inerte e umidade da biomassa sobre os parâmetros fluidodinâmicos. Não houve variação da velocidade de mínima fluidização para os componentes puros em diferentes alturas de leito estático, sendo a altura intermediária entre o leito raso e profundo, a escolhida para utilizar. Os pesquisadores avaliaram quatro diferentes umidades da biomassa que variaram entre 10,3 e 21,2% e a biomassa escolhida para compor a mistura binária com areia foi a de menor umidade que apresentou um maior índice de fluidização. Esses autores ainda observaram uma aglomeração e zonas mortas durante a fluidização de partículas úmidas. Além disso, o diâmetro de areia escolhido para compor a mistura foi àquele que apresentou uma v_{mf} próxima à v_{mf} da biomassa definida. Então, para definir a mistura binária que apresentou o melhor comportamento fluidodinâmico a proporção de pinheiro-larício e inerte foi variada e o índice de fluidização foi calculado. A mistura escolhida que apresentou o melhor índice de fluidização foi a de menor proporção de biomassa.

2.2.7 Correlações empíricas da literatura para estimar os parâmetros fluidodinâmicos de misturas binárias

Não há consenso entre os pesquisadores sobre uma equação universal para prever a velocidade de mínima fluidização do gás para os diversos tipos de biomassa, uma vez que essa velocidade depende de vários fatores, como as propriedades do fluido e partículas utilizadas, além da geometria do equipamento. Dessa forma, diversas pesquisas vêm sendo realizadas para estimação de parâmetros utilizando equações empíricas e/ou semiempíricas baseadas em experimentos (RAO & BHEEMARASETTI, 2001; PAUDEL & FENG, 2013; PÉREZ *et al.*, 2017; VASCONCELOS *et al.*, 2018; TARGINO *et al.*, 2021).

Rao e Bheemarasetti (2001) desenvolveram uma correlação para prever a velocidade de mínima fluidização para misturas binárias através dos seus estudos em leito fluidizado utilizando partículas de diferentes biomassas (casca de arroz, serragem e casca de amendoim) e areia. A Equação 3 apresenta a correlação desenvolvida que leva em consideração um tamanho de partícula efetivo (dp_{ef}) dado pela Equação 4 e uma densidade aparente efetiva das partículas da mistura ($\rho_{p,ef}$), calculada pela Equação 5.

$$v_{mf} = \frac{dp_{ef}^2(\rho_{p,ef} - \rho_g)g}{1650\mu} \quad (3)$$

em que ρ_g e μ correspondem à massa específica em kg/m^3 e viscosidade do fluido em Pa.s , respectivamente, obtidas através da literatura, e g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

$$dp_{ef}^2 = k \left\{ dp_a \left[\left(\frac{\rho_{p,a}}{\rho_{p,b}} \right) \left(\frac{dp_b}{dp_a} \right) \right]^{\frac{w_b}{w_a}} \right\}^2 \quad (4)$$

em que w é a massa em kg , ρ_p é a densidade aparente da partícula em kg/m^3 , dp é o diâmetro médio em metros e os subscritos b , a , ef referem-se à biomassa, areia e mistura efetiva, respectivamente. E $k = 20dp_a + 0,36$.

$$\rho_{p,ef} = x_a \rho_{p,a} + x_b \rho_{p,b} \quad (5)$$

em que x corresponde à fração mássica.

Paudel e Feng (2013) desenvolveram novas correlações para a determinação da velocidade de mínima fluidização em seu estudo fluidodinâmico que utilizou biomassa (casca de noz e espiga de milho), inertes (areia, esferas de vidro e alumina) e misturas binárias. Os autores propuseram uma nova correlação para mistura binária a partir da fluidização das partículas de inerte e biomassa separadamente, levando agora em consideração a fração mássica das partículas de biomassa:

$$Re_{mf} = \left\{ 30,28^2 + \left[0,046(1 - x_b) + 0,108x_b^{1/2} \right] \frac{dp_{ef}^3 \rho_g (\rho_{p,ef} - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{1/2} - 30,28 \quad (6)$$

em que Re_{mf} corresponde ao número de Reynolds na condição de mínima fluidização.

A mistura binária foi também tratada como monocomponente a partir do cálculo do diâmetro e massa específica efetivos da mistura, representados pelas equações abaixo:

$$dp_{ef} = dp_b dp_a \left[\frac{x_b \rho_{p,a} + x_a \rho_{p,b}}{x_b \rho_{p,a} dp_a + x_a \rho_{p,b} dp_b} \right] \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_{p,ef}} = \frac{x_b}{\rho_{p,b}} + \frac{x_a}{\rho_{p,a}} \quad (8)$$

Por fim, a velocidade de mínima fluidização pode ser estimada pela equação:

$$v_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu}{dp_{ef} \rho_g} \quad (9)$$

Oliveira *et al.* (2013) propuseram uma nova correlação para prever a velocidade de mínima fluidização para mistura binária de biomassa e areia durante seus estudos com misturas compostas por três tipos de biomassa (bagaço de sorgo, resíduo de fumo e casca de soja) e

areias de diferentes tamanhos. Os autores utilizaram uma correlação usualmente empregada na literatura que depende de dois parâmetros empíricos, os quais foram determinados através de uma regressão não linear aplicada aos resultados experimentais. A correlação é expressa pela equação:

$$v_{mf} = 1,17 \times 10^{-4} \left[\frac{dp_{ef}^2 (\rho_{p,ef} - \rho_g) g}{\mu} \left(\frac{\rho_{p,ef}}{\rho_g} \right)^{1,23} \right]^{0,4916} \quad (10)$$

A massa específica efetiva da mistura é calculada da mesma forma que a Equação 5 e o diâmetro efetivo da mistura pode ser calculado através da equação:

$$dp_{ef} = dp_a \left[\left(\frac{\rho_{p,a}}{\rho_{p,b}} \right) \left(\frac{dp_b}{dp_a} \right) \right]^{\frac{x_b}{x_a}} \quad (11)$$

Assim, a determinação de parâmetros fluidodinâmicos como a velocidade de mínima fluidização é um fator-chave para a otimização de reatores ou secadores de leito fluidizado, e sua estimativa pode ser realizada através de correlações empíricas dispostas na literatura.

Além disso, apesar de trabalhos recentes na literatura estudarem a fluidodinâmica de diferentes tipos de biomassa e inertes em leito fluidizado, poucos estudos recentes têm avaliado a influência da umidade na fluidização das partículas de biomassa, principalmente em teores mais elevados, devido à dificuldade em trabalhar com partículas úmidas, o que leva os autores a preferirem trabalhar com partículas com baixo teor de umidade. Ademais, baixas faixas de frações mássicas da biomassa na mistura que são avaliadas, não ultrapassando geralmente 15% de biomassa em peso. Uma baixa proporção de biomassa afeta diretamente o rendimento de um processo de termoconversão em leito fluidizado.

No que diz respeito à biomassa escolhida para o estudo, embora a literatura apresente algumas aplicações em reatores de leito fluidizado para o talo e rizoma, não há estudos relacionados à fluidodinâmica da mistura da casca da mandioca e inertes em leito fluidizado. Portanto, esses estudos são de fundamental importância para garantir o conhecimento das condições ótimas de operação no leito fluidizado, permitindo assim, a sua aplicabilidade em operações de pré-tratamento como a secagem, ou de queima, como a pirólise, gaseificação ou combustão do resíduo da casca de mandioca.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e a unidade experimental de leito fluidizado, bem como são descritas as metodologias adotadas para o preparo e caracterização física da casca de mandioca, areia e suas misturas binárias, e realização dos ensaios fluidodinâmicos.

3.1 Materiais

Neste trabalho foi utilizada casca (periderme) de mandioca (*Manihot esculenta*), como biomassa de estudo, obtida em feiras livres do município de São Cristóvão, estado de Sergipe. O resíduo coletado semanalmente possuía cerca de 15 kg e era composto por cascas, entrecasca, folhas e até mesmo partes da polpa, como ilustra a Figura 3.1:



Figura 3.1 - Resíduo de mandioca coletado em feira livre.

Partículas inertes de areia quartzosa de diâmetros médios de 0,93 mm e 1,29 mm, obtidas comercialmente, também foram utilizadas em um sistema binário com a biomassa, a

fim de auxiliar a fluidização das partículas de casca de mandioca. As Figuras 3.2 (a) e (b) apresentam as partículas dessa areia:

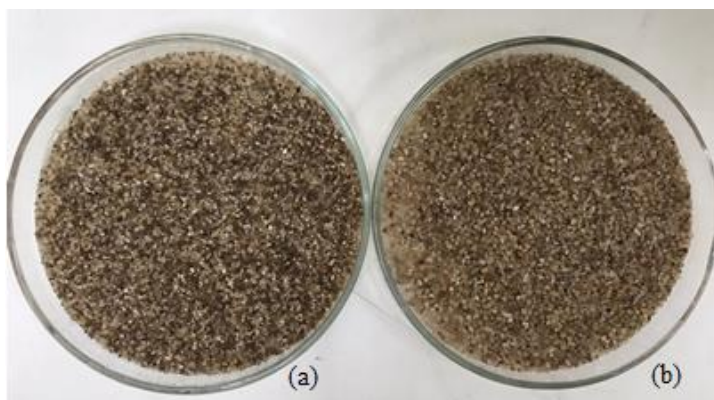


Figura 3.2 - Areia quartzosa (a) $d_p = 0,93$ mm (b) $d_p = 1,29$ mm

3.2 Equipamento

O aparato experimental utilizado neste estudo foi uma típica unidade de leito fluidizado, conforme esquematizado na Figura 3.3, existente no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Departamento de Engenharia Química (DEQ), na Universidade Federal de Sergipe (UFS), onde os testes fluidodinâmicos foram desenvolvidos.

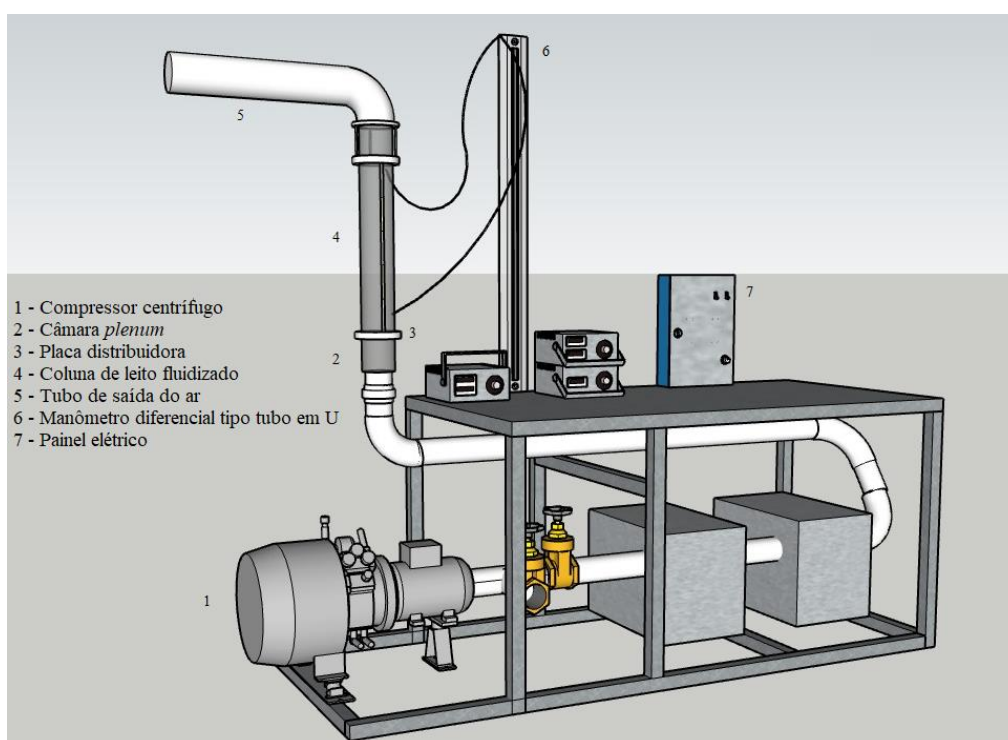


Figura 3.3 - Esquema do aparato experimental.

O fluxo de ar no interior de uma tubulação de 2 in foi fornecido por um compressor centrífugo (1) de 4 cv (marca Eberle, modelo B100, 3470 rpm) e regulado por meio de um inversor de frequência situado no painel elétrico (7). Antes de percolar o leito de partículas de biomassa e areia, o ar passa por uma zona de homogeneização preenchida com partículas de polietileno (2) e por uma placa distribuidora (3), com *mesh* adequado para não permitir o retorno de particulado fino para a linha. O leito (4) é formado por uma coluna cilíndrica com diâmetro interno de 10,95 cm e 50 cm de altura, construída em acrílico para permitir a visualização do regime de fluidização das partículas. A velocidade do ar foi medida após a passagem pelo leito através de um tubo PVC de 49,71 mm de diâmetro interno (5) com auxílio de um anemômetro digital da Instrutherm TAD-500 e a queda de pressão no leito foi aferida por meio do manômetro diferencial do tipo tubo em U (6) que utiliza água como fluido manométrico.

3.3 Metodologia Experimental

3.3.1 Preparo da biomassa

O resíduo sólido coletado após o descascamento da mandioca possui uma camada marrom mais externa, chamada de casca ou periderme, e uma camada branca, conhecida como entrecasca ou córtex. A primeira é mais empregada para gerar energia através da queima, e a segunda para a produção de amido. Cabe ressaltar que neste trabalho a casca foi o material de interesse. Assim, no laboratório as cascas foram separadas da entrecasca, lavadas em água corrente para eliminar resquícios de solo remanescentes da colheita e quaisquer outras impurezas, e dispostas sobre bancada por aproximadamente 24 horas para remover, em temperatura ambiente, a umidade livre em excesso resultante da etapa de higienização, e facilitar a etapa subsequente de trituração do material.

A Figura 3.4 ilustra a casca após a lavagem. Após essa etapa, as cascas foram trituradas em um triturador convencional na velocidade mínima por 40 segundos, acondicionadas em sacos plásticos herméticos e armazenadas em um refrigerador a 4°C para conservação de sua umidade inicial até seu uso nos experimentos de caracterização física e de fluidização.



Figura 3.4 - Casca de mandioca após a lavagem.

3.3.2 Caracterização física das partículas

A caracterização física dos materiais é uma etapa de fundamental importância já que as características das partículas afetam diretamente a sua fluidização, sendo necessário determinar essas propriedades essenciais para a análise fluidodinâmica. A biomassa armazenada foi disposta novamente em bancadas até atingir a temperatura ambiente para a realização da etapa de caracterização das partículas e dos leitos, que antecedeu os ensaios fluidodinâmicos e que envolveu: a classificação granulométrica, determinação do teor de umidade, do ângulo de repouso, a classificação de Geldart, a determinação da massa específica aparente da partícula, bem como da densidade de empacotamento e porosidade do leito.

As medidas das propriedades físicas foram realizadas em triplicata e os desvios foram expressos em termos de erro padrão.

i. Granulometria

A análise granulométrica das partículas de biomassa foi realizada com um conjunto de peneiras Tyler e com o auxílio de um agitador da marca Bertel por 30 minutos. Os detalhes estão apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Peneiras Tyler utilizadas na análise granulométrica.

Mesh	Abertura (mm)	d_p (mm)
9	2,00	> 2
12	1,40	1,70
14	1,18	1,29
16	1,00	1,09
20	0,85	0,93
24	0,71	0,78
Fundo	-	< 0,71

O diâmetro médio das partículas (d_p) apresentado na Tabela 3.1 foi determinado por meio da média entre as aberturas das peneiras em que o material passou adiante e ficou retido.

Cerca de 250 g de material foram dispostos nas peneiras que estavam empilhadas em ordem decrescente de diâmetro, de modo que partículas mais grossas ficavam retidas na primeira peneira e partículas mais finas na última. Após o peneiramento, a massa retida em cada peneira foi pesada em balança analítica da Shimadzu com precisão 0,0001 g, a fim realizar os cálculos pertinentes para obtenção das frações mássicas. Esse procedimento foi repetido durante a realização desse trabalho para avaliar possíveis mudanças na distribuição.

Com objetivo de evitar os problemas relacionados à ampla distribuição de tamanho de partículas, como por exemplo, elutrição de partículas finas enquanto partículas mais grossas permanecem estacionárias, escolheu-se trabalhar com apenas um diâmetro de partícula, àquele que apresentou maior frequência na distribuição granulométrica.

Para a mistura binária da biomassa e areia, o diâmetro médio efetivo da mistura foi determinado segundo Paudel e Feng (2013), através da relação entre as frações mássicas e densidades aparentes dos componentes, que foi apresentada anteriormente na Equação 7.

Para obtenção dos diâmetros que foram utilizados nas caracterizações físicas e ensaios fluidodinâmicos, a areia passou por uma etapa de peneiramento utilizando o mesmo conjunto de peneiras Tyler apresentado na Tabela 3.1. As partículas de areia com diâmetro médio de 0,93 e 1,29 mm correspondem às partículas que ficaram retidas nas peneiras correspondentes a 20 e 14 mesh, respectivamente.

ii. *Teor de Umidade (X_{bu})*

O teor de umidade em base úmida (X_{bu}) da biomassa foi determinado através de dois métodos para efeitos de comparação: utilizando um Analisador de Umidade Infravermelho da Shimadzu MOC 120H e pelo método da estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas.

O teor de umidade foi medido a cada batelada na etapa de peneiramento para verificar a existência de perda de umidade durante o processo, devido ao pequeno aquecimento do motor do triturador convencional.

Para atender o objetivo específico do trabalho de avaliar a influência do teor de umidade nos parâmetros fluidodinâmicos, escolheu-se trabalhar com 3 umidades diferentes: umidade inicial, correspondente à umidade intrínseca do material após o seu preparo, umidade final, correspondente à biomassa com um teor aceitável para armazenamento e combustão, e uma umidade intermediária entre às duas citadas anteriormente. Para alcançar os teores de umidade intermediária e final, a biomassa foi seca em estufa a 105 ± 3 °C até alcançar a umidade desejada, que foi verificada novamente através do Analisador de Umidade Infravermelho.

iii. *Massa Específica Aparente das Partículas (ρ_{ap})*

A massa específica das partículas de areia foi determinada pelo método de picnometria líquida, realizado em triplicata, utilizando água como líquido de referência. Enquanto para partículas de biomassa foi determinada através da técnica de permeamtria descrita por Geldart (1990), que consistiu em relações matemáticas por meio da determinação da altura de leito em cada ponto da curva de queda de pressão versus velocidade do ar para um leito de partículas empacotadas de forma frouxa e densa, respectivamente. A massa específica aparente efetiva das partículas nas misturas binárias (ρ_{ef}) foi calculada utilizando a equação proposta por Paudel e Feng (2013), Equação 8, apresentada anteriormente na seção 2.2.7.

iv. *Densidade Bulk ou de Empacotamento do Leito (ρ_l)*

A densidade *bulk* ou de empacotamento foi determinada após o empacotamento frouxo das partículas no leito, pela razão entre a massa de partículas (m_p) e o volume de carga no leito (V_l), que variou de acordo com a altura de leito estático utilizada:

$$\rho_l = \frac{m_p}{V_l} \quad (12)$$

v. *Porosidade*

A porosidade dos leitos de monopartículas, formados apenas por partículas de inerte ou somente com partículas de biomassa, foi determinada a partir da relação entre a densidade de empacotamento do leito (ρ_l) e a massa específica aparente das partículas (ρ_p), expressa por:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \quad (13)$$

Por sua vez, a porosidade dos leitos contendo misturas binárias biomassa-areia foi determinada pela relação da densidade de empacotamento do leito (ρ_l) e a massa específica efetiva das partículas da mistura ($\rho_{p,ef}$):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_{p,ef}} \quad (14)$$

vi. *Ângulo de Repouso*

Para avaliar a fluidez das partículas o ângulo de repouso dinâmico foi determinado para a biomassa, areia e misturas binárias, utilizando o método do tambor rotativo. O aparato experimental existente no laboratório consiste de um tambor em tubo PVC com 2,3 mm de espessura, 14,6 cm de diâmetro interno e 14,3 cm de comprimento, e pode ser visualizado na Figura 3.5:



Figura 3.5 - Tambor rotativo utilizado para determinação do ângulo de repouso.

A carga de material utilizada nessa etapa correspondeu a 20% do volume do tambor para todos os testes realizados. Essa escolha permitiu um escoamento adequado dentro do tambor sem riscos dos materiais de maior densidade (a areia e misturas binárias de maior proporção do inerte) exercerem uma força suficientemente grande para empurrar a tampa posicionada na parte frontal do tambor. Essa tampa foi feita de material transparente de modo a permitir a visualização do material. Uma etapa prévia de quarteamento foi realizada para garantir amostras representativas, principalmente para as misturas binárias. O material devidamente misturado foi disposto em uma bandeja de polietileno e dividido em 4 partes, em que as partes extremas foram escolhidas para a análise. A Figura 3.6 a seguir ilustra esse procedimento que se repetiu até alcançar a quantidade correspondente ao preenchimento de 20% do volume do tambor.



Figura 3.6 - Quarteamento para homogeneização e seleção de amostras.

A velocidade de rotação utilizada no motor foi mantida fixa em aproximadamente 6 rpm e para determinar o ângulo formado pela movimentação das partículas no tambor foi utilizada uma câmera filmadora localizada a uma distância de 30 cm de modo que a sua lente ficasse posicionada em direção ao centro do tambor. O vídeo de aproximadamente 1 minuto foi dividido em 3 partes e as imagens foram tratadas no software *ImageJ*, conforme ilustrado na Figura 3.7.

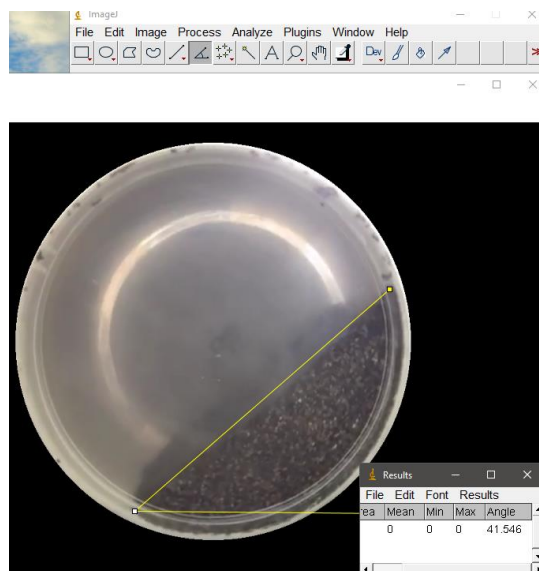


Figura 3.7 - Exemplo de determinação do ângulo de repouso dinâmico por meio do software *Image J*.

O vídeo permitiu a medida do ângulo de repouso em três momentos diferentes igualmente espaçados, conforme metodologia adotada por Cheng e Zhao (2017), em que após a realização da média dessa triplicata obteve-se a medida final do ângulo de repouso dinâmico. A partir da determinação desse ângulo e da Tabela 2.2 foi possível classificar o nível de escoabilidade do material.

vii. *Classificação de Geldart*

Com base na massa específica do ar (ρ_g) obtida através da literatura, e a partir da determinação das massas específicas e dos diâmetros das partículas de biomassa e de areia, além do cálculo dos diâmetros e densidades efetivos das misturas binárias, procedeu-se à classificação de Geldart (Figura 2.4) das partículas.

3.3.3 Ensaios Fluidodinâmicos

Os ensaios fluidodinâmicos dos componentes individuais, bem como de suas misturas binárias, foram conduzidos com ar à temperatura ambiente, variando as condições de altura de leito estático (razão $L/D = 1, 1,5$ e 2), teor de umidade da biomassa ($X_{bu} = 10\%, 42,5\%$ e 75%) e fração volumétrica de biomassa na mistura binária ($x_v = 25\%, 50\%$ e 75%), além do diâmetro do inerte ($d_p = 0,93$ mm e $1,29$ mm). A partir desses testes foi analisada a influência dessas variáveis sobre o comportamento fluidodinâmico. Foram utilizadas duas misturas binárias

compostas por biomassa e inertes com $d_p = 0,93 \text{ mm}$ (MB093) e $d_p = 1,29 \text{ mm}$ (MB129). Um resumo das condições operacionais empregadas nos ensaios fluidodinâmicos, envolvendo quantidades mássicas de biomassa e de inertes utilizadas ao se combinar cada fração volumétrica, umidade de biomassa e razão L/D do leito, encontra-se detalhado no Apêndice A.

i. Procedimento experimental

Primeiramente, foi realizada a calibração do leito sem adição de partículas para descontar a perda de carga proveniente da passagem do ar pela câmara *plenum* e placa distribuidora na coluna vazia. A frequência do compressor foi variada para fazer a aquisição de dados de queda de pressão do leito e velocidade do ar. A queda de pressão no leito foi medida utilizando-se o ponto de tomada de pressão na saída da câmara *plenum* e o ponto de tomada de pressão mais distante do leito, localizada a 45 cm acima da placa distribuidora, através do manômetro de tubo em U. Esta calibração forneceu através da relação entre frequência e queda de pressão a seguinte equação:

$$\Delta P = 1,3541f + 5,4772f^2 \quad (15)$$

em que ΔP é a queda de pressão no leito vazio, em Pa e f é a frequência em Hz.

Para os ensaios fluidodinâmicos as partículas de interesse foram alimentadas pelo topo da coluna sob a ação da gravidade, sempre despejadas de uma altura fixa, tomando-se o cuidado para que se acomodassem livremente à medida que caíam. O método de empacotamento do leito utilizado foi, portanto, o aerado ou frouxo. O empacotamento denso foi evitado devido à maior queda de pressão imposta no leito, além da não garantia de reprodutibilidade de uma força de mesma intensidade durante o empacotamento. Os ensaios foram conduzidos tanto para as partículas individuais, quanto para as misturas binárias compostas por inertes de diferentes diâmetros e biomassa de diferentes umidades.

A mistura binária foi introduzida no leito de forma bem misturada através de uma homogeneização prévia dos seus componentes, assim como realizado por Bai e Si (2020). Essa homogeneização ocorreu em uma bandeja de polietileno, em que as partículas eram dispostas e misturadas manualmente com auxílio de uma espátula até ficarem completamente misturadas.

Após a mistura completa, o material foi transferido para um béquer para então ser introduzido no leito.

Para definir a carga utilizada no leito, um estudo prévio foi realizado para relacionar a quantidade de partículas que correspondia à altura de leito estático de estudo, levando em consideração cada proporção volumétrica estudada. Após a alimentação, o mesmo procedimento adotado na calibração foi seguido para obter os dados de queda de pressão no leito e de velocidades do ar, para construção das curvas características.

A fim de verificar a perda de umidade da biomassa durante os testes fluidodinâmicos que duravam cerca de 13 minutos, a umidade foi verificada antes e depois dos ensaios por meio do analisador de umidade infravermelho. Ao término das corridas o material foi recolhido com auxílio de um aspirador convencional. Após a descarga dos componentes, uma etapa de separação foi necessária para as misturas binárias para reutilização do inerte nos ensaios subsequentes. Para partículas de biomassa mais secas a separação se dava no próprio leito, através da segregação das partículas, mas para a biomassa mais úmida a separação foi realizada de duas formas a depender do diâmetro das partículas: peneiramento para partículas de diferentes diâmetros, ou arraste das partículas mais leves através de um soprador usual, para partículas de mesmo diâmetro.

ii. Determinação dos parâmetros fluidodinâmicos

Os parâmetros fluidodinâmicos como queda de pressão de mínima fluidização (ΔP_{mf}) e velocidades incipiente, de mínima e de completa de fluidização foram determinados a partir de uma análise gráfica das curvas características, conforme detalhada nos tópicos 2.2.2 e 2.2.6 para sistemas monocomponentes e misturas binárias, respectivamente. Esses parâmetros foram determinados a partir de ensaios fluidodinâmicos realizados em duplicata e os desvios das medidas foram expressos em termos de erro padrão. A Figura 3.8 ilustra um exemplo da determinação experimental para mistura binária contendo biomassa da casca de mandioca e areia.

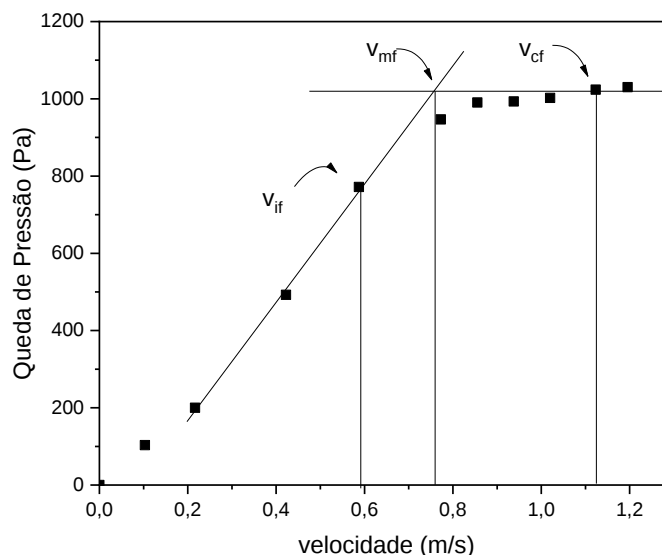


Figura 3.8 - Análise gráfica para determinação dos parâmetros fluidodinâmicos das misturas binárias.

As curvas fluidodinâmicas das misturas binárias foram construídas apenas para vazões crescentes do ar de escoamento, devido à descaracterização do leito observada para as misturas em vazões decrescentes, de forma similar ao que foi adotado por Formisani *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2013) e Pérez *et al.* (2017). E para efeitos de comparação, o mesmo procedimento foi realizado para os componentes individuais, com a velocidade de mínima fluidização sendo determinada a partir da interseção entre as curvas que representam o regime de leito fixo e leito fluidizado.

A velocidade de mínima fluidização para misturas binárias também foi estimada através de correlações empíricas existentes na literatura (RAO & BHEEMARASETTI, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2013; PAUDEL & FENG, 2013) que estão detalhadas no tópico 2.2.7. E a qualidade da fluidização foi avaliada com base nos cálculos do índice de fluidização (Equação 2), juntamente com a visualização de fenômenos que a afetam, como o *slugging* e a segregação de partículas.

3.3.4 Análise estatística

Os ensaios fluidodinâmicos com as misturas binárias investigadas, biomassa-areia de 0,93 mm e biomassa-areia de 1,29 mm, seguiram um planejamento fatorial completo 3^3 , com

duplicata em todos os pontos, totalizando 54 experimentos para cada uma delas. A matriz de experimentos é detalhada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Planejamento fatorial adotado com os respectivos fatores codificados e decodificados.

Ordem	Fatores					
	X ₁	X ₂	X ₃	L/D	X _{bu} (%)	x _v (%)
1	-1	-1	-1	1	10	25
2	0	-1	-1	1,5	10	25
3	1	-1	-1	2	10	25
4	-1	0	-1	1	42,5	25
5	0	0	-1	1,5	42,5	25
6	1	0	-1	2	42,5	25
7	-1	1	-1	1	75	25
8	0	1	-1	1,5	75	25
9	1	1	-1	2	75	25
10	-1	-1	0	1	10	50
11	0	-1	0	1,5	10	50
12	1	-1	0	2	10	50
13	-1	0	0	1	42,5	50
14	0	0	0	1,5	42,5	50
15	1	0	0	2	42,5	50
16	-1	1	0	1	75	50
17	0	1	0	1,5	75	50
18	1	1	0	2	75	50
19	-1	-1	1	1	10	75
20	0	-1	1	1,5	10	75
21	1	-1	1	2	10	75
22	-1	0	1	1	42,5	75
23	0	0	1	1,5	42,5	75
24	1	0	1	2	42,5	75
25	-1	1	1	1	75	75
26	0	1	1	1,5	75	75
27	1	1	1	2	75	75

As variáveis independentes foram: razão L/D, codificada como X₁, teor de umidade da biomassa (X_{bu}, %), codificada como X₂, e fração volumétrica de biomassa (x_v, %), codificada como X₃. As equações de codificação para cada uma destas variáveis são expressas como:

$$X_1 = \frac{L/D - 1,5}{0,5} \quad (16)$$

$$X_2 = \frac{X_{bu}-42,5}{32,5} \quad (17)$$

$$X_3 = \frac{x_v-50}{25} \quad (18)$$

Os parâmetros fluidodinâmicos obtidos seguindo o planejamento fatorial 3^3 , para cada diâmetro de partícula de areia utilizado nas misturas binárias, foram analisados estatisticamente, utilizando o *software* Statística 10.0, a fim de quantificar os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores (variáveis independentes). As respostas avaliadas foram a queda de pressão na condição de mínima fluidização, as velocidades incipiente, de mínima e completa fluidização, e o índice de fluidização.

A significância dos efeitos foi determinada via análise de variância (ANOVA) e teste do valor-p, considerando um nível de confiança de 95%. Os modelos empíricos relacionando cada variável resposta com as variáveis independentes foram determinados via análise de regressão múltipla. Na análise de regressão foi utilizado o seguinte modelo de 2ª ordem com termos de interação:

$$y = b_0 + x'b + x'Bx'' \quad (19)$$

em que y é a resposta prevista pelo modelo, b_0 é o coeficiente linear, $x'b$ são os termos de primeira ordem, b é o vetor com parâmetros ligados às variáveis independentes (efeito linear), $x'Bx''$ são os termos de contribuição quadrática, B é a matriz com parâmetros ligados aos efeitos quadráticos e de interações das variáveis independentes, e x'' é o vetor das variáveis independentes codificadas.

A qualidade dos ajustes dos modelos foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos a partir da metodologia empregada no presente trabalho. Inicialmente, os resultados referentes à caracterização física das partículas de biomassa, inerte e mistura binárias são apresentados. Depois, os resultados do comportamento fluidodinâmico para um sistema de monopartículas de casca de mandioca e de areia são apresentados e discutidos. Em seguida, o mesmo é realizado para o leito de partículas binárias. Por fim, é efetuada uma análise estatística a fim de quantificar a dependência dos parâmetros fluidodinâmicos com respeito à razão L/D do leito, teor de umidade e fração volumétrica de biomassa e diâmetro de inerte, bem como identificar as condições de operação ótimas no leito fluidizado.

4.1 Caracterização Física das Partículas

4.1.1 Distribuição Granulométrica

Após o peneiramento das partículas de casca de mandioca e de posse das massas que ficaram retidas em cada peneira foi possível obter a distribuição granulométrica das partículas úmidas de biomassa, a qual encontra-se listada na Tabela 4.1.

Os dados obtidos na Tabela 4.1 são representativos de cada amostragem da coleta de resíduos, obtendo-se um rendimento médio de 10,59% na obtenção da casca após a separação da entrecasca, considerando o resíduo total coletado que incluía casca, entrecasca, folhas e até mesmo partes da polpa da mandioca.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica da casca de mandioca *in natura*.

Mesh	Abertura (mm)	Faixa de diâmetro (mm)	Diâmetro médio (mm)	Massa retida (g)	Percentual retido (%)
9	2,00	+2,00	-	81,4090	7,59
12	1,40	-2,00+1,40	1,70	208,0250	19,41
14	1,18	-1,40+1,18	1,29	312,8900	29,19
16	1,00	-1,18+1,00	1,09	157,8740	14,73
20	0,85	-1,00+0,85	0,93	145,9680	13,62
24	0,71	-0,85+0,71	0,78	82,4010	7,69
Fundo	-	-0,71	-	83,4230	7,78
Total	-	-	-	1071,9900	100

É possível visualizar que o maior percentual de retenção da biomassa ocorreu na peneira de abertura 1,18 mm, na faixa de diâmetro de 1,40-1,18 mm. Essa distribuição pode ser melhor observada na curva de distribuição de tamanho de partículas ilustrada na Figura 4.1.

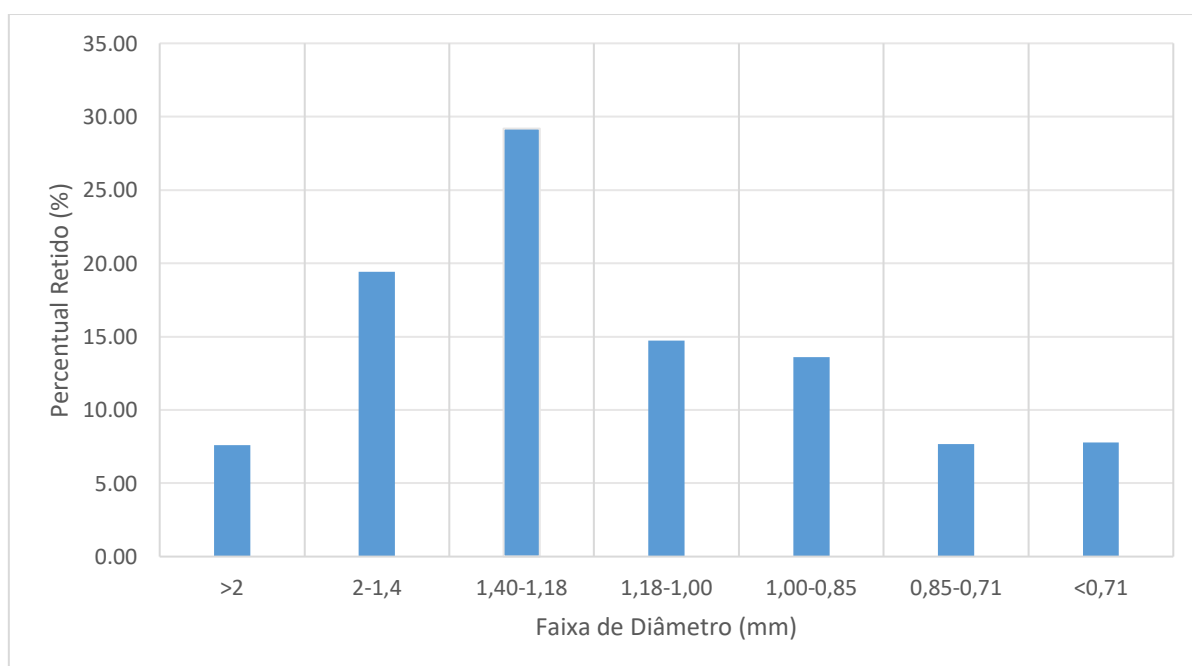


Figura 4.1 - Curva de frequência simples para o diâmetro das partículas de biomassa

A análise da curva de frequência simples representada pela Figura 4.1 permite a visualização de uma maior concentração de partículas na peneira 14 mesh citada anteriormente, seguida da peneira de 12 mesh. Uma distribuição aproximadamente uniforme é percebida entre as peneiras com 16 e 20 mesh. Além disso, o fundo apresentou uma quantidade significativa de material retido, igualando-se à peneira de 24 mesh. De maneira geral, o comportamento ilustrado do peneiramento de partículas úmidas da biomassa se aproxima de uma distribuição normal.

Com o objetivo de minimizar os efeitos da ampla distribuição do tamanho de partículas sobre o comportamento de fluidização e, tendo em vista que a maior frequência de partículas foi observada na peneira de 14 *mesh*, correspondente ao diâmetro médio de peneira de 1,29 mm, este foi escolhido para realizar os estudos fluidodinâmicos subsequentes, bem como toda a caracterização física das partículas de biomassa.

Para aumentar o rendimento do peneiramento, toda a massa de partículas retidas nas peneiras com aberturas superiores à de interesse foi triturada e peneirada novamente. Com isso, o rendimento final do peneiramento aumentou significativamente de 29,19% para 42,68%.

4.1.2 Teor de Umidade

Visto que o objetivo do trabalho envolve analisar a influência do teor de umidade da casca de mandioca sobre o comportamento fluidodinâmico, esta propriedade foi medida durante toda realização dos estudos. A Tabela 4.2 apresenta os teores de umidade em base úmida (X_{bu}) das partículas de biomassa de 1,29 mm de diâmetro médio, avaliados pelos dois métodos de determinação adotados.

Tabela 4.2 - Teores de umidade das partículas de biomassa determinados por diferentes métodos.

X_{bu} (%)	Analizador de Umidade	Método da Estufa
Inicial	75,01±0,97	75,40±0,56
Intermediária	41,40±0,46	41,71±0,55
Final	10,42±0,56	10,98±0,37

De modo geral, não houve variações significativas entre os métodos de medição de umidade adotados, devido a isso, resolveu-se adotar o analisador de umidade para as medidas subsequentes devido ao menor tempo de resposta. Os valores reais medidos correspondentes às umidades inicial, intermediária e final foram aproximados para 10%, 42,5% e 75%, respectivamente, pela facilidade na notação daqui em diante. A Figura 4.2 mostra as partículas de biomassa de 1,29 mm de diâmetro nas diferentes umidades trabalhadas.

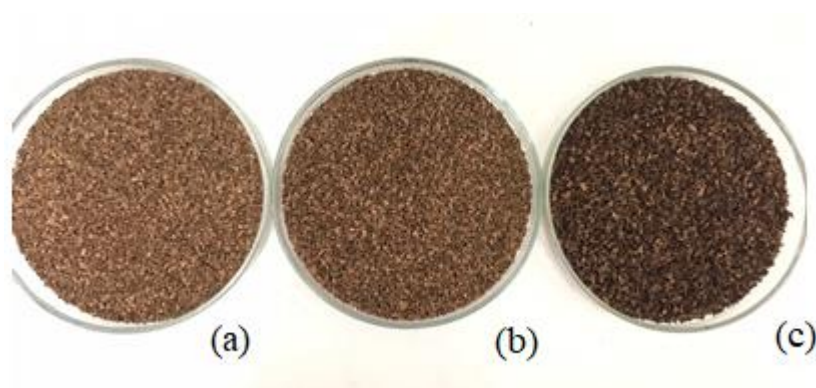


Figura 4.2 - Casca de mandioca utilizada nos experimentos em diferentes umidades (a) 10% b.u. (b) 42,5% b.u. (c) 75% b.u.

A casca residual da mandioca após lavagem, trituração e peneiramento apresentou uma umidade inicial de $75,01 \pm 0,97\%$ b.u., relativamente próxima aos valores de 73,9 e 66,23% reportados, respectivamente, por Vilhalva *et al.* (2011) e Santos Neto *et al.* (2019), para a casca de mandioca proveniente de diferentes processamentos. Cabe ressaltar que nesses estudos a casca foi constituída de córtex e periderme. Não foram encontrados estudos utilizando apenas a periderme do tubérculo *in natura*.

A umidade da casca de mandioca mostra-se superior àquelas de outros resíduos sólidos, como a casca da beterraba e o caroço do açaí, reportadas por Sozzi *et al.* (2021) e Nagata *et al.* (2020), de aproximadamente 53,9% e 32,8% b.u., respectivamente. Segundo Liu *et al.* (2014), a umidade de biomassas em geral ultrapassa 50% em base úmida.

4.1.3 Massa Específica das Partículas

Os resultados de densidade aparente das partículas de areia e de casca de mandioca, obtidos em função da umidade e do diâmetro médio de partícula, estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Massa específica aparente dos materiais utilizados.

Material	d_p (mm)	X_{bu} (%)	ρ_p (kg/m ³)
Areia	0,93	-	2533,7±14,7
	1,29	-	2647,5±19,8
Biomassa	1,29	10	320,4±5,0
		42,5	421,8±28,3
		75	637,4±16,2

A massa específica da areia permaneceu em valores próximos para os dois diâmetros empregados e estão condizentes com a literatura (PAUDEL & FENG, 2013; SHAUL *et al.*, 2014). É possível observar que a densidade aparente da biomassa aumentou conforme a elevação da umidade, e isso pode ser explicado pela presença da água na estrutura dessas partículas. Comportamento similar foi observado por Bai e Si (2020), no qual um aumento na umidade, levou à uma maior densidade e coesão das partículas que resultou em incrementos na velocidade de mínima fluidização.

A massa específica aparente de diferentes tipos de biomassa foi determinada por diversos autores na literatura utilizando métodos variados. A massa específica encontrada para a casca de mandioca se aproxima da densidade de 540 kg/m³ determinada por Bai e Si (2020) para a biomassa de pinheiro-larício seca (10,3% b.u.). Uma massa específica aparente de 1200 kg/m³ e 1080 kg/m³ foi encontrada para a casca de noz e para o sabugo de milho, respectivamente, no trabalho realizados por Paudel e Feng (2013). Já Sozzi *et al.* (2021) determinaram a densidade aparente para as partículas de biomassa de resíduos de beterraba através do método de picnometria de mercúrio. O valor encontrado para esse parâmetro foi de aproximadamente 1030 kg/m³. Targino *et al.* (2021) obtiveram uma densidade aparente de 1241 kg/m³ para resíduos de açaí, através do método de picnometria líquida utilizando o hexano como líquido de referência.

Para as misturas binárias em cada condição de altura de leito estático, fração volumétrica e umidade da biomassa a massa específica efetiva da mistura foi calculada conforme a Equação 8 e os dados estão dispostos no Apêndice B. De maneira geral, a massa específica efetiva da mistura aumentou à medida que a proporção de areia aumentou na mistura, visto que ela é ponderada pela fração mássica de cada componente individual na mistura.

Para a análise fluidodinâmica abordada no item 4.2, o conhecimento das densidades das partículas será de suma importância para avaliar efeitos de segregação por diferença de densidade para sólidos de mesmo diâmetro numa mistura binária, conforme estudos realizados por Formisani *et al.* (2008).

4.1.4 Densidade de Empacotamento e Porosidade do Leito

A partir do conhecimento do diâmetro da coluna cilíndrica e da altura de leito estático correspondente a cada razão L/D investigada, foram calculados os volumes de leito que seriam utilizados. A partir da medida das massas de monopartículas ou de misturas binárias requeridas para ocupar tais volumes foi possível determinar a densidade de empacotamento do leito para cada condição estudada.

Na Tabela 4.4 estão dispostos os resultados de densidade e porosidade dos leitos empacotados apenas com partículas de inerte ou somente com partículas de biomassa, nas diferentes alturas de leito estático trabalhadas.

A porosidade do leito empacotado somente com partículas de areia aumentou ao aumentar o diâmetro médio de partícula de 0,93 mm para 1,29 mm em todas as razões de leito estático estudadas. Os resultados obtidos estão dentro da faixa reportada na literatura para um leito de partículas não porosas (KUNNI & LEVENSPIEL, 1991). A menor porosidade do leito de areia com $d_p = 0,93$ mm se deve ao fato das partículas conseguirem se acomodar mais facilmente no leito, deixando uma menor quantidade de espaços vazios entre elas. De forma similar, Vasconcelos *et al.* (2018) obtiveram uma redução na porosidade do leito quando houve uma redução granulométrica do resíduo de sisal de 0,7 mm para 0,3 mm, mantendo-se as outras variáveis constantes.

Tabela 4.4 - Densidade de empacotamento e porosidade dos leitos de monopartículas em diferentes razões L/D, teor de umidade e diâmetro de partícula.

L/D	Material	dp (mm)	X _{bu} (%)	ρ_l (kg/m ³)	ε
1	Areia	0,93	-	1470,2	0,42
		1,29		1477,9	0,44
	Biomassa	1,29	10	141,9	0,55
			42,5	170,6	0,60
			75	340,0	0,47
1,5	Areia	0,93	-	1451,7	0,43
		1,29		1463,3	0,45
	Biomassa	1,29	10	137,1	0,57
			42,5	167,1	0,60
			75	308,7	0,52
2	Areia	0,93	-	1455,6	0,43
		1,29		1477,9	0,44
	Biomassa	1,29	10	133,6	0,58
			42,5	164,3	0,61
			75	325,8	0,49

De forma geral, as porosidades dos leitos contendo partículas de biomassa foram superiores às das dos leitos de areia, já que as partículas de biomassa possuem uma geometria complexa, influenciada por suas diferentes formas e tamanhos (PAUDEL & FENG, 2013), ficando mais espaçadas dentro de leito e aumentando sua porosidade.

A porosidade do leito composto apenas de partículas de biomassa aumentou quando essa passou de uma umidade de 10% para 42,5% b.u. Porém, houve uma diminuição dessa porosidade para as partículas de 75% de umidade em todas as razões de leito estático estudadas. Esse resultado pode ser explicado pela presença de pontes líquidas em partículas com alto teor de umidade, que preenchem espaços vazios do leito, diminuindo assim sua porosidade.

Em seus estudos para avaliar a fluidez de *blends* de carvão e biomassa, Guo *et al.* (2015) observaram que um aumento no teor de umidade da biomassa pode melhorar a adesão entre a biomassa e carvão, pois a espessura da camada de umidade diminui a distância interpartícula, mantendo-as unidas.

Os leitos de inerte possuíram uma maior densidade de empacotamento, em comparação com os leitos de biomassa, resultado dentro do esperado devido aos valores de densidade aparente das partículas obtidos. Paudel e Feng (2013) obtiveram uma densidade de empacotamento de 1560 kg/m^3 e uma porosidade de 0,406 para um leito de partículas de areia de diâmetro médio de 0,2408 mm, valores próximos aos dispostos na Tabela 4.4. Enquanto que para a casca de noz com $d_p = 0,856 \text{ mm}$ e sabugo de milho com $d_p = 1,04 \text{ mm}$ os autores obtiveram 630 e 520 kg/m^3 para a densidade de empacotamento, e 0,475 e 0,518 para a porosidade do leito, respectivamente. Os valores encontrados para a densidade das partículas de casca de mandioca foram relativamente inferiores aos das biomassas acima descritas, porém a porosidade do leito não apresentou diferença significativa. Por sua vez, a porosidade do leito de partículas de resíduos de beterraba chegou a variar entre 0,73 e 0,76, no estudo realizado por Sozzi *et al.* (2021). Esses elevados valores de porosidade podem ser explicados pelo maior diâmetro de partícula dos resíduos de beterraba, que variou entre 4,42 a 5,24 mm.

De forma geral, não houve mudanças significativas para a densidade de empacotamento e porosidade do leito para as partículas de inerte e biomassa nas diferentes razões de leito estático estudadas, ao se fixar as mesmas condições de umidade e diâmetro de partícula inerte. Indicativo de que o empacotamento de partículas foi reproduzível durante os ensaios fluidodinâmicos.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados de densidade de empacotamento e porosidade do leito para as duas misturas binárias compostas por biomassa e inertes com $d_p = 0,93 \text{ mm}$ (MB093) e $d_p = 1,29 \text{ mm}$ (MB129), em diferentes frações volumétricas de biomassa (x_v) e teores de umidade (X_{bu}), na altura de leito estático de 16,4 cm ($L/D = 1,5$).

Os valores de porosidade e densidade de empacotamento das misturas binárias são reflexos dos comportamentos apresentados pelos componentes puros, listados na Tabela 4.4. A porosidade do leito de partículas aumentou conforme a proporção de inerte diminuiu (e x_v aumentou), para uma biomassa de mesmo teor de umidade. E ao comparar as duas misturas, tem-se também que de maneira geral a MB093 possui porosidade menor em relação à MB129 fixando as condições de umidade e proporção. A mesma tendência também é observada na diminuição da porosidade quando a mistura binária passa de 42,5 para 75%, em todas as proporções de biomassa. Já a densidade de empacotamento diminuiu à medida que a proporção de biomassa aumentou e a umidade diminuiu.

Tabela 4.5 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão L/D = 1,5.

Material	X _{bu} (%)	x _v (%)	dp _{ef} (mm)	ρ_t (kg/m ³)	ε
MB093	10	25	0,98	1123,4	0,46
		50	1,05	795,1	0,50
		75	1,15	465,4	0,54
	42,5	25	0,98	1130,9	0,47
		50	1,05	810,0	0,52
		75	1,14	487,9	0,56
	75	25	0,99	1168,9	0,45
		50	1,07	886,0	0,46
		75	1,17	601,9	0,48
MB129	10	25	1,29	1132,4	0,48
		50	1,29	800,2	0,51
		75	1,29	469,3	0,54
	42,5	25	1,29	1139,9	0,49
		50	1,29	815,2	0,53
		75	1,29	491,8	0,56
	75	25	1,29	1177,9	0,46
		50	1,29	891,2	0,47
		75	1,29	605,9	0,49

O diâmetro médio efetivo da mistura aumentou com a proporção de biomassa utilizada para a MB093 em todas as alturas de leito estático analisadas, embora não houve mudanças significativas com a umidade ao fixar valores de x_v. Comportamento esperado já que o diâmetro médio efetivo da mistura é ponderado pela fração mássica de seus componentes. Quanto maior a proporção de um material, mais o diâmetro da mistura se aproxima do diâmetro dessa partícula. Já para MB129 não houve mudanças para dp_{ef} visto que a biomassa e o inerte possuem o mesmo valor de diâmetro de partícula.

No estudo desenvolvido por Pérez *et al.* (2017) para avaliar a influência do tamanho de partículas de bagaço de cana-de-açúcar em uma mistura binária com areia, os autores verificaram que a velocidade de mínima fluidização aumentou à medida que a fração de biomassa aumentou, apesar da diminuição da densidade aparente do leito, já que a biomassa

possui uma densidade menor que a areia. Isso ocorreu devido à elevação do diâmetro efetivo da mistura à medida que a fração de biomassa aumentou, visto que a biomassa possuía um diâmetro muito superior ao inerte utilizado. Portanto, a influência do diâmetro característico prevaleceu no comportamento fluidodinâmico.

Resultados similares aos apresentados na Tabela 4.5 para L/D de 1,5 foram obtidos para as misturas binárias nas outras razões de leito estático estudadas, e encontram-se reunidos no Apêndice C.

4.1.5 Ângulo de Repouso Dinâmico (α)

Os resultados das medidas de ângulo de repouso dinâmico das partículas individuais de areia e biomassa, e de suas misturas binárias, bem como a análise de suas escoabilidades com base na Tabela 2.2 estão dispostos na Tabela 4.6.

De acordo com a Tabela 4.6, a areia é um material que possui a classificação de escoamento livre (30-38°), possuindo um ângulo de repouso menor que o da biomassa, indicativo de uma melhor escoabilidade. Os resultados obtidos estão próximos ao ângulo de 34° encontrado na literatura para a areia seca, segundo Al-hashemi e Al-amoudi (2018).

As partículas de biomassa seca ($X_{bu} = 10\%$) tiveram uma classificação de escoamento moderado (38-45°), enquanto que as partículas de biomassa de umidade intermediária e superior, tiveram escoamento classificado como coesivo (45-55°), com o maior ângulo, de 49,728°, medido para a biomassa de maior umidade (75% b.u.). Partículas mais coesas tendem a gerar um ângulo de repouso maior, já que devido à sua baixa fluidez tendem a se aglomerar uma sobre as outras.

Nos estudos realizados por Chinwan e Castell-Perez (2019) na avaliação da fluidez da farinha de milho amarelo, os autores também observaram uma elevação no ângulo de repouso estático à medida que o teor de umidade das partículas aumentaram, devido ao aumento da coesão entre as partículas, dificultando assim a sua fluidez.

A partir da Tabela 4.6 pode ser inferido também que o ângulo de repouso medido para as misturas binárias diminuiu em comparação à biomassa pura nas mesmas condições, indicando que o uso de inertes melhorou satisfatoriamente a característica do escoamento, passando de um escoamento coesivo para um escoamento moderado. Com exceção da proporção volumétrica de 75% de biomassa e 75% de umidade para MB129, que apesar da

diminuição do ângulo medido, ainda continuou na mesma faixa de classificação. O maior tamanho de partícula do inerte utilizado nessa mistura teve grande influência nesse resultado.

Tabela 4.6 - Ângulo de repouso dinâmico para os componentes individuais e misturas binárias.

Material	X _{bu} (%)	d _p ou d _{p_{ef}} (mm)	x _v (%)	α (°)	Escoabilidade
Biomassa	10			42,880±0,477	Moderado
	42,5	1,29	100	45,405±0,003	Coesivo
	75			49,728±2,469	Coesivo
Areia	-	0,93	0	37,510±0,134	Livre
		1,29		37,913±0,067	
MB093	10	0,98	25	42,015±0,239	Moderado
		1,05	50	41,730±0,256	
		1,15	75	42,323±0,911	
	42,5	0,98	25	41,692±0,864	
		1,05	50	41,919±0,345	
		1,14	75	42,900±3,214	
	75	0,99	25	42,110±0,419	
		1,07	50	41,745±0,190	
		1,17	75	40,713±0,633	
MB129	10		25	40,204±0,602	Moderado
			50	39,687±2,214	
			75	41,080±2,214	
	42,5		25	42,746±0,942	
		1,29	50	40,649±0,953	
			75	43,684±5,572	
	75		25	42,969±0,505	
			50	42,309±1,172	
			75	46,475±2,721	

O comportamento esperado durante os experimentos de medição do ângulo de repouso em um tambor giratório era que as partículas se movessem da extremidade superior para inferior da encosta do tambor de forma contínua, formando um ângulo de repouso constante. Porém foi observado um comportamento diferente, de forma geral para a biomassa pura e misturas de

maior proporção de biomassa, em que as partículas acompanhavam o movimento do tambor ao iniciar a rotação até a inclinação atingir um ângulo máximo. Nesse momento, as partículas caíam por meio de uma “avalanche” e uma nova inclinação, dessa vez inferior, era formada. Esse fenômeno também foi visualizado por Cheng e Zhao (2017) durante seus experimentos para determinar o ângulo de repouso dinâmico de sedimentos de 0,28 a 4,38 mm e foi denominado como “efeito avalanche”. Como resultado, a média entre os ângulos superior e inferior foi adotada como medida final do ângulo de repouso dinâmico. Durante a análise dos autores, foi observado que a diferença entre os ângulos superior e inferior formados aumenta com o tamanho do sedimento utilizado, resultando em maiores ângulos de repouso. Esse fato pode justificar o resultado obtido para a exceção da classificação de escoabilidade da MB129.

Não houve “efeito avalanche” para as partículas de areia e misturas binárias com $x_v = 25\%$, independente da umidade das partículas da biomassa, e $x_v = 50\%$ quando utilizou partículas de biomassa com $X_{bu} = 10$ e $42,5\%$. O comportamento esperado de formação de uma inclinação constante foi notado nessas condições. De modo geral, esse efeito levou à ângulos de repouso maiores tanto para a biomassa pura, quanto para as misturas binárias que o apresentaram, principalmente para as partículas de biomassa mais úmidas ($X_{bu} = 75\%$). Mas, a partir da adição dos inertes, esse efeito só foi observado para as misturas com $x_v = 75\%$, independente do teor de umidade de biomassa avaliado, e $x_v = 50\%$ para partículas com umidade de 75% b.u., o que corrobora para a conclusão de que o uso de inertes melhorou a fluidez das partículas.

4.1.6 Classificação de Geldart

O diagrama de Geldart fornece uma importante classificação das partículas quanto ao regime fluidodinâmico, auxiliando no entendimento do seu comportamento. Dentro desse contexto, os componentes individuais e as misturas binárias foram classificados quanto aos grupos de Geldart e o resultado disposto é apresentado na Figura 4.3.

As partículas inertes foram classificadas como pertencentes ao grupo D de Geldart, devido aos maiores tamanhos que possuem, e tendem a apresentar um comportamento jorrável no leito. Já as partículas de biomassa nos diferentes teores de umidade analisados, foram classificadas como pertencentes ao grupo B, com uma fluidização que apresenta um comportamento semelhante à areia de menores diâmetros.

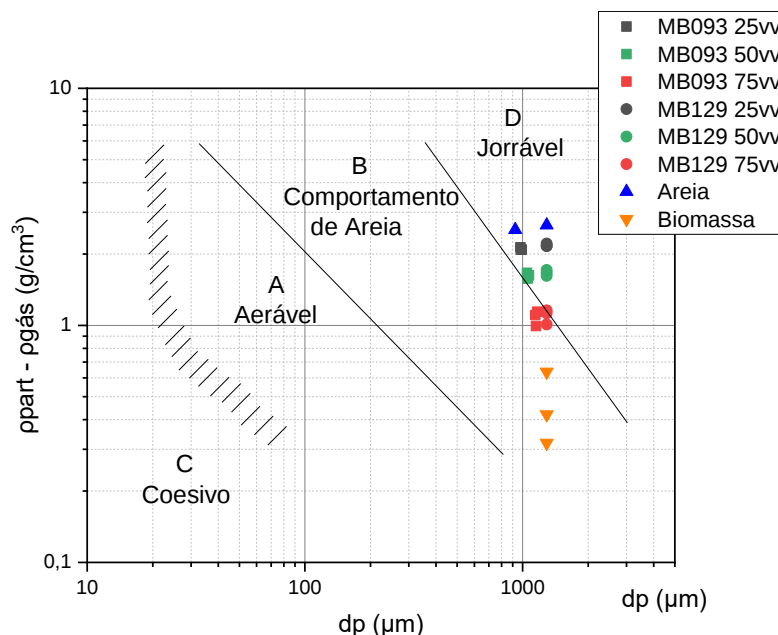


Figura 4.3 - Classificação de Geldart das partículas de areia, de biomassa e das misturas binárias biomassa-areia.

É importante salientar que o diagrama de Geldart não leva em consideração a umidade das partículas, que exibem uma característica mais coesa com maiores forças interpartículas. Portanto, essa classificação da biomassa pura nas maiores condições de umidade ($X_{bu} = 42,5\%$ e 75%) como pertencentes ao grupo B pode não refletir à realidade observada nos testes fluidodinâmicos, devido aos fortes efeitos coesivos provenientes do elevado teor de umidade. Assim como prevê os estudos realizados por Seville e Clift (1984) é possível que as partículas úmidas sofram alterações na sua classificação Geldart.

Uma tendência foi observada para a classificação Geldart das misturas binárias que dependeu somente da proporção de biomassa envolvida na mistura. Fatores como o diâmetro do inerte e teor de umidade da biomassa não foram suficientes para influenciar nessa classificação. As misturas binárias com 75% de fração volumétrica de biomassa foram classificadas como pertencentes ao grupo B de Geldart, enquanto as misturas de menores proporções de biomassa foram classificadas como pertencentes ao grupo D. Essa tendência é razoável, visto que o cálculo da densidade efetiva da mistura leva em consideração a quantidade dos componentes individuais na mistura, uma mistura de maior proporção de biomassa vai tender à classificação da biomassa pura e vice-versa.

No diagrama apresentado na Figura 4.3 é possível observar que conforme a proporção de biomassa aumenta na mistura, independente do inerte utilizado ou teor de umidade da biomassa, os pontos correspondentes a essas misturas vão se deslocando para a parte inferior do diagrama até cruzar a linha que divide as duas regiões entre os grupos D e B, em direção aos pontos correspondentes à biomassa pura.

4.2 Análise Fluidodinâmica

4.2.1 Fluidodinâmica dos leitos de monopartículas de inerte e de biomassa

Os comportamentos fluidodinâmicos das partículas de biomassa e de inertes, individualmente, foram analisados nas mesmas condições de razão L/D do leito e de umidade de biomassa propostas no planejamento experimental de suas misturas binárias, para efeitos de comparação. A Figura 4.4 apresenta as curvas características de fluidização das partículas de areia de 0,93 mm e 1,29 mm de diâmetro, nas três diferentes alturas de leito estático estudadas.

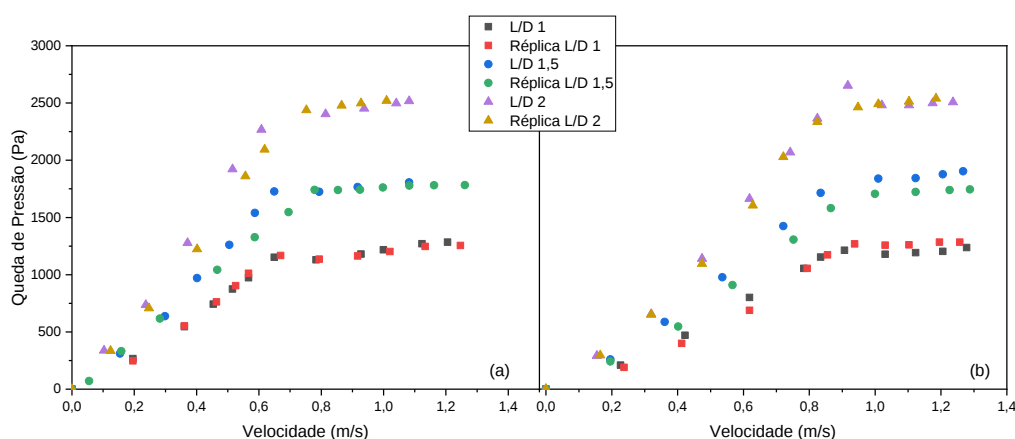


Figura 4.4 - Queda de pressão em função da velocidade do ar, para leitos de partículas de areia em diferentes razões L/D: (a) $d_p = 0,93$ mm e (b) $d_p = 1,29$ mm

O comportamento exibido é típico para partículas em leito fluidizado, consistindo inicialmente de uma região de leito fixo, na qual a queda de pressão no leito aumenta com o aumento da velocidade do ar até o ponto em que as forças de arrasto exercidas pelo fluxo de ar contrabalanceiem o peso aparente das partículas no leito, iniciando a região de leito fluidizado,

caracterizada por uma estabilização da queda de pressão (KUNNI & LEVENSPIEL, 1991). A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros fluidodinâmicos obtidos através da análise gráfica das curvas com seus respectivos erros padrão.

Tabela 4.7 - Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos de monopartículas de areia obtidos em diferentes razões L/D e diâmetros de partícula.

L/D	d_p (mm)	v_{mf} (m/s)	ΔP_{mf} (Pa)	IF (%)
1	0,93	$0,68 \pm 0,02$	$1263,0 \pm 14,9$	$83,2 \pm 1,9$
	1,29	$0,90 \pm 0,01$	$1250,1 \pm 31,6$	$79,4 \pm 1,5$
1,5	0,93	$0,70 \pm 0,03$	$1780,9 \pm 2,3$	$77,4 \pm 0,4$
	1,29	$0,93 \pm 0,02$	$1801,3 \pm 57,7$	$79,4 \pm 1,4$
2	0,93	$0,68 \pm 0,04$	$2469,4 \pm 37,0$	$80,5 \pm 0,7$
	1,29	$0,87 \pm 0,01$	$2512,3 \pm 7,3$	$81,7 \pm 1,8$

A queda de pressão no leito aumenta conforme a carga no leito, traduzida pela maior altura de leito estático utilizada. De maneira geral, as quedas de pressão foram menores para a areia de menor diâmetro em todas as alturas estudadas, mas a diferença encontrada foi bem pequena, devido aos valores próximos de massa específica exibidos pelos inertes.

O aumento observado na velocidade mínima de fluidização com o aumento do tamanho da partícula de areia ocorre porque as forças inerciais associadas a partículas de maior diâmetro são maiores, sendo assim é necessário um incremento na energia cinética para provocar o deslocamento dessas partículas. Resultados similares foram obtidos por Bai e Si (2020) que encontraram em seus estudos uma velocidade de mínima fluidização de 0,36 m/s e 0,18 m/s para as areias quartzosas de 0,657 mm e 0,475 mm de diâmetro médio, respectivamente. Valores inferiores aos encontrados para os inertes utilizados nas condições exibidas da Tabela 4.7, mas condizentes com a literatura, visto que partículas menores tendem a fluidizar mais facilmente.

Shaul *et al.* (2014) estimaram para partículas de zircônia de 1,1 mm de diâmetro médio e também pertencentes ao grupo D de Geldart, uma velocidade de mínima fluidização de 0,7989 m/s utilizando uma razão L/D = 1. Não foram observadas alterações significativas quando a

altura de leito estático foi variada, permanecendo com velocidades de mínima fluidização entre 0,7169 e 0,7989 m/s.

De forma análoga ao resultado dos autores citados, ao se fixar o tamanho das partículas de areia, a velocidade de mínima fluidização (v_{mf}) permaneceu em valores próximos nas três alturas de leito estudadas, inferindo que a razão L/D não apresentou influência significativa sobre esse parâmetro.

O índice de fluidização permaneceu sem alterações significativas comparando os dois tamanhos de partícula de areia na mesma altura de leito estático. Bai e Si (2020) chegaram a valores de IF em torno de 90% para areias com tamanhos variando de 0,178 a 0,657 mm, sendo diretamente proporcionais à velocidade superficial do gás.

As curvas fluidodinâmicas características dos leitos contendo apenas partículas de biomassa, em diferentes umidades e razões L/D de leito estático, são mostradas na Figura 4.5.

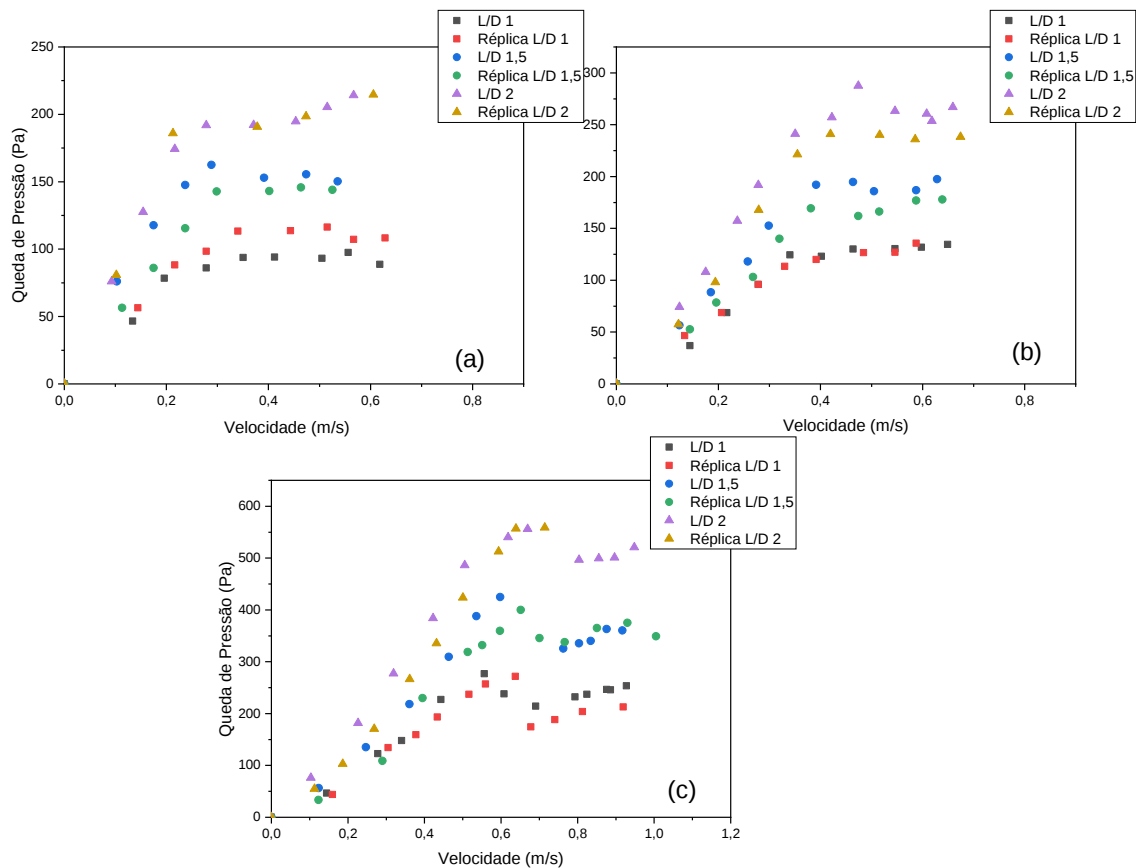


Figura 4.5 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para leitos de monopartículas de biomassa em diferentes umidades e razões de leito estático:

(a) $X_{bu} = 10\%$; (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$

A queda de pressão do leito fluidizado aumentou ao aumentar o teor de umidade da biomassa. Um comportamento experimental dentro do esperado já que partículas úmidas tem uma maior massa específica aparente, de modo que uma massa maior é utilizada para preencher o mesmo volume que partículas mais secas, resultando em um maior peso aparente do leito, além de estarem sujeitas aos efeitos de coesão.

No leito com partículas de 75% de umidade, em todas as razões L/D de leito estático estudadas foi observado um pico característico nas curvas fluidodinâmicas, o qual é decorrente dos efeitos de forças atrativas interparticulares. Sua presença significa que no leito em estudo foi necessária energia adicional do fluido para superar as forças coesivas entre as partículas e causar a expansão do leito. Um pico similar foi observado por Shaul *et al.* (2014) nas curvas características de materiais pertencentes ao grupo A de Geldart. Os autores atribuíram essa saliência às forças de coesão causadas por partículas de tamanho pequeno, que devem ser superadas para iniciar a fluidização. As partículas da casca de mandioca pertencem ao grupo B e não ao Grupo A, da classificação Geldart, sendo importante salientar que as forças de coesão em seus leitos são devidas à elevada umidade superficial da biomassa. Como discutido anteriormente, a classificação de Geldart pode mudar de acordo com a umidade das partículas.

A Tabela 4.8 apresenta os principais parâmetros fluidodinâmicos obtidos através da análise das curvas características da biomassa pura.

Tabela 4.8 - Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos de monopartículas de biomassa em diferentes umidades e razões L/D de leito estático.

L/D	X _{bu} (%)	v _{mf} (m/s)	ΔP _{mf} (Pa)	IF (%)
1	10	0,25±0,01	103,6±9,8	71,2±5,2
	42,5	0,36±0,01	129,0±2,3	75,1±1,0
	75	0,50±0,02	233,0±18,8	74,7±1,1
1,5	10	0,27±0,03	147,3±3,8	72,1±1,6
	42,5	0,38±0,00	186,3±9,1	69,8±3,6
	75	0,56±0,03	361,4±0,8	81,7±3,8
2	10	0,28±0,04	180,8±12,5	72,2±2,4
	42,5	0,38±0,00	252,0±11,7	81,2±0,2
	75	0,53±0,01	477,1±21,0	87,7±8,2

A velocidade de mínima fluidização seguiu a mesma tendência observada para a queda de pressão, aumentando com o teor de umidade da biomassa. Partículas mais úmidas requerem maiores velocidades do ar de escoamento para vencer as forças de coesão e a maior força peso impostas pela umidade e dar início à fluidização.

Um aumento na velocidade de mínima fluidização também foi notado por Bai e Si (2020) para partículas de biomassa úmidas, em razão do aumento de densidade das partículas e da elevação da coesão causadas pela presença de água. Por outro lado, observaram também que a aglomeração das partículas mais úmidas durante a fluidização equiparou-se a um aumento do diâmetro da partícula, gerando uma maior resistência ao movimento do gás e resultando em uma maior velocidade de mínima fluidização. Uma velocidade de aproximadamente 0,2 m/s foi encontrada pelos mesmos autores para a biomassa de pinheiro-larício com 10,3% de umidade, valor muito próximo encontrado experimentalmente para a casca de mandioca seca nas três razões de leito estático estudadas.

A velocidade de mínima fluidização de 0,238 m/s encontrada nos estudos realizados por Jia *et al.* (2016) para serragem do pinheiro-Douglas, também foi próxima dos resultados obtidos. Já Liu *et al.* (2014) determinaram uma velocidade de mínima fluidização de 0,32 m/s para as amostras de serragem de dois tipos diferentes de pinheiro.

A razão L/D de leito estático não causou variações tão significativas nas velocidades de mínima fluidização nas três condições de umidade estudadas. Resultado análogo ao obtido para os inertes de diferentes diâmetros e também observado por Bai e Si (2020), tanto nos seus estudos fluidodinâmicos para a biomassa, quanto para o inerte.

Um escoamento do tipo *slug* foi observado para a fluidização da biomassa de maior teor de umidade nas razões de leito estático iguais a 1,5 e 2, como pode ser observado na Figura 4.6.

Esse tipo de escoamento afeta consideravelmente a qualidade da fluidização e eleva a queda de pressão no leito, necessitando de maiores vazões do ar para quebrá-lo. Ele afeta o contato sólido-fluido e, por conseguinte, as trocas de calor e massa que o leito fluidizado proporciona. Portanto, a sua ocorrência não é desejável. Esse fenômeno não foi observado para o leito mais raso provavelmente devido à facilidade do ar em escoar um leito de altura menor, no qual as resistências ao seu escoamento são minimizadas.



Figura 4.6 - Escoamento do tipo *slug* para biomassa com $X_{bu} = 75\%$ e $L/D = 2$.

Os maiores valores de índice de fluidização obtidos foram de 87,7% e 81,7%, para as biomassas com 75% de umidade e razão L/D de leito estático de 2 e 1,5 respectivamente, exatamente as que apresentaram *slugging*. Esses leitos experimentaram esse fenômeno antes de iniciar a fluidização de fato, à medida que a velocidade do gás foi aumentando, o *slugging* do tipo pistão, em que as partículas eram separadas por um espaço vazio no leito, foi formado. Esse *slug* continuou se deslocando em forma de pistão até a sua quebra a velocidades mais altas do gás, e início da fluidização turbulenta. Shaul *et al.* (2014) também observaram esse fenômeno para partículas pertencentes ao grupo A, B e D de Geldart, sendo que as partículas pertencentes ao grupo B e D apresentaram o mesmo tipo de *slugging* observado para o leito de partículas de casca de mandioca com 75% de umidade. Esse fenômeno e as menores porosidades de leito observadas contribuíram de forma considerável para elevação da queda de

pressão no leito, também evidenciados pelos picos nos gráficos fluidodinâmicos, Figura 4.5 (c). Maiores velocidades superficiais do gás de escoamento foram requeridas para quebrar esses *slugs*, o que pode ter contribuído para que uma maior parte do leito estivesse fluidizado. Em contrapartida, foi observado um arraste de partículas para fora do leito devido à alta velocidade do ar de escoamento.

Portanto, não se deve levar em consideração para avaliar a qualidade da fluidização apenas os valores nominais do índice de fluidização, mas também o comportamento apresentado pelo leito, como o fenômeno de *slugging* e a elutriação das partículas, que devem ser ponderados na análise, principalmente quando envolve partículas com altos teores de umidade. Apesar do índice de fluidização ter apresentado valores elevados nessas condições, esse comportamento exibido é característico de uma fluidização de baixa qualidade. De forma geral, o índice de fluidização apresentou valores superiores à 69% para todas as corridas fluidodinâmicas.

Em seus estudos, Bai e Si (2020) verificaram que as partículas de biomassa foram completamente, parcialmente e não fluidizadas, quando o índice de fluidização estava na faixa de [0,95 a 1], [0,6 a 0,95] e [0 a 0,6], respectivamente. Esse índice diminuía à medida que a umidade da biomassa aumentava, diferentemente do que foi constatado para a casca de mandioca, em que os maiores índices foram alcançados para a biomassa com maior teor de umidade. Essa diferença pode ser explicada justamente pela não ocorrência do fenômeno de *slug* nos ensaios para a biomassa utilizada pelos referidos autores, justificado pelos baixos teores de umidade trabalhados.

A reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos realizados pode ser confirmada visto que os desvios existentes entre os dados apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8 são menores que as incertezas das medidas, que incluem tanto as incertezas associadas ao instrumento de medição de vazão, como de queda de pressão.

Bai e Si (2020) analisaram a fluidodinâmica, separadamente, de partículas de pinheiro-larício de 1,05 mm de diâmetro médio em diferentes valores de umidade e de quatro tipos de inertes de areia quartzosa, cujos diâmetros médios variaram entre 0,178 e 0,657 mm. Os efeitos da razão de leito estático, umidade da partícula de biomassa e diâmetro do inerte utilizado foram avaliados para definir quais partículas de biomassa e inerte iriam compor a mistura binária para ser utilizada em um processo de pirólise. As condições de operação da fluidização para essa mistura binária escolhida foi então definida através da variação da proporção volumétrica das partículas. Porém, essa abordagem pode levar à conclusões errôneas

já que o comportamento fluidodinâmico da mistura binária difere dos componentes puros e depende de diversos fatores.

Portanto, para uma análise mais completa do comportamento fluidodinâmico de misturas binárias, um planejamento experimental 3^3 foi realizado para cada tamanho de partícula de areia, a fim de avaliar a influência da razão L/D, fração volumétrica e umidade da biomassa sobre os parâmetros de fluidização.

4.2.2 Fluidodinâmica de misturas binárias

Foram realizados os ensaios fluidodinâmicos de misturas binárias constituídas de partículas de biomassa e inertes com o objetivo de analisar a influência da razão de leito estático (L/D), do diâmetro (d_p) do inerte utilizado, da fração volumétrica de biomassa (x_v) e teor de umidade da biomassa (X_{bu}) sobre os parâmetros fluidodinâmicos: velocidades incipiente (v_{if}), de mínima (v_{mf}) e de completa (v_{cf}) fluidização, queda de pressão de mínima fluidização (ΔP_{mf}) e índice de fluidização (IF).

Além disso, utilizando o *Software* Estatística 10.0, foi realizada uma análise estatística, considerando um nível de confiança de 95%, para averiguar quais fatores (razão L/D, teor de umidade e fração volumétrica de biomassa) e quais interações influenciaram significativamente na queda de pressão do leito, velocidade incipiente, de mínima e completa fluidização, além do índice de fluidização. A influência dos termos lineares e quadráticos dos fatores foi testada, bem como suas interações lineares. Em seguida, procedeu-se a uma análise de regressão para a obtenção de modelos empíricos correlacionando os parâmetros fluidodinâmicos com os fatores do processo. Para os modelos que obtiveram um ajuste com coeficiente de regressão (R^2) superior a 0,7, as superfícies de respostas foram plotadas.

A Tabela 4.9 contém os resultados das três velocidades fluidodinâmicas (v_{if} , v_{mf} e v_{cf}) e da queda de pressão na mínima fluidização, analisadas na razão de leito estático correspondente a 1,5, bem como o erro padrão inerente às medidas, para as misturas compostas por biomassa e inerte com $d_p = 0,93$ mm (MB093). Os dados apresentados possuem tendência similar, embora de magnitudes diferentes, àquela da mistura binária composta por biomassa e inerte de 1,29 mm de diâmetro (MB129). O Apêndice D traz os dados fluidodinâmicos para MB093 e MB129 em todas as condições operacionais investigadas.

Tabela 4.9 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para a MB093 na razão $L/D = 1,5$, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.

X_{bu} (%)	x_v (%)	dp_{ef} (mm)	ΔP_{mf} (Pa)	v_{if} (m/s)	v_{mf} (m/s)	v_{cf} (m/s)	IF(%)
10	25	0,98	1392,8±61,4	0,51±0,11	0,76±0,00	1,04±0,02	80,2±0,9
	50	1,05	1002,1±13,3	0,51±0,01	0,81±0,00	1,09±0,06	78,7±1,9
	75	1,15	584,1±20,8	0,48±0,00	0,68±0,02	0,92±0,10	80,3±5,8
42,5	25	0,98	1409,4±31,3	0,64±0,01	0,75±0,03	1,03±0,08	78,1±1,4
	50	1,05	1064,7±17,1	0,61±0,02	0,88±0,00	1,17±0,02	79,7±1,4
	75	1,14	604,4±28,2	0,66±0,08	0,83±0,03	0,86±0,02	76,2±7,8
75	25	0,99	1478,7±3,3	0,73±0,00	0,77±0,02	0,84±0,03	78,0±0,8
	50	1,07	1178,8±12,3	0,81±0,01	0,82±0,01	0,96±0,02	80,9±2,7
	75	1,16	809,5±38,4	0,93±0,12	0,91±0,11	1,34±0,01	83,6±7,0

De maneira geral, a queda de pressão nas condições de mínima fluidização aumentou ao aumentar a carga no leito, a qual para uma dada razão L/D está diretamente relacionada à umidade das partículas de biomassa e à quantidade de areia na mistura, independentemente do tamanho de partícula do inerte utilizado. Ao fixar a razão L/D e o tamanho do inerte, o aumento da fração de biomassa levou a uma diminuição da densidade de empacotamento e a um aumento da porosidade, o que pode ter contribuído para uma menor resistência do leito ao estabelecimento da fluidização, resultando numa redução da queda de pressão de mínima fluidização.

Ao comparar os dois tamanhos de inertes, não houve mudanças significativas para a queda de pressão nas mesmas condições, o que corrobora com a pequena diferença de massa específica observada entre eles. A queda de pressão de mínima fluidização também é maior conforme a razão de leito estático aumenta, obedecendo o mesmo padrão, visto que é necessário um volume maior de partículas para preencher um leito de maior altura, ou seja, maior o peso aparente do leito a ser contrabalanceado.

É importante salientar que não houve variações significativas na umidade das partículas de biomassa durante os ensaios fluidodinâmicos, tendo a umidade das partículas de biomassa após o término das corridas, variado de 0,58 a 11,57% em relação ao teor de umidade de início da corrida fluidodinâmica (10%, 42,5% ou 75%).

As Figuras 4.7 (a) e (b) mostram os diagramas de Pareto com os efeitos principais e de interação das variáveis independentes sobre a queda de pressão de mínima fluidização dos leitos de biomassa-areia de 0,93 mm e de biomassa-areia de 1,29 mm, respectivamente. A magnitude dos efeitos é representada pelas colunas, sendo que os fatores que são estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança, ultrapassam a linha vermelha que denota $p = 0,05$.

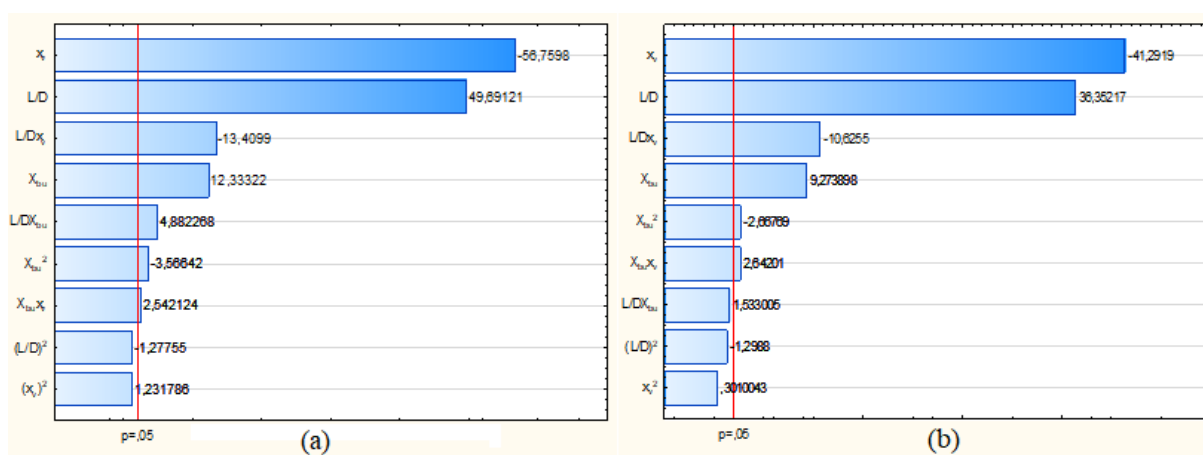


Figura 4.7 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a queda de pressão de mínima fluidização (a) MB093 e (b) MB129.

A partir das Figuras 4.7 (a) e (b) é possível inferir que a fração volumétrica de biomassa foi o fator que mais influenciou a queda de pressão de mínima fluidização do leito, seguida da razão de leito estático e da interação linear entre eles, para os dois tipos de misturas binárias avaliadas. Os termos linear e quadrático do teor de umidade, e a interação linear $x_{bu}x_v$, também se mostraram significativos tanto para MB093, como para MB129. Já o fator relacionado à interação linear da $(L/D)x_{bu}$ ficou abaixo do nível de significância, Figura 4.7 (b), não exercendo influência sobre ΔP_{mf} dos leitos contendo MB129. Porém, teve efeito positivo sobre ΔP_{mf} dos leitos contendo MB093, Figura 4.7 (a).

A fração volumétrica de biomassa exerce um efeito linear negativo sobre a queda de pressão, diferentemente do observado para a razão de leito estático e o teor de umidade, cujos efeitos lineares são positivos. Esse resultado está em consonância com a análise do comportamento exibido para a queda de pressão (Tabela 4.9), visto que a queda de pressão no leito aumentou à medida que a razão L/D e o teor de umidade aumentaram e a fração volumétrica de biomassa diminuiu.

A dependência de ΔP_{mf} com as variáveis independentes significantes pode ser melhor visualizada através das superfícies de resposta mostradas nas Figuras 4.8 e 4.9, para a MB093 e MB129, respectivamente.

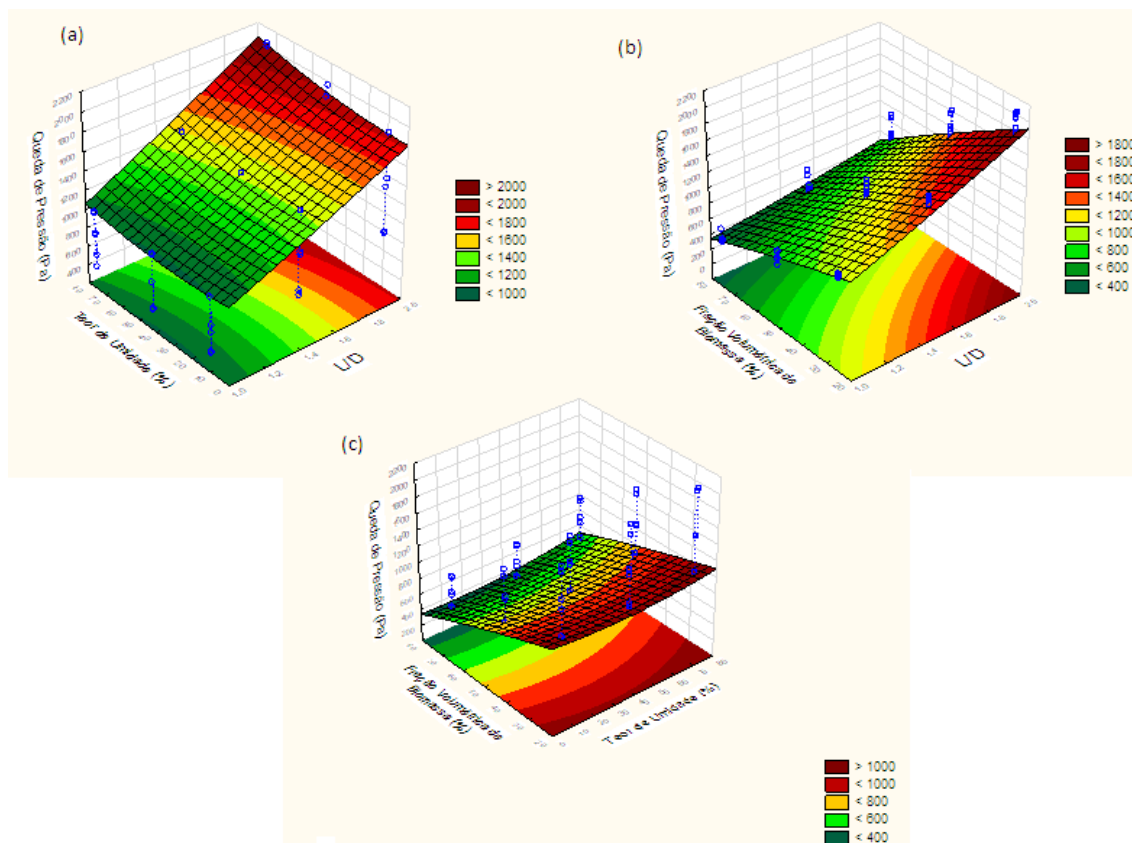


Figura 4.8 - Superfícies de resposta para a queda de pressão de mínima fluidização da MB093 como função (a) da razão L/D do leito e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$ e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa, para $L/D = 1$.

Como pode ser visualizado na Figura 4.8 (a), os menores valores de queda de pressão são alcançados para os valores mais baixos da razão de leito estático e da umidade da biomassa. De forma similar, ocorre para uma maior fração volumétrica de biomassa e menor razão de leito estático, Figura 4.8 (b), e maior fração volumétrica de biomassa em toda a faixa de teor de umidade investigada, Figura 4.8 (c). A superfície de resposta possuiu um coeficiente de determinação igual a 0,9928 e a queda de pressão de mínima fluidização pode ser descrita matematicamente utilizando os fatores mais significativos a partir da equação codificada abaixo:

$$\Delta P_{mf} = 1068,821 + 680,550X_1 + 168,806X_2 - 40,976X_2^2 - 776,657X_3 + 82,086X_1X_2 - 224,793X_1X_3 + 42,898X_2X_3 \quad (20)$$

em que X_1 é a razão de leito estático (L/D), X_2 é o teor de umidade da biomassa e X_3 é a fração volumétrica de biomassa.

As superfícies de resposta, que representam a dependência da queda de pressão na condição de mínima fluidização para os leitos MB129 com respeito à razão L/D , teor de umidade e fração de biomassa, são apresentadas na Figura 4.9.

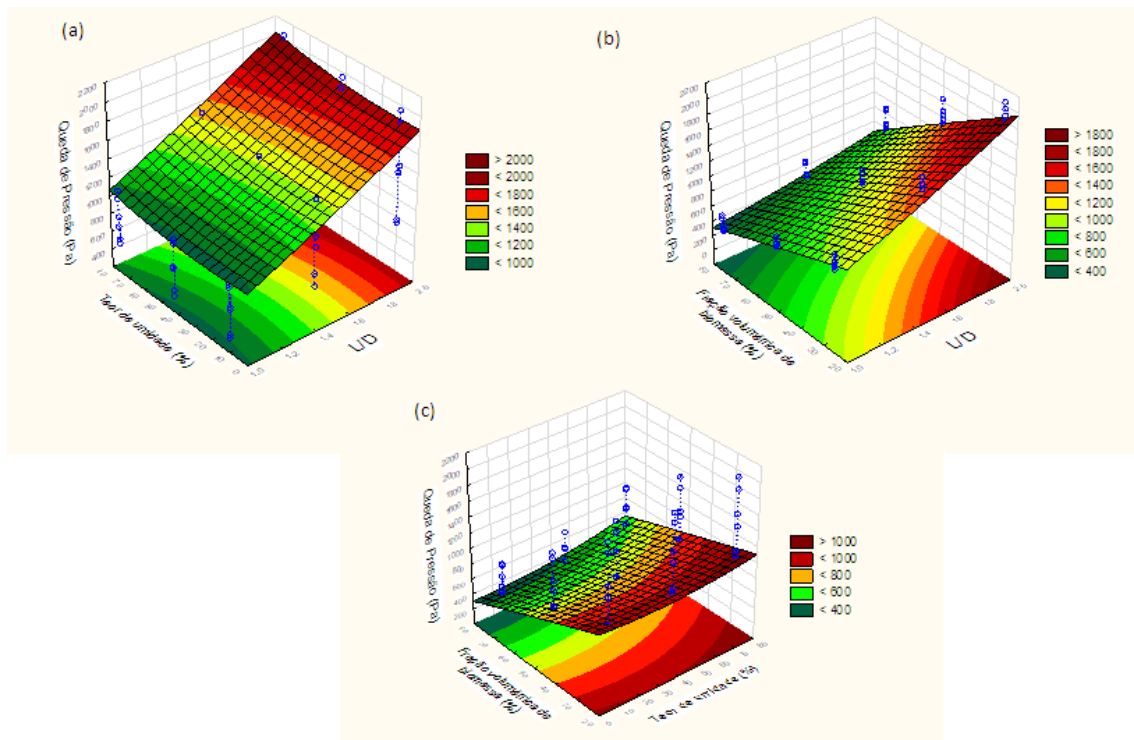


Figura 4.9 - Superfícies de resposta para a queda de pressão de mínima fluidização da MB129 como função (a) da razão L/D do leito e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D do leito e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$ e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa, para $L/D = 1$.

Verifica-se que a MB129 possui comportamento semelhante ao exibido pela MB093. A superfície de resposta também possuiu um bom coeficiente de determinação, igual a 0,9866, e a queda de pressão de mínima fluidização pode ser descrita matematicamente em função dos fatores mais significativos a partir da equação codificada abaixo:

$$\Delta P_{mf} = 1056,494 + 685,631X_1 + 174,867X_2 - 42,217X_2^2 - 778,278X_3 - 245,380X_1X_3 + 61,196X_2X_3 \quad (21)$$

Durante os experimentos, a segregação entre as partículas mais leves de biomassa (*flotsam*) e mais pesadas de areia (*jestsam*) foi claramente observada. Esse fenômeno ocorreu em todas as corridas fluidodinâmicas, em maior ou menor proporção, e pode ser visualizado nas Figuras 4.10 e 4.11.

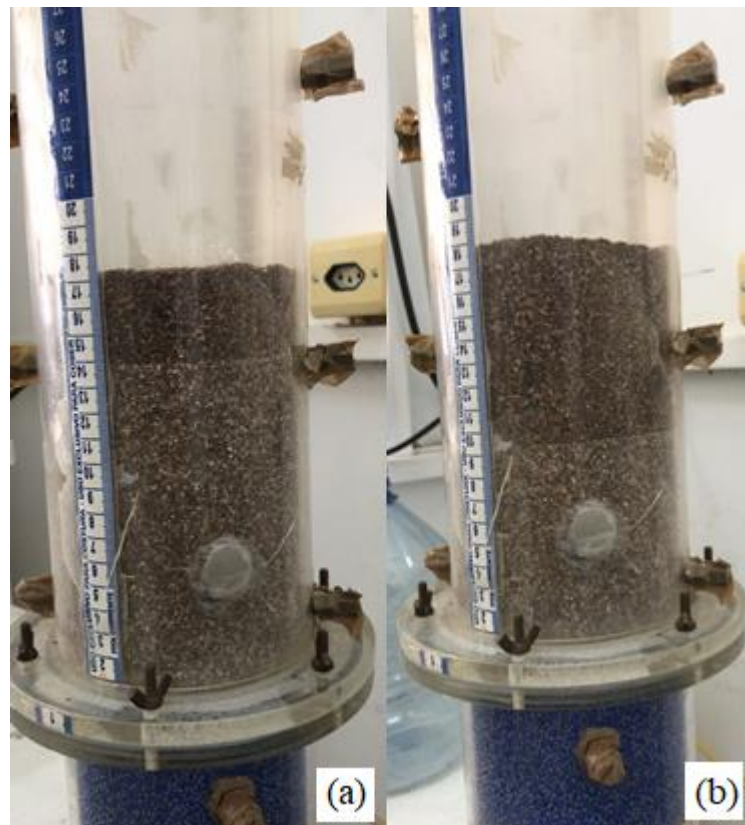


Figura 4.10 - Leito completamente segregado: MB093 e $L/D = 1,5$.

(a) $x_v = 25\%$, $X_{bu} = 10\%$; (b) $x_v = 50\%$, $X_{bu} = 10\%$

De maneira geral, uma segregação em maior proporção foi observada para as misturas MB093 e MB129, formadas por partículas de biomassa de 42,5 e 10% b.u., resultando em uma segregação completa que pode ser visualizada na Figura 4.10. Uma segregação completa também foi visualizada para MB129 com partículas de biomassa de 75% b.u.

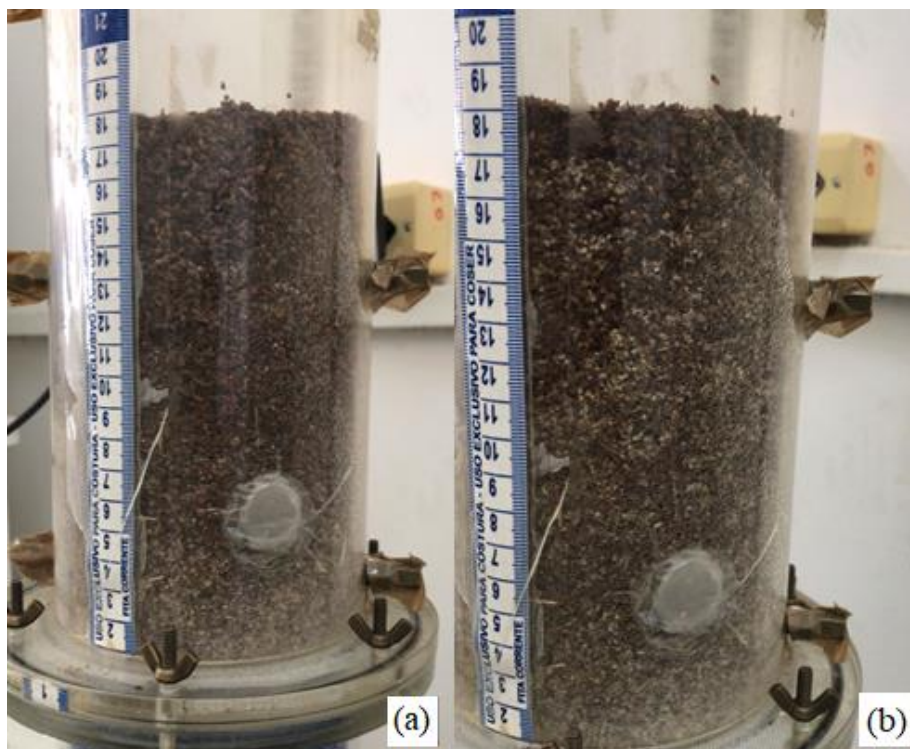


Figura 4.11 - Leito parcialmente misturado: MB093 e $L/D = 1,5$.

(a) $x_v = 75\%$, $X_{bu} = 75\%$; (b) $x_v = 50\%$, $X_{bu} = 75\%$ b.u.

A MB093, no entanto, apresentou um comportamento diferente para a uma razão de leito estático correspondente a 1,5 e umidade da biomassa de 75%b.u., em que uma remistura dos componentes foi observada em maiores velocidades do ar, resultando em um leito parcialmente misturado, Figura 4.11. Esse resultado será melhor discutido no tópico em que se avalia a influência da umidade.

Essa segregação é devida principalmente à grande diferença de massa específica entre as partículas de areia e biomassa, com razões que variam de 3,97 a 8,26, como mostrado na Tabela 4.10.

É importante salientar que apesar da MB093 diferir tanto na densidade quanto no diâmetro dos componentes puros, a segregação por densidade prevalece devido a uma maior razão. De acordo com Formisani *et al.* (2008), quando os componentes da mistura diferem em densidade e diâmetro, a ação de cada fator de segregação pode tender a fortalecer ou contrabalancear o outro. Durante seus estudos de fluidização para sólidos em misturas binárias que diferiam tanto em densidade quanto em diâmetro, os autores verificaram experimentalmente que em uma mistura de esferas de aço e de peneira molecular, cujas razões

de tamanho e densidade são iguais a 0,55 e 5,2, respectivamente, prevaleceu a segregação por densidade.

Tabela 4.10 - Razões entre os diâmetros (dp_j/dp_f) e densidades ($\rho_{p,j}/\rho_{p,f}$) de partículas *jetsam* e *flotsam*.

Mistura	<i>flotsam</i>	<i>jetsam</i>	$\rho_{p,j}/\rho_{p,f}$	dp_j/dp_f
	Biomassa $X_{bu} = 10\%$		7,91	
MB093	Biomassa $X_{bu} = 42,5\%$	Areia $d_p = 0,93$ mm	6,01	0,72
	Biomassa $X_{bu} = 75\%$		3,97	
	Biomassa $X_{bu} = 10\%$		8,26	
MB129	Biomassa $X_{bu} = 42,5\%$	Areia $d_p = 1,29$ mm	6,28	1
	Biomassa $X_{bu} = 75\%$		4,15	

Os mesmos autores observaram uma segregação em camadas praticamente puras nos ensaios fluidodinâmicos realizados para sistemas de esferas de vidro e aço, cuja razão de densidade (ρ_j/ρ_f) excedia 3. Da mesma forma, a razão entre as densidades de *jetsam* e *flotsam* para MB093 e MB129 ultrapassa o valor mencionado por Formisani *et al.* (2008) e resultados similares de segregação completa (Figura 4.10) foram exibidos.

Vasconcelos *et al.* (2018) também verificaram o fenômeno de segregação durante os ensaios fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduos de sisal e areia. Um mecanismo de segregação similar ao observado pelos autores para as misturas binárias formadas pelo componente menos denso e menor, foi observado durante os ensaios fluidodinâmicos para a MB093 e MB129, apesar do componente menos denso (biomassa) possuir um diâmetro maior ou igual à areia nas respectivas misturas. Essa similaridade é devido à pequena razão entre os diâmetros dos componentes da mistura, que vai exercer pouca influência sobre o padrão de segregação. Caso um componente fosse muito menor que o outro, o segundo mecanismo abordado pelos autores provavelmente ocorreria.

Um fina camada de bolhas começa a se formar na região superior do leito sendo possível observar uma movimentação das partículas de biomassa que estão no topo desse leito. À medida que a velocidade de ar aumenta uma movimentação da biomassa em direção ao topo do leito é observado, ao mesmo tempo que as partículas mais densas de areia localizadas na parte superior começam a se mover em direção ao fundo do leito. A frente de fluidização avança

fazendo com que as partículas de biomassa fluidizem enquanto as partículas de areia formam um leito estático no fundo da coluna. Ao aumentar ainda mais a velocidade, é possível visualizar a fluidização separadamente das duas camadas de partículas segregadas no leito, apresentando o comportamento visualizado pela Figura 4.10 ao término da corrida fluidodinâmica.

Esse comportamento inicial prevalece também para a exceção encontrada na MB093 com $L/D = 1,5$ e $X_{bu} = 75\%$, porém à medida que a velocidade do ar aumenta, bolhas ascendentes do ar promovem uma remistura vigorosa do leito, fazendo com que o mesmo apresente o comportamento exibido pela Figura 4.11 quando o ensaio finaliza.

Fu *et al.* (2019) observaram uma fluidização parcial no estado de mínima fluidização para as partículas maiores e mais pesadas da mistura binária e de acordo com Formisani *et al.* (2008), em um sistema empacotado com partículas bem misturadas, a transição para o estado completamente fluidizado começa com a segregação parcial ou total de seus componentes.

De acordo com Syahrul *et al.* (2003), no início da fluidização nem todas as partículas estão fluidizadas devido às forças de coesão do leito e normalmente as camadas superiores do leito fluidizam enquanto a camada inferior ainda permanece fixa. A fluidização completa do leito ocorre a uma certa velocidade do gás quando todas as partículas permanecem suspensas no leito e nesse ponto a queda de pressão é maior que o peso aparente do leito devido ao efeito das forças de coesão.

Pérez *et al.* (2017) avaliaram os fenômenos de mistura e segregação de misturas binárias compostas por partículas de bagaço de cana-de-açúcar e areia. O mecanismo de segregação visualizado pelos autores foi diferente do encontrado para a MB093 e MB129. As partículas de areia exibiram inicialmente um comportamento de *flotsam*, se movendo em direção à parte superior do leito, enquanto as partículas de biomassa permaneciam estáticas. Esse comportamento aconteceu devido às maiores razões de diâmetro encontradas para o conjunto biomassa/inerte que variou entre 3,2 e 42,2. Nesse arranjo, a segregação por diferença de tamanho prevaleceu no comportamento da mistura. Para as misturas com uma razão de diâmetros igual ou menor que 1, a segregação por densidade prevaleceu e o comportamento visualizado pelos autores foi similar ao descrito anteriormente para as misturas binárias de casca de mandioca e areia.

Já Oliveira *et al.* (2013) notaram que a relação diâmetro inerte/biomassa influenciou mais efetivamente na segregação do que as densidades dos mesmos. Um regime de fluidização

com menor segregação foi obtido para mistura binária composta por biomassa e areia de menor diâmetro.

De volta à Tabela 4.9, os maiores índices de fluidização foram obtidos para as misturas binárias de maior proporção e umidade de biomassa para os dois diâmetros de areia utilizados, indicando que uma proporção menor de inerte foi suficiente para quebrar as forças coesivas inerentes à biomassa úmida e proporcionar uma melhor fluidização. Além disso, uma maior proporção de biomassa leva a uma maior porosidade do leito, o que facilita a percolação do ar entre as partículas, como discutido anteriormente. Esse índice foi menor para as maiores proporções de inerte, provavelmente devido ao fenômeno de segregação em maior proporção observado durante a fluidização das misturas.

As Figuras 4.12 (a) e (b) mostram os diagramas de Pareto com os efeitos dos fatores L/D , X_{bu} e x_v sobre o índice de fluidização das misturas MB093 e MB129, respectivamente.

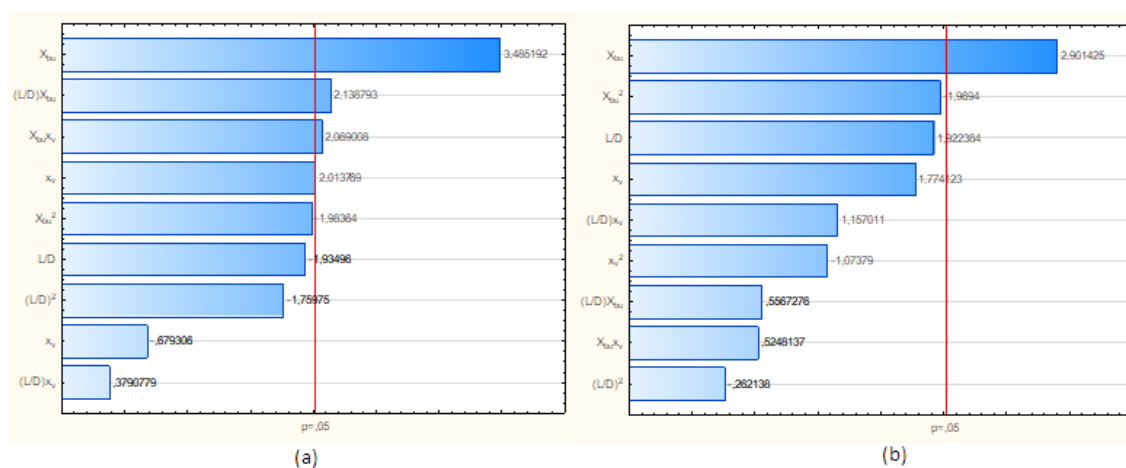


Figura 4.12 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre o índice de fluidização:

(a) MB093 e (b) MB129.

O teor de umidade foi o fator que mais influenciou no índice de fluidização, independentemente da mistura utilizada. Para a MB093, Figura 4.12 (a), houve também influência das interações lineares entre o teor de umidade e os demais fatores (L/D e x_v). Já para MB129, Figura 4.12 (b), o índice de fluidização foi influenciado apenas pelo termo linear do teor de umidade.

O sinal positivo desse fator infere que o índice de fluidização de cada mistura aumentou à medida que o teor de umidade da biomassa aumentou, dado que corrobora com a

análise realizada (Tabela 4.9), mas que é contrário ao que Bai e Si (2020) verificaram ao trabalhar com partículas de pinheiro-larício. Os autores não utilizaram partículas inertes nesses ensaios, sendo este um fator chave para auxiliar na quebra dos caminhos preferenciais fazendo com que a umidade dessas partículas não afetasse negativamente o índice de fluidização.

O arraste de partículas de biomassa para fora do leito também foi observado durante os ensaios fluidodinâmicos e os valores de percentagem de biomassa elutriada estão dispostos nas Tabela 4.11, 4.12 e 4.13, para as razões $L/D = 1$, 1,5 e 2 respectivamente.

Tabela 4.11 - Percentagem de biomassa elutriada em $L/D = 1$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)	Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)
MB093	10	25	1,35	MB129	10	25	6,38
		50	5,42			50	3,03
		75	1,89			75	7,51
	42,5	25	6,56		42,5	25	9,35
		50	0,34			50	0,84
		75	0,06			75	2,42
	75	25	4,21		75	25	1,84
		50	2,02			50	0,78
		75	2,67			75	0,25

Tabela 4.12 - Percentagem de biomassa elutriada em $L/D = 1,5$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)	Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)
MB093	10	25	1,07	MB129	10	25	4,74
		50	13,74			50	6,28
		75	24,24			75	38,41
	42,5	25	0,16		42,5	25	6,36
		50	1,40			50	2,09
		75	1,31			75	10,27
	75	25	0,76		75	25	1,37
		50	0,91			50	1,59
		75	0,45			75	2,14

Tabela 4.13 - Percentagem de biomassa elutriada em $L/D = 2$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)	Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Elutriado (%)
		25	5,01			25	14,05
	10	50	4,62		10	50	11,56
		75	22,23			75	39,74
		25	2,93			25	3,30
MB093	42,5	50	4,91	MB129	42,5	50	11,19
		75	8,68			75	24,29
		25	1,67			25	14,77
	75	50	2,72		75	50	8,23
		75	1,50			75	3,09

A partir da Tabela 4.11 é possível verificar que, para a menor condição de razão de leito estático, não houve uma tendência clara para os percentuais de elutriação de biomassa nas condições estudadas. De maneira geral, a elutriação observada foi pequena, não ultrapassando 10%, visto que o leito possui uma menor altura.

Para as razões de leito estático iguais a 1,5 e 2, Tabelas 4.12 e 4.13, é possível perceber que a elutriação das partículas sofre influência do teor de umidade e proporção de biomassa na mistura. De maneira geral, uma maior quantidade de partículas foi arrastada para fora do leito, à medida que a proporção aumentou e a umidade diminuiu. Uma menor influência da proporção é sentida quando as partículas de biomassa possuem uma umidade de 75% b.u., visto que não há alterações tão significativas para a percentagem de elutriação quando esse parâmetro é fixado. Partículas mais secas são menos suscetíveis aos efeitos coesivos e de adesão que exercem uma maior força peso e dificultam o arraste exercido pelo ar. E quanto mais partículas de biomassa presentes no leito, como discutido anteriormente, a porosidade do leito é aumentada, diminuindo a resistência à passagem do ar. De maneira geral, a MB129 apresentou uma maior percentagem de biomassa elutriada, fixando as mesmas condições de análise, em comparação com a MB093. O maior diâmetro do inerte requer maiores vazões de ar para que o leito fluidize completamente, como discutido anteriormente, então uma maior quantidade de partículas de biomassa é arrastada para fora do leito. Ao comparar entre as razões de leito estático, leitos rasos apresentaram os menores percentuais de elutriação, enquanto o leito profundo apresentou percentuais de elutriação levemente maiores que o leito intermediário.

É possível analisar de forma mais detalhada a influência da razão de leito estático, do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa, bem como do diâmetro do inerte utilizado, através dos comportamentos observados para as velocidades incipiente, mínima e de completa fluidização dos sistemas de misturas binárias estudados, como também, avaliar estatisticamente quais desses fatores e interações influenciaram nessas velocidades, o que será tratado nos tópicos subsequentes.

i) *Influência do diâmetro do inerte*

Os comportamentos típicos das velocidades fluidodinâmicas em função do diâmetro de partícula do inerte são exibidos na Figura 4.13 para a razão $L/D = 1,5$, nas diferentes condições estudadas. Os resultados para as razões $L/D = 1$ e 2 encontram-se no Apêndice F.

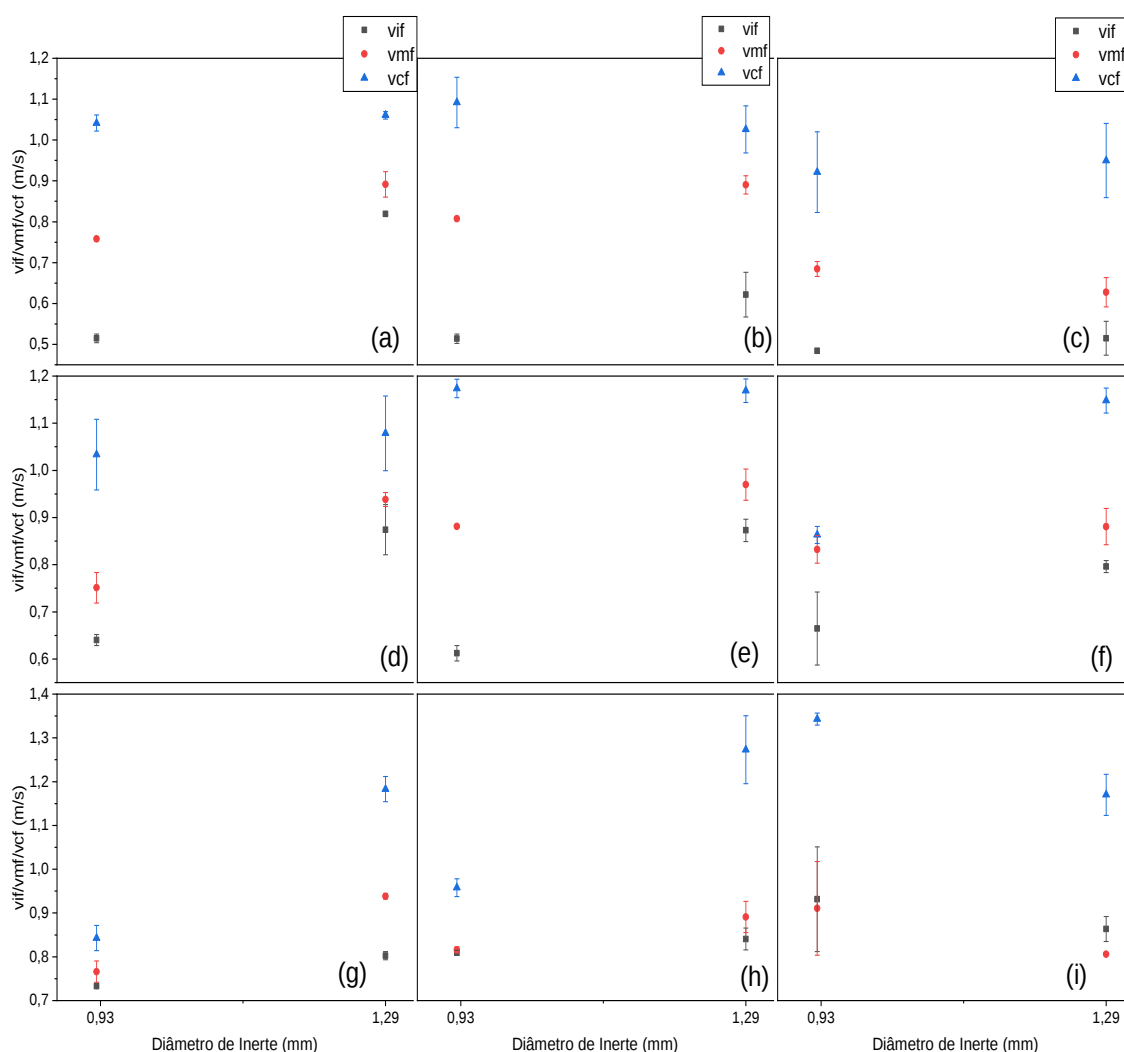


Figura 4.13 - Velocidades fluidodinâmicas em função do diâmetro do inerte para misturas binárias com $L/D = 1,5$. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$.

De forma geral, considerando as incertezas das medidas, as maiores velocidades foram observadas para o inerte de maior diâmetro em todas as razões de leito estático avaliadas, embora algumas exceções foram encontradas para a velocidade de completa fluidização em diferentes alturas de leito estático, Figura 4.13 (i). Quanto maior é diâmetro da partícula de inerte, maiores são as vazões de ar necessárias para contrabalancear a força peso das partículas e assim dar início à fluidização. Resultados similares foram obtidos por Vasconcelos *et al.* (2018) nos seus estudos de fluidização de misturas binárias contendo resíduos de sisal e areia.

Baseando-se ainda no diâmetro efetivo da mistura (d_{ef}), a MB129 possui $d_{ef} = 1,29$ mm, maior que o diâmetro efetivo da MB093, conforme reportado na Tabela 4.9. Pérez *et al.* (2017) observaram que a influência do diâmetro característico das partículas da mistura prevaleceu no comportamento fluidodinâmico, visto que foi notado uma maior velocidade de mínima fluidização conforme a fração mássica das partículas de biomassa aumentou, apesar da diminuição do peso aparente do leito. O diâmetro efetivo da mistura aumentou com a fração de biomassa que possuía um maior diâmetro em comparação ao inerte utilizado.

Diferentes tamanhos de partículas e composições resultam em diferentes interações partícula-partícula. A velocidade de completa fluidização está relacionada à fluidização das duas partículas envolvidas na mistura binária. A areia de menor diâmetro pode ter formado misturas mais coesivas com a biomassa em algumas configurações do leito, exercendo excepcionalmente uma influência mais significativa que aquela de misturas com maiores diâmetros efetivos, obtidos com o uso de partículas de areia de maior tamanho.

Ao utilizar os sólidos inertes nas misturas binárias com biomassa não foi observada a formação de *slugs* como na fluidização da biomassa pura, apesar da formação de caminhos preferenciais, indicativo da melhora da qualidade de fluidização da mistura. Esses resultados estão em consonância com os dados obtidos para o ângulo de repouso das misturas binárias, que diminuíram em relação à biomassa pura.

Esse fenômeno de *slug* foi visualizado na mistura binária composta por resíduo de sisal e areia de mesmo diâmetro, com 5% de fração mássica de biomassa nos estudos realizados por Vasconcelos *et al.* (2018). O mesmo também foi notado por Oliveira *et al.* (2013) para as misturas com fração mássica de biomassa de 15% para o bagaço de sorgo e resíduo de tabaco utilizando a areia como inerte.

ii) *Influência da razão L/D de leito estático*

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os comportamentos típicos das velocidades incipiente, de mínima e completa fluidização, em função da razão L/D, para MB093 e MB129, respectivamente, nas diferentes condições de umidade e proporção volumétrica da biomassa estudadas.

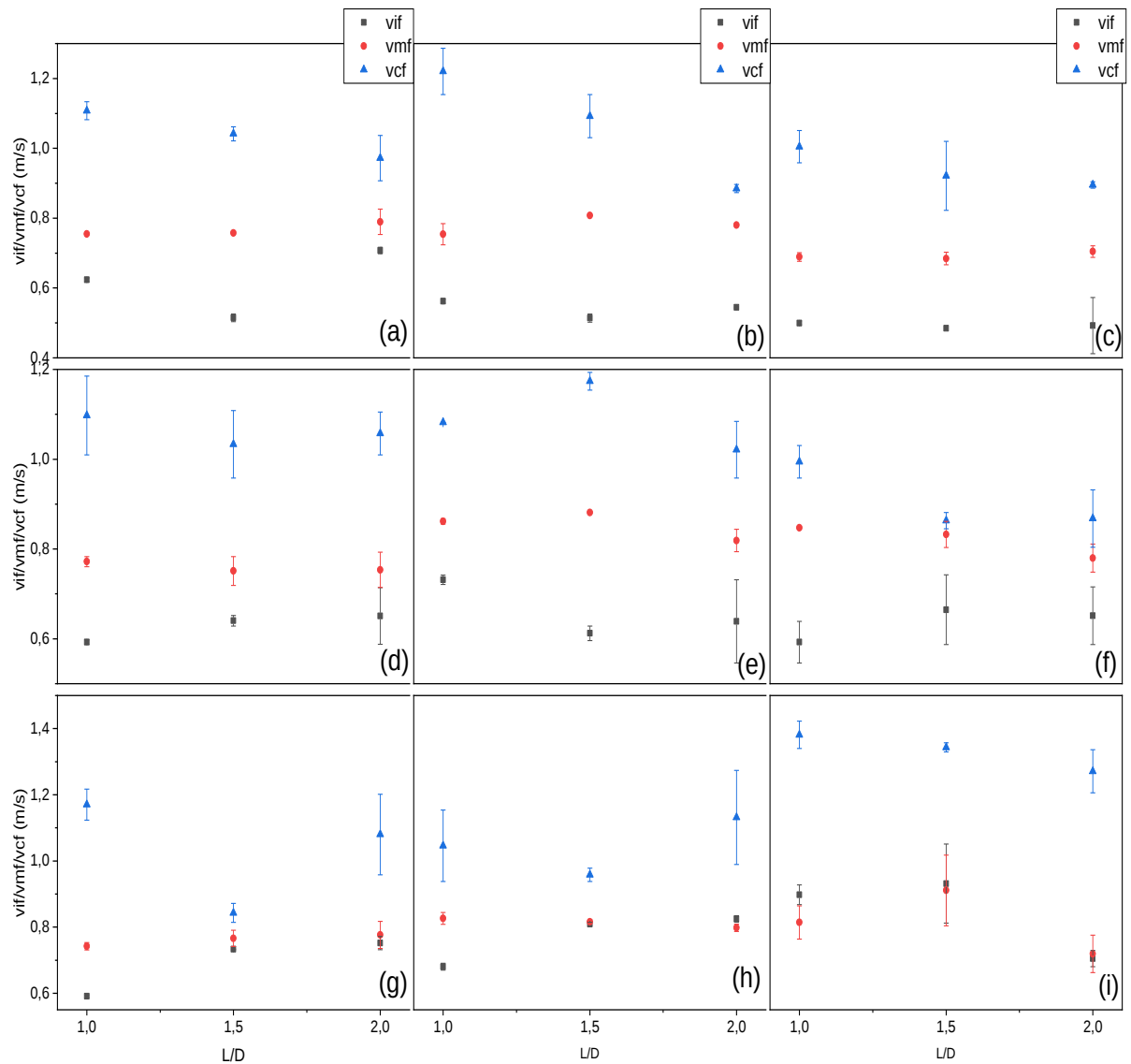


Figura 4.14 - Velocidades fluidodinâmicas em função da razão L/D, para MB093. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$.

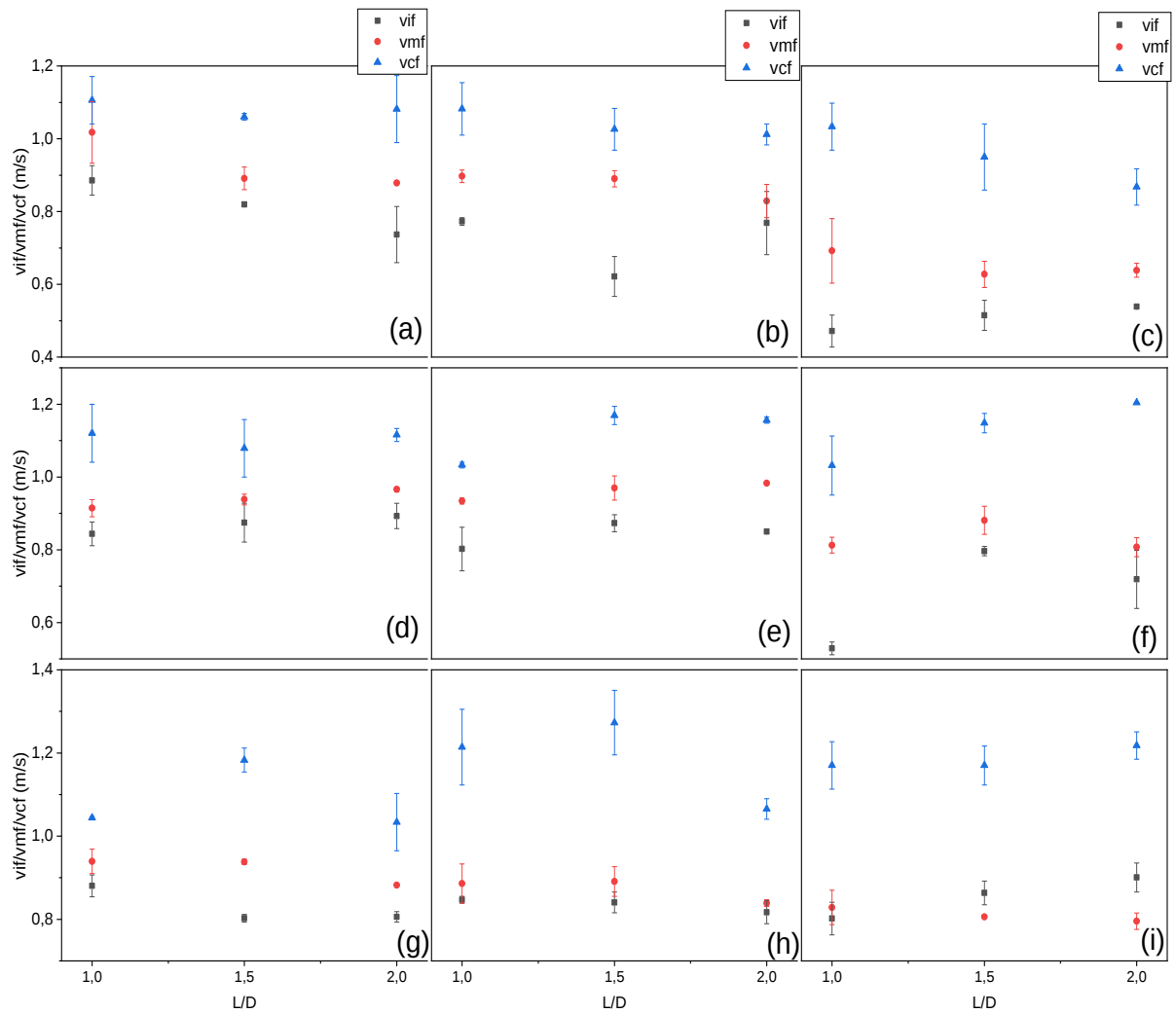


Figura 4.15 - Velocidades fluidodinâmicas em função da razão L/D , para MB129. $X_{bu} = 10\%$: (a) $x_v = 25\%$ (b) $x_v = 50\%$ (c) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 42,5\%$: (d) $x_v = 25\%$ (e) $x_v = 50\%$ (f) $x_v = 75\%$; $X_{bu} = 75\%$: (g) $x_v = 25\%$ (h) $x_v = 50\%$ (i) $x_v = 75\%$.

De forma geral, levando em consideração o erro atrelado às medidas, a razão de leito estático não influenciou de forma significativa a v_{mf} em todas as proporções volumétricas e umidades de biomassa investigadas, independentemente do inerte utilizado. Para elucidar essa análise, os diagramas de Pareto com os efeitos sobre as velocidades de mínima fluidização das misturas MB093 e MB129 são apresentados nas Figuras 4.16 (a) e (b), respectivamente.

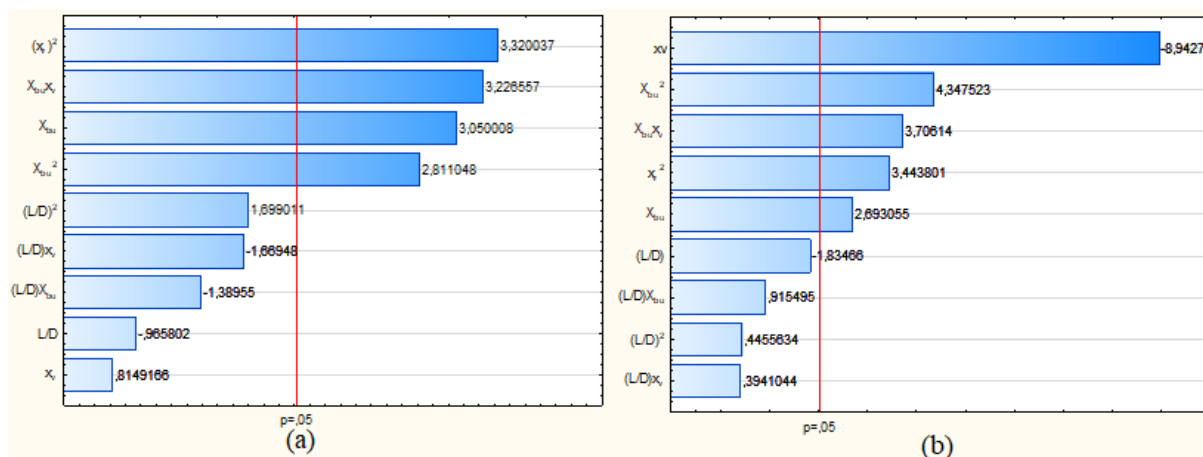


Figura 4.16 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade de mínima fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.

Ao observar a Figura 4.16 (a) e (b), é possível inferir que não houve influência do termo da razão de leito estático, seja linear, quadrático ou interativo, em nenhuma mistura binária analisada, já que permanece abaixo do nível de significância. Para a MB093, Figura 4.16 (a), a velocidade de mínima fluidização sofreu forte influência do termo quadrático da fração volumétrica de biomassa, da interação linear entre o teor de umidade e a fração volumétrica, e dos termos linear e quadrático do teor de umidade. Já para a MB129, Figura 4.16 (b), além dos fatores citados, houve também o efeito linear negativo da fração volumétrica da biomassa, sendo este o mais significativo. O termo da fração volumétrica, seja linear ou quadrático, foi o mais significativo entre as misturas binárias analisadas, resultado esse, que será melhor discutido posteriormente, na análise da influência desse fator sobre as velocidades fluidodinâmicas.

De volta à Figura 4.15, é possível observar que as v_{if} e v_{cf} apresentaram diferentes comportamentos conforme a proporção e umidade da biomassa variaram, indicando que a razão de leito estático possui grande influência sobre essas velocidades fluidodinâmicas. Por sua vez, tal comportamento não foi observado por Formisani *et al.* (2008), em que as velocidades incipiente e de completa fluidização de diferentes misturas binárias contendo esferas de vidro e aço não sofreram influência de fatores geométricos. Essa diferença pode estar associada ao fato de os autores trabalharem somente com partículas esféricas que não possuem diferentes formas e arranjos em comparação com partículas de biomassa.

Foram observados nos estudos desenvolvidos por Bai e Si (2020) sobre a influência da razão de leito estático que o ar penetrava facilmente um leito de partículas cuja altura do

leito estático correspondia à metade do diâmetro da coluna. Já para um leito muito grande, a queda de pressão observada foi muito elevada, causando coalescência de bolhas durante o incremento de fluxo do gás, diminuindo a sua estabilidade. Portanto, a altura escolhida pelos autores para desenvolver os experimentos fluidodinâmicos de misturas binárias correspondeu à altura intermediária entre os leitos raso e profundo, igual ao tamanho do diâmetro da coluna. Já Emiola-Sadiq *et al.* (2021) trabalharam com uma razão $L/D = 1,5$ para todas as misturas binárias durante seus estudos de segregação.

Trabalhar na razão $L/D = 2$ pode ser prejudicial devido a maior facilidade para arraste, pois é desejável que a mistura permaneça no leito o maior tempo de residência possível para maiores trocas de calor e massa. Mesmo com o uso de tela no topo da coluna, problemas como acúmulo de partículas na parte superior foram identificados, podendo causar alterações na fluidodinâmica, como a elevação da queda de pressão no leito causada pela obstrução da passagem de ar. Em contrapartida, uma altura de leito muito pequena apresenta os mesmos tipos de problemas visualizados por Bai e Si (2020), prejudicando a fluidodinâmica do processo. Targino *et al.* (2021) ainda observaram a elutriação de partículas do leito quando aumentou a vazão do ar no leito fluidizado mesmo em razões L/D inferiores a 1.

iii) *Influência do teor de umidade da biomassa*

A fim de identificar quais das variáveis independentes empregadas no planejamento experimental influenciaram significativamente a velocidade incipiente de fluidização (v_{if}), foram construídos os diagramas de Pareto apresentados na Figura 4.17 (a) e (b), os quais mostram os efeitos principais e de interação das variáveis independentes (L/D , X_{bu} e x_v) sobre v_{if} das misturas binárias biomassa-areia de 0,93 mm e biomassa-areia de 1,29 mm, respectivamente.

A velocidade incipiente de fluidização foi influenciada fortemente pelo teor de umidade, de forma linear e positiva, independentemente do tipo de mistura binária utilizado. Ou seja, quanto maior a umidade da biomassa, maior v_{if} . Para a MB093, Figura 4.17 (a), a interação linear entre o teor de umidade e a fração volumétrica de biomassa apresentou efeito positivo sobre v_{if} , enquanto a interação linear entre a razão L/D de leito estático e a fração volumétrica de biomassa teve efeito negativo. Já para a MB129, Figura 4.17 (b), além dos fatores elencados, houve também um significativo efeito linear negativo da fração volumétrica de biomassa.

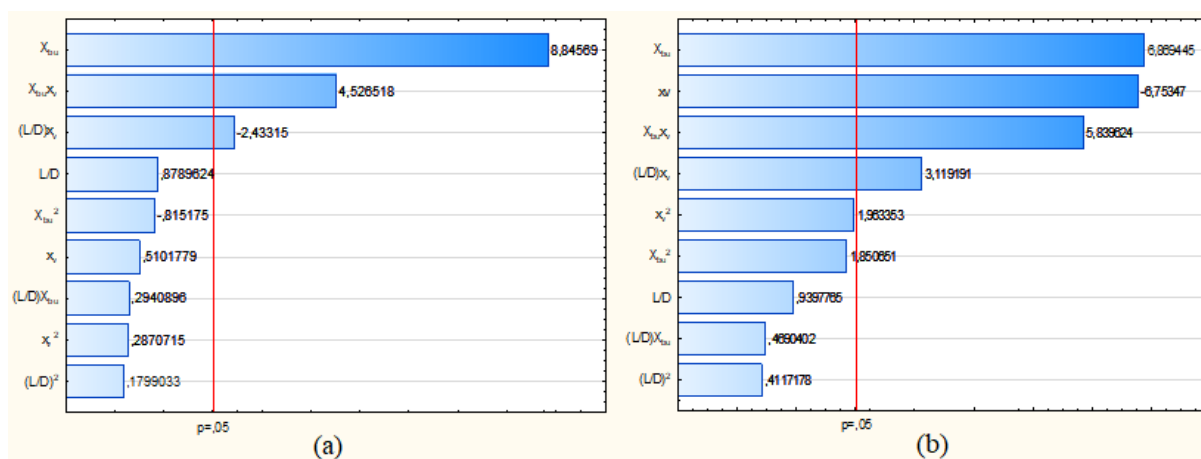


Figura 4.17 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade incipiente de fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são mostradas as superfícies de resposta para as velocidades de fluidização incipientes dos leitos contendo MB093 e MB129, respectivamente, a partir das quais podem ser melhor visualizados os efeitos das condições empregadas nos experimentos.

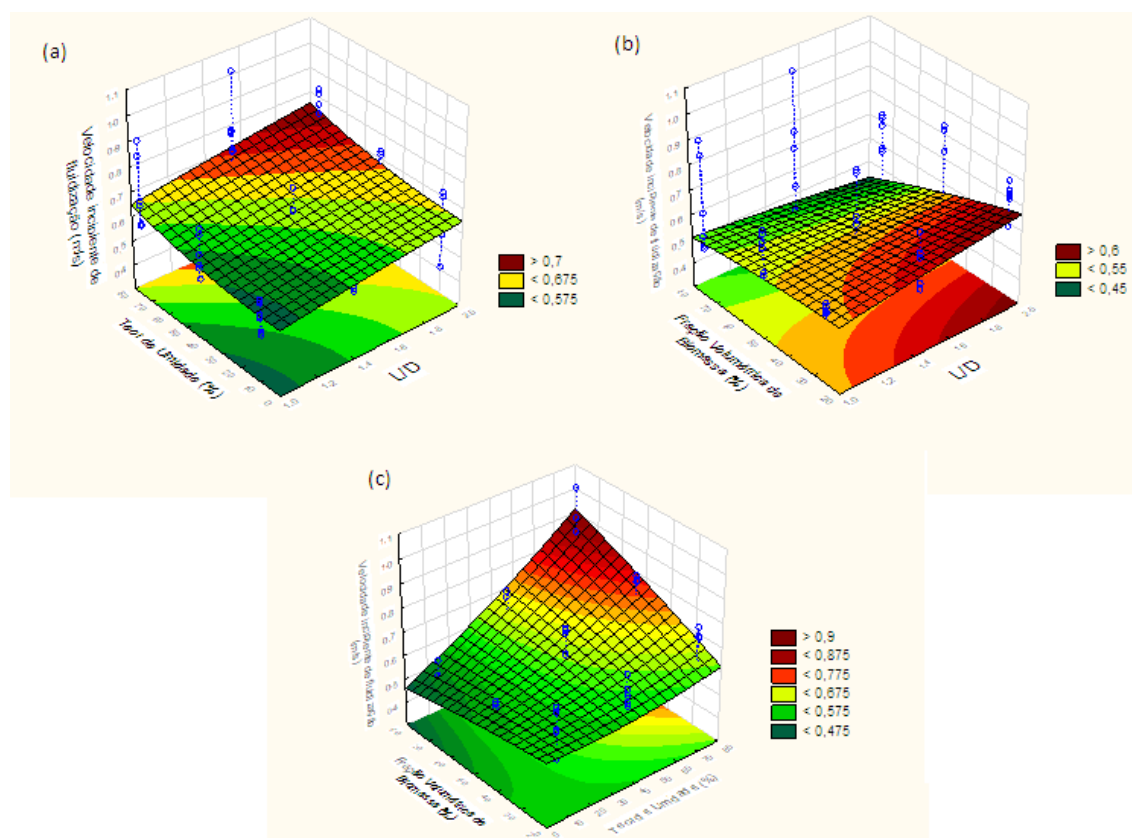


Figura 4.18 - Superfícies de resposta para a velocidade incipiente de fluidização da MB093 como função da (a) razão L/D e teor de umidade com $x_v = 25\%$; (b) razão L/D e fração volumétrica de biomassa com $X_{bu} = 10\%$; e (c) teor de umidade de biomassa e fração volumétrica de biomassa com $L/D = 1$.

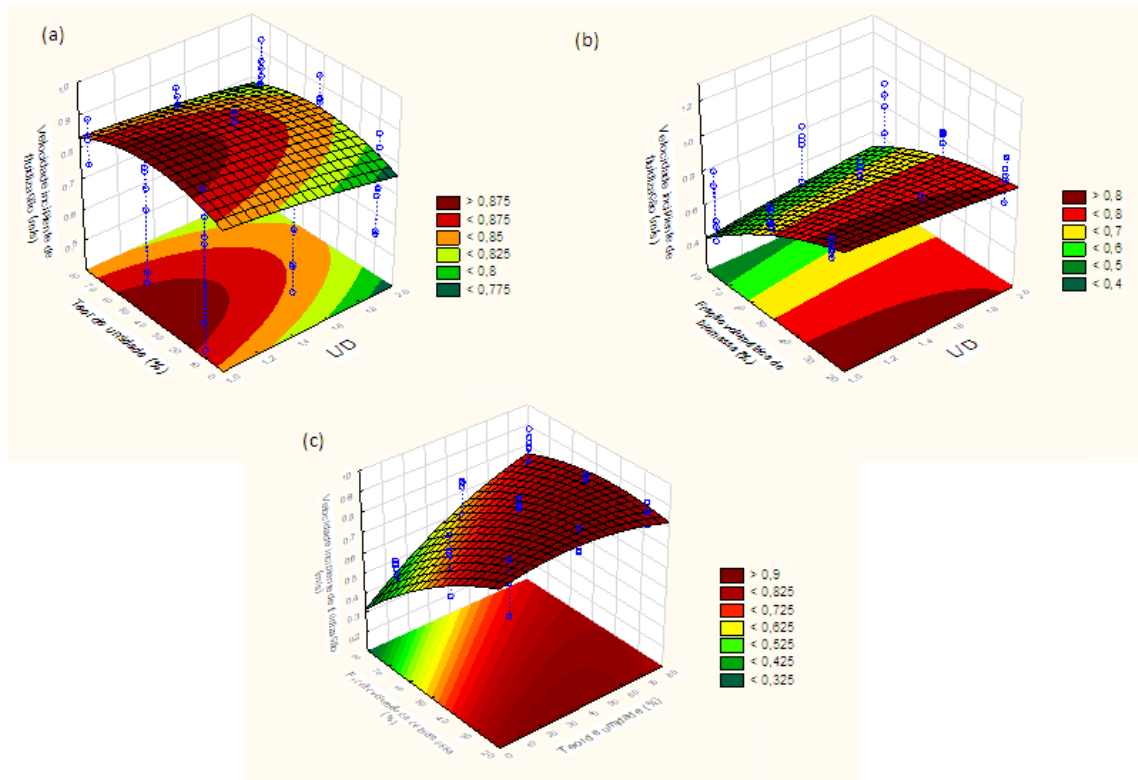


Figura 4.19 - Superfícies de resposta para a velocidade incipiente de fluidização da MB129 como função (a) da razão L/D do leito e do teor de umidade da biomassa, para $x_v = 25\%$; (b) da razão L/D do leito e da fração volumétrica de biomassa, para $X_{bu} = 10\%$; e (c) do teor de umidade e da fração volumétrica de biomassa, para $L/D = 1$.

As menores velocidades incipientes de fluidização de MB093 foram alcançadas para um menor teor de umidade e razão L/D, Figura 4.18 (a), e de maneira geral em maiores frações volumétricas de biomassa, Figura 4.18 (b) e (c). A análise de regressão realizada forneceu, com um coeficiente de determinação de 0,7078, o seguinte modelo empírico para descrever a dependência funcional de v_{if} com as variáveis independentes estatisticamente significantes:

$$v_{if} = 0,654 + 0,220X_2 - 0,074X_1X_3 + 0,138X_2X_3 \quad (22)$$

As superfícies de resposta para v_{if} de MB129, mostradas na Figura 4.19, apresentaram comportamentos diferentes daqueles observados para a MB093, à medida que a região das curvas onde a velocidade incipiente de fluidização é minimizada corresponde a uma região muito pequena, que de maneira geral está associada à região de maior fração volumétrica de

biomassa. Esse comportamento corrobora com a discussão realizada no tópico sobre a influência do diâmetro do inerte, em que as velocidades fluidodinâmicas foram fortemente afetadas, e os menores valores foram alcançados quando utilizou-se a areia de menor diâmetro na mistura. O modelo empírico que descreve a dependência funcional de v_{if} da MB129 com os fatores significativos é expresso, com R^2 de 0,7678, pela equação:

$$v_{if} = 0,773 + 0,159X_2 - 0,155X_3 + 0,088X_1X_3 + 0,166X_2X_3 \quad (23)$$

Para uma análise mais detalhada, as Figuras 4.20 a 4.22 apresentam os comportamentos típicos das velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade das partículas de biomassa na MB093 nas diferentes condições estudadas.

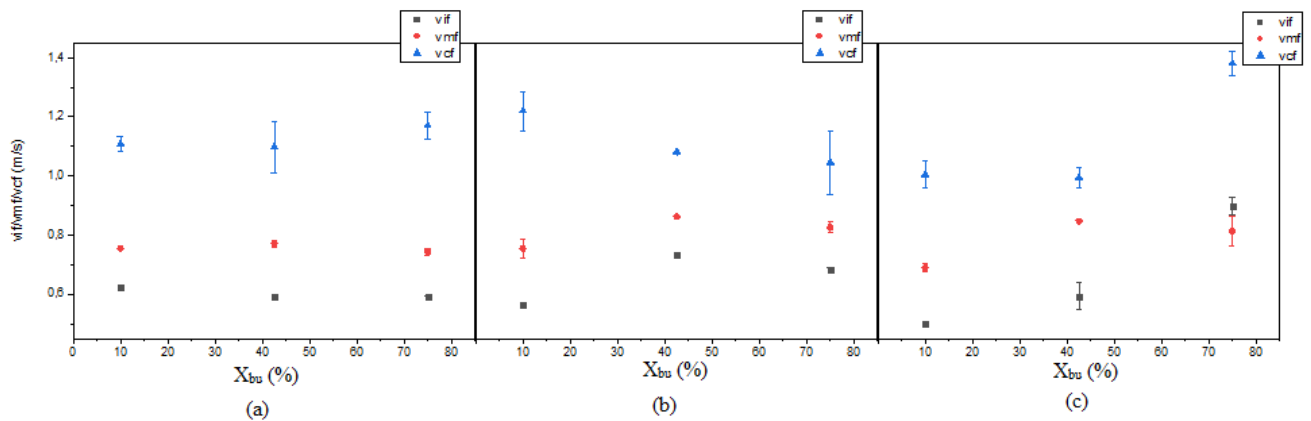


Figura 4.20 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 1$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

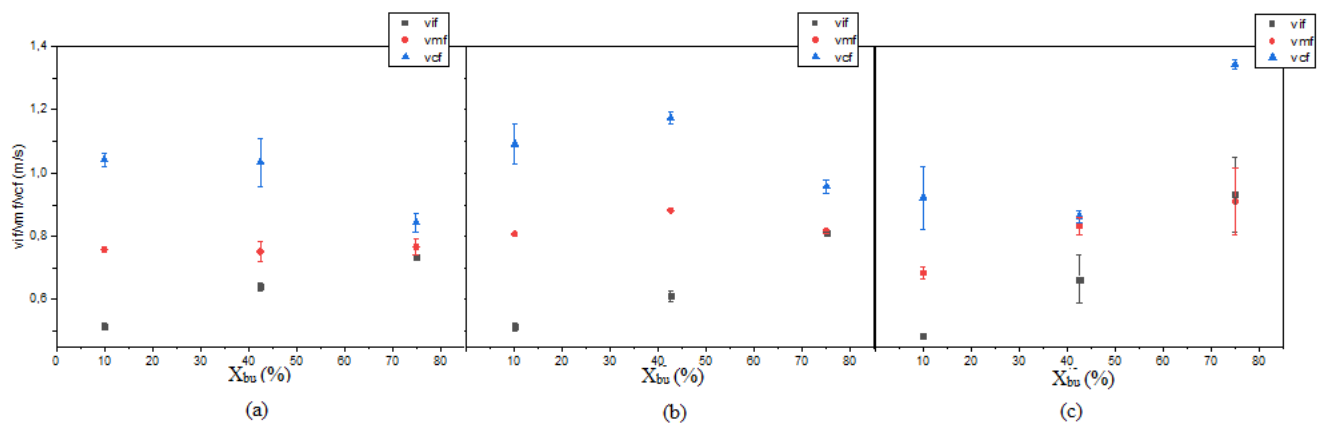


Figura 4.21 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 1,5$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

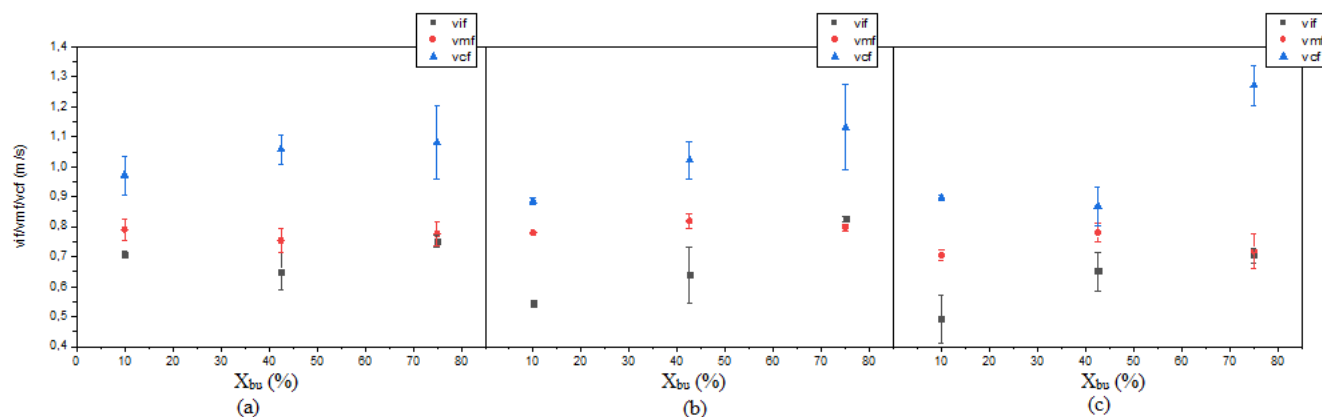


Figura 4.22 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 2$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

É possível inferir a partir da Figura 4.20 (a) que o aumento do teor de umidade da biomassa não causou alterações significativas nas velocidades fluidodinâmicas, nas condições de fração volumétrica de 25% e razão leito estático $L/D = 1$. Ao comparar com as Figuras 4.21 e 4.22 é possível inferir que essa foi a condição que exibiu uma menor influência da umidade, visto que praticamente não houve alterações das velocidades nas três umidades analisadas. Além disso, as curvas fluidodinâmicas nessa condição estão praticamente sobrepostas (vide Apêndice E), indicando que não houve alterações significativas causadas pela umidade das partículas, e essas curvas vão se distanciando à medida que a razão L/D e fração volumétrica de biomassa aumentam. Ao se empregar um leito raso e uma menor quantidade de biomassa frente à de inerte, menores são os efeitos associados à umidade como a formação de pontes líquidas que aumentam as forças de coesão entre as partículas, que não são suficientes para dificultar o escoamento do ar.

Para a razão de leito estático igual a 1,5, a velocidade incipiente de fluidização aumenta com o teor de umidade da partícula, Figura 4.21, já que para uma maior umidade, maior é a dificuldade do ar em vencer as forças de coesão existentes, além do fator de compactação das partículas, e iniciar a fluidização das partículas mais leves. Porém, com exceção para $x_v = 75\%$, há uma diminuição da velocidade de completa fluidização com o aumento da umidade. Esse resultado pode ser melhor compreendido pela análise dos comportamentos fluidodinâmicos mostrados nas curvas características da Figura 4.23. Ao se aumentar a umidade da biomassa, observa-se uma diminuição da frente de fluidização parcial, levando o leito à sua fluidização completa em velocidades menores.

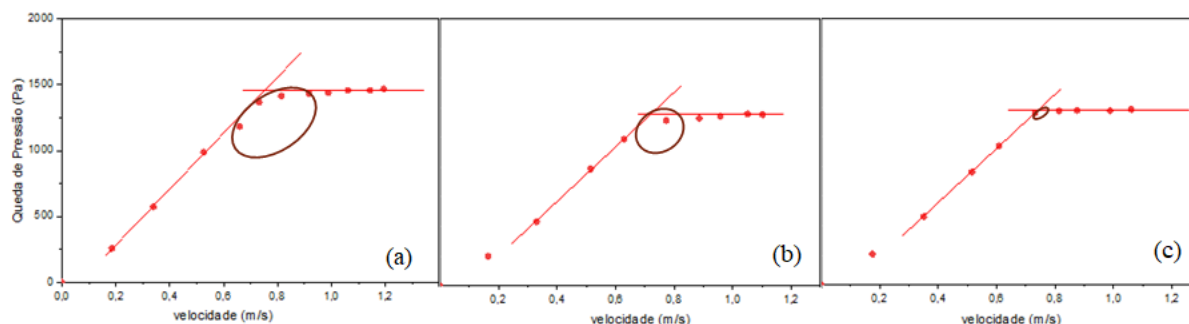


Figura 4.23 - Curvas características da MB093 na razão $L/D = 1,5$ e $x_v = 25\%$:
(a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$

Isso acontece porque ao aumentar a umidade, a v_{mf} da biomassa úmida (0,56 m/s) se aproxima mais da v_{mf} do inerte utilizado (0,70 m/s), fazendo com que as partículas fluidizem em instantes próximos.

Bai e Si (2020) trabalharam com partículas de areia com v_{mf} próxima à v_{mf} das partículas de biomassa para evitar segregação da mistura. Visualmente, ainda foi observado na razão de leito estático de 1,5, em todas as proporções de biomassa utilizadas, uma remistura dos componentes do leito para a biomassa com $X_{bu} = 75\%$, logo após a segregação inicial que ocorria, levando à um leito parcialmente misturado ao término da corrida fluidodinâmica, como mostrado anteriormente na Figura 4.11. Essa remistura citada não foi visualizada para as outras razões de leito estático utilizadas. Para um leito mais profundo, houve arraste de partículas antes de ocorrer alguma possível remistura, já para o leito raso, devido à passagem do ar com mais facilidade esse fenômeno não foi observado.

De acordo com Emiola-Sadiq *et al.* (2021), a mistura perfeita é um desafio durante a fluidização de misturas binárias devido às diferentes características dos componentes. Em velocidades mais altas do gás, as forças de mistura da partícula tendem a ser maiores que as forças de segregação, alcançando um estado de equilíbrio dinâmico que dá origem a uma diferente distribuição dos sólidos na mistura binária. Uma remistura da mistura binária de diferentes inertes avaliada por Formisani *et al.* (2008) também foi visualizada com o aumento da velocidade do gás, para todas as razões de densidades trabalhadas, diferentemente do que ocorreu na fluidização da MB093. Essa diferença é devida à faixa de razão de densidade trabalhada pelos autores, variando de 1,70 a 3,06 nos estudos de segregação por densidade, inferior à faixa trabalhada na MB093.

A exceção para tendência da v_{cf} citada anteriormente e encontrada em $x_v = 75\%$ pode ser justificada pela quantidade muito superior de biomassa utilizada, que faz com que os efeitos coesivos sejam muito significativos. Devido a essas forças estarem presentes de maneira mais acentuada, há formações de caminhos preferenciais que torna necessário o uso de maiores vazões de ar para quebrá-los, com isso, as velocidades de completa fluidização alcançam maiores valores para a biomassa de maior umidade.

Para as misturas binárias de $x_v = 75\%$ e $X_{bu} = 75\%$, em todas as razões de leito estático testadas houve uma inversão entre a v_{if} e v_{mf} , ou seja, a velocidade inicial de fluidização apresentou um valor maior que a velocidade de mínima fluidização, um resultado não muito comum. Porém, essa tendência pode ser explicada devido às forças coesivas presentes na biomassa úmida, que aumentam consideravelmente a queda de pressão no leito, resultando em um pico nas curvas fluidodinâmicas características, que podem ser visualizados no Apêndice E. Esse fato era esperado já que houve um aumento na proporção dessa biomassa no leito e por consequência maiores forças coesivas atuando na fluidodinâmica do mesmo.

Esse mesmo comportamento foi visualizado por Formisani *et al.* (2008) nas curvas características de misturas binárias de esferas de vidro e aço, com fração volumétrica de 50%, segregadas por densidade. Apesar das partículas utilizadas serem inertes e não apresentarem a influência da umidade, a formação de picos de queda de pressão nas curvas características e inversão da tendência da v_{if} e v_{mf} foram observados. Esse comportamento indica que a queda de pressão total é maior do que o peso aparente do leito por unidade de seção transversal de área, ou seja, parte do leito, se não todo, ainda encontra-se em leito fixo. Resultado similar foi reportado por Vasconcelos *et al.* (2018).

Para $L/D = 2$, Figura 4.22, essa mesma inversão, verificada de forma unânime para a proporção de 75% de biomassa, foi também visualizada para a proporção de 50% somente nessa razão de leito estático. Como a altura do leito corresponde ao dobro de seu diâmetro, uma maior quantidade de biomassa foi utilizada em comparação às outras razões nessa mesma proporção, de modo que as forças coesivas foram suficientemente fortes para a formação do pico de queda de pressão na curva fluidodinâmica. Leitos mais profundos tendem a formar caminhos preferenciais com mais facilidade, já que o ar tende a procurar esses caminhos para passar e partículas úmidas tendem a se aglomerar de forma mais coesa. Fato esse pôde ser observado ao término da corrida fluidodinâmica como ilustra a Figura 4.24, que mostra o topo da coluna do leito fluidizado após o ensaio da mistura binária com a biomassa de $X_{bu} = 75\%$, $x_v = 50\%$.



Figura 4.24 - Caminho preferencial observado após ensaio com a mistura binária composta por biomassa de $X_{bu} = 75\%$ e $x_v = 50\%$, e areia de 0,93 mm de diâmetro.

As Figuras 4.25 a 4.27 apresentam os comportamentos típicos das velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade das partículas de biomassa, para a MB129, nas diferentes condições investigadas.

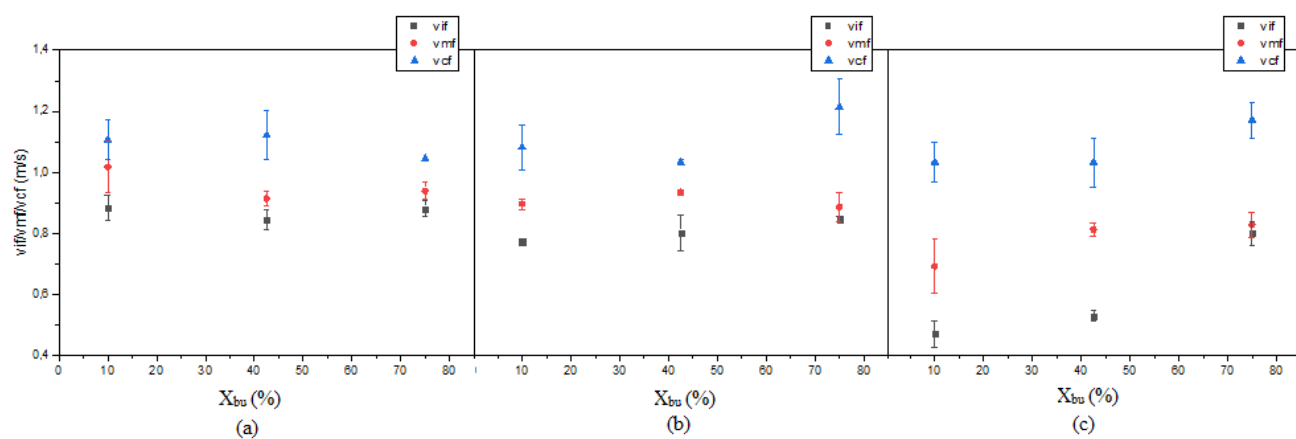


Figura 4.25 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

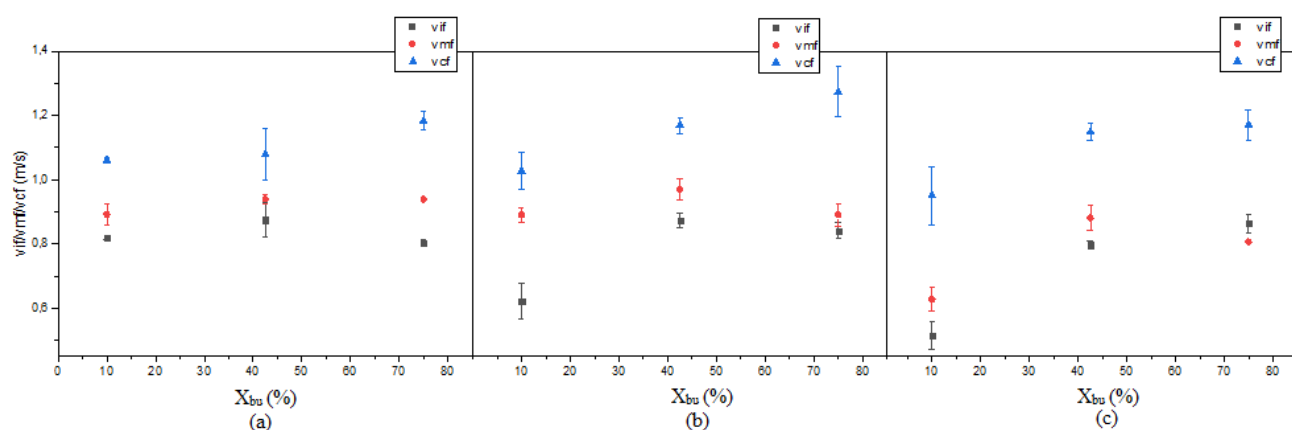


Figura 4.26 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1,5$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

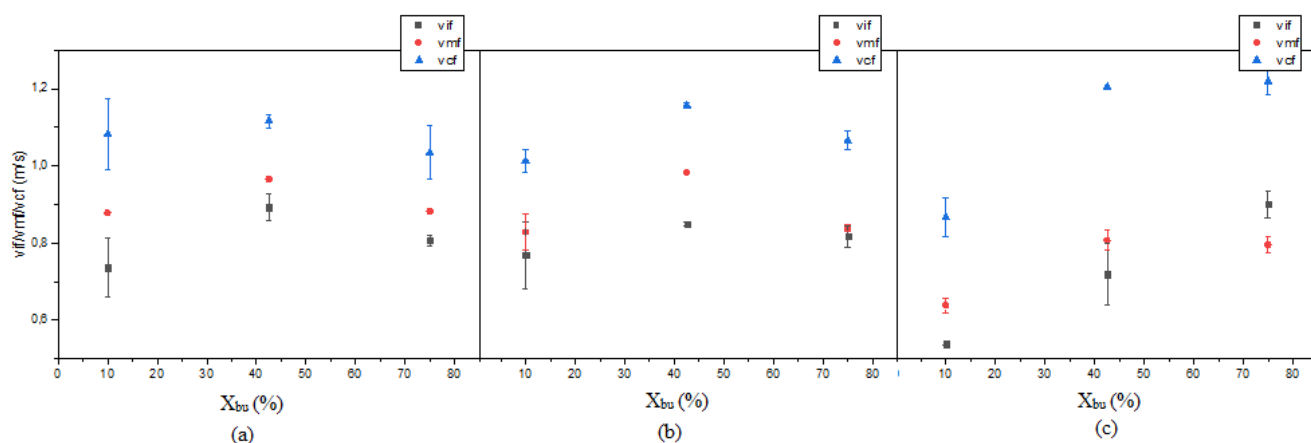


Figura 4.27 - Velocidades fluidodinâmicas em função do teor de umidade da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 2$: (a) $x_v = 25\%$, (b) $x_v = 50\%$ e (c) $x_v = 75\%$.

Ao observar a Figura 4.25, assim como mencionado para a mistura com o inerte de menor diâmetro, é possível inferir que não há influência significativa da umidade nos valores das velocidades estudadas para a proporção volumétrica de biomassa de 25% e razão $L/D = 1$. Nessa razão de leito estático, a v_{cf} apresenta tendência similar para as proporções de 50% e 75% de biomassa, apresentando um comportamento praticamente constante para $X_{bu} = 10$ e 42,5% até aumentar seu valor em $X_{bu} = 75\%$. Este comportamento está dentro do esperado, já que para uma maior umidade maiores vazões de ar são necessárias. Essa influência da umidade é vista ainda para a v_{if} na maior proporção de biomassa, em que apresenta uma tendência de crescimento. Apesar do leito raso proporcionar uma passagem mais fácil do ar, o inerte utilizado é de maior diâmetro em comparação ao anterior, apesar de ambos pertencerem ao grupo D da classificação de Geldart, implicando em maiores vazões de ar para fluidizar as partículas.

Para $L/D = 1,5$, Figura 4.26, é possível observar também uma tendência de crescimento de v_{cf} , em todas as proporções de biomassa, à medida que a umidade aumenta. Para a proporção de 25%, a v_{if} diminui ao aumentar a umidade da biomassa de 42,5 a 75% b.u., indicando que as interações provenientes das forças coesivas devido à umidade não foram suficientes para fazer a v_{if} aumentar, e o inerte (que está presente em maior quantidade) pode ter auxiliado para quebrá-las. A v_{mf} apresenta um comportamento semelhante para as menores proporções de biomassa estudadas, mas difere para a proporção de 75%, visto que a maior proporção de biomassa sofre um impacto maior na mudança de umidade, pois há uma maior quantidade de partículas no leito.

Apesar de também de ter sido constatada uma inversão entre a v_{if} e v_{mf} , Figuras 4.25 (c), 4.26 (c) e 4.27 (c), associada aos picos de queda de pressão que precedem a formação de caminhos preferenciais para todas as razões L/D na proporção volumétrica de 75% de biomassa, não ocorreu a remistura dos componentes do leito para a umidade de 75% utilizando o inerte de maior diâmetro (MB129). Devido à diferença de diâmetro entre os inertes, a $v_{mf} = 0,93$ m/s da areia de $d_p = 1,29$ mm é bem superior à v_{mf} da biomassa pura (0,56 m/s), e somados à maior diferença na massa específica, contribuem para a segregação da mistura.

Para o leito mais profundo, Figura 4.27, não foram observadas mudanças significativas na tendência das velocidades para as proporções menores, indicativo de que até a proporção de 50% não houve impacto significativo nas velocidades estudadas. A mudança foi perceptível para a proporção de 75%, devido maior influência das forças coesivas, conforme explicado anteriormente.

iv) *Influência da proporção volumétrica de biomassa*

Nas Figuras 4.28 (a) e (b) são apresentados os diagramas de Pareto para MB093 e MB129, respectivamente, com a finalidade de avaliar a influência dos fatores sobre as velocidades de completa fluidização (v_{cf}) dessas misturas.

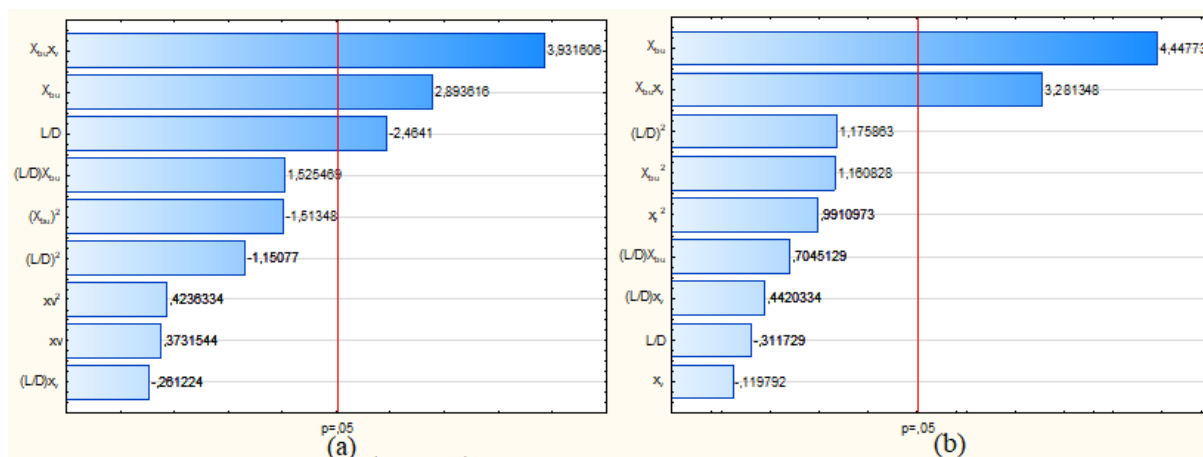


Figura 4.28 - Diagrama de Pareto com os efeitos de fatores sobre a velocidade de completa fluidização: (a) MB093 e (b) MB129.

O diagrama da Figura 4.28 (a) mostra que para a M093 a interação linear entre o teor de umidade e a fração volumétrica de biomassa, e o termo linear do teor de umidade influenciaram positivamente v_{cf} , enquanto a razão L/D de leito estático teve efeito linear negativo. Já para a MB129, somente o termo linear do teor de umidade e sua interação linear com a fração volumétrica de biomassa exerceram efeitos significativos e positivos sobre v_{cf} .

Na investigação dos fatores que influenciaram a velocidade de completa fluidização de misturas binárias com resíduo de sisal e areia, Vasconcelos *et al.* (2018) verificaram que os termos que mais afetam essa velocidade foram a fração mássica de biomassa e a interação entre a fração mássica e diâmetro do inerte utilizado.

As Figuras 4.29 a 4.31 apresentam os comportamentos típicos das velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica das partículas de biomassa, para a MB093, nas diferentes condições estudadas, para uma melhor análise desse fator.

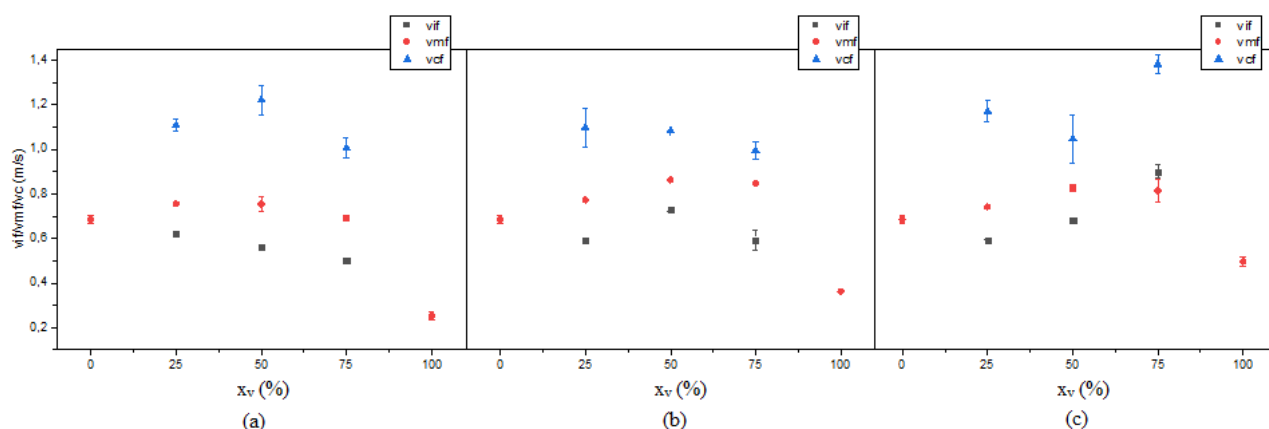


Figura 4.29 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com L/D = 1: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42.5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

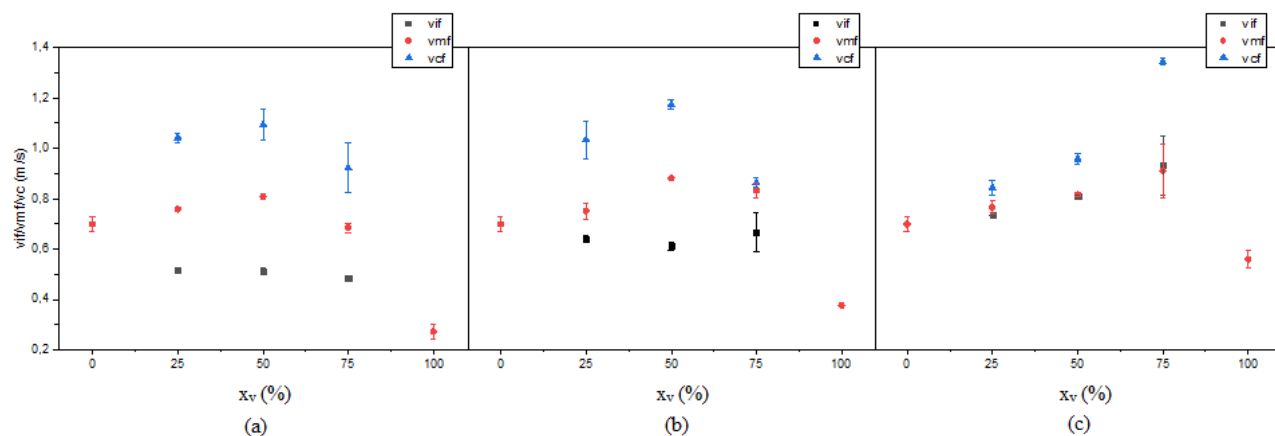


Figura 4.30 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 1,5$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

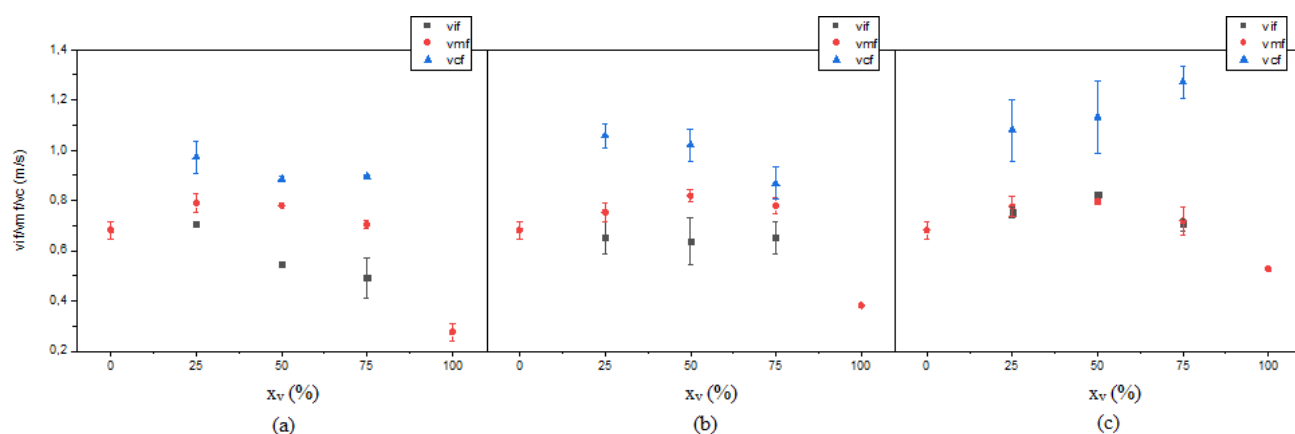


Figura 4.31 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB093 com $L/D = 2$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

Ao observar a Figuras 4.29 (a) é possível visualizar uma tendência de diminuição da v_{if} com o aumento da proporção da biomassa com $X_{bu} = 10\%$, e que se repete em todas as razões de leito estático trabalhadas, Figuras 4.30 (a) e 4.31 (a). Já para v_{mf} e v_{cf} , essa queda só foi constatada ao aumentar x_v de 50% para 75%. Um resultado diferente foi observado por Pérez *et al.* (2017) em seus estudos fluidodinâmicos de misturas binárias do bagaço de cana-de-açúcar e areia, em que a velocidade de mínima fluidização aumentou conforme a fração mássica da biomassa aumentava. Porém, o teor de umidade da biomassa não foi especificado. Sem a influência da umidade, ao aumentar a proporção da biomassa na mistura espera-se que as velocidades tendam a se aproximar das velocidades para a biomassa pura.

Já Formisani *et al.* (2008) observaram uma tendência de queda para a v_{if} à medida que a fração de *flotsam* aumentava em um sistema composto de misturas segregadas por densidade, enquanto a v_{cf} permaneceu praticamente constante até uma fração de *flotsam* igual a 0,7. Comportamento similar ao apresentado para a v_{if} na Figura 4.29 (a), considerando o erro envolvido nas medidas, e que difere para as Figuras 4.29 (b) e (c) que sofrem uma maior influência da umidade das partículas de biomassa.

Para umidade de 42,5%, Figuras 4.29 (b), 4.30 (b) e 4.31 (b), a v_{if} permanece praticamente constante até a proporção de 75% de biomassa e cai para a biomassa pura. Ou seja, a fração volumétrica de biomassa não influenciou nessa velocidade e as misturas binárias possuem v_{if} próxima à v_{mf} da areia pura. Já a v_{mf} é crescente até a proporção de 50% de biomassa, seguida de queda até a biomassa pura ($x_v = 100\%$). E a v_{cf} apresentou uma tendência de queda para todas as razões L/D. Fu *et. al* (2019) observaram em seus estudos de velocidade de mínima fluidização para beneficiamento de carvão seco que para uma fração de volume abaixo de 50% para partículas de areia, carvão ou gangue, a velocidade de mínima fluidização das misturas se aproximaram de um leito de monopartículas de magnetita.

As misturas com $X_{bu} = 75\%$ e $x_v = 75\%$, Figuras 4.29 (c), 4.30 (c) e 4.31 (c), alcançaram as maiores velocidades de completa fluidização pelas mesmas justificativas abordadas no tópico da influência da umidade. Nesta fração, há uma pequena elevação da v_{if} devido à inversão sofrida pela presença de picos no gráfico fluidodinâmico e que foram discutidos anteriormente. Neste mesmo teor de umidade prevaleceu uma tendência de elevação das v_{if} , v_{mf} e v_{cf} com o aumento da proporção da biomassa, até a queda do valor da v_{mf} para biomassa pura ($x_v = 100\%$).

O comportamento fluidodinâmico de misturas binárias com biomassa de bagaço de sorgo, resíduos de fumo e casca de soja foi avaliado em diferentes frações de biomassa no estudo desenvolvido por Oliveira *et al.* (2013). Os autores concluíram que esse comportamento está intimamente relacionado ao tamanho e forma da biomassa, já que partículas mais irregulares como o bagaço de sorgo, apresentaram um comportamento distinto em comparação aos outros tipos de biomassa, exibindo menores velocidades de mínima fluidização para maiores proporções do bagaço.

As Figuras 4.32 a 4.34 apresentam os comportamentos típicos das velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica das partículas de biomassa, para a MB129, nas diferentes condições estudadas.

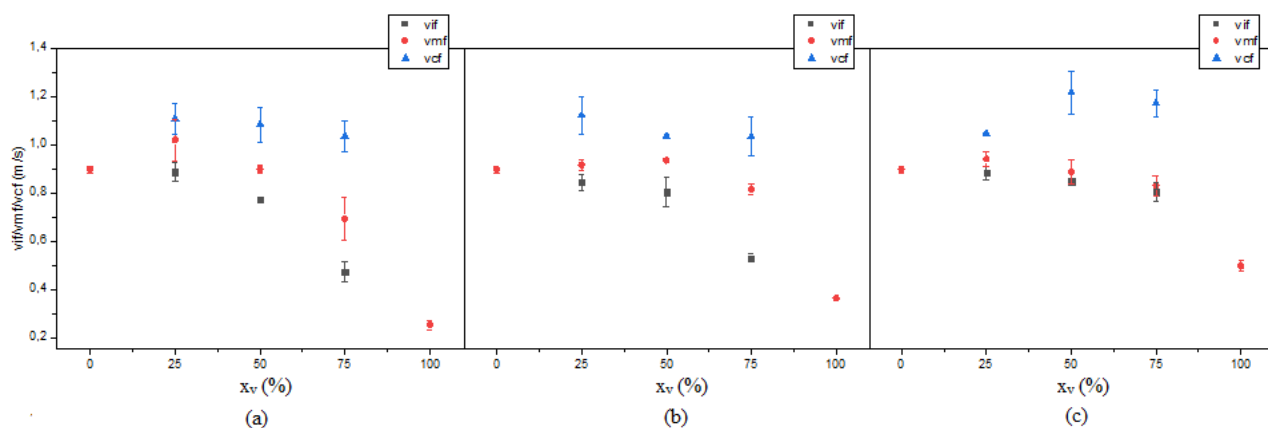


Figura 4.32 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

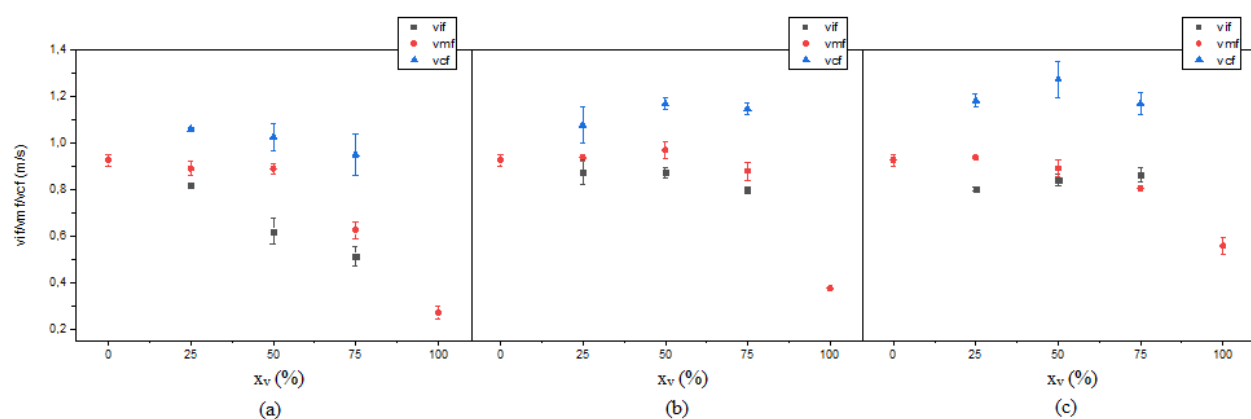


Figura 4.33 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 1,5$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

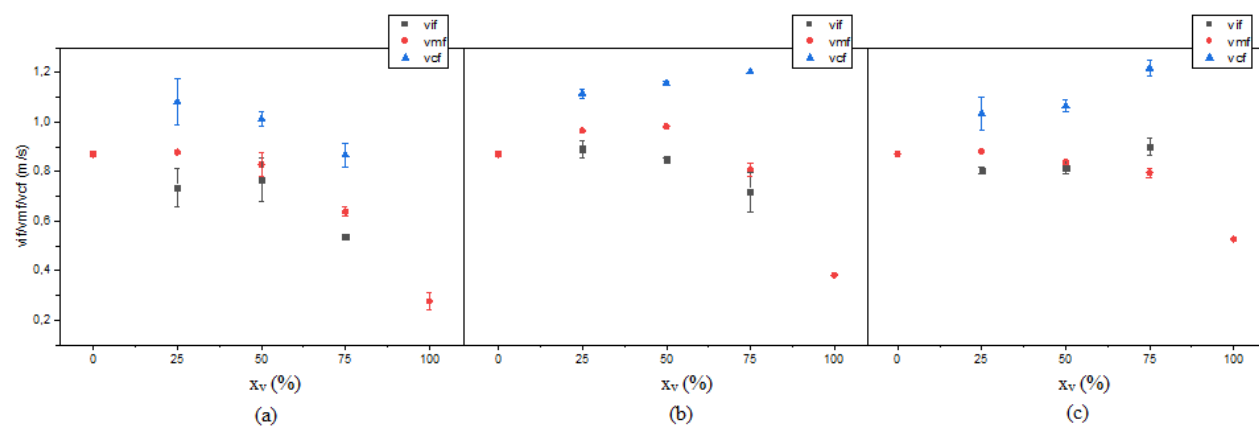


Figura 4.34 - Velocidades fluidodinâmicas em função da fração volumétrica da biomassa, para misturas MB129 com $L/D = 2$: (a) $X_{bu} = 10\%$, (b) $X_{bu} = 42,5\%$ e (c) $X_{bu} = 75\%$.

A partir das Figuras 4.32 (a), 4.33 (a) e 4.34 (a), para a biomassa seca, é possível visualizar uma tendência de diminuição das três velocidades analisadas com o aumento da proporção da biomassa, similar ao apresentado para a MB093. Um resultado semelhante foi encontrado por Vasconcelos *et al.* (2018) para a velocidade de completa fluidização. Emiola-Sadiq *et al.* (2021) também observaram uma diminuição na velocidade de completa fluidização com o aumento da composição de biomassa de *pellets* de cascas de soja e aveia. Os autores atribuíram essa tendência à redução da densidade total do leito à medida que a fração da biomassa aumenta no leito. Porém, foi observado um aumento nessa mesma velocidade quando aumentou a fração de serragem no leito, devido à forma diferente e tamanho da partícula, que causaram aglomeração com as partículas de areia em cargas maiores.

Para a biomassa de 42,5% de umidade, Figuras 4.32 (b), 4.33 (b) e 4.34 (b), diferentemente do comportamento apresentado para o sistema binário formado pela areia de $d_p = 0,93$ mm, as v_{if} e v_{mf} só permaneceram praticamente constantes até uma fração volumétrica de 50% de biomassa. Pode-se chegar à mesma conclusão dada anteriormente, de que a proporção de biomassa só foi significativa para alterar esse comportamento a partir de 75%, já que está presente em uma maior quantidade, então a v_{if} cai e tende a se aproximar da v_{mf} da biomassa pura. Até $x_v = 50\%$, as misturas binárias possuem v_{if} próxima à v_{mf} da areia pura. Para a v_{cf} , uma tendência de queda é observada para a altura de leito raso, diferentemente para as razões $L/D = 1,5$ e 2 , em que se observa uma tendência de crescimento até a proporção de 75% de biomassa seguido de queda até o componente puro. Pelo mesmo motivo discutido anteriormente, por se tratar de um leito raso, o ar não tem dificuldade para passar o que resulta em uma diminuição da v_{cf} com o aumento da proporção, mesmo a partícula sendo mais úmida ($X_{bu} = 42,5\%$), as forças coesivas não são suficientes para afetar essa velocidade, com relação ao comportamento apresentado para a partícula seca nas mesmas condições, Figura 4.32 (a). Porém, ao aumentar a altura do leito, a umidade já começa a afetar significativamente as velocidades estudadas.

Para a biomassa a 75% de umidade, Figuras 4.32 (c), 4.33 (c) e 4.34 (c), uma tendência de queda das velocidades incipiente e mínima fluidização é observada em todas as alturas de leito estático e proporções de biomassa, exceto para $x_v = 75\%$ de biomassa, em que há uma pequena elevação da v_{if} devido à inversão sofrida pela presença de picos no gráfico fluidodinâmico e que foram retratados no tópico da umidade. No leito raso, a velocidade de completa fluidização possui dois momentos de queda: em $x_v = 25\%$ e 100% . Já no leito intermediário e profundo há crescimento dessa velocidade até 75% de umidade, seguido de

queda até 100%. A justificativa é a mesma dada anteriormente para os leitos raso, intermediário e profundo, com base no grau de facilidade ou dificuldade de passagem do ar pela coluna.

Formisani *et al.* (2008) observaram uma transição mais curta para o estado de completa fluidização, ou seja, um pequeno intervalo entre v_{if} e v_{cf} , para sistemas ricos em *jetsam*, em misturas cujo fenômeno de segregação que prevalece é a segregação por densidade. Tal transição curta não ocorreu em todas as condições testadas para MB093 e MB129, em $x_v = 25\%$, já que esse intervalo de velocidades sofre influência da umidade, além da razão L/D, como visto anteriormente.

v) Comparação com Correlações Empíricas

A Tabela 4.14 apresenta a comparação entre os valores de velocidade de mínima fluidização determinados experimentalmente para as misturas MB093 e MB129, e aqueles estimados por correlações empíricas disponíveis na literatura e apresentadas no item 2.2.7.

Tabela 4.14 - Comparação entre as velocidades de mínima fluidização obtidas experimentalmente e previstas por correlações empíricas, para as misturas binárias na razão L/D = 1,5.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	Experimental	Rao e Bheemarasetti (2001)		Oliveira <i>et al.</i> (2013)		Paudel e Feng (2013)	
			v_{mf} (m/s)	v_{mf} (m/s)	Erro Relativo (%)	v_{mf} (m/s)	Erro Relativo (%)	v_{mf} (m/s)	Erro Relativo (%)
MB093	10	25	0,76	0,30	-60,60	0,40	46,74	0,66	12,59
		50	0,81	0,38	-52,49	0,44	45,19	0,66	18,75
		75	0,68	0,83	21,31	0,60	12,96	0,59	14,31
	42,5	25	0,75	0,30	-59,94	0,40	46,20	0,68	9,21
		50	0,88	0,39	-55,41	0,44	49,54	0,69	21,77
		75	0,83	0,90	8,18	0,61	26,69	0,64	23,47
	75	25	0,77	0,32	-58,02	0,41	46,19	0,73	5,08
		50	0,82	0,48	-40,68	0,48	41,59	0,74	8,71
		75	0,91	1,78	94,96	0,80	12,60	0,71	22,57
MB129	10	25	0,89	0,61	-31,92	0,58	34,71	0,90	-0,99
		50	0,89	0,75	-15,70	0,63	29,66	0,82	7,39
		75	0,63	1,44	129,92	0,80	-26,77	0,67	-7,00
	42,5	25	0,94	0,61	-35,10	0,58	38,04	0,93	1,14
		50	0,97	0,76	-21,70	0,63	35,51	0,87	10,39
		75	0,88	1,51	71,11	0,80	9,23	0,73	17,00
	75	25	0,94	0,64	-32,07	0,59	37,45	0,97	-3,49
		50	0,89	0,88	-1,44	0,65	27,13	0,92	-2,70
		75	0,81	2,46	204,82	0,95	-17,62	0,79	1,91

Pode ser notado na Tabela 4.14 que a correlação empírica que mais se aproximou dos dados experimentais foi a desenvolvida por Paudel e Feng (2013), que apresentou de maneira geral os menores erros relativos, variando de 0,99 a 23,47%. A correlação leva em consideração a percentagem de massa de biomassa na mistura e foi desenvolvida pelos autores durante seus estudos fluidodinâmicos de partículas de biomassa (espiga de milho e casca de noz) e inertes (areia, vidro e alumina) e suas misturas binárias. Por sua vez, os autores abrangeram uma ampla faixa de dados da literatura, além dos seus dados experimentais, no desenvolvimento da correlação, o que pode ter justificado os menores erros encontrados.

A correlação de Paudel e Feng (2013) também forneceu uma boa aproximação para a velocidade de completa fluidização experimental da mistura binária do resíduo de sisal e areia nos estudos desenvolvidos por Vasconcelos *et al.* (2018). De forma similar, Sozzi *et al.* (2021) utilizaram a relação desenvolvida pelos autores para um leito que contém apenas partículas de biomassa para estimar a velocidade de mínima fluidização dos resíduos de beterraba.

A correlação proposta por Oliveira *et al.* (2013) foi a segunda melhor que se adequou aos dados experimentais de velocidade de mínima fluidização, provavelmente devido às partículas de biomassa de diferentes formas e tamanhos, abrangendo uma ampla faixa de diâmetros estudadas pelo autor. Já a correlação desenvolvida por Rao e Bheemarasetti (2001) apresentou os maiores erros relativos, não sendo um modelo recomendado para prever a velocidade de mínima fluidização.

vi) *Definição da melhor condição operacional*

Com base na análise fluidodinâmica realizada em diversas condições de altura de leito estático, teor de umidade e fração volumétrica de biomassa, além de diâmetro de partícula de inerte, é possível definir uma condição ótima de operação tanto para um secador, quanto para um reator de leito fluidizado, operando com partículas de casca residual de mandioca e areia como sólido inerte para auxiliar a fluidização.

A fluidização da biomassa pura deve ser evitada devido ao fenômeno de *slugging* que foi visualizado durante os testes fluidodinâmicos. Esse comportamento é característico de uma fluidização de baixa qualidade, que dificulta a troca de calor e massa que o leito fluidizado proporciona, proveniente justamente da mistura intensa provocada no leito. Portanto, o uso de partículas inertes para auxiliar na fluidização é inevitável. Além disso, a biomassa pura possui

uma baixa fluidez, traduzida pelos elevados ângulos de repouso determinados, e que a partir da adição dos inertes apresentou uma mudança na classificação de escoamento coesivo para moderado. Nesse contexto, o diâmetro de partícula de areia de 0,93 mm apresentou ótimo desempenho nos ensaios realizados. Esse diâmetro permitiu uma menor queda de pressão no leito em comparação com o de maior diâmetro, além de apresentar uma segregação de menor proporção quando utilizado com a biomassa de maior teor de umidade. E de forma geral, proporcionou menores velocidades fluidodinâmicas para as misturas binárias estudadas.

Tratando-se da altura de leito estático a ser utilizada, a razão $L/D = 1$ mostrou-se a menos promissora, devido à facilidade de passagem do ar através do leito, comprometendo a fluidodinâmica do mesmo. Apesar da razão $L/D = 2$ apresentar maiores índices de fluidização em comparação com a razão $L/D = 1,5$, há maior facilidade de arraste quando se trabalha em uma altura de leito maior, além disso, a razão de leito estático possui forte influência sobre a queda de pressão, não sendo tão desejável uma queda de pressão tão intensa no leito. Ao utilizar uma razão $L/D = 1,5$, ainda foi visualizado uma remistura no leito de partículas que antes tendia à segregação. Portanto, a razão L/D recomendada para a aplicação é a intermediária de 1,5.

É desejável trabalhar com a maior proporção possível de biomassa dentro do leito que permita uma boa fluidização, para assim aumentar a capacidade de processamento e o rendimento, por exemplo, em uma operação de conversão de energia. A fração volumétrica de 75% de biomassa mostrou-se promissora em permitir uma boa fluidização das partículas dentro do leito, sem formação de *slugs*, mesmo com uma menor proporção de inertes. Essa fração apresentou de modo geral os maiores índices de fluidização na razão $L/D = 1,5$, indicando que uma menor quantidade de inertes foi capaz de quebrar os caminhos preferenciais e permitir uma boa fluidização. Além disso, houve uma diminuição das velocidades fluidodinâmicas para partículas secas, quando utilizou uma maior quantidade de biomassa, fisicamente isso representa uma redução no custo energético, visto que o compressor irá precisar fornecer uma menor potência.

O teor de umidade a ser adotado depende da operação que será aplicada. Um secador de leito fluidizado tem o objetivo de reduzir a umidade do material até teores adequados para o tratamento final, sendo de 8-12% para operações de queima. Portanto, o secador irá operar com a partícula de biomassa de umidade inicial correspondente a 75%. À medida que a umidade vai sendo removida da partícula, a fluidodinâmica da mesma vai sendo alterada, por isso essa investigação realizada para biomassa com diferentes teores de umidade possui uma importância tão grande. A partir desse conhecimento, é possível operar em velocidades de mínima

fluidização menores à medida que a umidade vai sendo removida da partícula, já que partículas menos úmidas oferecem uma menor resistência ao escoamento. Essa medida possibilita uma operação mais viável economicamente com a elevação da eficiência energética do secador, já que o consumo de energia irá diminuir.

Já em um reator de leito fluidizado para conversão da biomassa em energia, seja por meio da pirólise, combustão ou gaseificação, é necessário que a biomassa possua um teor de umidade de 8-12%, como mencionado anteriormente. É importante salientar que a escolha da areia foi estrategicamente pensada para operações de queima, visto que esse inerte não apresenta nenhuma restrição quanto ao seu uso em temperaturas mais elevadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste estudo, o comportamento fluidodinâmico individual de partículas de biomassa da casca residual de mandioca com diferentes teores de umidade e areia quartzosa com diâmetros de 0,93 e 1,29 mm, e as características de fluidização de suas respectivas misturas binárias foram investigados. As velocidades fluidodinâmicas das misturas foram determinadas e analisadas frente à variação da razão de leito estático, fração volumétrica e teor de umidade da biomassa, além do diâmetro do inerte. As principais conclusões desse estudo são listadas a seguir.

De forma geral, a porosidade do leito de partículas de biomassa foi superior à porosidade das partículas de areia, principalmente devido à geometria mais complexa da biomassa que resulta em um maior espaçamento no leito. Os leitos empacotados com partículas de casca de mandioca com 75% b.u. de umidade apresentaram os menores valores de porosidade, quando comparados aos leitos com a biomassa parcialmente e totalmente seca, em razão da presença de pontes líquidas entre as partículas úmidas, que contribuiu para diminuir os espaços interpartículas. A porosidade dos leitos de misturas binárias foi reflexo dos componentes puros, seguindo a mesma tendência de acordo com a proporção de partículas.

A metodologia adotada para os ensaios fluidodinâmicos realizados mostrou-se promissora, permitindo a reprodutibilidade dos dados obtidos.

Durante os ensaios com o leito contendo apenas partículas de biomassa ou areia, a velocidade de mínima fluidização das partículas individuais não sofreu influência da altura de leito estático, mas aumentou com a umidade da biomassa e diâmetro da partícula de areia. Picos característicos foram identificados nas curvas fluidodinâmicas para o leito de monopartículas de biomassa com 75% de umidade, que são devidos às forças de coesão presentes entre partículas úmidas.

Para as misturas binárias, a queda de pressão de mínima fluidização seguiu a mesma tendência apresentada para os componentes individuais, aumentando conforme a carga do leito, a qual para uma dada razão L/D está diretamente relacionada à umidade das partículas de

biomassa e à quantidade de areia na mistura. Essa tendência está em consonância com a porosidade e densidade de empacotamento do leito determinadas.

Durante os ensaios, a segregação dos componentes foi claramente observada e ocorreu em maior proporção para as misturas formadas por partículas menos úmidas e com maior proporção de inertes. A MB093, no entanto, apresentou uma remistura dos componentes para a mistura composta por biomassa com maior umidade em maiores vazões de escoamento do ar. Isso foi devido às velocidades de mínima fluidização terem sido próximas dos componentes individuais da mistura.

A razão L/D de leito estático não influenciou de forma significativa a v_{mf} das misturas binárias, diferentemente do comportamento apresentado pelas v_{if} e v_{cf} . E de forma geral, a umidade afeta de forma significativa as velocidades à medida que se aumenta a proporção volumétrica de biomassa e a razão de leito estático. Houve uma inversão nos valores de v_{if} e v_{mf} , para as misturas binárias com $x_v = 75\%$ e $X_{bu} = 75\%$, em todas as razões de leito estático testadas, devido às forças coesivas presentes na biomassa úmida, que resultaram em um pico de queda de pressão nas curvas fluidodinâmicas características.

As velocidades fluidodinâmicas apresentaram um comportamento diferente para partículas de biomassa secas e úmidas, conforme a proporção de biomassa variou nas diferentes misturas. Uma tendência de queda das velocidades prevaleceu para as duas misturas binárias à medida que a proporção de biomassa aumentou, para a biomassa seca. Enquanto que uma tendência de crescimento das velocidades prevaleceu com o aumento da proporção da biomassa para a MB093, porém essa tendência só foi constatada na maior razão L/D para a MB129, com a biomassa mais úmida.

De maneira geral, as maiores velocidades foram observadas para o inerte de maior diâmetro, para todas as razões de leito estático avaliadas, salvo algumas exceções encontradas para a velocidade de completa fluidização. Isto é devido a maiores vazões de ar necessárias para contrabalancear a força peso das partículas de maiores diâmetros.

Ao utilizar os sólidos inertes nas misturas binárias com biomassa não foi observada a formação de *slugs*, como na fluidização da biomassa pura. Isto foi um indicativo da melhora da qualidade de fluidização da mistura, em consonância com as medidas de ângulo de repouso dinâmico. Os ângulos de repouso das misturas binárias foram menores que os da biomassa pura nas mesmas condições, indicando que o uso de inertes melhorou satisfatoriamente a escoabilidade das partículas.

Por fim, com base na avaliação fluidodinâmica das misturas binárias realizada neste trabalho, as condições de operação de leito fluidizado recomendadas como as mais adequadas, tanto para a secagem da casca de mandioca com umidade inicial de 75%, como para a conversão termoquímica da biomassa desidratada a 10% b.u., envolvem o uso da mistura binária de partículas da casca de mandioca com areia de $d_p = 0,93$ mm, a uma fração volumétrica de biomassa de 75% e uma razão L/D de 1,5. As velocidades incipiente, de mínima e completa fluidização para condição mais adequada de secagem correspondem a 0,93, 0,91 e 1,34 m/s, respectivamente, já para condição mais adequada de conversão termoquímica correspondem a 0,48, 0,68 e 0,92 m/s, respectivamente.

As condições de fluidização mais adequadas da mistura casca de mandioca-areia, definidas neste trabalho, podem contribuir para aumentar a eficiência energética de secadores e reatores de leito fluidizado, quando aplicados para o aproveitamento dessa biomassa residual para a produção de bioenergia.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS

ADAMU, M. H.; ZENG, X.; ZHANG, J.; WANG, F.; XU, G. Property of drying , pyrolysis , gasification , and combustion tested by a micro fluidized bed reaction analyzer for adapting to the biomass two-stage gasi fication process. **Fuel**, v. 264, n. August 2019, 2020.

AGUSTIN, F.; ERPOMEN; NINGRAT, R. W. S. **The Use of Cassava Peel as a Source of Energy for Substituting Rice Bran in Ration Containing Gliricidia maculata Leaves in Dairy Cows**IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**2020

AL-HASHEMI, H. M. B.; AL-AMOUDI, O. S. B. A review on the angle of repose of granular materials. **Powder Technology**, v. 330, p. 397–417, 2018.

AMALIA, A. V.; FIBRIANA, F.; WIDIATNINGRUM, T.; HARDIANTI, R. D. Bioconversion and valorization of cassava-based industrial wastes to bioethanol gel and its potential application as a clean cooking fuel. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 35, n. July, p. 102093, 2021.

ANYANWU, C. N.; IBETO, C. N.; EZEHOA, S. L.; OGBUAGU, N. J. Sustainability of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) as industrial feedstock, energy and food crop in Nigeria. **Renewable Energy**, v. 81, p. 745–752, 2015.

BAI, Y.; SI, H. Experimental study on fluidization, mixing and separation characteristics of binary mixtures of particles in a cold fluidized bed for biomass fast pyrolysis. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 153, n. May, p. 107936, 2020.

BARBOSA, A. M.; ROCHA, T. A. F.; SALDARRIAGA, J. F.; ESTIATI, I.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Alternative drying of orange bagasse in vibrofluidized bed for use in combustion. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 152, n. March, p. 107941, 2020.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

CHEN, W. H.; YE, S. C.; SHEEN, H. K. Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 195–203, 2012.

CHENG, N. S.; ZHAO, K. Difference between static and dynamic angle of repose of uniform sediment grains. **International Journal of Sediment Research**, v. 32, n. 2, p. 149–154, 2017.

CHIBA, S.; CHIBA, T.; NIENOW, A. W.; KOBAYASHI, H. The minimum fluidisation

velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. **Powder Technology**, v. 22, n. 2, p. 255–269, 1979.

CHINWAN, D.; CASTELL-PEREZ, M. E. Effect of conditioner and moisture content on flowability of yellow cornmeal. **Food Science and Nutrition**, v. 7, n. 10, p. 3261–3272, 2019.

CREMASCO, M. A. **Fluidização. In: Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014

CRUZ, G.; RODRIGUES, A. DA L. P.; SILVA, D. F. DA; GOMES, W. C. Physical–chemical characterization and thermal behavior of cassava harvest waste for application in thermochemical processes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 143, n. 5, p. 3611–3622, 2021.

DUAN, J.; FANG, L.; GAO, S.; ZHANG, Z.; WANG, W. Numerical simulation and structural optimization of multi-compartment fluidized bed reactor for biomass fast pyrolysis. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 140, n. March, p. 114–126, 2019.

EMIOLA-SADIQ, T.; WANG, J.; ZHANG, L.; DALAI, A. Mixing and segregation of binary mixtures of biomass and silica sand in a fluidized bed. **Particuology**, v. 58, p. 58–73, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Balanço Energético Nacional 2022: Relatório final, ano base 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 04 dez. 2022

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 04 dez. 2022

FARROW, S.; ETERIGHO, E.; SNAPE, C. Pyrolysis and Char Burnout Characteristics of Cassava Peelings as Potential Energy Source. v. 57, p. 59–66, 2018.

FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; LONGO, T. The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval. **Powder Technology**, v. 185, n. 2, p. 97–108, 2008.

FU, Z.; ZHU, J.; BARGHI, S.; ZHAO, Y.; LUO, Z.; DUAN, C. Minimum fluidization velocity of binary mixtures of medium particles in the Air Dense medium fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 207, p. 194–201, 2019.

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

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L. C.; WOUTERS, I. CHARACTERIZATION OF POWDER FLOWABILITY USING MEASUREMENT OF ANGLE OF REPOSE. **CHINA PARTICUOLOGY**, v. 4, n. 1990, p. 104–107, 2006.

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.

GUPTA, S.; DE, S. Investigation of hydrodynamics and segregation characteristics in a dual fluidized bed using the binary mixture of sand and high-ash coal. **Advanced Powder Technology**, v. 32, n. 8, p. 2690–2702, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE. Estatística da Produção Agrícola – Lavoura Temporária 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producaoagricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>> Acesso em: 04 dez. 2022.

IDRIS, S.; ROSNAH, S.; NOR, M. Z. M.; MOKHTAR, M. N.; ABDUL GANI, S. S. Physicochemical composition of different parts of cassava (*Manihot esculenta* crantz) plant. **Food Research**, v. 4, p. 78–84, 2020.

IEA – International Energy Agency. Bioenergy Annual Report, 2019. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/05/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2019.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

IGHALO, J. O.; ADENIYI, A. G. Modelling the Valorisation of Cassava Peel (*Manihot esculenta*) Waste Via Pyrolysis and in-Line Steam Reforming. **Environmental Processes**, v. 8, n. 1, p. 267–285, 2021.

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**, 2016.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009.

KANG, D. H.; KIM, S. IL; CHUN, W. P.; LEE, D. H. Drying characteristics of fine powders in an inert medium circulating fluidized bed with binary inert media. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 45, p. 266–276, 2017.

KARMAKAR, M. K.; HALDAR, S.; CHATTERJEE, P. K. STUDIES ON FLUIDIZATION BEHAVIOUR OF SAND AND BIOMASS. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, 2013.

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

KUPRIANOV, V. I.; SE, C.; NINDUANGDEE, P. The influence of fluidized bed co-combustion of cassava rhizome and eucalyptus bark on the combustor performance and time-related physiochemical changes of the bed material. **Biomass and Bioenergy**, v. 127, n. October 2018, p. 105250, 2019.

LIU, Y.; PENG, J.; KANSHA, Y.; ISHIZUKA, M.; TSUTSUMI, A.; JIA, D.; BI, X. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Novel fluidized bed dryer for biomass drying. **Fuel Processing Technology**, v. 122, p. 170–175, 2014.

MOHD-SALLEH, S. N. A.; MOHD-ZIN, N. S.; OTHMAN, N.; GOPALAKRISHNAN, Y.; ABU-BAKAR, N. Treat-ability of manihot esculenta peel extract as coagulant aid for stabilised

leachate. **Pertanika Journal of Science and Technology**, v. 29, n. 3, p. 1503–1516, 2021.

NAGATA, G. A.; COSTA, T. V.; PERAZZINI, M.T. B.; PERAZZINI, H. Analysis of the isothermal condition in drying of acai berry residues for biomass application. **Biomass and Bioenergy**, v. 133, p. 105453, 2020.

OKUDOH, V.; TROIS, C.; WORKNEH, T.; SCHMIDT, S. The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1035–1052, 2014.

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.

PANGHAL, A.; MUNEZERO, C.; SHARMA, P.; CHHIKARA, N. Cassava toxicity, detoxification and its food applications: a review. **Toxin Reviews**, v. 40, n. 1, p. 1–16, 2021.

PATTIYA, A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1959–1967, 2011.

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

PÉREZ, N. P.; PEDROSO, D. T.; MACHIN, E. B.; ANTUNES, J. S.; VERDÚ RAMOS, R. A.; SILVEIRA, J. L. Fluid dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 135–149, 2017.

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

RENZO, A. DI; SCALA, F.; HEINRICH, S. Recent advances in fluidized bed hydrodynamics and transport phenomena—progress and understanding. **Processes**, v. 9, n. 4, p. 10–13, 2021.

RUEANGSAN, K.; KRAISODA, P.; HEMAN, A.; TASAROD, H. Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. **Heliyon**, v. 7, n. October, p. e08291, 2021.

SANTOS NETO, A.A; NASCIMENTO, V.R.S.R.; FIGUEIREDO, R.T. **Avaliação da casca de mandioca como adsorvente de baixo custo para adsorção de corante: caracterização e cinética**. Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados XXXIV, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

SEVILLE, J. P. K.; CLIFT, R. The effect of thin liquid layers on fluidisation characteristics. **Powder Technology**, v. 37, n. 1, p. 117–129, 1984.

SEVILLE, J. P. K.; WILLETT, C. D.; KNIGHT, P. C. Interparticle forces in fluidisation: A review. **Powder Technology**, v. 113, n. 3, p. 261–268, 2000.

SHAH, M. A.; KHAN, M. N. S.; KUMAR, V. Biomass residue characterization for their potential application as biofuels. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, n. 3,

p. 2137–2145, 2018.

SHARMA, H. B.; PANIGRAHI, S.; SARMAH, A. K.; DUBEY, B. K. Downstream augmentation of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion for integrated biogas and hydrochar production from the organic fraction of municipal solid waste: A circular economy concept. **Science of the Total Environment**, v. 706, p. 135907, 2020.

SHAUL, S.; RABINOVICH, E.; HAIM, K. Typical Fluidization Characteristics for Geldart ' s Classification Groups. **Particulate Science and Technology**, n. October, p. 37–41, 2014.

SIVAMANI, S.; CHANDRASEKARAN, A. P.; BALAJI, M.; SHANMUGAPRAKASH, M.; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, A.; BASKAR, R. Evaluation of the potential of cassava-based residues for biofuels production. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 17, n. 3, p. 553–570, 2018.

SOARES, J. F.; CONFORTIN, T. C.; TODERO, I.; MAYER, F. D.; MAZUTTI, M. A. Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, n. January 2019, 2020.

SORIA-VERDUGO, A.; CANO-PLEITE, E.; PASSALACQUA, A.; FOX, R. O. Effect of particle shape on bubble dynamics in bubbling fluidized bed. **Fuel**, v. 249, n. December 2022, p. 06012, 2023.

SOZZI, A.; ZAMBON, M.; MAZZA, G.; SALVATORI, D. Fluidized bed drying of blackberry wastes : Drying kinetics , particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids. **Powder Technology**, v. 385, p. 37–49, 2021.

SUN, Z.; HAN, B.; BAI, T.; BARGHI, S.; ZHU, J. Comparison of hydrodynamics in a gas-solids fluidized bed with binary particle systems for dry coal beneficiation. **Chemical Engineering Science**, v. 247, p. 117028, 2022.

SYAHRUL, S.; DINCER, I.; HAMDULLAHPUR, F. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42, n. 7, p. 691–701, 2003.

TARGINO, T. G.; FREIRE, J. T.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Fluidization design parameters of agroindustrial residues for biomass applications: experimental, theoretical, and neural networks approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 107, n. 0123456789, p. 135–149, dez. 2021.

VASCONCELOS, D.; BATALHA, G.; PEREIRA, L. G.; PIRES, C. A. Fluidization of binary mixtures of sisal residue and sand: A new model for deriving the final fluidization velocity. **Particuology**, v. 40, p. 10–22, 2018.

VILHALVA, D.A.A.; SOARES JÚNIOR, M.S.; CALIARI, M. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Trop.**, v. 42, n. 3, p. 331- 339, 2012.

VILLABONA-ORTÍZ, Á.; TEJADA-TOVAR, C.; GONZALEZ-DELGADO, Á. D.

Adsorption of Cd^{2+} ions from aqueous solution using biomasses of theobroma cacao, zeamays, manihot esculenta, dioscorea rotundata and elaeis guineensis. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2021.

ZHANG, H.; HU, J.; ZHENG, J.; XIAO, R. Fast pyrolysis of cellulosic ethanol solid residues with high ash and lignin contents in a fluidized bed. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 128, n. May, p. 217–223, 2017.

ZHANG, Y.; GOH, K. L.; NG, Y. L.; CHOW, Y.; WANG, S.; ZIVKOVIC, V. Process intensification in micro-fluidized bed systems: A review. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 164, n. November 2020, p. 108397, 2021.

ZHONG, H.; XIONG, Q.; YIN, L.; ZHANG, J.; ZHU, Y.; LIANG, S.; NIU, B.; ZHANG, X. CFD-based reduced-order modeling of fluidized-bed biomass fast pyrolysis using artificial neural network. **Renewable Energy**, v. 152, p. 613–626, 2020.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leite, para $L/D = 1$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	m areia (g)	m bio(g)	m total (g)	x bio
Areia	-	0	1516 1524	0	1516 1524	0
Biomassa	10 42,5 75	100	0	146,2943 175,9262 350,6155	146,2943 175,9262 350,6155	1
MB093	10	25	1138	36,5735	1174,5735	0,031
		50	758	73,1471	831,1471	0,088
		75	380	109,7207	489,7207	0,224
	42,5	25	1138	43,9800	1181,9800	0,037
		50	758	87,9631	845,9631	0,104
		75	380	131,9446	511,9446	0,258
	75	25	1138	87,6534	1225,6534	0,072
		50	758	175,3077	933,3077	0,188
		75	380	262,9616	642,9616	0,409
	10	25	1144	36,5735	1180,5735	0,031
		50	762	73,1471	835,1471	0,088
		75	382	109,7207	491,7207	0,223
MB129	42,5	25	1144	43,9800	1187,9800	0,037
		50	762	87,9631	849,9631	0,103
		75	382	131,9446	513,9446	0,257
	75	25	1144	87,6538	1231,6538	0,071
		50	762	175,3077	937,3077	0,187
		75	382	262,9616	644,9616	0,408

Tabela A.2 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leite, para $L/D = 1,5$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	m areia (g)	m bio(g)	m total (g)	x bio
Areia	-	0	2242 2260	0	2242 2260	0
Biomassa	10 42,5 75	100	0	211,7694 258,0210 476,7655	211,7694 258,0210 476,7655	1
MB093	10	25	1682	52,9423	1734,9423	0,031
		50	1122	105,8847	1227,8847	0,086
		75	560	158,8270	718,8270	0,221
	42,5	25	1682	64,5052	1746,5052	0,037
		50	1122	129,0104	1251,0104	0,103
		75	560	193,5155	753,5155	0,257
	75	25	1682	123,1913	1805,1913	0,068
		50	1122	246,3827	1368,3827	0,180
		75	560	369,5741	929,5741	0,398
	10	25	1696	52,9423	1748,9423	0,030
		50	1130	105,8847	1235,8847	0,086
		75	566	158,8271	724,8271	0,219
MB129	42,5	25	1696	64,5052	1760,5052	0,037
		50	1130	129,0100	1259,0100	0,102
		75	566	193,5155	759,5155	0,255
	75	25	1696	123,1914	1819,1914	0,068
		50	1130	246,3827	1376,3827	0,179
		75	566	369,7541	935,7541	0,395

Tabela A.3 - Resumo das condições operacionais empregadas, relacionadas com a carga do leite, para $L/D = 2$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	m areia (g)	m bio(g)	m total (g)	x bio
Areia	-	0	3002 3048	0	3002 3048	0
Biomassa	10 42,5 75	100	0	275,503 338,9192 672,0010	275,503 338,9192 672,0010	1
MB093	10	25	2242	73,1471	2315,1471	0,032
		50	1516	146,2900	1662,2900	0,088
		75	758	211,7694	969,7694	0,218
	42,5	25	2242	87,9631	2329,9631	0,038
		50	1516	175,9262	1691,9262	0,104
		75	758	258,0207	1016,0207	0,254
	75	25	2242	175,3077	2417,3077	0,073
		50	1516	350,6155	1866,6155	0,188
		75	758	492,7655	1250,7655	0,394
	10	25	2260	73,1471	2333,1471	0,031
		50	1524	146,1943	1670,1943	0,088
		75	762	211,7694	973,7694	0,217
MB129	42,5	25	2260	87,9631	2347,9631	0,037
		50	1524	175,9262	1699,9262	0,103
		75	762	258,0207	1020,0207	0,253
	75	25	2260	175,3077	2435,3077	0,072
		50	1524	350,6155	1874,6155	0,187
		75	762	492,7655	1254,7655	0,393

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Densidade aparente e diâmetro efetivos das misturas binárias.

L/D		1			1,5		2	
Material	X _{bu} (%)	X _v (%)	ρ _{ef} (kg/m ³)	d _p _{ef} (mm)	ρ _{ef} (kg/m ³)	d _p _{ef} (mm)	ρ _{ef} (kg/m ³)	d _p _{ef} (mm)
MB093	10	25	2085,1	0,98	2092,5	0,98	2079,7	0,98
		50	1575,7	1,05	1587,8	1,05	1575,7	1,05
		75	994,4	1,15	1002,9	1,15	1010,0	1,15
	42,5	25	2135,8	0,98	2138,3	0,98	2130,9	0,98
		50	1666,2	1,05	1670,9	1,05	1666,2	1,05
		75	1106,2	1,14	1108,4	1,14	1115,4	1,14
	75	25	2089,2	0,99	2106,1	0,99	2084,1	0,99
		50	1625,4	1,07	1649,9	1,07	1625,4	1,07
		75	1143,0	1,17	1160,8	1,16	1166,5	1,16
MB129	10	25	2161,2		2170,3		2156,4	
		50	1618,1	1,29	1631,9	1,29	1618,5	1,29
		75	1010,2		1021,5		1026,3	
	42,5	25	2214,8		2218,5		2210,5	
		50	1712,4	1,29	1718,3	1,29	1712,4	1,29
		75	1124,3		1129,2		1133,9	
	75	25	2162,2		2181,6		2157,7	
		50	1665,3	1,29	1692,3	1,29	1665,3	1,29
		75	1158,3		1178,7		1182,8	

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão $L/D = 1$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	dp_{ef} (mm)	ρ_l (kg/m ³)	ε
MB093	10	25	0,98	1139,1	0,45
		50	1,05	806,0	0,49
		75	1,15	474,9	0,52
	42,5	25	0,98	1146,2	0,46
		50	1,05	820,4	0,51
		75	1,14	496,5	0,55
	75	25	0,99	1188,6	0,43
		50	1,07	905,1	0,44
		75	1,17	623,5	0,45
MB129	10	25	1,29	1144,9	0,47
		50	1,29	809,9	0,50
		75	1,29	476,9	0,53
	42,5	25	1,29	1152,1	0,48
		50	1,29	824,3	0,52
		75	1,29	498,4	0,56
	75	25	1,29	1194,4	0,45
		50	1,29	909,0	0,45
		75	1,29	625,5	0,46

Tabela C.2 - Densidade de empacotamento, porosidade e diâmetro efetivo das misturas binárias MB093 e MB129 em diferentes umidades e frações de biomassa, na razão $L/D = 2$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	$d_{p_{ef}}$ (mm)	ρ_l (kg/m ³)	ε
MB093	10	25	0,98	1122,6	0,46
		50	1,05	806,0	0,49
		75	1,15	470,2	0,53
	42,5	25	0,98	1129,8	0,47
		50	1,05	820,4	0,51
		75	1,14	492,7	0,56
	75	25	0,99	1172,1	0,44
		50	1,07	905,1	0,44
		75	1,16	606,5	0,48
MB129	10	25	1,29	1131,3	0,48
		50	1,29	809,9	0,50
		75	1,29	472,2	0,54
	42,5	25	1,29	1138,5	0,48
		50	1,29	824,3	0,52
		75	1,29	494,6	0,56
	75	25	1,29	1180,8	0,45
		50	1,29	909,0	0,45
		75	1,29	608,4	0,49

APÊNDICE D

Tabela D.1 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 1$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	dp_{ef} (mm)	ΔP_{mf} (Pa)	v_{if} (m/s)	v_{mf} (m/s)	v_{cf} (m/s)	IF (%)
MB093	10	25	0,98	996,9±4,1	0,62±0,01	0,75±0,00	1,11±0,03	81,7±0,2
		50	1,05	667,6±38,3	0,56±0,01	0,75±0,03	1,22±0,07	80,1±2,3
		75	1,15	415,6±6,8	0,50±0,01	0,69±0,01	1,00±0,05	82,7±2,4
	42,5	25	0,98	1011,8±10,2	0,59±0,01	0,77±0,01	1,10±0,09	82,7±0,5
		50	1,05	718,9±0,1	0,73±0,01	0,86±0,01	1,08±0,00	81,9±0,4
		75	1,14	439,5±7,3	0,59±0,05	0,85±0,00	0,99±0,04	82,6±1,3
	75	25	0,99	1036,9±6,3	0,59±0,00	0,74±0,01	1,17±0,05	81,4±0,7
		50	1,07	802,9±12,9	0,68±0,01	0,83±0,02	1,05±0,11	83,2±1,1
		75	1,17	510,4±66,1	0,90±0,03	0,81±0,05	1,38±0,04	88,3±2,7
MB129	10	25	1,29	926,6±19,4	0,89±0,04	1,02±0,08	1,11±0,07	75,8±1,8
		50	1,29	688,3±12,2	0,77±0,01	0,90±0,02	1,08±0,07	79,7±1,2
		75	1,29	389,7±15,2	0,47±0,04	0,69±0,09	1,03±0,06	79,5±2,5
	42,5	25	1,29	981,8±22,8	0,84±0,03	0,91±0,02	1,12±0,08	79,9±1,8
		50	1,29	695,3±9,8	0,80±0,06	0,93±0,01	1,03±0,01	76,3±4,3
		75	1,29	410,8±29,9	0,53±0,02	0,81±0,02	1,03±0,08	75,8±7,5
	75	25	1,29	1065,5±43,2	0,88±0,03	0,94±0,03	1,04±0,00	81,7±5,2
		50	1,29	769,5±49,8	0,85±0,01	0,89±0,05	1,21±0,09	79,4±5,6
		75	1,29	556,0±23,2	0,80±0,04	0,83±0,04	1,17±0,06	82,8±5,3

Tabela D.2 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 1,5$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	$d_{p_{ef}}$ (mm)	ΔP_{mf} (Pa)	v_{if} (m/s)	v_{mf} (m/s)	v_{cf} (m/s)	IF (%)
MB093	10	25	0,98	1392,8±61,4	0,51±0,11	0,76±0,00	1,04±0,02	80,2±0,9
		50	1,05	1002,1±13,3	0,51±0,01	0,81±0,00	1,09±0,06	78,7±1,9
		75	1,15	584,1±20,8	0,48±0,00	0,68±0,02	0,92±0,10	80,3±5,8
	42,5	25	0,98	1409,4±31,3	0,64±0,01	0,75±0,03	1,03±0,08	78,1±1,4
		50	1,05	1064,7±17,1	0,61±0,02	0,88±0,00	1,17±0,02	79,7±1,4
		75	1,14	604,4±28,2	0,66±0,08	0,83±0,03	0,86±0,02	76,2±7,8
	75	25	0,99	1478,7±3,3	0,73±0,00	0,77±0,02	0,84±0,03	78,0±0,8
		50	1,07	1178,8±12,3	0,81±0,01	0,82±0,01	0,96±0,02	80,9±2,7
		75	1,16	809,5±38,4	0,93±0,12	0,91±0,11	1,34±0,01	83,6±7,0
MB129	10	25	1,29	1359,2±66,3	0,82±0,01	0,89±0,03	1,06±0,01	76,2±2,2
		50	1,29	958,9±54,8	0,62±0,05	0,89±0,02	1,03±0,06	76,6±3,0
		75	1,29	542,7±68,7	0,51±0,04	0,63±0,04	0,95±0,09	82,4±7,2
	42,5	25	1,29	1409,8±74,3	0,87±0,05	0,94±0,01	1,08±0,08	79,3±1,7
		50	1,29	1031,7±0,5	0,87±0,02	0,97±0,03	1,17±0,02	77,1±1,9
		75	1,29	625,6±10,8	0,80±0,01	0,88±0,04	1,15±0,03	80,0±0,7
	75	25	1,29	1500,1±72,9	0,80±0,01	0,94±0,01	1,18±0,03	82,2±1,2
		50	1,29	1148,6±28,2	0,84±0,02	0,89±0,04	1,27±0,08	81,8±2,8
		75	1,29	800,6±8,0	0,86±0,03	0,81±0,00	1,17±0,05	84,5±3,2

Tabela D.3 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos para as diferentes misturas binárias em $L/D = 2$.

Material	X_{bu} (%)	x_v (%)	$d_{p_{ef}}$ (mm)	ΔP_{mf} (Pa)	v_{if} (m/s)	v_{mf} (m/s)	v_{cf} (m/s)	IF (%)
MB093	10	25	0,98	1808,4±35,9	0,71±0,01	0,79±0,04	0,97±0,06	75,6±1,8
		50	1,05	1319,3±43,3	0,54±0,00	0,78±0,00	0,88±0,01	76,8±2,4
		75	1,15	796,0±8,8	0,49±0,08	0,70±0,02	0,90±0,01	78,1±3,6
	42,5	25	0,98	1907,8±60,1	0,65±0,06	0,75±0,04	1,06±0,05	78,2±2,9
		50	1,05	1362,9±44,2	0,64±0,09	0,82±0,02	1,02±0,06	78,1±2,5
		75	1,14	842,4±14,4	0,65±0,06	0,78±0,03	0,87±0,06	76,6±1,7
	75	25	0,99	2024,9±12,5	0,75±0,02	0,78±0,04	1,08±0,12	82,4±0,2
		50	1,07	1586,0±21,4	0,82±0,01	0,80±0,01	1,13±0,14	83,6±1,9
		75	1,16	1073,9±18,2	0,70±0,02	0,72±0,06	1,27±0,07	92,9±2,6
MB129	10	25	1,29	1889,6±67,5	0,74±0,08	0,88±0,00	1,08±0,09	81,1±0,1
		50	1,29	1332,6±36,0	0,77±0,09	0,83±0,05	1,01±0,03	80,2±0,1
		75	1,29	760,7±11,4	0,54±0,00	0,64±0,02	0,87±0,05	79,5±1,2
	42,5	25	1,29	1894,8±62,3	0,89±0,03	0,97±0,01	1,12±0,02	78,3±2,8
		50	1,29	1352,3±67,2	0,85±0,01	0,98±0,00	1,16±0,01	78,5±3,6
		75	1,29	841,0±1,1	0,72±0,08	0,81±0,03	1,20±0,00	82,3±5,2
	75	25	1,29	1966,0±82,2	0,81±0,01	0,88±0,00	1,03±0,07	80,3±0,8
		50	1,29	1556,7±76,7	0,82±0,03	0,84±0,01	1,07±0,02	84,7±0,1
		75	1,29	1059,0±11,6	0,90±0,04	0,80±0,02	1,22±0,03	90,5±2,1

APÊNDICE E

Figura E.1 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas no teor de umidade da biomassa, em diferentes frações volumétricas e razões L/D do leito estático.

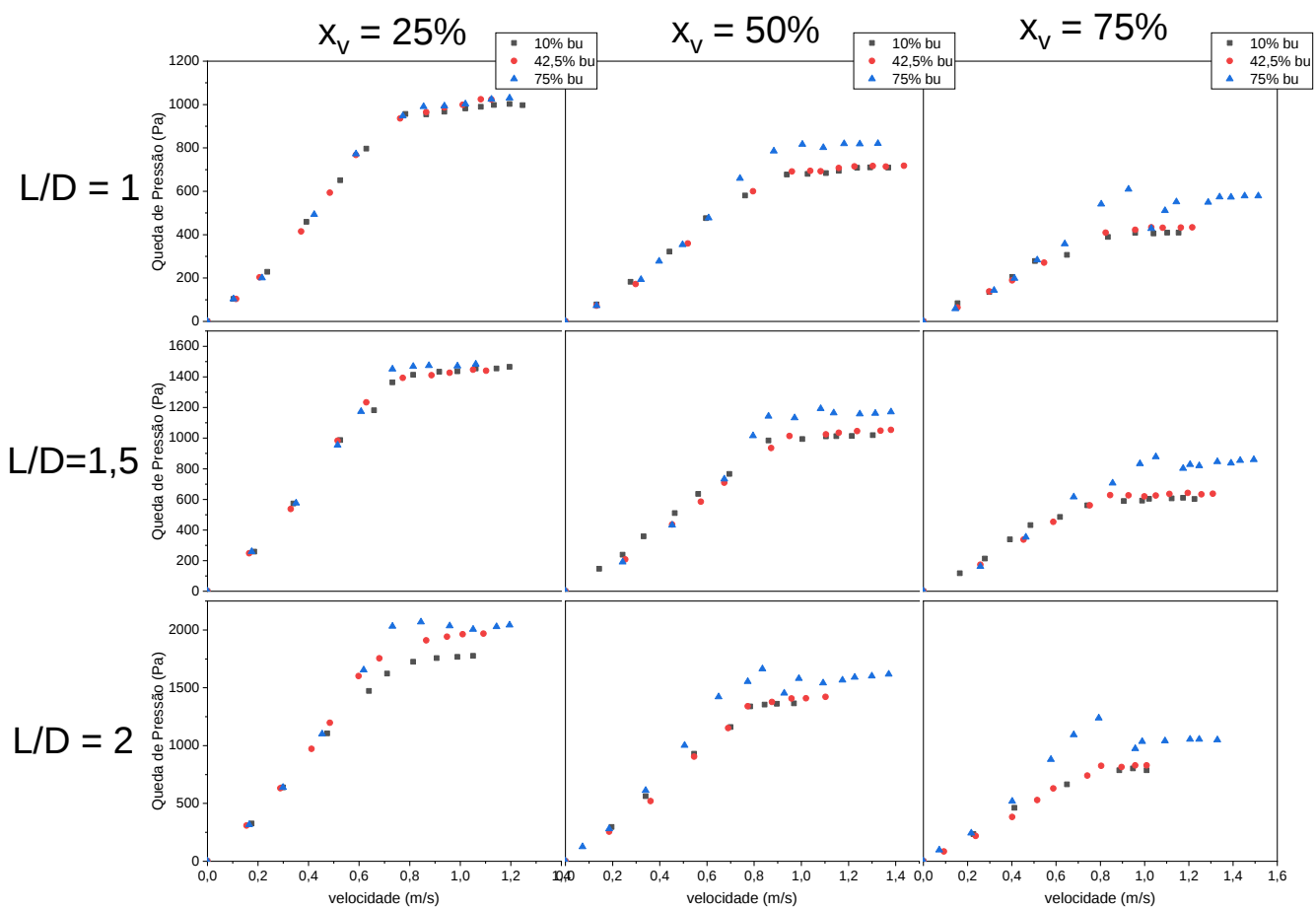


Figura E.2 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas no teor de umidade da biomassa, em diferentes frações volumétricas e razões L/D do leito estático.

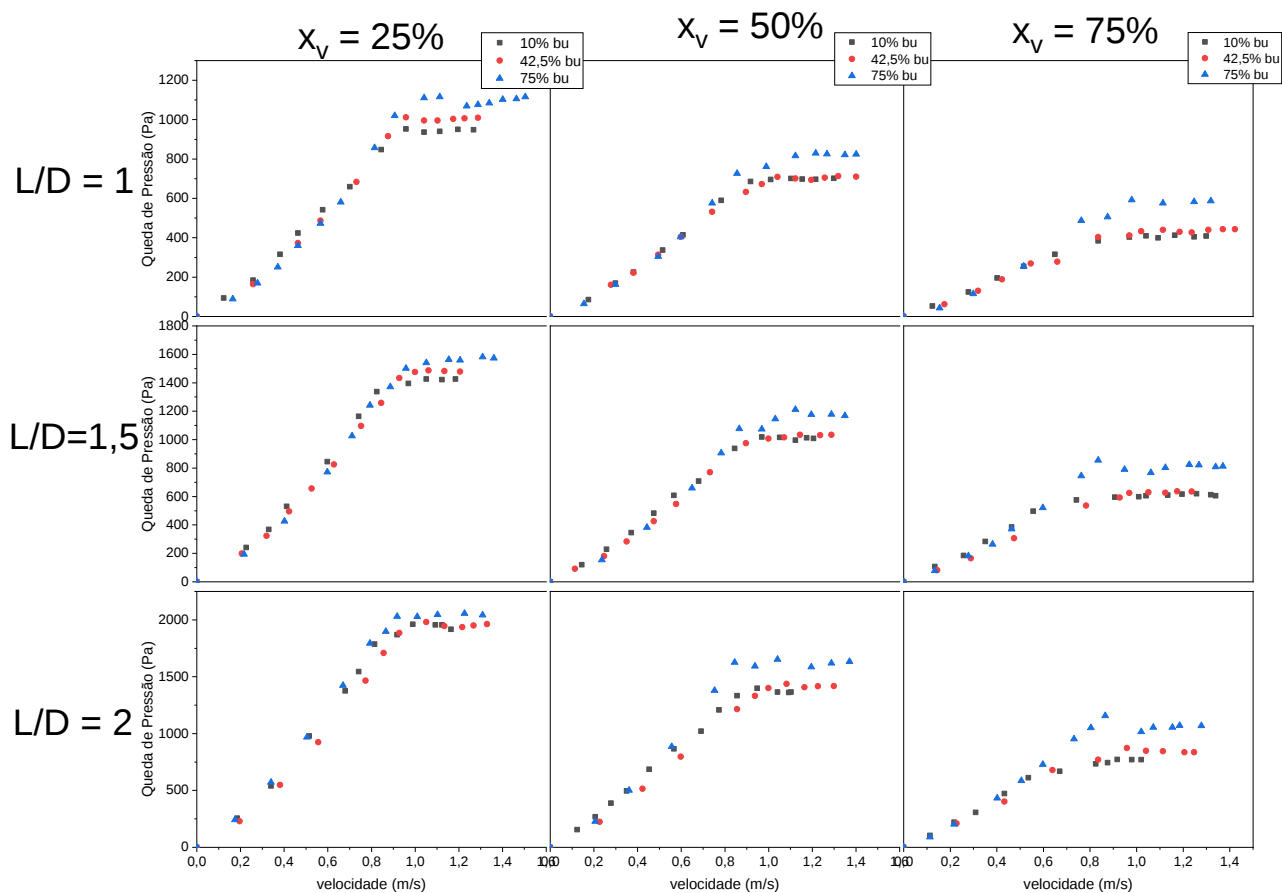


Figura E.3 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas na fração volumétrica da biomassa, em diferentes teores de umidade e razões L/D do leito estático.

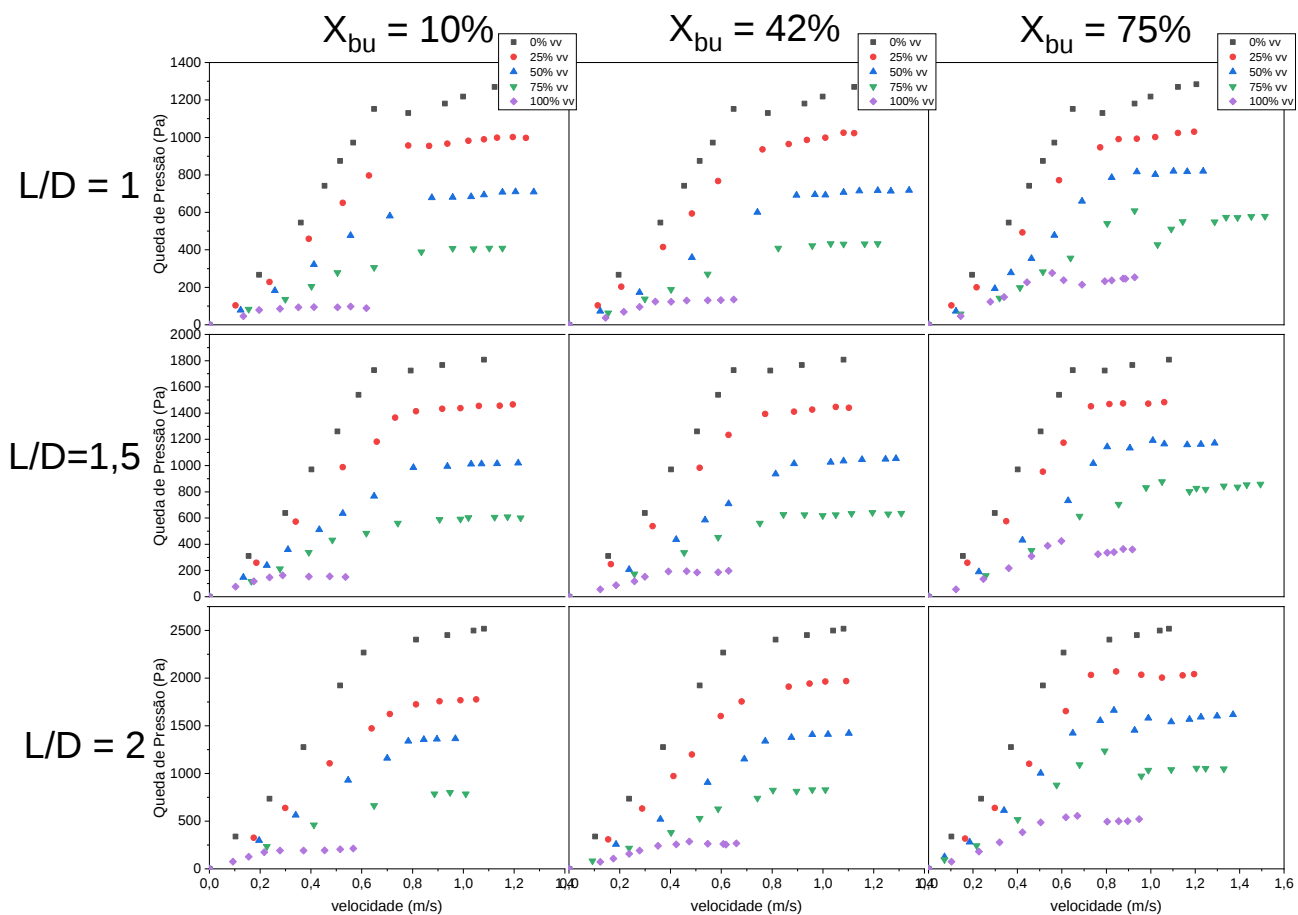


Figura E.4 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas na fração volumétrica da biomassa, em diferentes teores de umidade e razões L/D do leito estático.

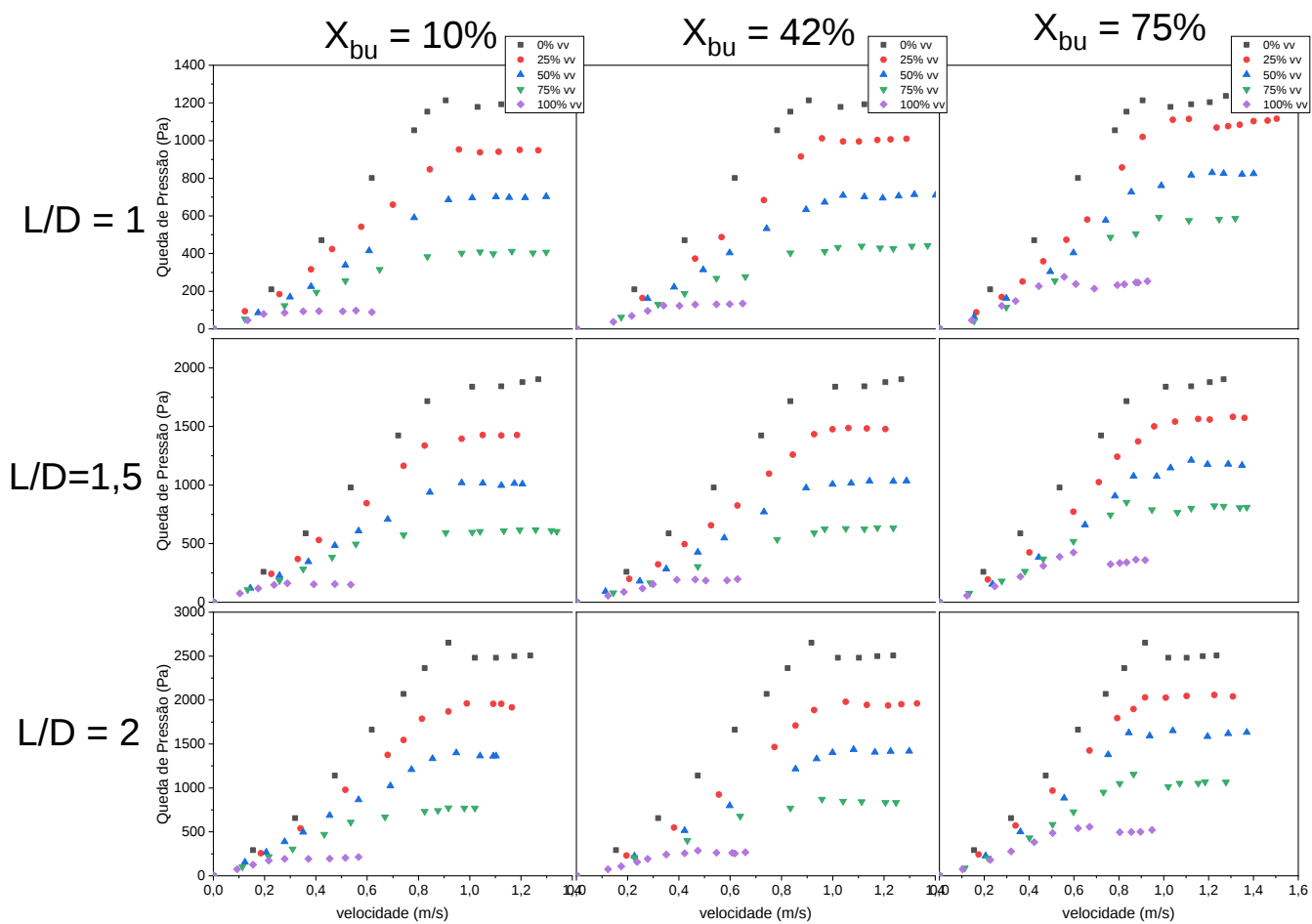


Figura E.5 - Curvas fluidodinâmicas da MB093 parametrizadas na razão de leito estático, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.

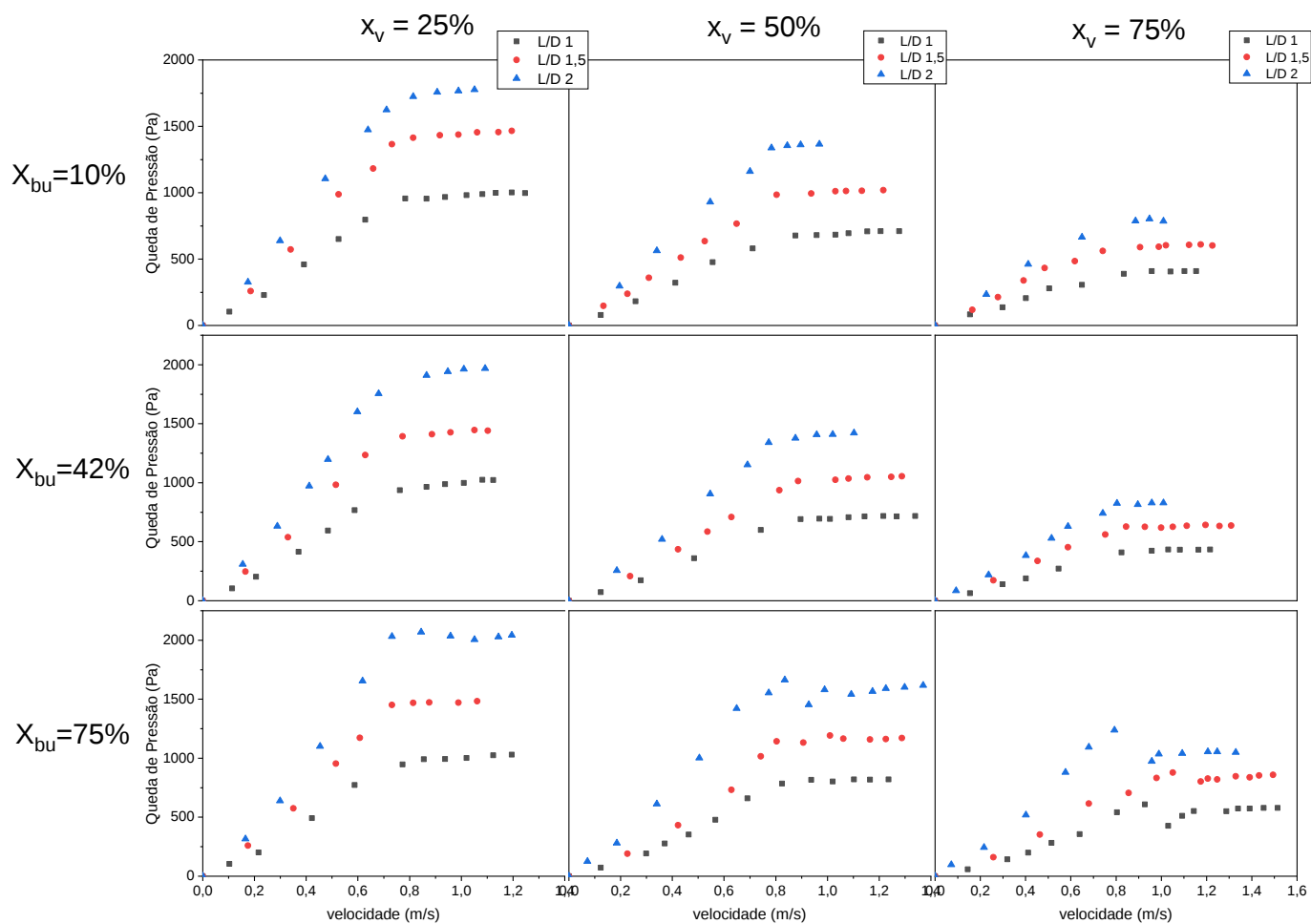
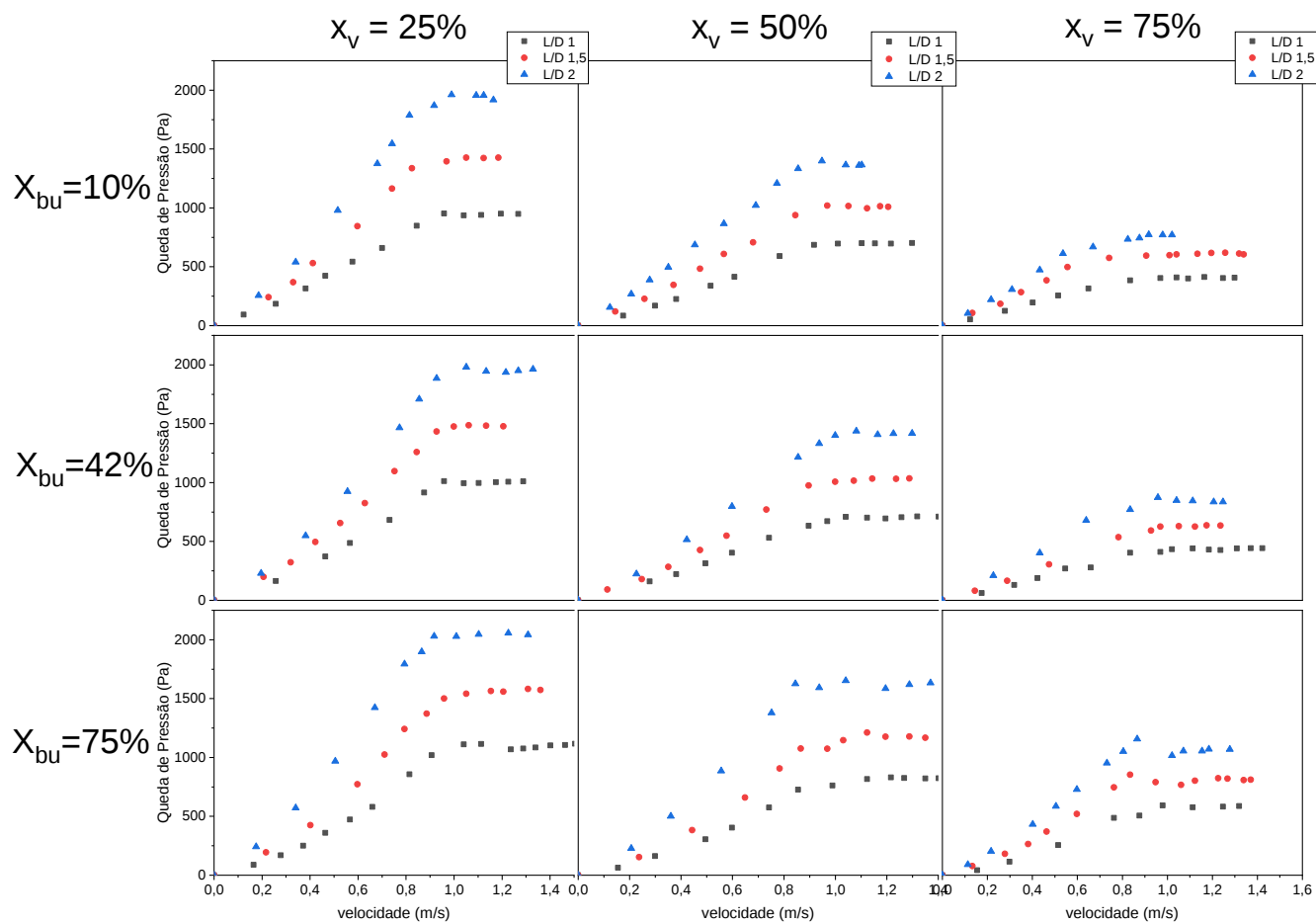


Figura E.6 - Curvas fluidodinâmicas da MB129 parametrizadas na razão de leito estático, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.



APÊNDICE F

Figura F.1 - Velocidades incipiente, mínima e de completa fluidização em função do diâmetro do inerte, para razão $L/D = 1$, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.

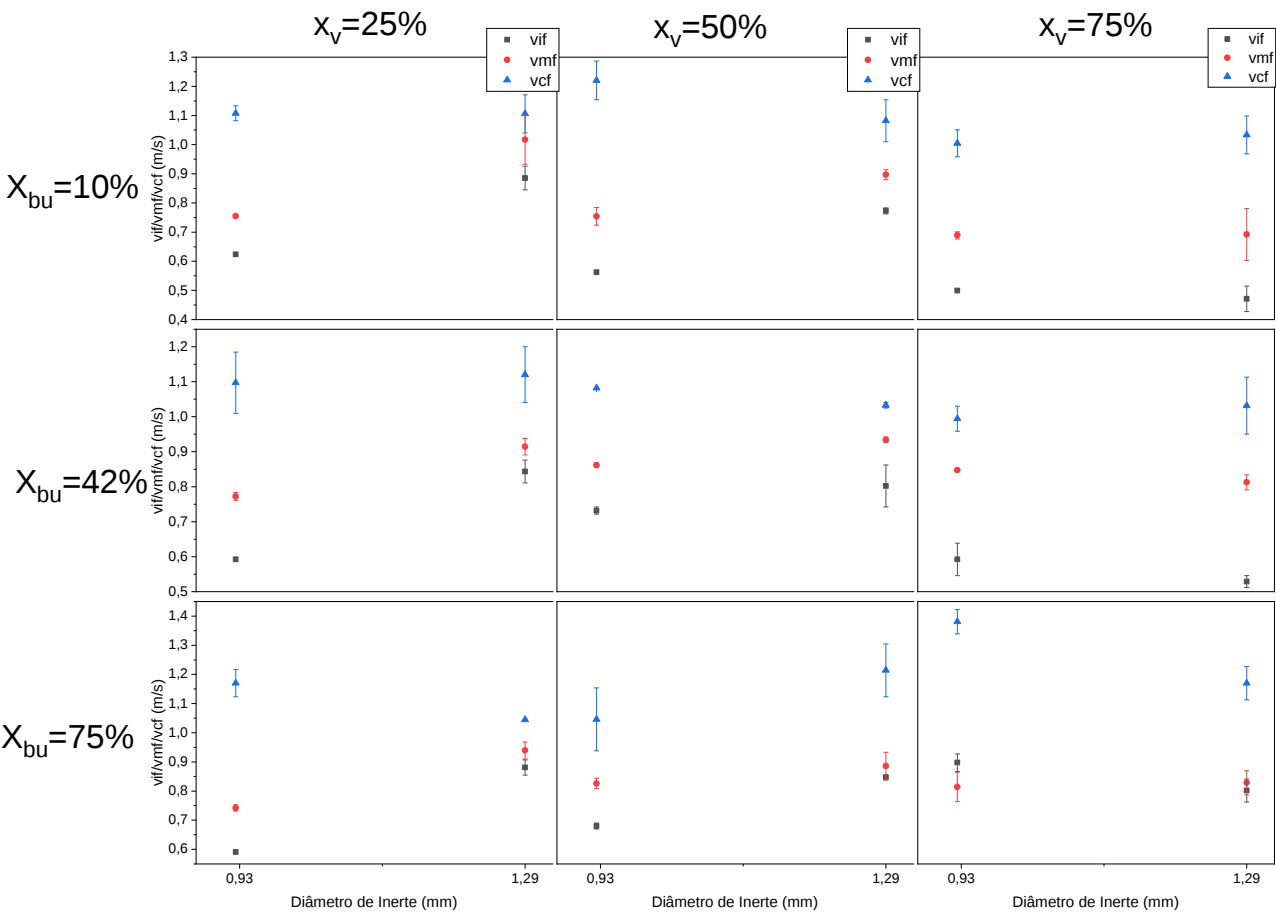


Figura F.2 - Velocidades incipiente, mínima e de completa fluidização em função do diâmetro do inerte, para razão $L/D = 2$, em diferentes teores de umidade e frações volumétricas de biomassa.

