

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

DIONISSON DE ANDRADE MICHELOTTO

**ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DA VARIAÇÃO DA RAZÃO DE ASPECTO DE
PARTÍCULAS CILÍNDRICAS EM LEITO FLUIDIZADO**

SÃO LEOPOLDO
2018

Dionisson de Andrade Michelotto

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DA VARIAÇÃO DA RAZÃO DE ASPECTO DE
PARTÍCULAS CILÍNDRICAS EM LEITO FLUIDIZADO

Dissertação de Mestrado apresentado como
requisito para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a. Prof.^a Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak

Prof.^a Dr.^a. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Prof.^a Dr.^a. Regina Célia Espinosa Modolo

SÃO LEOPOLDO
2018

M623a Michelotto, Dionisson de Andrade.

Análise fluidodinâmica da variação da razão de aspecto de partículas cilíndricas em leito fluidizado / Dionisson de Andrade Michelotto – 2018.

57 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

“Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander”

1. Dinâmica de fluidos. 2. Fluidização. 3. Razão de aspecto. 4. Velocidade mínima de fluidização. 5. Leito de jorro. I. Título.

CDU 532

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Silvana Teresinha Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

RESUMO

O impacto ambiental ocasionado pela combustão do carvão mineral em máquinas térmicas estimula buscas de alternativas sustentáveis. Uma das alternativas pode ser a substituição do carvão pela biomassa em reatores de leito fluidizado. A velocidade mínima de fluidização das partículas é um parâmetro fluidodinâmico que influencia fortemente o comportamento em projetos de reatores de leito fluidizado. A maioria das pesquisas utiliza como um dos principais parâmetros em suas correlações a esfericidade. Outros estudos afirmam que a razão de aspecto influencia bastante a velocidade mínima de fluidização. Utilizando um reator de leito fluidizado com distribuidor de placa perfurada, partículas de bambu cilíndricas com razões de aspecto de 2, 4 e 6, pertencente ao grupo D da classificação Geldart, foram fluidizadas. Nos resultados experimentais foi possível observar que a razão de aspecto influencia na velocidade mínima de fluidização, quanto maior a razão de aspecto, maior a velocidade. Os resultados foram comparados com outros autores, onde cinco ficaram suficientemente próximos dentro de uma variação de 20% dos valores obtidos nos experimentos. Como a fluidização se comportava tipo jorro, foi comparado com correlações de jorro, onde uma única correlação ficou com variação em torno de 20% dos valores obtidos nos experimentos, enquanto as outras correlações ficaram com diferenças maiores. Uma nova correlação foi proposta modificando-se a equação de Ergun através da substituição da esfericidade pela razão de aspecto e ajustando seus coeficientes. Nesta nova correlação os valores da velocidade mínima de fluidização calculados ficaram próximos aos resultados experimentais dentro de uma variação de 15%.

Palavras-chave: leito fluidizado, razão de aspecto, velocidade mínima de fluidização, leito de jorro

ABSTRACT

The environmental impact caused by the combustion of mineral coal in thermal plants stimulates researches for sustainable alternatives. One of the alternatives may be the replacement of coal by biomass in fluidized bed reactors. The particle minimum fluidization velocity is a fluid dynamics parameter that strongly influences the behavior in fluidized bed reactor designs. Most academic papers use the sphericity as one of the main parameters in their correlations. Other studies state that the aspect ratio greatly influences the minimum fluidization velocity. Using a fluidized bed reactor with perforated plate distributor, cylindrical bamboo particles with aspect ratios of 2, 4 and 6, belonging to group D of the Geldart classification, were fluidized. In the experimental results it was possible to observe that the aspect ratio influences the minimum fluidization velocity. The results were compared with other authors, where five were sufficiently close within a variation of 20% of the values obtained in the experiments. As fluidization behaved like a spout, it was compared with spout correlations, where a single correlation achieved differences below 20% than the values obtained in the experiments, while the other correlations obtained larger differences. A new correlation was proposed based in the Ergun equation replacing sphericity by the aspect ratio and adjusting its coefficients. In this new correlation the calculated minimum fluidization velocity values were close to the experimental results within a range of 15%.

Keywords: fluidized bed, aspect ratio, minimum fluidization velocity, spouted bed

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Regimes de fluidização no diagrama de perda de pressão em função a velocidade de fluidização.....	16
Figura 2.2 - Medição da largura e comprimento da partícula de biomassa.....	20
Figura 2.3 - Diagrama de classificação das partículas para fluidização.....	20
Figura 2.4 – Esquema de um leito em jorro em um reator usual para jorro.....	22
Figura 2.5 – A mínima fluidização definida no ponto B.....	25
Figura 2.6 – Coeficientes de arrastos c_d para alguns formatos geométricos para $Re > 10^4$	26
Figura 2.7 – Resultados experimentais e da modelação da (u_{mf}) para bagaço de cana.....	27
Figura 2.8- Correlações para velocidade mínima de jorro que Monazam (2018) utilizou para sua pesquisa.	30
Figura 3.1- Preparação dos palitos para colocar no tridimensional.....	33
Figura 3.2- Equipamento de fluidização de bancada.....	34
Figura 3.3 – Distribuidor de ar tipo tela.....	35
Figura 3.4 – Distribuidor tipo placa perfurada 1 (25 orifícios de 2,5 mm).	36
Figura 3.5 – – Distribuidor tipo placa perfurada 2 (57 orifícios de 4mm).....	36
Figura 3.6 – Curva característica da perda de carga no distribuidor 1 e 2 aumentando a vazão.	37
Figura 3.7 - Curva característica da perda de carga no distribuidor 1 e 2 diminuindo a vazão.	37
Figura 3.8 – Altura inicial do leito (compactado).....	39
Figura 4.1 - Fluidização e defluidização das partículas 4x2 utilizando o distribuidor 1.....	42
Figura 4.2 – Fluidização e defluidização das partículas 8x2 utilizando o distribuidor 1.....	42
Figura 4.3 - Fluidização e defluidização das partículas 4x2 utilizando o distribuidor 2.....	43
Figura 4.4- Fluidização e defluidização das partículas 8x2 utilizando o distribuidor 2.....	43
Figura 4.5 - Fluidização e defluidização das partículas 12x2 utilizando o distribuidor 2.....	44
Figura 4.6 - Expansão do leito após fluidização das partículas de 4x2mm, 8x2mm e 12x2mm (leito solto).....	45
Figura 4.7 – Comparação dos resultados experimentais com a linha de tendência polinomial para a variação da razão de aspecto com a velocidade mínima de fluidização.	46

Figura 4.8- Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mf} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA.	47
Figura 4.9 – Comparação dos resultados experimentais com correlações literárias para a variação da razão de aspecto com a velocidade mínima de fluidização.....	48
Figura 4.10 – Comparação dos resultados do experimental com a equação de Ergun modificado da velocidade mínima de fluidização versus RA	49
Figura 4.11 - Comparação resultados experimentais desse trabalho e de Emden (2016) com os resultados da equação de Ergun modificado.	50
Figura 4.12 - Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mj} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Esfericidade para alguns formatos de partículas	19
Tabela 2.2- Valor das constantes K_1 e K_2 de outros autores.	24
Tabela 2.3 – Propriedades das partículas utilizadas pelo Emden (2016)	28
Tabela 2.4 – Desvio dos resultados de Emden (2016) com a equação de Goroshko (1958) ...	28
Tabela 3.1- Formato e dimensões das partículas padrão	31
Tabela 4.1- Resultado da esfericidade, razão de aspecto	40
Tabela 4.2 – Resultado das massas específicas e da fração de vazio	41
Tabela 4.3- Resultados da velocidade mínima fluidização	44
Tabela 4.4- Diferença das alturas estáticas do leitos	45
Tabela 4.5 - Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mj} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA que ficaram em torno de 95% de erro.....	52

LISTA DE SIGLAS

BEN Balanço Energético Nacional - Brasil

LCVMAT Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área frontal do corpo [m ²]
Ar	Número de Arquimedes [-]
A_{pe}	Área da esfera projetada [m ²]
A_{se}	Área da superfície da esfera [m ²]
A_{sp}	Área da superfície da partícula [m ²]
A_t	Área da superfície do leito [m ²]
A_{orf}	Área total de todos orifícios [m ²]
b	Largura da partícula [m]
C_D	Coeficiente de arrasto [-]
d	Diâmetro da partícula [m]
d_p	Diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula [m]
d_{orf}	Diâmetro de cada orifício [m]
F_D	Força de arrasto [N]
g	Aceleração gravitacional [m/s ²]
L_{mf}	Altura do leito na mínima fluidização [m]
l	Comprimento da partícula [m]
m_a	Massa da amostra [kg]
n_{orf}	Número de orifícios do distribuidor [-]
RA	Razão de aspecto [-]
Re_{mf}	Número de Reynolds na velocidade mínima de fluidização [-]
W	Peso do leito [N]
u	Velocidade de fluidização [m/s]
u_{mf}	Velocidade mínima de fluidização [m/s]
u_{orf}	Velocidade do fluido nos orifícios do distribuidor [m/s]
V_a	Volume ocupado pela amostra [m ³]
\dot{V}	Vazão do fluido no leito [m ³ /h]

Símbolos Gregos

μ_f	Viscosidade absoluta do fluido [N s/m ²]
Δp	Perda de carga [mbar]
Δp_{col}	Perda de carga do leito mais a do distribuidor [mbar]
ε	Fração de vazio do leito [-]
ε_{mf}	Fração de vazio do leito na condição de mínima fluidização [-]
ρ_{ca}	Massa específica de carga [kg/m ³]
ρ_p	Massa específica real [kg/m ³]
ρ_f	Massa específica do fluido [kg/m ³]
Φ_s	Esfericidade das partículas [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivos Específicos	13
1.2 Justificativa	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Regimes De Fluidização	15
2.2 Propriedades Das Partículas	16
2.2.1 Propriedades físicas.....	16
2.2.1.1 <i>Massa específica real</i>	17
2.2.1.2 <i>Massa específica de carga (bulk)</i>	17
2.2.1.3 <i>Fração de Vazio</i>	17
2.2.1.4 <i>Tamanho das partículas</i>	17
2.2.1.5 <i>Esfericidade e razão de aspecto</i>	18
2.2.2 Propriedades fluidodinâmicas.	20
2.2.2.1 <i>Classificação das partículas</i>	20
2.2.2.2 <i>Leito de Jorro</i>	21
2.2.2.3 <i>Velocidade mínima em leito fluidizado</i>	22
2.2.2.4 <i>Força de arrasto</i>	25
2.2.2.5 <i>Fluidização de partículas com grande razão de aspecto</i>	26
2.3 Correlações para jorro.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais utilizados	31
3.2 Preparação das amostras	31
3.3 Determinação das Massas Específicas e Fração de vazio	31
3.4 Determinação da esfericidade e a razão de aspecto	32
3.5 Procedimento Experimental.....	33
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	40
4.1 Esfericidade e a razão de aspecto.....	40
4.2 Massas Específicas, Fração de vazio e Classificação de Geldart.....	41
4.3 Análise fluidodinâmica.....	41
4.4 Expansão do leito estático após fluidização.....	45

4.5 Influência da razão de aspecto	45
4.6 Comparação com Correlações Empíricas	46
4.6.1 Velocidade Mínima de Fluidização.....	47
4.6.2 Velocidade Mínima de Jorro.	51
5 CONCLUSÃO.....	53
5.1 Sugestões para outros trabalhos.....	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é um combustível fóssil formado pela decomposição da matéria orgânica dos restos da vegetação que originalmente há milhões de anos se acumulavam em pântanos e turfeiras. A energia que obtemos do carvão hoje vem da energia que as plantas absorveram do sol durante este período (WORLD COAL, 2014; WORLD ENERGY RESOURCES, 2016). O carvão mineral é a segunda fonte de energia mais importante, fornecendo 30% do consumo global de energia, alimenta atualmente 40% da eletricidade do mundo e está previsto para continuar a fornecer uma parte estratégica nos próximos 30 anos. (WORLD ENERGY RESOURCES, 2016). As reservas minerais brasileiras são compostas pelo carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso, que são classificadas de baixa qualidade, com baixo teor de carbono e alto teor de umidade. As maiores jazidas situam-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Os menores, no Paraná e São Paulo. As reservas brasileiras ocupam o 10º lugar no *ranking* mundial, correspondendo a menos de 1% das reservas totais (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2008). O minério e seus derivados representam 4,5% da matriz da energia elétrica a partir da operação de usinas termoelétricas (Balanço Energético Nacional, 2016).

Biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia. De acordo com a sua origem, pode ser florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2008).

Como vantagens da utilização da biomassa em substituição aos combustíveis fósseis podem-se citar a menor poluição atmosférica global e localizada e a estabilidade do ciclo de carbono. Assim, a mistura de carvão com a biomassa resultará na redução do consumo de carvão mineral e da emissão de CO₂ para a atmosfera. Em relação a outros tipos de energias renováveis, a biomassa, sendo energia química, destaca-se pela alta densidade energética e pelas facilidades de armazenamento, conversão e transporte (SILVA; BENTES; MEDRADO; SOBRINHO; JÚNIOR, 2008).

Os leitos fluidizados são encontrados em muitas operações de plantas em indústrias químicas, farmacêuticas e minerais (TAGHIPOUR.; ELLIS; WONG, 2005). A tecnologia do leito de fluidização é um método para alcançar uma maior eficiência de combustão de 96-98%

e cerca de 60-80 vezes maior taxa de transferência de calor em caldeiras a vapor que as obtidas submergindo o trocador de calor em gases de combustão dos combustíveis. É possível atingir-se eficiências na caldeira de 80 a 85%, com vantagem adicional de baixa temperatura de combustão (800-900 °C) e, portanto, baixa emissão de NO_x (ABDULLAH, 2003).

A zona de combustão em caldeiras de leito fluidizado opera em condições fluidodinâmicas especiais essenciais para um bom processo de combustão (ABDULLAH, 2003). A velocidade mínima de fluidização das partículas é um parâmetro fluidodinâmico que tem influência elevada no comportamento dos leitos fluidizados. Portanto, sua previsão precisa é de grande importância para a concepção de tais equipamentos e vários autores definem correlações para estimar essa velocidade baseados em diversos parâmetros físicos, geométricos e fluidodinâmicos (REINA; VELO; PUIGJANER, 2000; COLTTERS; RIVAS, 2004).

Grande parte do desenvolvimento de reatores de leito fluidizado tem sido empírico, pois o complexo comportamento do escoamento do gás nos sistemas faz a modelagem de fluxo uma tarefa desafiadora (TAGHIPOUR.; ELLIS; WONG, 2005). Muitos autores utilizam a esfericidade como parâmetro principal para elaborar suas correlações, embora Perez (2016) tenha estudado partículas com alta razão de aspecto, ou seja, com um comprimento muito maior que o diâmetro, que apresentou uma alta coesividade, tornando praticamente impossível fluidizá-las. Verificou-se também a formação de canais preferenciais, através dos quais o gás escapou sem ser capaz de fluidizar o leito.

Há poucos estudos sobre a influência da razão de aspecto na velocidade mínima de fluidização e, assim, este trabalho demonstra a influência da razão de aspecto na velocidade mínima de fluidização.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é determinar o efeito da razão de aspecto na velocidade mínima de fluidização, comparando os resultados com correlações literárias.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivo específico pretende-se:

- Analisar a influência do distribuidor na fluidização de partículas com razão de aspecto alto.

- Avaliar o comportamento da mínima velocidade de fluidização variando a razão de aspecto de partículas padronizadas.
- Determinar uma correlação apropriada levando em conta a razão de aspecto.

1.2 Justificativa

A questão ambiental levantada pelo uso de combustíveis fósseis para geração de energia tem levado a pesquisas na busca de alternativas para a redução das emissões de gases poluentes como CO₂, CO, SO₂ e NO_x. O uso da biomassa em sistemas de co-combustão em leito fluidizado é mencionado como uma destas alternativas (LINHARES; GOMES; MARCÍLIO; MELO, 2016).

Como a fluidodinâmica dos componentes é essencial para o projeto dos reatores de leito fluidizado borbulhante, há vários estudos do comportamento fluidodinâmico, porém, a maioria das pesquisas é com componentes de partículas com classificação de Geldart A e B e com razão de aspecto baixo que são partículas mais fáceis de fluidizar.

Desta forma, este trabalho visa a análise do comportamento fluidodinâmico de palitos de bambu, cujas características entram na classificação de Geldart D, variando sua razão de aspecto e comparando os resultados com correlações literárias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta revisão bibliográfica referente a breves definições do regime de fluidização, características das partículas, tanto física como fluidodinâmica e algumas correlações de alguns autores para facilitar a caracterização da fluidodinâmica de biomassa, inertes e a mistura entre elas.

2.1 Regimes De Fluidização

A fluidização é a operação pela qual as partículas sólidas se comportam como fluido através da suspensão por um gás ou líquido. Este método de contato tem algumas características incomuns (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Os tipos de regime de fluidização são:

Leito fixo - Se um fluido é passado para cima através de um leito de partículas finas, o fluido simplesmente percola através dos espaços vazios entre partículas estacionárias. Este é um leito fixo (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Leito borbulhante - Geralmente, os sistemas gás-sólidos comportam-se de forma bastante diferente. Com um aumento da vazão para além da fluidização mínima, observam-se grandes instabilidades com borbulhamento e canalização de gás. Há vazões mais altas, a agitação se torna mais violenta e o movimento de sólidos se torna mais vigoroso. Além disso, o leito não se expande muito para além do seu volume com uma fluidização mínima (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Leito turbulento - Quando partículas finas são fluidizadas a uma vazão de fluido suficientemente elevado, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície superior do leito desaparece, o arrastamento torna-se apreciável e, em vez de bolhas, observa-se um movimento turbulento de aglomerados sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas. Este é o leito fluidizado turbulento (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Fluidização rápida - No contexto da sua utilização em caldeiras de leito fluidizado circulante (CFB), o leito fluidizado rápido pode ser definido como uma suspensão gasoso-sólida de alta velocidade em que as partículas, elutriadas pelo gás de fluidificação acima da velocidade terminal de partículas individuais, são recuperadas e retornadas para a base do reator a uma taxa suficientemente alta para causar um grau de refluxo sólido que assegurará um mínimo nível de uniformidade de temperatura no forno (BASU, 2004).

Transporte pneumático - Com um aumento adicional da velocidade do gás, os sólidos são transportados do leito com o gás. Neste estado, temos um leito fluidizado em fase dispersa ou diluída.

O comportamento de cada tipo de regime explicado anteriormente é mostrada na Figura 2.1 no diagrama de perda de pressão em função da velocidade do fluido, desde uma baixa vazão no leito fixo até alta vazão já com características de transporte pneumático.

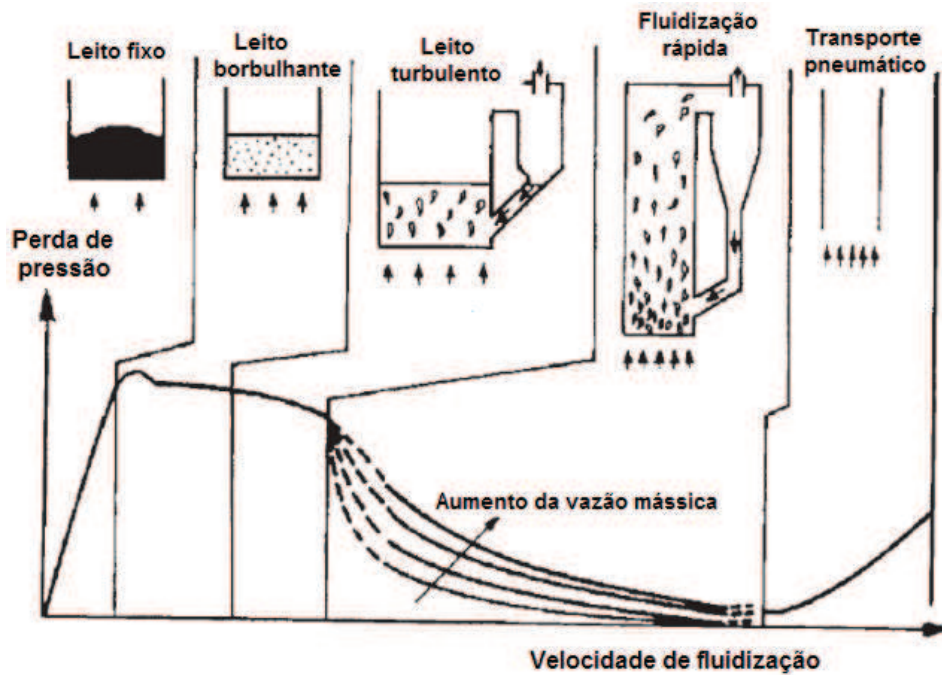


Figura 2.1 - Regimes de fluidização no diagrama de perda de pressão em função a velocidade de fluidização
Fonte: Oka (2004).

2.2 Propriedades Das Partículas

Conhecer as propriedades das partículas é relevante para o estudo da fluidização e está diretamente associada as suas propriedades físicas e fluidodinâmicas.

2.2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas das partículas são importantes no comportamento da fluidização, pois elas influenciam a percolação do fluido através das partículas.

2.2.1.1 Massa específica real

Massa específica real é definida como massa específica de partículas, incluindo os vazios dentro da partícula individual. Isto é definido como a massa da partícula dividida pelo volume. (ABDULLAH, 2003).

2.2.1.2 Massa específica de carga (bulk)

A massa específica de carga é a massa específica total do material solto, incluindo a separação de distância interparticular. De acordo com a equação Eq. (2.1) definido como massa total de material dividido pelo volume unitário. É medido simplesmente despejando a quantidade pesada de amostra de partículas através de um funil em um cilindro graduado e o volume ocupado determina a massa específica de carga (ABDULLAH, 2003).

$$\rho_{ca} = \frac{m_a}{V_a} \quad (2.1)$$

onde m_a é a massa da amostra e V_a é o volume ocupado pela amostra, ρ_{ca} representa a massa específica de carga.

2.2.1.3 Fração de Vazio

Uma massa de material tem partículas que descansam uma na outra devido à força da gravidade para formar um leito empacotado. Contudo, dependendo da forma das partículas e das características de empacotamento, certo volume de espaço entre as partículas permanece desocupado, tal espaço é chamado de vazio e é definido pela Eq. (2.2) (ABDULLAH, 2003).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ca}}{\rho_p} \quad (2.2)$$

onde ε representa a porosidade do leito, ρ_p representa a massa específica real da partícula.

2.2.1.4 Tamanho das partículas

O tamanho de partículas pode ser encontrado através de paquímetros ou micrômetros se as partículas tiverem forma regular.

A partir das medições é calculado o diâmetro da partícula equivalente ao diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume da partícula. A da partícula de forma cilíndrica em estudo é definido na Eq. (2.3).

$$d_p = 2 \sqrt[3]{\frac{3 d^2 l}{16}} \quad (2.3)$$

onde d é o diâmetro da partícula, d_p é o diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula e l é o comprimento da partícula.

2.2.1.5 Esfericidade e razão de aspecto

A esfericidade descreve a orientação da partícula de forma esférica (BASU, 2006). O valor da esfericidade fica entre zero e um, onde quanto mais próximo de zero, mais longe da partícula ser considerada uma esfera.

A esfericidade pode ser determinada pela razão entre a área da superfície da esfera e a área da superfície da partícula, ambas com o mesmo volume (KUNII; LEVENSPIEL, 1991), apresentada na Eq.(2.4).

$$\phi_s = \frac{A_{se}}{A_{sp}} \quad (2.4)$$

onde ϕ_s representa a esfericidade da partícula, A_{se} representa a área da superfície da esfera, A_{sp} representa a área da superfície da partícula.

Kunii e Levenspiel (1991) disponibilizaram uma tabela com valores de esfericidades para alguns formatos geométricos utilizando a Eq. (2.4), mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Esfericidade para alguns formatos de partículas

Formato da Partícula	Esfericidade
Esfera	1
Cubo	0,81
Cilindro	
$l = d$	0,87
$l = 5d$	0,7
$l = 10d$	0,58
discos	
$l = d/3$	0,76
$l = d/6$	0,6
$l = d/10$	0,47

Fonte: Adaptado de (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

Alguns problemas surgem ao determinar a esfericidade. Todos os tipos e formas de partículas podem ter a mesma esfericidade e é muito difícil avaliar adequadamente a esfericidade das partículas irregulares, principalmente quando ele é bem diferente de uma esfera (KUNII E LEVENSPIEL, 1991)

Para as partículas bem diferentes de uma esfera onde os diâmetros estão mal definidos, os resultados obtidos com a aplicação de qualquer modelo esférico certamente terão viés ou erro imprevisível. Em certos casos extremos, os resultados da utilização de um modelo esférico sobre partículas não-esféricas serão muito diferentes da realidade (XU; DI GUIDA, 2003). As partículas tipo fibra assumem essa característica, onde a sua razão comprimento e largura talvez possa ser utilizada como parâmetro para análise da fluidodinâmica através da razão de aspecto apresentada na Eq. (2.5).

$$RA = \frac{l}{b} \quad (2.5)$$

onde RA é a razão de aspecto e b é a largura da partícula.

Como exemplo, uma partícula de biomassa com razão de aspecto grande é mostrada na Figura 2.2.

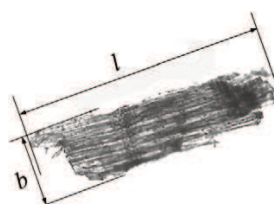


Figura 2.2 - Medição da largura e comprimento da partícula de biomassa
 Fonte: Adaptado de (GUO, Q.; CHEN, X., LIU, 2012)

Neste método, a largura b é tomada como a dimensão básica e definida como a distância mínima entre duas linhas paralelas tangenciais ao contorno projetado da partícula e o comprimento l é a distância entre duas tangentes ao contorno projetado da partícula desenhada perpendicularmente às tangentes que definem a largura.

2.2.2 Propriedades fluidodinâmicas.

2.2.2.1 Classificação das partículas

Nem todos os tipos de partículas podem ser fluidizados satisfatoriamente. O tamanho de partícula é um parâmetro importante para a fluidização. As partículas podem ser classificadas de acordo com classificação baseada na massa específica e tamanho da partícula (ABDULLAH, 2003). Ao observar cuidadosamente a fluidização de todos os tipos e tamanhos de sólidos, Geldart organizou quatro grupos claramente reconhecíveis na Figura 2.3, caracterizados pela diferença de massa específico e tamanho médio da partícula para fluidizar com ar em condições ambientais.

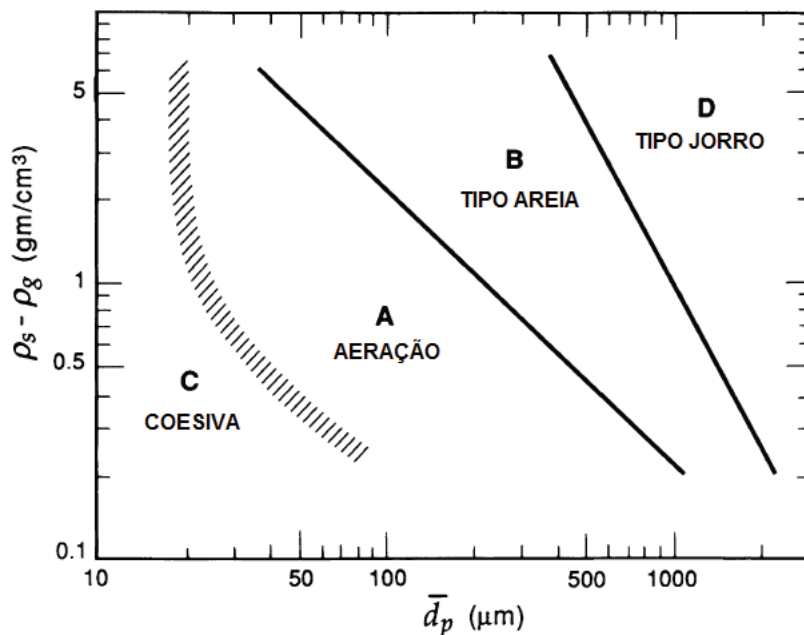


Figura 2.3 - Diagrama de classificação das partículas para fluidização.
 Fonte: Adaptado de (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

As características mais facilmente reconhecíveis dos grupos são:

Os pós, no grupo A, que exibem uma expansão de fase densa após uma fluidização mínima e antes do início das bolhas; as que pertencem ao grupo B, que formam bolhas à velocidade de fluidização mínima; as do grupo C, que são difíceis de fluidizar e as do grupo D que podem formar leito de jorro (GELDART, 1972).

2.2.2.2 Leito de Jorro

Além dos regimes citados no item 2.1, há um regime chamado leito de jorro caracterizado pelo o comportamento dos sólidos em um leito que jorra ao receber um jato de gás de alta vazão no centro do leito. Para ter esse comportamento de jorro geralmente utiliza-se um reator de formato cilíndrico de base cônica com um orifício localizado no centro que permite a passagem do fluido. A injeção do fluido em altas vazões promove um fluxo de partículas ascendente em forma de um canal central, dentro do leito de sólidos. Estas partículas, após alcançarem o topo do leito, formam uma fonte, dirigida à periferia do leito e caem dentro da região anular, entre o núcleo do canal e as paredes da coluna. As partículas são lentamente levadas em movimento descendente, até que na base do recipiente ocorre o reencontro das partículas com o fluxo de ar do canal central, permitindo o movimento sistemático contínuo e cíclico das partículas: um sistema fluidodinâmico único que é o leito de jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

As setas na Figura 2.4 indicam os sentidos dos movimentos das partículas em um leito de jorro.

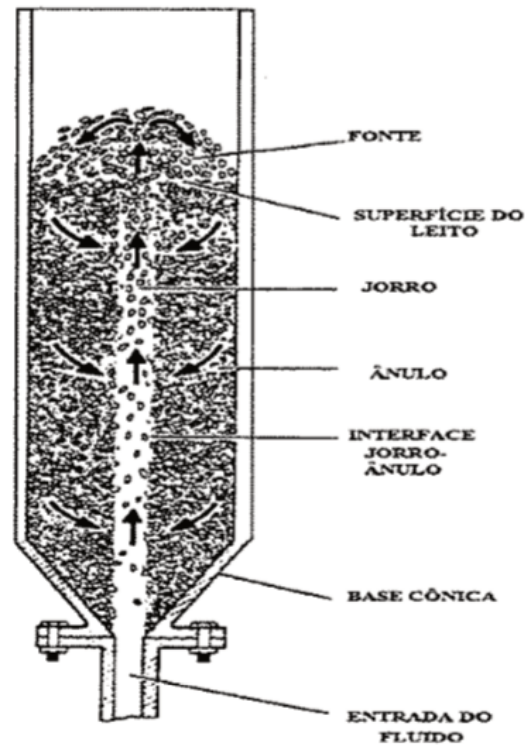


Figura 2.4 – Esquema de um leito em jorro em um reator usual para jorro
 Fonte: (Mathur; Epstein, 1974).

2.2.2.3 Velocidade mínima em leito fluidizado

A velocidade mínima de fluidização ocorre onde o arrasto do fluido é igual ao peso de uma partícula menos a sua flutuabilidade, onde o leito fixo se transforma em um leito fluidizado e as partículas sólidas se comportam como um líquido (BASU, 2006).

A equação de Ergun é aplicada em uma ampla gama de números de Reynolds para partículas não-esféricas. Ergun apresentou que a queda de pressão no leito é igual à energia total perdida por causa da viscosidade e efeitos cinéticos. (FARSHI, 2013). Este conceito é expresso na Eq. (2.6) que representa a equação de Ergun.

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\mu_f \cdot u_{mf}}{(\phi_s \cdot d_p)^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\rho_f \cdot u_{mf}^2}{(\phi_s \cdot d_p)} \quad (2.6)$$

onde Δp representa a perda de carga no leito, L_{mf} representa a altura do leito da mínima fluidização, μ_f é a viscosidade absoluta do fluido, u_{mf} é a velocidade mínima de fluidização, ϕ_s a esfericidade das partículas e ε_{mf} é a fração de vazio.

Como é expresso anteriormente que o sólido ou fluido está fluindo para cima, onde a ação fluidizada acontece. A equação Eq.(2.7) é aplicada onde o peso de partículas é igual à força de arrasto que é proveniente do movimento de gás.

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) g \quad (2.7)$$

onde g é a aceleração gravitacional [m/s²].

Usando a equação da queda de pressão no leito (Equação de Ergun), onde a velocidade da fluidez é mínima, a queda de pressão pode ser obtida pela Eq.(2.8).

$$Ar = \frac{1,75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} (Re_{mf}) \quad (2.8)$$

Onde:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (2.9)$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} \quad (2.10)$$

onde na Eq.(2.9) Ar representa o número de Arquimedes, na Eq. (2.10) Re_{mf} representa o número de Reynolds na velocidade mínima de fluidização.

Segundo Kunii e Levenspiel (1991) a Eq.(2.8) pode ser descrita na Eq. (2.11).

$$Re_{mf} = (K_1^2 + K_2 Ar)^{0,5} - K_1 \quad (2.11)$$

Onde:

$$K_1 = \frac{1,75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.12)$$

$$K_2 = \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.13)$$

Através da Eq.(2.11) Wen e Yu (1966) viram que o valor de K_1 e K_2 permanecem constante para diversos tipos de partículas e para determinados parâmetros. Na Tabela 2.2 mostra outros valores das constantes elaborados por outros pesquisadores.

Tabela 2.2- Valor das constantes K_1 e K_2 de outros autores.

Pesquisador	K_1	K_2	Tipo de partículas
Kozanoglu et al. (2002)	30,3	0,0546	$\phi > 0,8$ Pimenta preta, painço, pasto,
	36,8	0,065	$0,5 < \phi \leq 0,8$ sementes de relva, feijão francês
	33,6	0,0598	Para ambos tipos de partículas
Wen e Yu, (1966)	33,7	0,0408	Vários tipos inclusive esferas de aço
Saxena e Vogel, (1977) apud Perez (2016)	25,5	0,0571	Dolomita
Babu et al. (1978) apud Perez (2016)	25,3	0,0651	Carvão, calcário, dolomita, minério de ferro
Chitester e Kornodky, (1984)	28,7	0,0494	Esferas de vidro, carvão até 64 bar
Richardson e Jeronimo, (1979)	25,7	0,0365	Carvão, char, calcário, cal
Grace, (1986) apud Perez (2016)	27,2	0,0408	Areia fina $< 100 \mu\text{m}$
Reina et al. (2000)	48	0,045	Vários tipos de madeiras
Paudel e Feng, (2013)	30,28	0,108	Nozes, casca de nozes, caule de milho

Fonte: adaptado de Perez (2016)

Experimentalmente, através do gráfico de perda de carga versus a velocidade do fluido na superfície no leito, a velocidade mínima de fluidização é definida pela a intersecção da linha do leito fixo com a linha do peso das partículas exercida na área da secção do reator. Essa (intersecção é apontada no ponto B na Figura 2.5) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

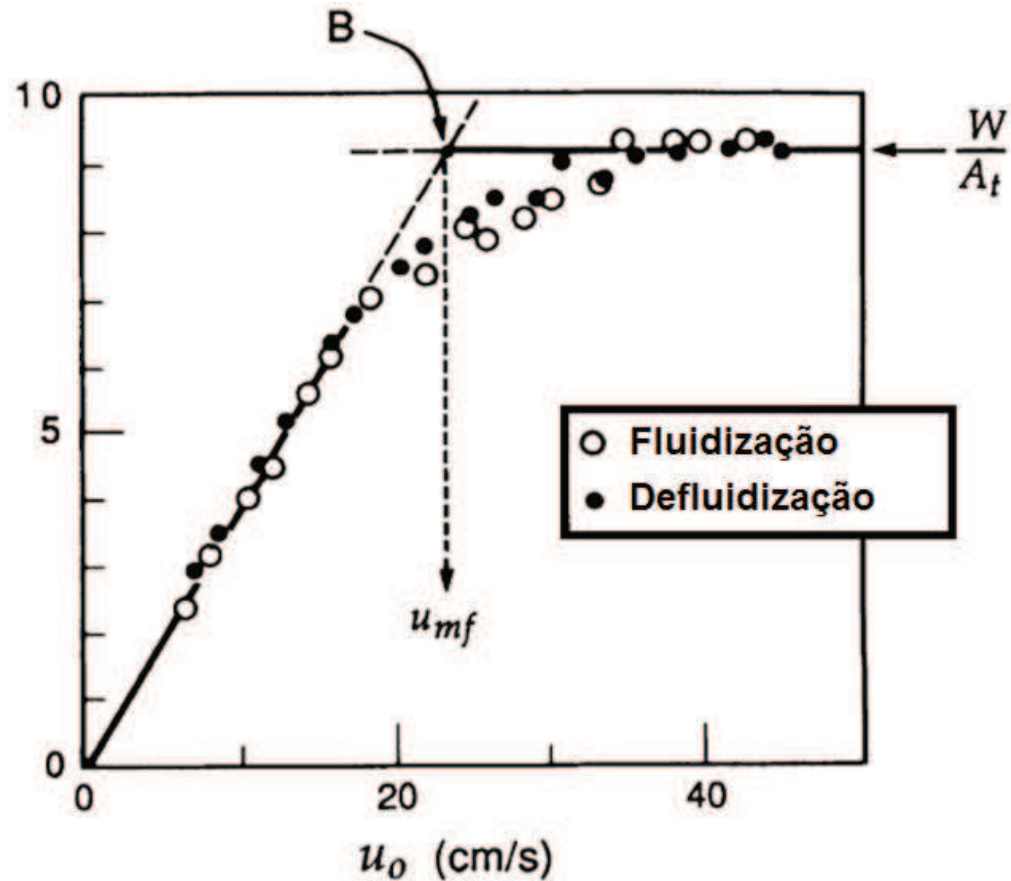


Figura 2.5 – A mínima fluidização definida no ponto B.
 Fonte: Adaptado de (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

2.2.2.4 Força de arrasto

A Força de arrasto é a força total exercida por um fluido sobre um corpo na direção do escoamento devido aos efeitos combinados de forças de cisalhamento na parede e forças de pressão (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Este comportamento é determinado pela Eq.(2.14).

$$F_D = C_D A \frac{\rho u^2}{2} \quad (2.14)$$

onde F_D é a força de arrasto, C_D é o coeficiente de arrasto e A é área frontal do corpo.

Na Figura 2.6 demonstra alguns coeficientes de arrasto, considerando $Re > 10^4$, para alguns formatos geométricos.

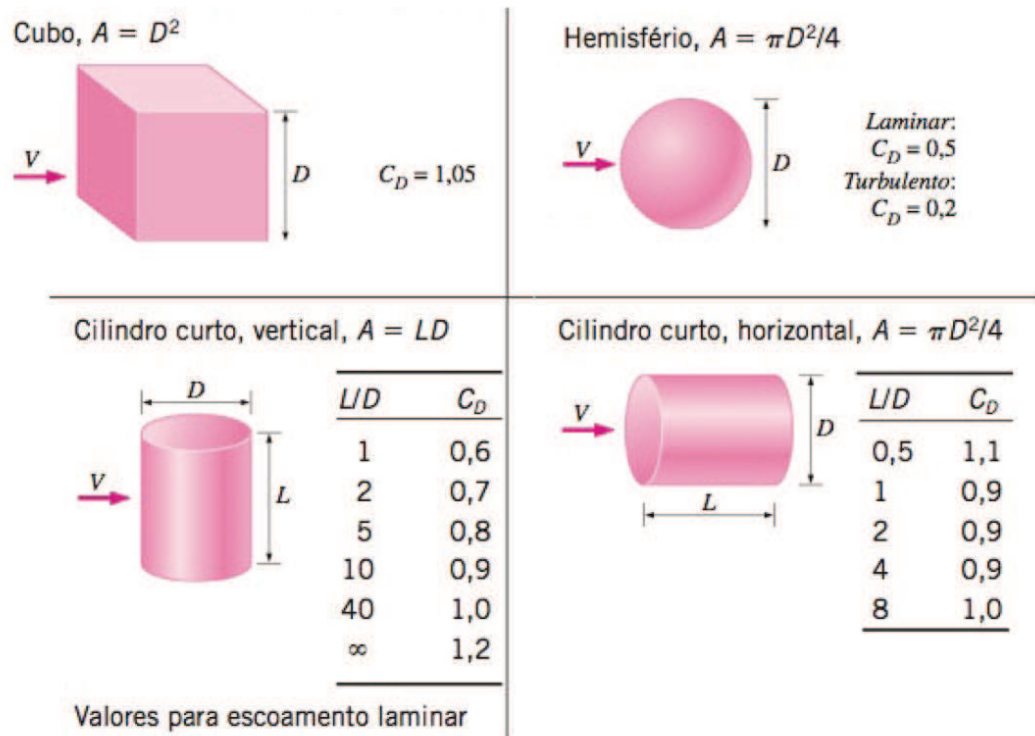


Figura 2.6 – Coeficientes de arrastos c_d para alguns formatos geométricos para $Re > 10^4$
Fonte: Adaptado de (ÇENGEL; CIMBALA, 2007)

Observando a Figura 2.6, especificamente na geometria cilindro curto, o coeficiente de arrasto muda conforme a área onde está sendo aplicada a força de arrasto. A força necessária para a suspensão de partículas dentro de um leito fluidizado é influenciada pelo coeficiente de arrasto da partícula.

2.2.2.5 Fluidização de partículas com grande razão de aspecto

Pérez (2016) realizou uma análise experimental da fluidodinâmica das partículas de bagaço de cana-de-açúcar numa coluna de fluidização de 190 mm de diâmetro interno, onde foi determinada a velocidade mínima de fluidização das partículas de bagaço com diâmetros característicos diferentes ($0 < d_p < 9,5$ mm) usando ar como meio de fluidização. Os resultados mostraram que a velocidade mínima de fluidização tem uma tendência de aumentar à medida que aumenta o diâmetro da partícula. No entanto, numa certa faixa de tamanho das partículas ($0,88$ mm $< d_p < 9,5$ mm), onde as partículas têm uma alta razão de aspecto, não foi possível fluidizá-las, mesmo aplicando alta velocidade superficial de ar. Isto ocorre, devido tendência

de entrelaçamento somado com as elevadas forças de adesão deste tipo de partículas polidispersas, bem como a elevada porosidade apresentada.

Com base nos resultados experimentais foi desenvolvido um novo modelo, representada pela Eq. (2-15), para a determinação da velocidade mínima de fluidização das partículas de bagaço de cana-de-açúcar com diâmetros característicos na faixa de 0,075 mm - 0,445 mm.

$$u_{mf} = \frac{0,082 \cdot Ar^{0,4311} \cdot \mu_f}{d_p \cdot \rho_f} \quad (2-15)$$

onde ρ_f representa a massa específica do fluido.

Os resultados foram comparados com correlações disponíveis na literatura, apresentadas na Figura 2.7, para a determinação da velocidade mínima de fluidização assim como com os resultados experimentais. Essas comparações mostraram que o novo modelo proposto prevê este parâmetro com um erro máximo de 6% em relação aos valores experimentais.

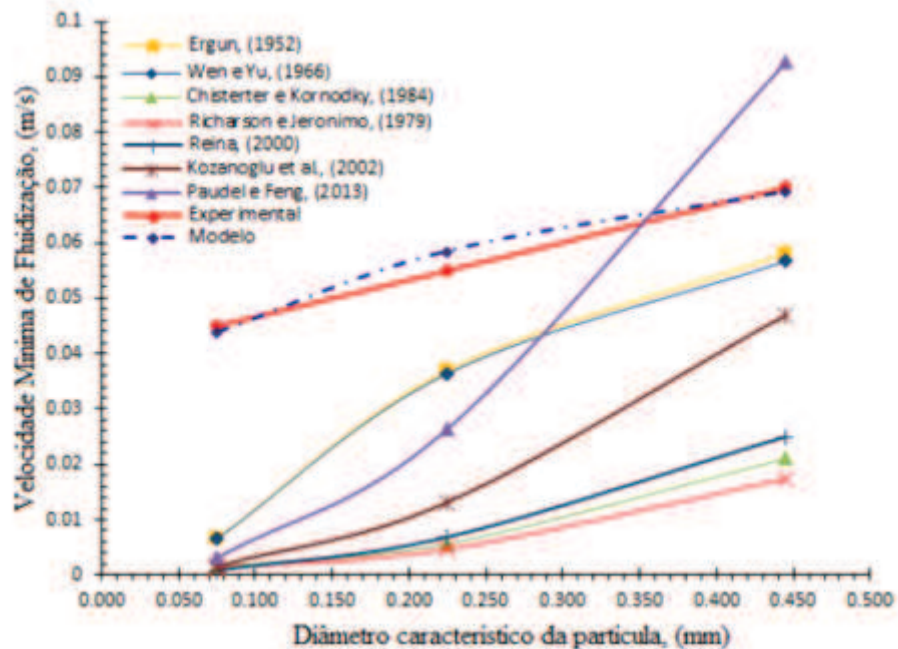

















Figura 2.7 – Resultados experimentais e da modelação da (u_{mf}) para bagaço de cana

Fonte: Pérez (2016)

Emden (2016) fluidizou partículas do grupo D de Geldart de diferentes formatos geométricos (Tabela 2.3) em um cilindro de policarbonato com 0,11 m de diâmetro interno e com distribuidor de placa porosa com 37% de abertura. Apesar da classificação tipo D, o autor realizou os estudos com fluidização normal, determinando suas velocidades mínimas de fluidização.

Tabela 2.3 – Propriedades das partículas utilizadas pelo Emden (2016)

FORMATO GRANULAR						
Tamanho [mm]	7,2	5	6,1/6,2	4,0/5,0	5,2/6,3/6,3	4,2/4,3/4,5
Massa Específica [kg/m ³]	772,5	823	708,5	719,3	746,9	716,8
Esfericidade	1	1	0,87	0,87	0,8	0,81
Razão de aspecto	1	1	1,02	1,25	1,22	1,07
FORMATO TIPO FIBRA						
Tamanho [mm]	3,9/14,0	3,0/9,0	4,2/4,2/11,4	3,0/3,0/7,1		
Massa Específica [kg/m ³]	764,4	760,4	639,7	745,6		
Esfericidade	0,75	0,78	0,73	0,75		
Razão de aspecto	3,59	3	2,71	2,33		
FORMATO TIPO CAVACO						
Tamanho [mm]	2,2/9,0/9,8	2,0/4,9/6,0	2,0/6,0/14,9	2,0/4,0/8,0	2,0/3,0/11	
Massa Específica [kg/m ³]	672,8	754,1	721,7	756,6	728,1	
Esfericidade	0,63	0,71	0,58	0,69	0,64	
Razão de aspecto	4,45	3	7,45	4	5,5	

Emden (2016) fez análise na velocidade mínima de fluidização e comparando os resultados experimentais com correlações de autores, conclui que os melhores resultados obtidos foi utilizando a Eq. (2-16) de Goroshko (1958), para todas as categorias de formas que incluem partículas complexas.

$$u_{mf} = \left(\frac{Ar}{1400 + 6,1802\sqrt{Ar}} \right) \frac{\mu_f}{\rho_f d_p} \quad (2-16)$$

Os valores numéricos dos desvios médios para todas as correlações são dados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Desvio dos resultados de Emden (2016) com a equação de Goroshko (1958)

	Esferas	Granulares	Fibrosas	Cavaco	Total
Desvio	7,90%	24,50%	15,30%	19,60%	20,40%

Emden (2016) classificou de acordo com a esfericidade desde 1, para esferas, até 0,588, para as placas alongadas de 2 mm x 6 mm x 15 mm (cavaco). Segundo ele, a

esfericidade sozinha não pode descrever a influência da forma da partícula no início da fluidização, já que a tendência em relação à esfericidade não é monotônica. A análise do formato e da razão de aspecto também não fornece resultados conclusivos sobre este assunto.

2.3 Correlações para jorro

Monazam (2018) fluidizou óxido de alumínio em reator cilíndrico de 10cm de diâmetro com base plana. O oxido de alumínio tem uma esfericidade de 0,82, tamanho de partícula entre 0,307 a 0,845mm e massa específica real de 3968 kg/m^3 , cuja sua classificação de Geldard é pertencente ao grupo D.

No artigo de Monazam (2018), é apresentada a Figura 2.8 que demonstra correlações elaboradas por outros autores que foram comparadas com os resultados do experimento dele. A Figura 2.8 também mostra os parâmetros utilizados pelos outros autores. Segundo Monazam (2018), discrepâncias consideráveis estavam presentes entre os valores obtidos nas diferentes correlações e também em relação aos valores experimentais. O modelo mais próximo foi à correlação desenvolvida por Mathur e Gishler (1955), que estava dentro de 10% dos seus dados. O pior modelo com seus resultados foi a correlação de Olazar et al. (1992) obtendo resultados 18.000 vezes maiores que os seus dados experimentais. Outra observação é que as faixas de valores de seus parâmetros experimentais variam significativamente a de seus estudos, como o tamanho de partícula e a massa específica.

Reference	Correlations	Conditions (Lima Rojas, 2011)	Slope, R ²
Mathur and Gishler (1955)	$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D}\right) \left(\frac{d_j}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{2gH(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}}$	$d_p = 0.5\text{--}3.1\text{ mm}$, $\rho_s = 1.1\text{--}2.67\text{ g/cm}^3$, $H/D \geq 1.3$, conical, $\gamma = 85^\circ$	0.9, 80%
Nikolaev and Golubev (1964)	$Re_{ms} = 0.051Ar^{0.59} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.25} \left(\frac{d_j}{D}\right)^{0.1}$	$d_p = 1.75\text{--}5.6\text{ mm}$, $H = 90\text{--}150\text{ mm}$, $D = 12\text{ cm}$, conical	1.4, 75%
Goltsiker (1967)	$Re_{ms} = 73Ar^{0.14} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)^{0.47}$	$d_p = 0.5\text{--}2.5\text{ mm}$, $\rho_s = 0.8\text{--}1.63\text{ g/cm}^3$, $H = 5\text{--}31\text{ cm}$, $d_j = 0.41\text{--}1.23\text{ cm}$, conical, $\gamma = 26^\circ\text{--}60^\circ$	3121.6, 42%
Fane and Mitchell (1984)	$U_{ms} = 2D^{1-\exp(-7D^2)} \left(\frac{d_p}{D}\right) \left(\frac{d_j}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{2gH(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}}$	$d_p = 2.5\text{--}6.5\text{ mm}$, $\rho_s = 1.14\text{--}1.37\text{ g/cm}^3$, $H/D = 1\text{--}2$, $d_j/D = 1/6$, conical, $\gamma = 60^\circ$	1.54, 75%
Choi and Meisen (1992)	$\frac{U_{ms}}{\sqrt{2gH}} = 70.147 \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.477} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.61} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.5087} \left(\frac{d_j}{D}\right)^{0.243}$	$d_p = 2.16\text{--}2.8\text{ mm}$, $\rho_s = 1.05\text{--}1.09\text{ g/cm}^3$, $H = 24\text{--}53\text{ cm}$, $d_j = 21\text{--}35\text{ mm}$, $D = 24.45\text{ cm}$, conical, $\gamma = 60^\circ$	2, 50%
Mukhlenov and Gorshtein (1965)	$Re_{ms} = 3.32Ar^{0.33} \left(\frac{H}{d_j}\right) \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0.55}$	$H = 9\text{--}15\text{ cm}$, $d_j = 2\text{--}5\text{ cm}$, conical	894, 50%
Tsvik, Nabiev, Rizaev, Merenkov, and Vyzgo (1967)	$Re_{ms} = 0.4Ar^{0.52} \left(\frac{H}{d_j}\right)^{1.24} \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0.42}$	$d_p = 1.5\text{--}4\text{ mm}$, $\rho_s = 1.65\text{--}1.7\text{ g/cm}^3$, $H = 10\text{--}50\text{ cm}$, $H/d_j = 1.6\text{--}8.7$, $D = 4\text{--}29\text{ cm}$, conical, $\gamma = 20^\circ\text{--}50^\circ$	2185, 36%
Olazar et al. (1992)	$Re_{ms} = 0.126Ar^{0.5} \left(1 + 2 \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \frac{H}{d_j}\right)^{1.68} \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0.57}$	$d_p = 1\text{--}25\text{ mm}$, $\rho_s = 0.24\text{--}3.52\text{ g/cm}^3$, $H = 36\text{--}61\text{ cm}$, $d_j = 3\text{--}6\text{ cm}$, $D = 36\text{ cm}$, conical, $\gamma = 28^\circ\text{--}45^\circ$	18,625, 35%
Zhou (2008)	$Re_{ms} = .0015Ar^{0.86} \left(\frac{H}{D}\right)^{1.59} \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0.87}$	$d_p = 0.3\text{--}0.65\text{ mm}$, $\rho_s = 6.0\text{ g/cm}^3$, $H/D = 0.5\text{--}1.0$, $d_j = 4\text{ mm}$, $D = 5\text{ cm}$, conical, $\gamma = 45^\circ\text{--}75^\circ$	5.3, 36%
Zhong et al. (2006)	$U_{ms} = 24.5 \sqrt{2gH} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.472} \left(\frac{d_j}{D}\right)^{0.183} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.208} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.225}$	$d_p = 1.3\text{--}3.2\text{ mm}$, $\rho_s = 1.02\text{--}2.6\text{ g/cm}^3$, $H/D = 1\text{--}1.72$, $H = 30\text{--}55\text{ cm}$, $d_j = 1\text{--}3\text{ cm}$, $D = 3\text{ cm}$, conical, $\gamma = 60^\circ$	87, 50%

Figura 2.8- Correlações para velocidade mínima de jorro que Monazam (2018) utilizou para sua pesquisa.

Fonte: Monazam (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta uma breve descrição de materiais e metodologias utilizadas para determinar parâmetros importantes necessários para estudar a fluidodinâmica de leitos fluidizados.

3.1 Materiais utilizados

Para análise do comportamento da influência da razão de aspecto das partículas foram utilizadas partículas padronizadas de madeiras com formato e dimensões uniformes, apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Formato e dimensões das partículas padrão

Formato	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)
cilíndrico	2,00	4,00
	2,00	8,00
	2,00	12,00

3.2 Preparação das amostras

Foram utilizados palitos feitos de bambu comercializados com diâmetro médio de 2 mm. Utilizando uma guilhotina, foram cortadas porções suficientes para o ensaio (em torno de 1 L) para cada comprimento citado na Tabela 3.1.

3.3 Determinação das Massas Específicas e Fração de vazio

Para a determinação da massa específica real dos componentes foi utilizado um picnômetro a gás hélio marca Quantachrome, modelo AccuPyc II 1340 do LCVMAT com uma precisão de $\pm 0,02\%$ e exatidão de $0,03\%$ na leitura, além de $0,03\%$ da capacidade da amostra, o mesmo foi capaz de fazer dez repetições nas medições da amostra dando como resultado o valor médio.

Na picnometria a gás hélio este é introduzido nas amostras de material, preenchendo assim os vazios e fornecendo o valor real da massa específica de cada material. Foram separadas 3 amostras em um béquer de 10 mL que foram colocadas em um picnômetro.

Para obtenção da massa específica de carga de cada material, foi medida sua massa e colocada no leito uma quantidade suficiente para manter a proporção $H/D = 1$. Para determinar a massa específica de carga foi dividida a massa total adicionada no leito, pelo volume ocupado. O método foi repetido três vezes para cada um dos componentes.

3.4 Determinação da esfericidade e a razão de aspecto

Para auxiliar na determinação da esfericidade e a razão de aspecto foi utilizado equipamento tridimensional de análise e medição de imagens da marca Starrett.

Neste equipamento foram colocadas as amostras de palitos de 2x4mm, 2x8mm e 2x12mm, como pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1- Preparação dos palitos para colocar no tridimensional.

3.5 Procedimento Experimental

Os ensaios efetuados foram efetuados sobre a pressão atmosférica, em um laboratório climatizado com temperatura em torno de 24 °C.

O equipamento utilizado neste trabalho é o mesmo utilizado por Genehr (2015), sendo composto por um tubo cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 94 mm (4) para simular um reator cilíndrico.

A parte inferior do leito, chamada distribuidor, é constituída de um tubo cilíndrico de aço inox, com comprimento de 100 mm (6). Abaixo deste cilindro tem um semicone (8) por

onde é insuflado o ar para fluidização. Nas extremidades inferior (7) e superior (5) do distribuidor, encontram-se instaladas telas metálicas. A tela na posição 05 na Figura 3.2, serve para sustentar o material adicionado no leito.

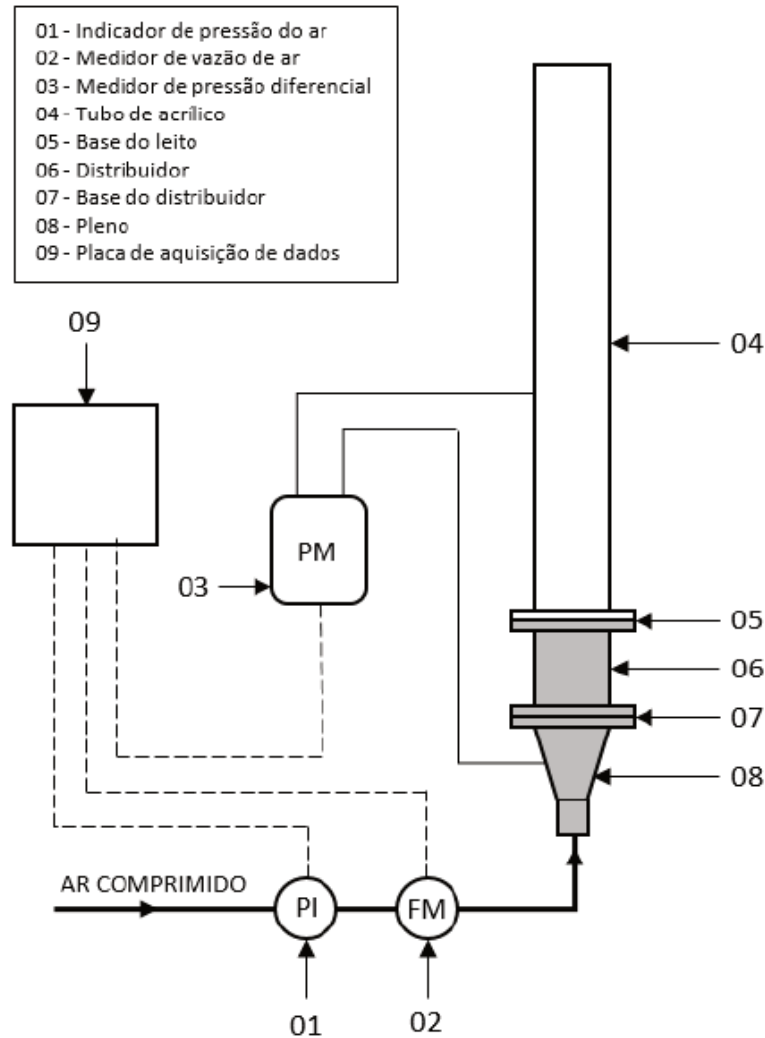


Figura 3.2- Equipamento de fluidização de bancada.

Fonte: GENEHR (2015).

Foi tentado fluidizar com o distribuidor de tela (Figura 3.3), o mesmo utilizado pelo Genehr (2015), porém ocorreu o efeito pistão, não sendo efetiva a fluidização.

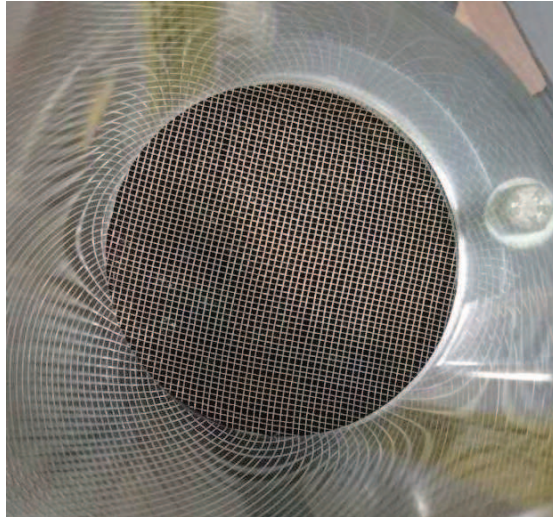


Figura 3.3 – Distribuidor de ar tipo tela

Para obter uma fluidização uniforme e estável, a resistência oferecida pelo distribuidor ao ar deve ser significativa em comparação com a oferecida pelos sólidos do leito. Assim, se houver uma pequena diferença na resistência entre uma seção do leito e outra, a resistência combinada do leito e do distribuidor à passagem de ar não variará apreciavelmente entre as seções. Desta forma, um fluxo de ar uniforme através de todas as seções do leito é garantido. (BASU, 2006).

Utilizando um distribuidor de placa perfurada em toda a sua área foi tentado fluidizar os palitos 4x2. Ocorreu inicialmente uma movimentação das partículas, porém criou-se caminhos preferenciais, cessando a movimentação das partículas.

Assim, para dar o efeito semelhante ao leito de jorro, que é cônico na sua base, direcionando as partículas que estão retornando para o centro do reator onde está localizada a entrada de ar, foram utilizados dois tipos de distribuidores. O primeiro possui 25 orifícios de 2,5 mm mantendo os furos a 17 mm de distância da parede do reator para o retorno das partículas pelas laterais, como pode ser observado na Figura 3.4, e o segundo, também com furos a 17 mm da parede, com 57 orifícios de 4 mm, como pode ser observado na Figura 3.5.

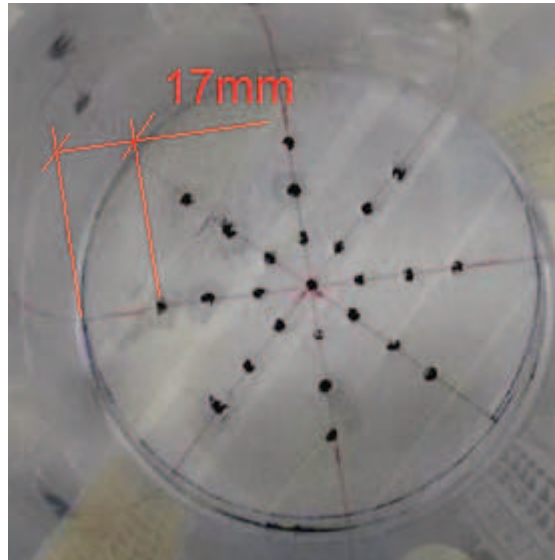


Figura 3.4 – Distribuidor tipo placa perfurada 1 (25 orifícios de 2,5 mm).

Na Figura 3.4 observa-se que há uma concentração dos furos na área central e não há furos próximos ao diâmetro externo. Essa característica favorece o leito a assumir um comportamento de jorro, mesmo não tendo o formato clássico de cone na base.

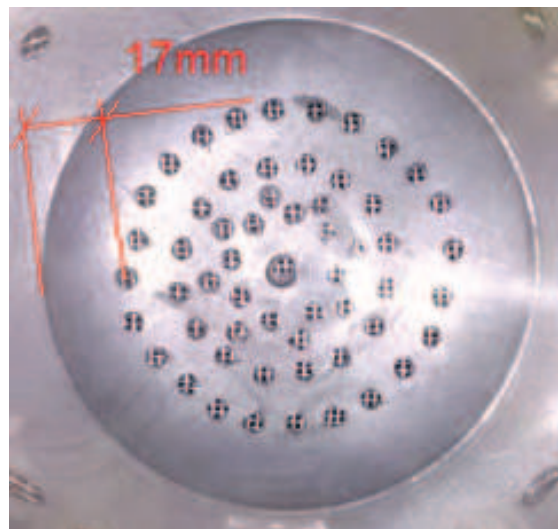


Figura 3.5 – – Distribuidor tipo placa perfurada 2 (57 orifícios de 4mm)

Foi feita análise da perda de carga dos distribuidores aumentando a vazão para obter suas curvas características, conforme Figura 3.6. Da mesma forma foi feita a análise diminuindo a vazão e obtendo as curvas características apresentadas na Figura 3.6 e Figura 3.7.

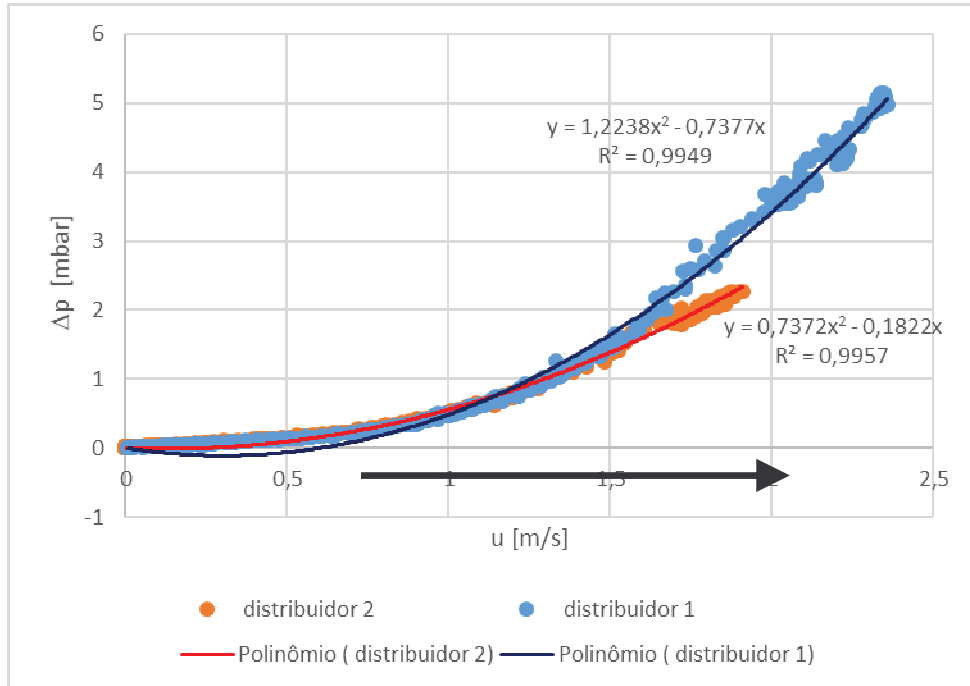


Figura 3.6 – Curva característica da perda de carga no distribuidor 1 e 2 aumentando a vazão.

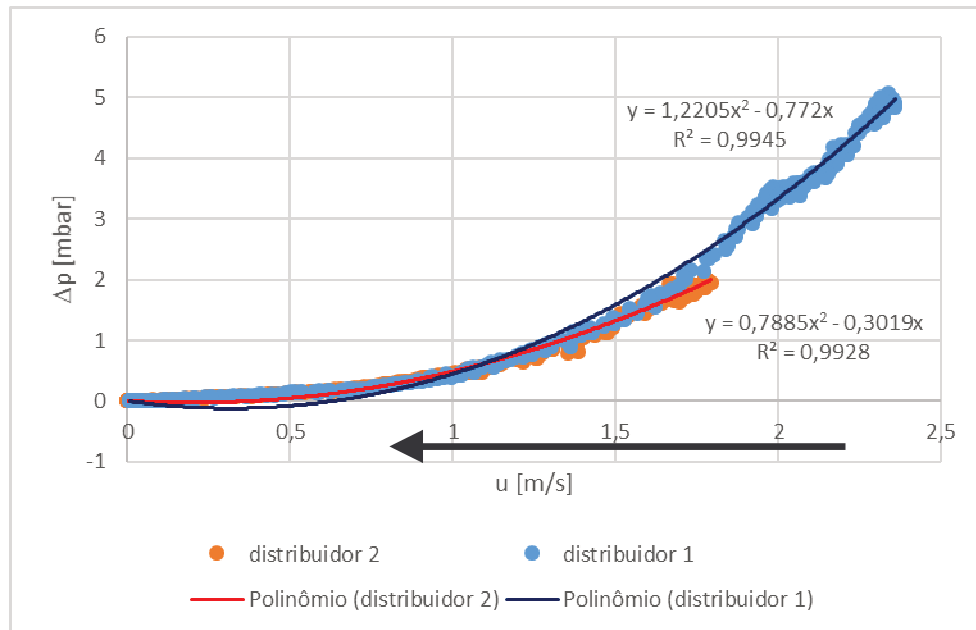


Figura 3.7 - Curva característica da perda de carga no distribuidor 1 e 2 diminuindo a vazão.

Os procedimentos para coleta de dados para obter as curvas foram feitos em triplicata para cada configuração, porém, plotadas no mesmo gráfico para obter uma linha de tendência e a sua equação polinomial mais precisa para cada curva característica. Com isso, no tratamento de dados para obtenção do comportamento fluidodinâmico no leito tem que desconsiderar a perda de carga do distribuidor para cada velocidade no reator através da Eq. (3-1) para o resultado da fluidização com o distribuidor 1, a Eq.(3-2) para o resultado da

fluidização com o distribuidor 2, a Eq.(3-3) para o resultado da defluidização com o distribuidor 1 e a Eq (3-4) para o resultado da defluidização com o distribuidor 2.

$$\Delta p = \Delta p_{col} - (1,2238u^2 - 0,7377u) \quad (3-1)$$

$$\Delta p = \Delta p_{col} - (0,7372u^2 - 0,1822u) \quad (3-2)$$

$$\Delta p = \Delta p_{col} - (1,2205u^2 - 0,772u) \quad (3-3)$$

$$\Delta p = \Delta p_{col} - (0,7885u^2 - 0,3019u) \quad (3-4)$$

onde Δp_{col} é a perda de carga do leito mais a do distribuidor e u é a velocidade superficial do gás acima do leito.

Considerando iguais as velocidades do fluido que passa em cada orifício, utilizando a Eq. (3-5) e a Eq. (3-6) se obtém a velocidade do fluido que passa através dos orifícios.

$$u_{ors} = \frac{\dot{V}}{A_{ors}} \quad (3-5)$$

$$A_{ors} = n_{ors} \frac{\pi d_{or}^2}{4} \quad (3-6)$$

onde , u_{ors} é a velocidade do fluido nos orifícios do distribuidor, \dot{V} é a vazão do fluido no leito, A_{ors} é a área total de todos os orifícios, n_{ors} é o número de orifícios do distribuidor e d_{or} é o diâmetro de cada orifício.

Assim, para o distribuidor 1 a Eq.(3-5) e a Eq.(3-6) se resume na Eq.(3-7).

$$u_{ors;d1} = \frac{\dot{V}}{1,227 \cdot 10^{-4}} \quad (3-7)$$

onde, $u_{ors;d1}$ é a velocidade do fluido nos orifícios do distribuidor 1.

Da mesma forma, para o distribuidor 2, se resume na Eq.(3-8).

$$u_{ors;d2} = \frac{\dot{V}}{7,163 \cdot 10^{-4}} \quad (3-8)$$

onde, $u_{ors;d2}$ é a velocidade do fluido nos orifícios do distribuidor 2.

Para iniciar a fluidização de cada ensaio, foram introduzidas as partículas pela parte superior da coluna até atingir uma altura estática no leito de 95 mm, como pode ser observado na Figura 3.8.



Figura 3.8 – Altura inicial do leito (compactado)

considerado compactado. Após a primeira fluidização, já com o leito estático, o leito fica expandido em relação ao leito estático inicial (compactado). Isso se chama leito com as partículas soltas.

Para a coleta de dados da velocidade superficial e da perda de carga no leito foi injetado ar, controlando gradativamente a vazão na entrada através de uma válvula manual, por um período em torno de 1 minuto e 30 segundos para cada fluidização ou defluidização. Os dados da queda de pressão foram medidos utilizando um instrumento da marca NOVUS, modelo HUBA 699, com faixa de medição ajustável entre 0 a 16 mbar, 0 a 25 mbar e 0 a 50 mbar.

Os valores da vazão de ar no leito foram medidos utilizando um fluxômetro da marca IFM, modelo SD6050, que possui uma faixa de medição de 0,2 a 75 Nm³/h com precisão de $\pm 1,5\%$ e saída de sinal analógico de 4 a 20 mA.

Os dados de pressão e vazão foram coletados através de uma placa coletora de dados da marca NOVUS, modelo Fieldlogger. O mesmo coletou os dados ao mesmo tempo de cinco em cinco segundos, permitindo análise do comportamento da perda de pressão com variação do fluxo do ar no leito.

Para cada componente a experiência foi repetida três vezes considerando-se a média dos valores obtidos.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste item, são discutidos os resultados das curvas de fluidização e defluidização das partículas padronizadas.

4.1 Esfericidade e a razão de aspecto

Obtendo as imagens com tridimensional, através da análise e tratamento digital pelo software imageJ, onde foi possível a obtenção das dimensões para determinar a esfericidade e a razão de aspecto média para os palitos de 4x2 mm e 8x2 mm. Como não foi possível colocar as partículas de 12x2 mm no tridimensional devido ao tamanho ultrapassar à da capacidade de captação, foi utilizado um paquímetro realizar as medições, inclusive foram validadas as feitas no tridimensional e posteriormente foram tratados os dados. Foram coletadas as dimensões de 50 amostras, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Resultado da esfericidade, razão de aspecto

Palito de bambu - 4x2 mm				
	d[mm]	Razão l/b [-]	Esfericidade [-]	dp [mm]
Média	2,028	2,309	0,816	3,059
Desvio Padrão	0,155	0,239	0,024	0,179
Palito de bambu - 8x2 mm				
	d[mm]	Razão l/b [-]		
Média	2,050	4,208	0,744	3,784
Desvio Padrão	0,093	0,015	0,018	0,139
Palito de bambu - 12x2 mm				
	d[mm]	Razão l/b [-]	Esfericidade [-]	
Média	2,011	6,300	0,656	4,237
Desvio Padrão	0,163	0,648	0,030	0,246

Observando os resultados da Tabela 4.1, foi visto que os resultados se afastaram pouco dos valores previstos na Tabela 3.1.

4.2 Massas Específicas, Fração de vazio e Classificação de Geldart

Na Tabela 4.2 mostra os resultados das massas específicas da fração de vazio.

Tabela 4.2 – Resultado das massas específicas e da fração de vazio

<i>Palitos bambu</i>	<i>4x2</i>	<i>8x2</i>	<i>12x2</i>
Massa específica real [kg/m ³]	879,9±6,8	879,9±6,8	879,9±6,8
Massa específica de carga compactada [kg/m ³]	381,9	382,6	364,9
Massa específica de carga solta [kg/m ³]	345,6	340,4	318,1
Fração de vazio do leito compactado [-]	0,566	0,565	0,585
Fração de vazio do leito solto [-]	0,607	0,613	0,639

Para verificar a classificação de Geldart foi utilizada a equação do próprio Geldart (1973) Eq.(4-1), onde diz que resultados das partículas acima de 10^6 pertencem ao grupo D.

$$(\rho_p - \rho_f)(d_p^2) \geq 10^6 \quad (4-1)$$

Os valores dos três tipos de partículas deram acima de 7×10^6 . Com isso, as partículas analisadas pertencem ao grupo D.

4.3 Análise fluidodinâmica

Nas Figura 4.1 a Figura 4.5 podem ser observadas as curvas de fluidização do leito compacta (F COMP.), fluidização do leito solto (F SOLT.) e defluidização (D) das partículas 4x2mm, 8x2mm e 12x2mm, e suas velocidades de mínima fluidização. No eixo das abscissas pode ser observada a velocidade de escoamento do gás e no eixo das ordenadas é observada a perda de pressão através do leito. Para determinação da mínima fluidização de partículas do grupo D foi adaptado o método apresentado na Figura 2.5 substituindo o ajuste linear da perda de carga do leito fixo por um ajuste de 2º grau. As linhas foram plotadas utilizando a queda de pressão dos pontos de defluidização (pontos verdes).

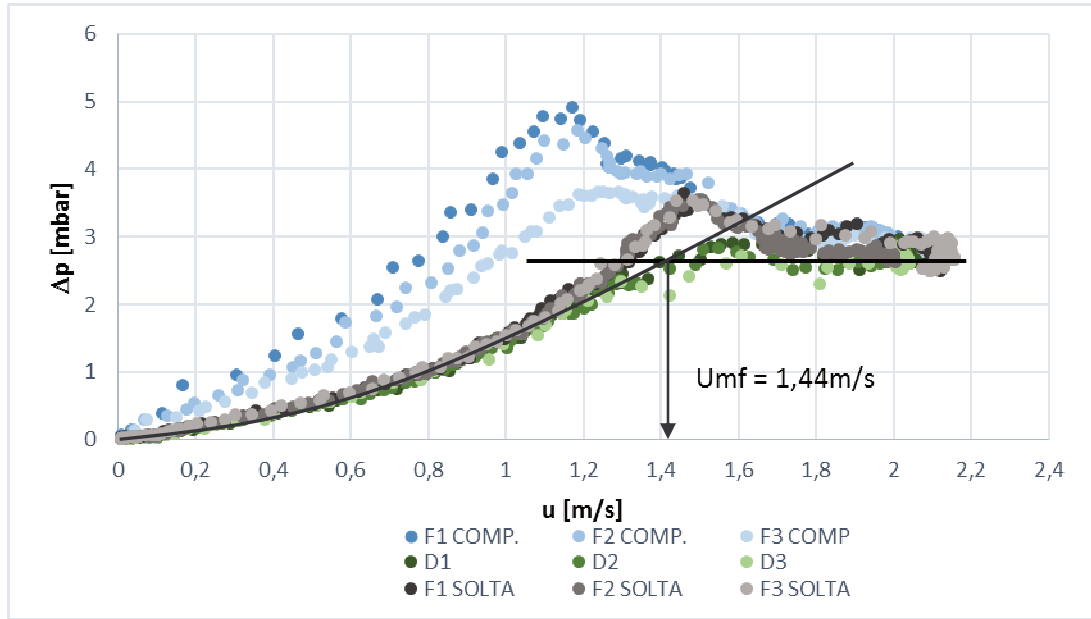


Figura 4.1 - Fluidização e defluidização das partículas 4x2 utilizando o distribuidor 1.

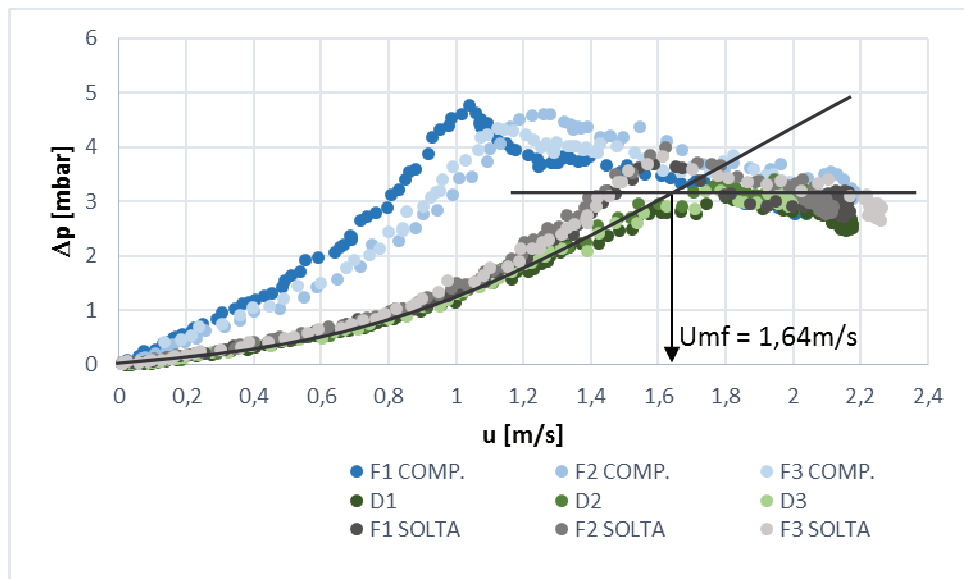


Figura 4.2 – Fluidização e defluidização das partículas 8x2 utilizando o distribuidor 1.

Para as partículas 12x2 não foi possível fluidizar pois o sistema utilizado não foi capaz de aumentar a vazão suficiente para chegar no regime de fluidização.

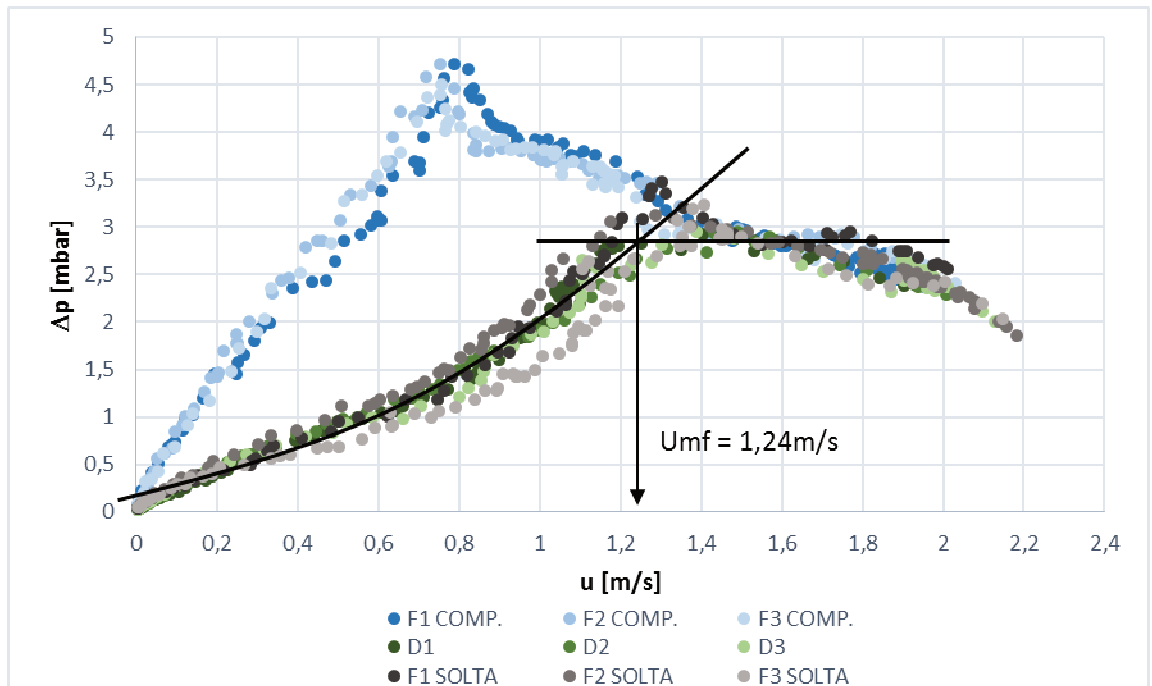


Figura 4.3 - Fluidização e defluidização das partículas 4x2 utilizando o distribuidor 2.

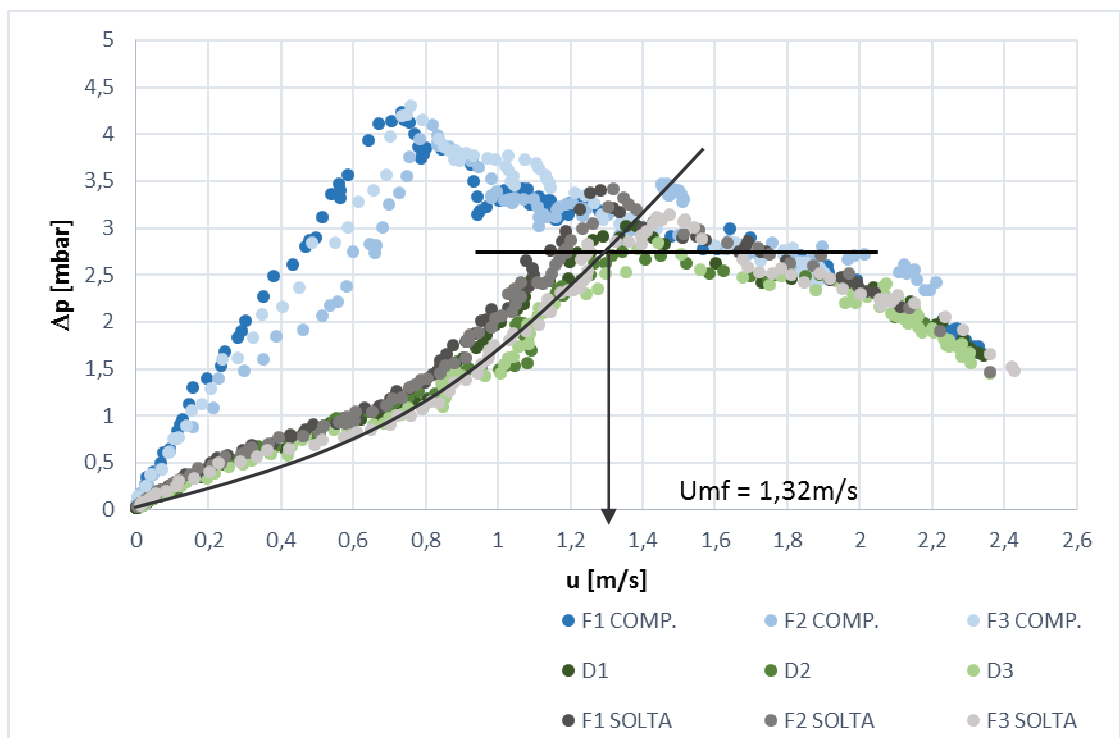


Figura 4.4- Fluidização e defluidização das partículas 8x2 utilizando o distribuidor 2.

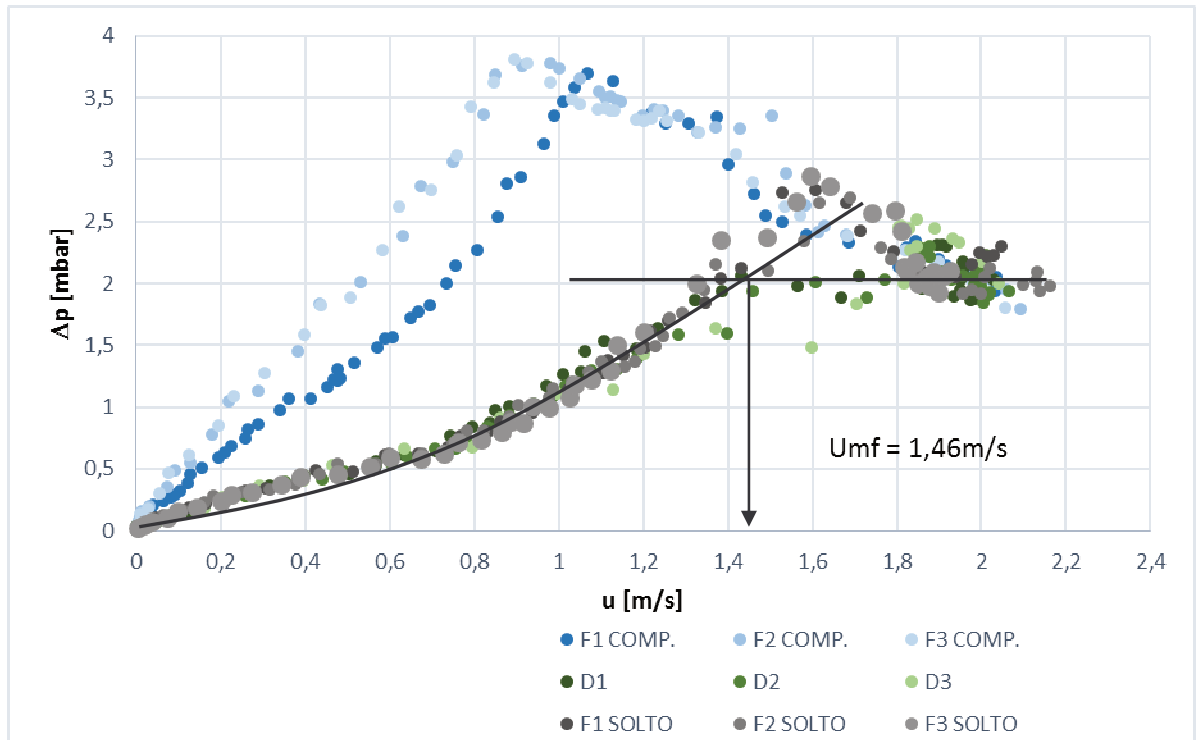


Figura 4.5 - Fluidização e defluidização das partículas 12x2 utilizando o distribuidor 2.

Observando os gráficos da Figura 4.1 a Figura 4.5 há uma grande diferença na inclinação do comportamento do fluido no leito compactado comparando com o leito solto. Isso é a resultante da energia necessária para soltar as partículas após abastecimento do leito.

Os resultados da velocidade mínima de fluidização são apresentados na Tabela 4.3 junto com os resultados das velocidades do fluido nos orifícios dos distribuidores.

Tabela 4.3- Resultados da velocidade mínima fluidização

Palito de bambu	4x2 mm	8x2 mm	12x2 mm
u mf [m/s] c/ distribuidor 1	1,44	1,64	-
u ors [m/s] c/ distribuidor 1	81,43	92,74	-
u mf [m/s] c/ distribuidor 2	1,24	1,32	1,46
u ors [m/s] c/ distribuidor 2	12,01	12,79	14,82

[-] valores não obtidos.

Uma velocidade de orifício excessivamente alta pode levar ao atrito das partículas do leito. Velocidades de orifício inferiores a 30 m/s são geralmente consideradas seguras enquanto qualquer valor acima de 90 m/s é considerado arriscado (BASU, 2006). Com isso, as velocidades de orifícios no distribuidor 1 entram nessa zona de risco de atrito entre as partículas elevando a velocidade mínima de fluidização, enquanto a do distribuidor 2 fica abaixo da zona de risco.

4.4 Expansão do leito estático após fluidização

Após a primeira fluidização, foi verificada a expansão do leito ao término da defluidização das partículas de 4x2mm, 8x2mm e 12x2mm, onde podem ser observadas na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Expansão do leito após fluidização das partículas de 4x2mm, 8x2mm e 12x2mm (leito solto)

Comparando a Figura 4.6 com as imagens do leito fixo compactado da Figura 3.8 se obteve a diferença na expansão do leito, onde os resultados são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Diferença das alturas estáticas do leitos

Palito de bambu	4x2 mm	8x2 mm	12x2 mm
Altura do leito estático compactado [mm]	95	97	95
Altura do leito estático solto [mm]	105	109	109
Diferença [mm]	10	12	14

Com isso, pode-se dizer que quanto maior a razão de aspecto da partícula, maior será a variação da altura estática do leito compactado para o leito solto e conseqüentemente será maior a fração de vazio no leito solto devido o assentamento das partículas após a fluidização obtendo um espaçamento maior entre as partículas.

4.5 Influência da razão de aspecto

Com a análise dos resultados experimentais foi possível desenvolver uma equação de ajuste para a determinação da (umf) das partículas de palito de bambu em função da razão de aspecto. Esta equação foi obtida usando uma linha de tendência polinomial, que permitiu a

determinação deste parâmetro em função da razão de aspecto com um $R^2=1$, sendo possível desenvolver uma equação para análise conforme a Eq. (4-2).

$$u_{mf} = 0,0062 RA^2 - 0,0016 RA + 1,2031 \quad (4-2)$$

Na Figura 4.7 pode-se comparar os resultados experimentais com a linha de tendência polinomial correspondente a Eq. (4-2).

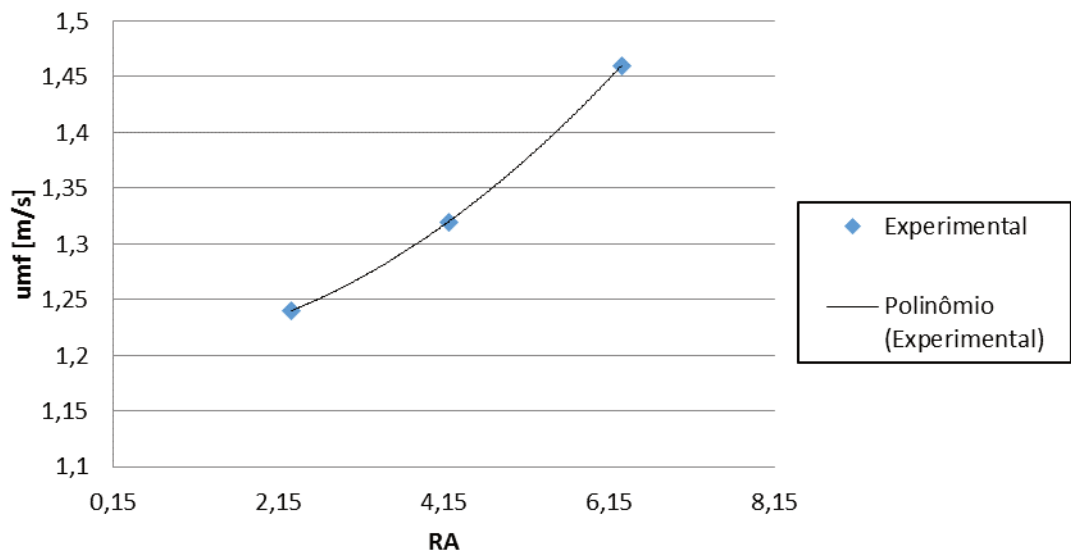


Figura 4.7 – Comparação dos resultados experimentais com a linha de tendência polinomial para a variação da razão de aspecto com a velocidade mínima de fluidização.

Analisando os resultados experimentais para formas mais alongadas, percebe-se que a U_{mf} aumenta proporcionalmente mais com a elevação da razão de aspecto. Esse comportamento pode estar relacionado a um maior entrelaçamento entre partículas com valores altos de RA, devido a maior área de contato entre partículas.

4.6 Comparação com Correlações Empíricas

Utilizando as correlações citadas neste trabalho foram comparados os resultados experimentais com correlações de velocidade mínima de fluidização e para velocidade mínima de jorro.

4.6.1 Velocidade Mínima de Fluidização.

As velocidades mínimas de fluidização U_{mf} verificadas na fluidização dos palitos e apresentadas Tabela 4.3 foram comparadas com correlações dos autores da revisão bibliográfica. Os resultados destas comparações estão expressos na Figura 4.8 utilizando o distribuidor 2.

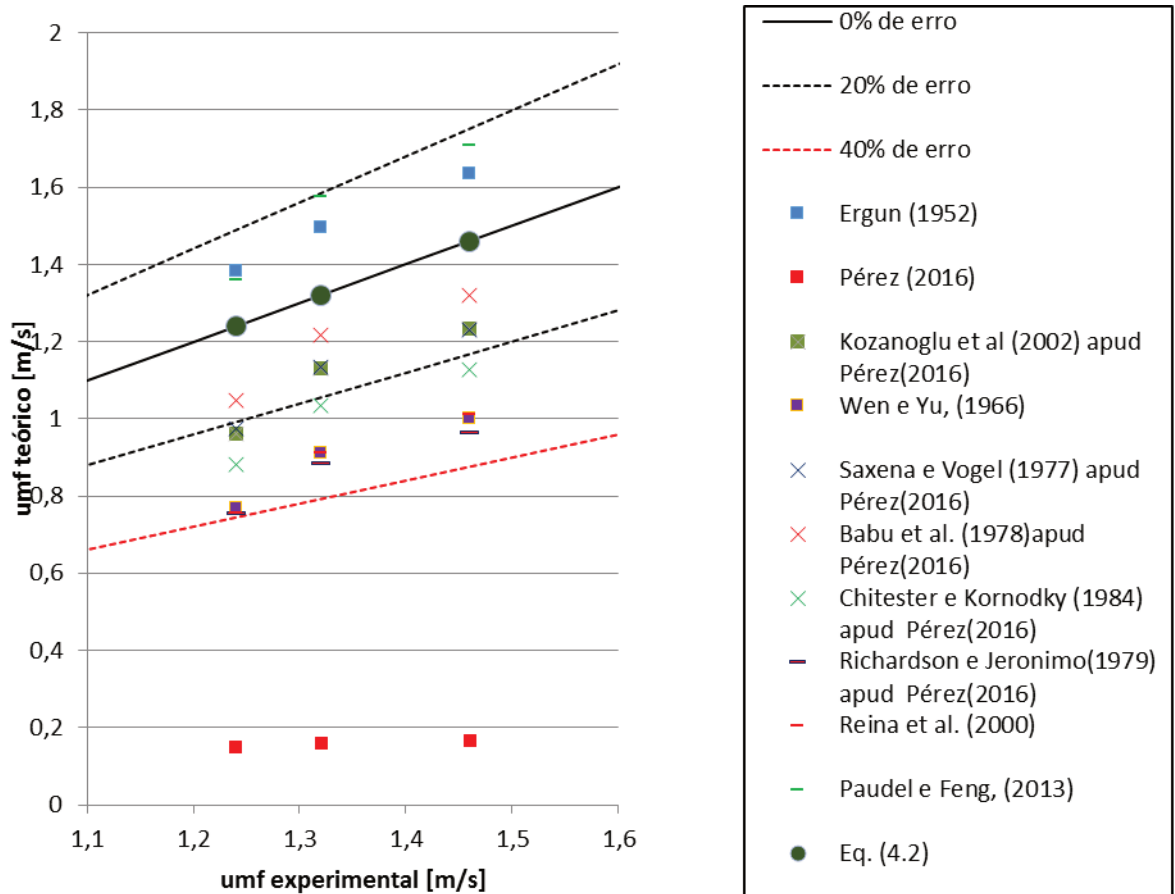


Figura 4.8- Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mf} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA.

Analisando os gráfico da Figura 4.8 pode-se verificar que as correlações empíricas da revisão bibliográfica que mais se aproximaram do experimental foram a do Ergun (1952), Paudel e Feng (2013), Babu (1978), Kozanoglu (2002), Saxena e Vogel (1977) com erro dentro de 20%. Chitester e kornodky (1984), Reina et al (2000), Wen e Yu (1966) e Richardson e Jeronimo (1979) ficaram com erro entre 20% a 40%. Utilizando a correlação de Perez (2016) ocorreu um erro em torno de 88%, embora ele deixa claro que a correlação

funciona somente para partículas com diâmetro característico de 0,445 mm e razão de aspecto de 4,2.

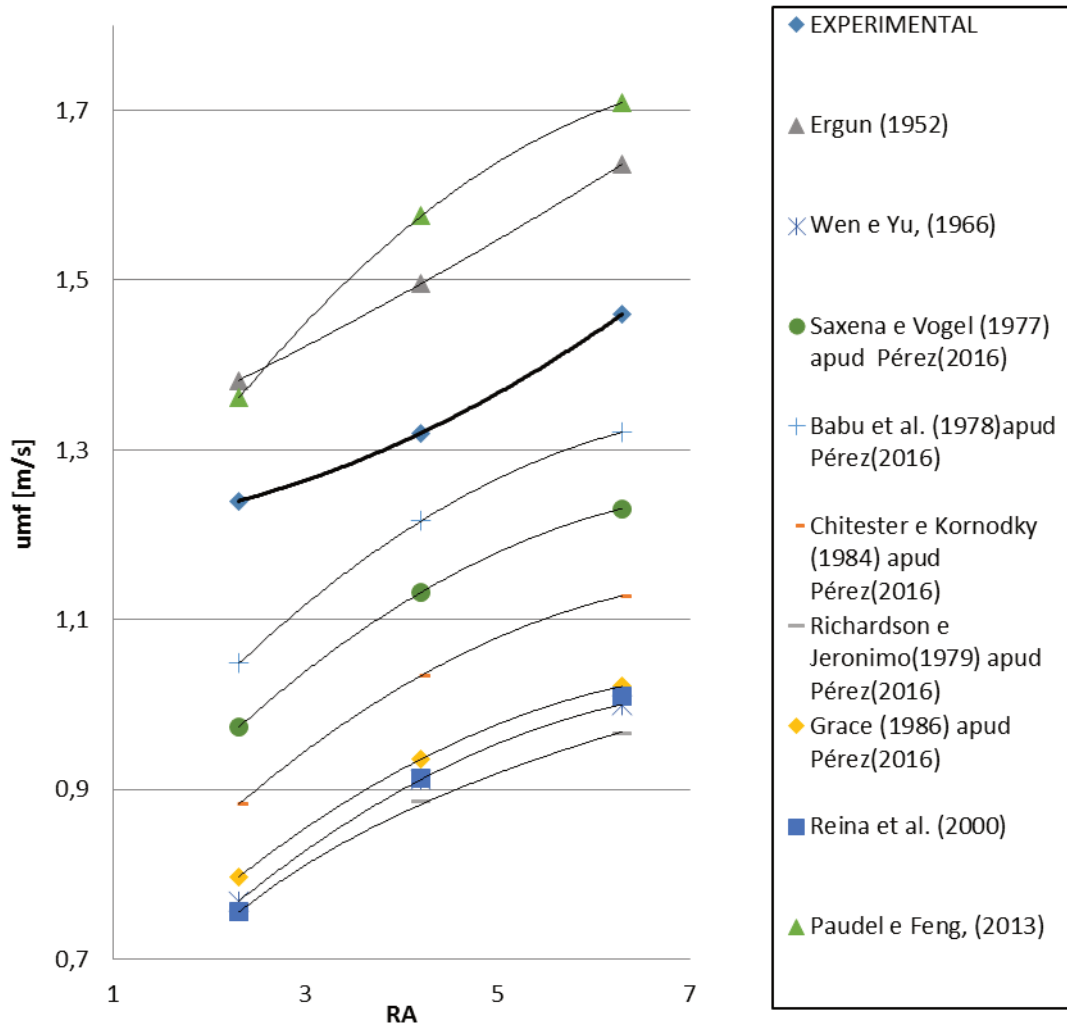


Figura 4.9 – Comparação dos resultados experimentais com correlações literárias para a variação da razão de aspecto com a velocidade mínima de fluidização.

A velocidade mínima de fluidização tende a aumentar quadraticamente com o aumento da razão de aspecto, e comparando com alguns autores foi possível observar na Figura 4.9 que nos resultados das correlações de velocidades mínimas dos autores há um comportamento logarítmico que se afasta dos resultados experimentais, ficando evidente que tende a estabilizar a velocidade mínima de fluidização, exceto a equação de Ergun (1952) que tende a aumentar linearmente os resultados.

Foi feita uma modificação na equação de Ergun substituindo a esfericidade pela razão de aspecto, ajustando os coeficientes (1,7 e 150) para ficar mais próximos dos resultados

experimentais e utilizando o diâmetro da partícula (d) no lugar do diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula (d_p). A equação (4-3) resume a equação de Ergun modificada para dar como resultado a velocidade mínima de fluidização.

$$u_{mf} = \left(\frac{5 \cdot 10^3 (1 - \varepsilon_{mf})}{RA} + (48RA \varepsilon_{mf}^3 Ar)^{0,5} \right) \frac{\mu_f}{24 \rho_f d} \quad (4-3)$$

A Figura 4.10 mostra o comportamento dos resultados da equação de Ergun modificada com os resultados experimentais.

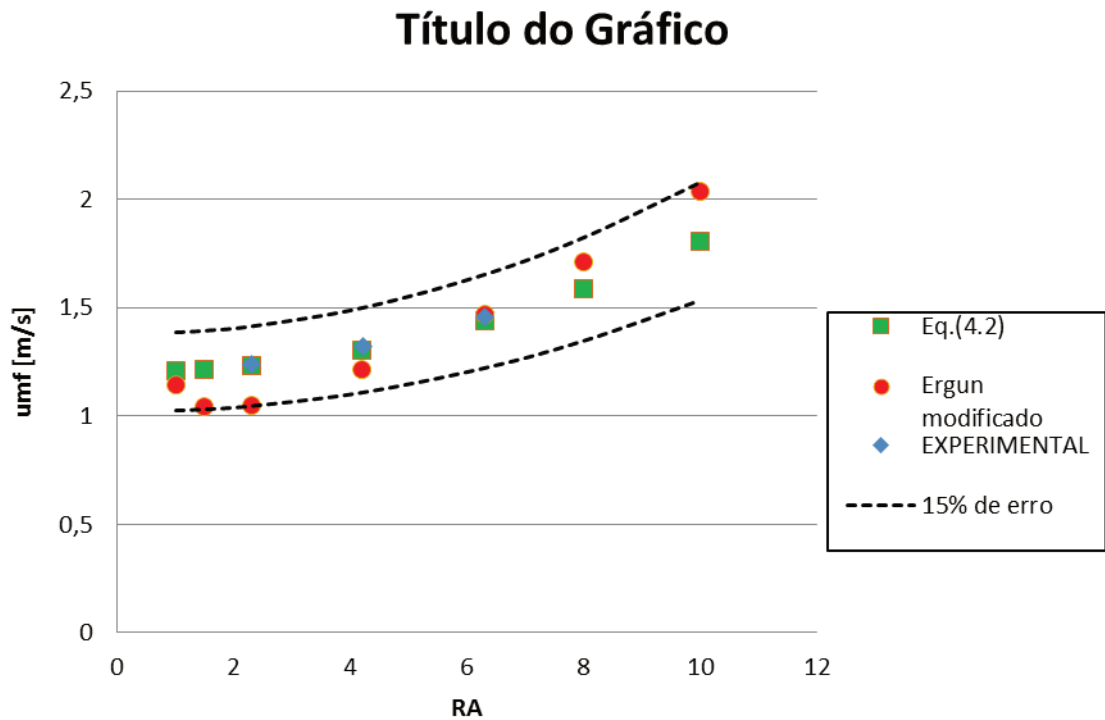


Figura 4.10 – Comparação dos resultados do experimental com a equação de Ergun modificado da velocidade mínima de fluidização versus RA

A Figura 4.10 demonstra que os resultados da equação de Ergun modificada ficaram com erro dentro de 15% do modelo.

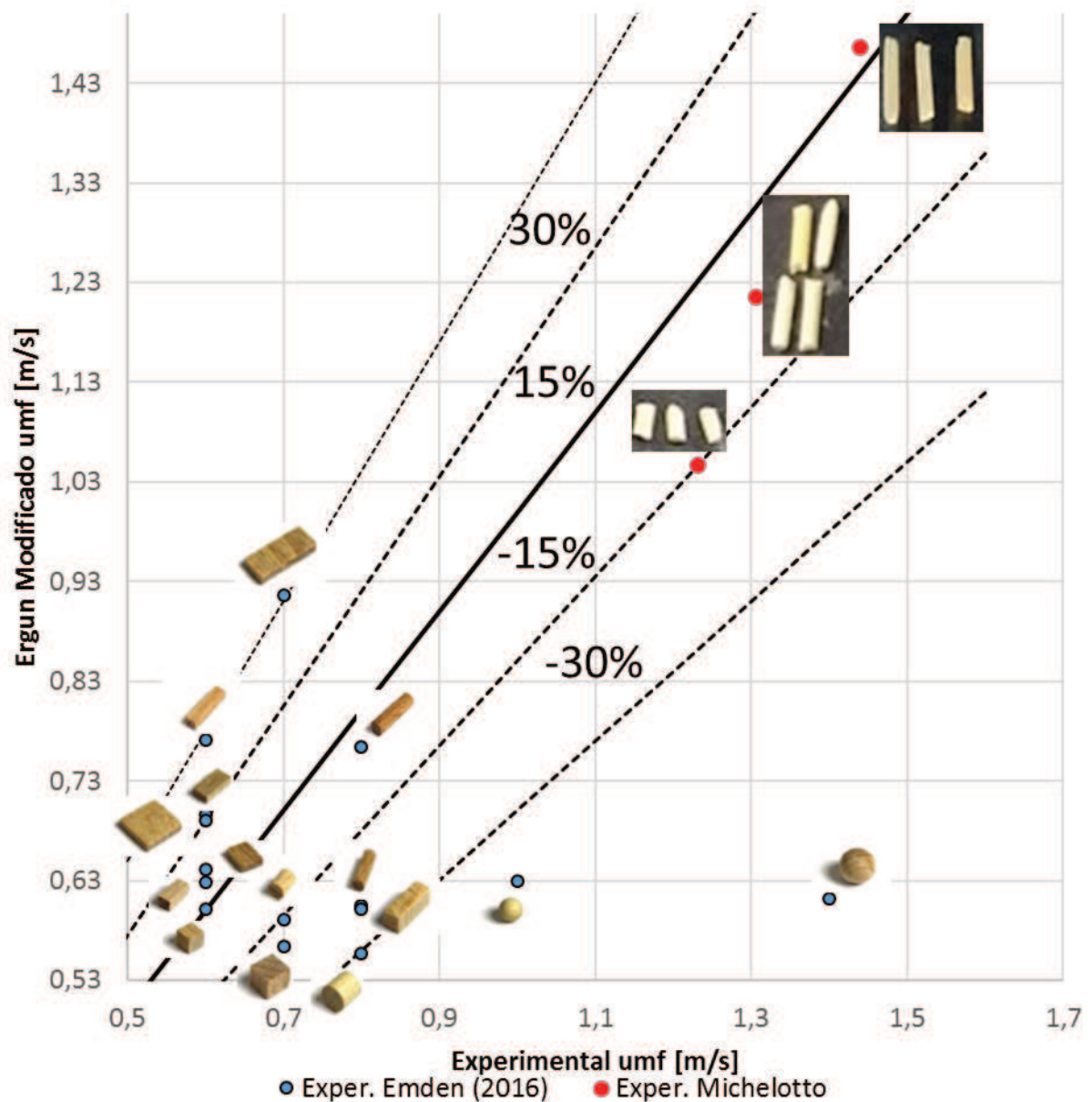


Figura 4.11 - Comparação resultados experimentais desse trabalho e de Emden (2016) com os resultados da equação de Ergun modificado.

A Figura 4.11 demonstra que as velocidades das partículas com os formatos classificados por Emden (2016) tipo cavaco demonstraram tendência de serem maiores com a Equação de Ergun Modificado do que os resultados experimentais de Emden (2016). Para as partículas tipo fibra e granulares, as velocidades com Ergun modificado tendem a serem menores que os resultados experimentais. Esses resultados obviamente demonstram influência do coeficiente de arrasto para diferentes formatos que não foi analisado nesse estudo. Quase todos ficaram com erro em torno de 30%, com exceção das esferas que chegou a ficar com

erro de 56%, pois tem coeficiente de arrasto menor do que os outros formatos, como pode ser observado na figura Figura 2.6. Em relação aos resultados desse trabalho, as velocidades pela equação de Ergun modificado também se comportaram como o tipo fibra com erro máximo de 15% menor que os valores experimentais.

Aplicando os dados das partículas analisados neste trabalho na equação de Goroshko (1958) apud Emden (2016), os erros ficaram em torno de 99%.

4.6.2 Velocidade Mínima de Jorro.

Como o comportamento da fluidização é tipo jorro, foram comparadas também com correlações feitas para jorro, as mesmas utilizadas nas pesquisas de Monazam (2018). Mesmo sendo estas correlações para reatores com bases cônicas e um único orifício central, e lembrando que o reator utilizado neste trabalho tem sua base plana e com vários orifícios, foi considerado que o ângulo da base é de 90° e o diâmetro do orifício de jorro é o diâmetro equivalente à soma das áreas dos orifícios do distribuidor. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.12 e na Tabela 4.5.

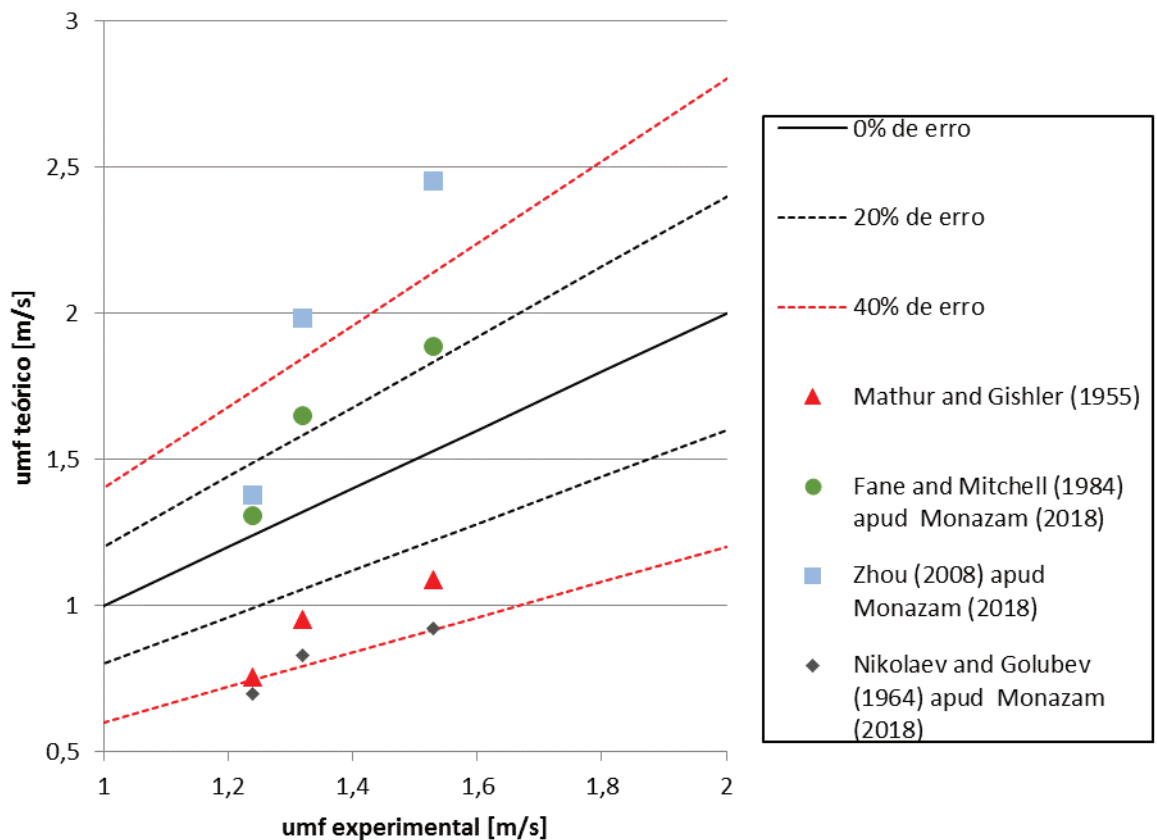


Figura 4.12 - Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mj} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA.

Na Figura 4.12 pode ser observado que o resultado de Fane e Mitchell (1984) foi que mais se aproximou, com erro em torno de 20% dos valores experimentais. Percebe-se novamente um comportamento similar às correlações de mínima fluidização com uma tendência logarítmica de estabilização da velocidade com o aumento de RA. Os outros ficaram acima de 40% de erro, principalmente as correlações dos autores citados na Tabela 4.5 que ficaram com erros em torno de 95%.

Tabela 4.5 - Comparação dos valores experimentais e teóricos para U_{mj} realizado com distribuidor 2 para diferentes RA que ficaram em torno de 95% de erro.

Palitos de bambu	4x2		8x2		12x2	
	u_{ms} [m/s]	Erro	u_{ms} [m/s]	Erro	u_{ms} [m/s]	Erro
Goltsiker (1967) apud Monazam (2018)	57,20	98%	50,03	97%	46,25	97%
Choi and Misen (1992) apud Monazam (2018)	198,64	99%	228,70	99%	248,36	99%
Mukhlenov and Gorshtein (1965) apud Monazam (2018)	10,66	88%	12,14	89%	13,09	88%
Tsvik, Nabiev, Rizaev, Merenkov, and Vyzgo (1967) apud Monazam (2018)	13,46	91%	15,32	91%	16,53	91%
Olazar er al. (1992) apud Monazam (2018)	49,81	98%	55,91	98%	59,81	97%
Zhong et al. (2006) apud Monazam (2018)	22,10	94%	24,64	95%	26,27	94%

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizada a fluidização, em leito fluidizado borbulhante a frio, de partículas cilíndricas com diferentes razões de aspecto para avaliar a influência desse parâmetro na velocidade mínima de fluidização e avaliar algumas correlações existentes na literatura.

A velocidade de orifício no distribuidor 1 ficou excessivamente alta com risco de levar ao atrito das partículas do leito, enquanto a do distribuidor 2 fica abaixo da zona de risco, portanto, é recomendável dimensionar o distribuidor de tal forma que a velocidade nos orifícios fique dentro da zona segura (<30 m/s).

Quanto maior a razão de aspecto da partícula, maior será a variação da altura estática do leito compactado para o leito solto e conseqüentemente será maior a fração de vazio.

Das outras correlações, grande parte ficou com erro dentro de 20% e outros ficaram com 20% a 40%. A correlação que mais se aproximou do experimental foi a de Ergun (1952) com um desvio máximo de 14%.

A velocidade mínima de fluidização tende a aumentar quadraticamente com o aumento da razão de aspecto, e comparando com alguns autores foi possível observar que os resultados das correlações de velocidades mínimas dos autores apresentam uma tendência logarítmica que se afasta dos resultados experimentais, ficando evidente a tendência de estabilização da velocidade mínima de fluidização. A única exceção é a equação de Ergun (1952), que tende a aumentar linearmente os resultados da velocidade mínima de fluidização. Aparentemente, quando se aumenta a razão de aspecto, aumenta o entrelaçamento das partículas, levando a necessidade de uma maior velocidade mínima de fluidização.

Considerando que a equação de Ergun é a correlação mais adequada para as partículas estudadas, pois foi que mais se aproximou dos resultados experimentais, inclusive na curva característica ($u_{mf} \times RA$), foi realizada uma modificação na equação de Ergun substituindo a esfericidade pela razão de aspecto e modificando seus coeficientes. Os resultados comparando com o experimental ficaram com erro dentro de 15% para a faixa de RA estudada. Comparando a equação de Ergun modificado com a velocidade das partículas de formatos diferentes classificados por Emden (2016) tipo cavaco, tipo fibra e granulares, ficaram com erro dentro de 30% e as esferas ficaram com erro máximo de 56%. Esses resultados obviamente demonstraram influência do coeficiente de arrasto para diferentes formatos de partículas que não foram analisados nesse estudo e não é previsto na equação de Ergun modificado. Como para esfera o coeficiente de arrasto é menor do que os outros formatos, é

necessário aumentar a velocidade de fluidização para obter força de arrasto suficiente para flutuação das partículas. Conclui-se que a equação de Ergun modificada para obtenção da velocidade mínima de fluidização aplicada para diferentes formatos geométricos das partículas pertencentes ao grupo D de Geldart é satisfatória, porém, para formatos esféricos a equação não é aconselhada.

Comparando com correlações feitas para jorro o resultado de Fane e Mitchell (1984) foi o que mais se aproximou, com erro em torno de 20% dos valores experimentais. Outros autores apresentaram correlações com erro de 40% até 99%, demonstrando que para o tipo de reator de base plana e as partículas em estudo, mesmo tendo comportamento de jorro, as correlações não podem ser aplicadas com tanta confiabilidade como as correlações para mínima fluidização.

5.1 Sugestões para outros trabalhos

- Analisar a Influência da rugosidade das partículas na velocidade mínima de fluidização;
- Reproduzir a pesquisa com partículas das mesmas dimensões desse trabalho, com massas específicas diferentes e acrescentar sua variação no modelo proposto neste trabalho;
- Verificar os limites de validade da equação de Ergun modificado.
- Incluir na correlação o coeficiente de arraste para partículas com os formatos esféricos, fibrosos e granulares.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M.Z. HUSAIN, Z. PONG, S.L.Y. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 24, p. 487–494, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia Elétrica do Brasil 3ª ed**, Brasília, 2008. < <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>
- BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia do Brasil. **Plano Nacional Energético 2030**. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>>.
- COLTTERS, R.; RIVAS, A.L. Minimum fluidation velocity correlations in particulate systems. **Powder Technology**, Caracas, v.147 p. 34-48, 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2007.
- EMDEN, H. K. Flow-regime transitions in fluidized beds or non-spherical particles. **Particuology**, Bochum, v.29, p. 1-15, 2016.
- FARSHI, A. Experimental measurement of different fluidization parameters. **Petroleum & Coal**, 2013.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.
- GENEHR, G. A. ; MAINARDI, H. K. ; ZINANI, F. ; INDRUSIAK, M. L. S. . Fluidization of mixtures of sand and wood bark biomass particles - an experimental study. **In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT**, 2016.
- GUO, Q.; CHEN, X., LIU, H. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle. **Fuel**, Shanghai, v. 94, p. 551-555, 2012.
- LINHARES, F.A.; GOMES, G.F.;MARCÍLIO, N.R.; MELO, P.J. Avaliação fluidodinâmica e co-combustão de resíduo de biomassa industrial em planta de bancada e planta piloto de leito fluidizado borbulhante. **Resíduos e Sólidos e Mudanças Climáticas**, v. 7, 2016.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1991.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds** 1. ed London: Academic Press, 1974.
- MONAZAM, E.R.; Minimum spouting velocity of flat-base spouted fluid bed. **Particuology**. Morgantown., v. 36, P. 27-36, 2018.
- OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker, 2004.
- PAUDEL, B.; FENG, Z.-G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 237, p. 134-140, 2013.

- PÉREZ, N.P.; Comportamento fluidodinâmico de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - **CONEM**, Fortaleza, v. 9, 2016.
- PÉREZ, N.P.; Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 73, p. 238-244, Dec. 2014.
- REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles. **Powder Technology**, v. 111, p. 245-251, 2000.
- SILVA, A.M.; BENTES, MEDRADO, S.B.; SOBRINHO, P.M.; JÚNIOR, J.A.C. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação do coque na coqueira da CNS. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.5, n.1, p. 40-45, 2008.
- WEN, C.Y.; YU, Y.H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **AIChE Journal**, n. 12, p. 610–612, 1966.
- WORLD ENERGY COUNCIL ; WORLD ENERGY RESOURCES. **Coal 2016**. <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Coal_2016.pdf>
- WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal Facts 2014**. Londres, 2014. <[https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_facts_2014\(12_09_2014\).pdf](https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_facts_2014(12_09_2014).pdf)>
- TAGHIPOUR, F.; ELLIS, N.; WONG, C.; Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics. **Chemical Engineering Science**, p. 6857–6867, 2005
- XU, R.; DI GUIDA, O. A. Comparison of sizing small particles using different technologies. **Powder Technology**, v. 132, n. 2-3, p. 145–153, 2003.