



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**JARDEL LENO ZANCANELLA MELO**

**ANÁLISE DO LEITO DE JORRO COMO SISTEMA DE  
CONTATO PARA PIRÓLISE DE COMPÓSITO  
PEBD/AL**

SÃO MATEUS – ES

2014

JARDEL LENO ZANCANELLA MELO

**ANÁLISE DO LEITO DE JORRO COMO SISTEMA DE  
CONTATO PARA PIRÓLISE DE COMPÓSITO  
PEBD/AL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário do Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia na Área de Concentração Multidisciplinar em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos.

SÃO MATEUS – ES

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Melo, Jardel Leno Zancanella, 1989-  
M528a Análise do leito de jorro como sistema de contato para pirólise  
de compósito PEBD/AL / Jardel Leno Zancanella Melo. – 2014.  
72 f. : il.

Orientador: Marcelo Silveira Bacelos.  
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal  
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Energia. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Resíduos sólidos.  
4. Escoamento multifásico. 5. Sistemas particulados. I. Bacelos,  
Marcelo Silveira. II. Universidade Federal do Espírito Santo.  
Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

---

**ANÁLISE DO LEITO DE JORRO COMO SISTEMA DE  
CONTATO PARA PIRÓLISE DE COMPÓSITO  
PEBD/AL**

**JARDEL LENO ZANCANELLA MELO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

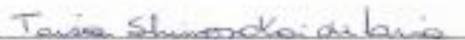
Aprovada: 11/09/2014.



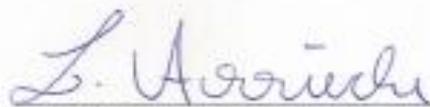
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria do Carmo Ferreira  
Universidade Federal de São Carlos  
Membro Externo



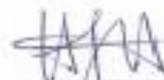
Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Membro Interno/PPGEN



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Taisa Shimosakai de Lira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Membro Interno/PPGEN



Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Membro Interno/PPGEN



Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador/PPGEN

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que me proporciona a cada dia crescer e amadurecer para essa longa jornada que é a vida.

Aos meus pais Manoel Melo e Darcileni Zancanella, ao meu irmão Daniel Zancanella e aos familiares, pela convivência, apoio nos momentos difíceis da vida. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr Marcelo Silveira Bacelos, pela competência em transmitir o conhecimento, profissionalismo, educação e respeito. Foi de suma importância a sua orientação para a conclusão do trabalho e para meu crescimento profissional e pessoal. Muito obrigado.

Aos professores do PPGEN/UFES e FAACZ, em especial aos professores Paulo Porto, Leonardo Arrieche, Fabio Ressel e Taisa Shimosakai. Obrigado pela dedicação e empenho.

Agradeço o suporte financeiro fornecido pela Capes e o apoio da TETRA PAK à pesquisa.

## RESUMO

Na última década, várias rotas de reutilização de resíduos de embalagens cartonadas têm sido propostas na literatura. Dentre os processos de recuperação, a pirólise de resíduos cartonados vem se destacando devido à possibilidade de obtenção de produtos com elevado valor agregado, como os óleos parafínicos e barras de alumínio. Recentemente, o leito de jorro tem sido investigado como um reator promissor para a pirólise de sólidos, devido a sua alta taxa de troca térmica. Entretanto para que a pirólise ocorra de forma adequada é imprescindível a realização de um procedimento investigativo sobre a dinâmica do escoamento de ar em meio aos resíduos no leito de jorro cônico. Assim, este estudo tem como objetivo analisar o comportamento fluidodinâmico do compósito PEBD/AL (em forma de pellet,  $d_s = 2,58$  mm) e as misturas de compósito PEBD/AL e areia ( $d_s = 2,58$  mm), em um leito de jorro cônico. Os dados experimentais de queda de pressão são medidos por um transdutor de pressão diferencial. Estes são endereçados a uma interface A/D da National Instruments e processados em um computador pelo programa de aquisição de dados desenvolvido com o software Labview 10.0. Os dados de velocidade do ar são obtidos pelo inversor de frequência que acompanha a unidade experimental. O modelo Euleriano é utilizado para descrever o escoamento de ar-sólido em leito de jorro cônico. As equações do modelo são abordadas utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional com o método de volumes finitos, utilizando uma malha estruturada bidimensional para discretização do domínio. Dentre os modelos de turbulência testados, o modelo k- $\epsilon$  disperso se mostra adequado para prever comportamento fluidodinâmico característico do leito. As simulações em CFD se mostraram adequadas no presente estudo de caso, subestimando os valores experimentais, onde os dados de velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ), queda de pressão de mínimo jorro ( $\Delta P_{mj}$ ) e queda de pressão máxima no leito ( $\Delta P_{max}$ ) apresentaram desvio percentual máximo igual a -13,5; -9,5 e -23% respectivamente. Analisando a estabilidade do leito, é recomendada a utilização de misturas com fração mássica de compósito PEBD/AL entre 20 e 40%.

Palavras-chave: Energia. Fluidodinâmica computacional. Sistemas particulados. Resíduos sólidos. Escoamento multifásico.

## ABSTRACT

In the last decade, several routes of waste cartons reusing have been proposed in the literature. Among other recovery processes, pyrolysis of carton residues has been highlighted due to make possible the manufacture of products with high added value, such as paraffin oils and aluminum bars. Recently, the spouted bed has been investigated as a promising reactor for pyrolysis of solids, due to its high rate of thermal exchange. However, in order to occur the pyrolysis appropriately is essential the study about the dynamics of air flow between solid residues in conical spouted bed. Thus, this research aims to analyze the flow of the LDPE/Al composite (in the form of pellets,  $d_s = 2,58$  mm) and mixtures of LDPE/Al composite and sand ( $d_s = 2.58$  mm) in a conical spouted bed. The experimental data of pressure drop are measured by a differential pressure transducer. These are assigned to an A/D interface, National Instruments. and processed on a computer by data acquisition program developed with Labview 10.0. The data of velocity of air are obtained by frequency inverter, which accompanies the experimental apparatus. The Eulerian model is used to describe the flow of air-solid in conical spouted bed. The equations of the model are addressed using the technique of computational fluid dynamics with the finite volume method, using a structured two-dimensional mesh. Among the tested turbulence models, the k- $\epsilon$  model dispersed seems to be appropriate to predict characteristic fluid dynamic behavior of the bed. The CFD simulations are adequate in this case study, underestimating the experimental values, where data for the minimum spouting velocity ( $V_{mj}$ ), pressure drop of minimum spouting ( $\Delta P_{mj}$ ) and maximum pressure drop in the bed ( $\Delta P_{max}$ ) have a maximum deviation of -13.5; -9.5 and -23, respectively. Analyzing the stability of the bed, to use mixtures with LDPE/Al composite mass fraction between 20 and 40% is recommended.

Keywords: Energy. Computational fluid dynamics. Particulate systems. Solid waste. Multiphase flow.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_D$	Coeficiente de arraste	[ - ]
$C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	Coeficiente no modelo de turbulência	[ - ]
$d_s$	Diâmetro de partícula	[ m ]
$D_p$	Diâmetro médio de peneira	[ m ]
$e_{ss}$	Coeficiente de restituição entre sólidos	[ - ]
$E$	Erro	[ - ]
$g_{0,ss}$	Função de distribuição radial	[ - ]
$\vec{g}$	Aceleração gravitacional	[ m.s <sup>-2</sup> ]
$G$	Produção de energia cinética turbulenta	[ - ]
$H_f$	Altura de fonte	[ m ]
$k_{\theta_s}$	Coeficiente de difusão de temperatura granular	[kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>1</sup> ]
$k$	Energia cinética turbulenta	[ m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$m$	Massa	[ kg ]
$V$	Volume	[ m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}$	Velocidade	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$V_{mj}$	Velocidade de mínimo jorro	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$\bar{I}$	Tensor unitário	[ - ]
$P$	Pressão	[ Pa ]
$\Delta P_{max}$	Queda de pressão máxima para vazões decrescentes de ar	[ Pa ]
$\Delta P_{mj}$	Queda de pressão de mínimo jorro	[ Pa ]

## Símbolos gregos

$\alpha$	Fração volumétrica	[ - ]
$\beta$	Coeficiente de troca de momento entre fases	[kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\gamma_{\theta_s}$	Energia de dissipação colisional	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$\varepsilon_0$	Porosidade	[ - ]
$\varepsilon$	Dissipação do vórtice de turbulência	[m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$\theta$	Temperatura granular	[m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$\lambda$	Viscosidade <i>bulk</i> de sólidos	[Pa.s]
$\mu$	Viscosidade cisalhante de sólidos	[Pa.s]
$\bar{\tau}$	Tensor tensão de sólidos	[N.m <sup>-2</sup> ]
$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	Esfericidade	[ - ]
$\phi_{gs}$	Troca de energia entre fases	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$\Pi$	Influência das fases dispersas na fase contínua	[ - ]
$\sigma$	Número de Prandtl	[ - ]

## Abreviaturas

AL	Alumínio
CFD	Fluidodinâmica Computacional
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
ATG	Análise Termogravimétrica

## Subscritos

- g Fase fluida, gasosa
- s Fase granular, sólida

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura física da embalagem cartonada.....	17
Figura 2.2 – Esquema da reciclagem de embalagens cartonadas.....	18
Figura 2.3 – Esquema de um leito de jorro convencional.....	22
Figura 2.4 – Leitos de jorro cônicos: (a) convencional (b) <i>Jet Spouted Bed</i> .....	25
Figura 2.5 – Curva característica do leito de jorro.....	28
Figura 2.6 – Desvio padrão da flutuação do sinal de queda de pressão ( $\sigma$ )do leito em função da velocidade do ar para vários regimes de escoamento. I - leito fixo; II - jorro estável; III - jorro instável. Leito de jorro cilíndrico operando com esferas de vidro com $d_p = 1,6$ mm. ....	29
Figura 3.1 – Esquema do sistema sob análise com condições de contorno especificadas.....	31
Figura 4.1 – Material utilizado: (a) compósito PEBD/AL; (b) Areia.....	38
Figura 4.2 – Carta de esfericidade .....	40
Figura 4.3 – Esquema com dimensões das partículas de compósito PEBD/AL .....	41
Figura 4.4 – Esquema da unidade experimental. 1) leito de jorro cônico-cilíndrico, 2) termopar, 3) transdutor de pressão, 4) aquecedor, 5) soprador, 6) condicionador de sinais, 7) placa de aquisição de dados, 8) microcomputador .....	43
Figura 4.5 – Rotina Labview para aquisição de dados.....	45
Figura 5.1 – Detalhe da geometria do leito de jorro e da malha computacional.....	46
Figura 6.1 – Fotografias do leito de jorro com mistura contendo 20% em massa de compósito PEBD/AL : (a) regime de jorro (b) regime de leito fixo ....	51

Figura 6.2 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar .....	51
Figura 6.3 – Desvio padrão da flutuação dos sinais pressão ( $\sigma$ ) no leito em função da velocidade do ar: (a) areia, (b) 20% compósito PEBD/AL, (c) 40% compósito PEBD/AL, (d) 60% compósito PEBD/AL, (e) 80% compósito PEBD/AL, (f) compósito PEBD/AL.....	53
Figura 6.4 – Teste de independência da malha .....	54
Figura 6.5 – Contornos de fração volumétrica de areia para velocidade do ar igual 17 m/s, utilizando os modelos de arraste Syamlal-O'Brien e Gidaspow .....	55
Figura 6.6 – Contornos de fração volumétrica de compósito PEBD/AL com velocidade do ar igual 10 m/s, para as condições de turbulência testadas.....	56
Figura 6.7 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para diferentes velocidades de entrada de ar no leito, para a condição de turbulência k- $\epsilon$ disperso: (a) compósito PEBD/AL, (b) areia .....	58
Figura 6.8 – Mapa vetores de velocidade para partículas de compósito PEBD/AL com velocidade do ar igual 10 m/s, para a condição 4 (modelo de turbulência k- $\epsilon$ disperso):a) região de fonte; b) região de jorro e anular .....	59
Figura 6.9 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito com misturas de areia e compósito PEBD/AL em regime de jorro, contendo 20%, 40%, 60% e 80% em massa de compósito PEBD/AL. (a) compósito PEBD/AL; (b) areia.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pesquisas referentes à pirólise de resíduos.....	19
Tabela 3.1 – Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido .....	33
Tabela 3.2 – Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido .....	34
Tabela 3.3 – Equações constitutivas de turbulência do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido .....	35
Tabela 5.1 – Parâmetros empregados nas simulações CFD .....	47
Tabela 6.1 – Propriedades físicas das partículas.....	49
Tabela 6.2 – Porosidade das misturas de areia e compósito PEBD/AL.....	50
Tabela 6.3 – Dados experimentais e simulados de $V_{mj}$ , $\Delta P_{mj}$ e $\Delta P_{max}$ para as misturas de areia e compósito PEBD/AL em leito de jorro.....	61
Tabela 6.4 – Erros relativos nas medidas de $V_{mj}$ , $\Delta P_{mj}$ e $\Delta P_{max}$ para as misturas de areia e compósito PEBD/AL em leito de jorro .....	62

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1 EMBALAGENS CARTONADAS.....	16
2.2 PIRÓLISE DE EMBALAGENS CARTONADAS .....	19
2.3 LEITO DE JORRO .....	21
2.3.1 Leitos de jorro não convencionais .....	24
2.3.2 Características fluidodinâmicas de um leito de jorro .....	26
<b>3 MODELAGEM</b> .....	30
3.1 SISTEMA SOB ANÁLISE .....	31
3.2 MODELO EULERIANO MULTIFÁSICO APLICADO AO LEITO DE JORRO .....	32
3.3 MALHA COMPUTACIONAL.....	36
<b>4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTICULAS E MISTURAS.....	38
4.1.1 Massa específica.....	38
4.1.2 Diâmetro.....	39
4.1.3 Porosidade .....	40
4.1.4 Esfericidade.....	40
4.2 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	43
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
<b>5 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO DO MODELO</b> .....	46
5.1 ESTUDO DA MALHA .....	46

5.2	MODELOS EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES CFD.....	47
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
6.1	EXPERIMENTAL.....	49
6.1.1	Caracterização das partículas e misturas.....	49
6.1.2	Fluidodinâmica em leito de jorro com misturas .....	50
6.2	SIMULAÇÃO .....	54
6.2.1	Teste de malha.....	54
6.2.2	Resultados qualitativos.....	55
6.2.3	Comparação dos dados experimentais e simulados .....	61
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento de contato fluido-partícula desenvolvido em 1955, com o intuito de solucionar problemas encontrados na fluidização de partículas com diâmetro superior a 1 mm. Devido ao movimento cíclico das partículas, o leito apresenta altos coeficientes de transferência de calor e massa. Ao longo dos anos, os leitos de jorro foram testados experimentalmente e aplicados em diferentes processos, tais como a polimerização, granulação, gaseificação de carvão, polimerização catalítica, secagem de pastas e fármacos, pirólise, dentre outros.

Vários trabalhos têm sido realizados aplicando a técnica CFD, com o objetivo de prever as características do escoamento em leito de jorro. A validação de um modelo computacional, através de métodos experimentais, visa obter informações específicas do processo com intuito de propor a ampliação de escala do leito de jorro com um desempenho satisfatório sob o ponto de vista fluidodinâmico.

Os resíduos gerados nos grandes centros urbanos têm, ao longo dos anos, causado grande impacto sobre o meio ambiente. As embalagens cartonadas pós-consumo constituem parte significativa dentre estes resíduos. Assim, devido a incentivos de instituições financeiras a empresas ambientalmente responsáveis e ao custo elevado da matéria-prima, surge a necessidade de buscar novas técnicas de reaproveitamento para tais embalagens.

Dentre os processos de aproveitamento de resíduos sólidos, a pirólise vem se destacando devido à obtenção de produtos de elevado potencial energético. Esta técnica pode gerar emissões atmosféricas baixas em relação a outras tecnologias como, por exemplo, a incineração direta em caldeiras. Ainda, o processo de pirólise apresenta alta eficiência energética uma vez que os gases produzidos podem ser reaproveitados no sistema como fonte de calor para a reação.

Além disso, devido ao alto valor agregado das embalagens cartonadas pós-consumo (composta de 75% de papel, 20% de polietileno e 5% de alumínio), elas foram destaque entre os resíduos modernos consumidos pela sociedade em todo o mundo.

No decorrer dos anos, a busca pela sustentabilidade, com o uso racional dos recursos energéticos disponíveis vem se tornando fator de suma importância nos processos industriais. Na atualidade, políticas ambientais, como o protocolo de Kyoto, estimulam a população e as indústrias a buscarem alternativas para o reaproveitamento de resíduos industriais, a fim de que não ocorra o esgotamento de fontes primárias. Deste modo, tecnologias sustentáveis e com alta eficiência energética, tendem a ganhar destaque no cenário industrial.

A pirólise surge como uma tecnologia sustentável no processo de reaproveitamento de embalagens cartonadas. Ao aplicar esta tecnologia para separar o alumínio do polietileno, permite-se que ambas as matérias-primas possam ser usadas para a fabricação de novas embalagens cartonadas. O leito de jorro é uma alternativa de reator para a pirólise de resíduos de sólidos, no entanto, é necessário um estudo prévio sobre a fluidodinâmica das partículas no leito para que sejam apontadas as condições operacionais de processo adequadas para o bom funcionamento do reator.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar a análise experimental, modelagem e a simulação da fluidodinâmica do leito de jorro com compósito PEBD/AL e como misturas de compósito PEBD/AL e areia. A parte experimental consiste em analisar os dados de queda de pressão no leito e velocidade do ar, de maneira a identificar os regimes de escoamento e a estabilidade do regime de jorro. A modelagem e simulação são realizadas com intuito de prever as condições operacionais do leito de jorro e para comparar os dados experimentais e simulados para validação do modelo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Embalagens Cartonadas**

A compatibilização do progresso tecnológico com a preservação do meio ambiente tornou-se elemento fundamental na garantia de um futuro próspero para a humanidade. A necessidade de conciliar esses dois caminhos tornou crucial o desenvolvimento de tecnologias que promovam um desenvolvimento sustentável. Atualmente, um problema que tem causado grande impacto no meio ambiente é a geração de resíduos sólidos, principalmente nas grandes cidades. Dentre os resíduos sólidos, gerados nas grandes áreas urbanas, destacam-se os resíduos de embalagens cartonadas.

A taxa de reciclagem de embalagens cartonada no Brasil foi de 29% em 2012 totalizando mais de 61 mil toneladas, valor acima da taxa de reciclagem mundial que, no mesmo período, se apresentava na ordem de 21,6%. Cada tonelada de embalagem cartonada reciclada gera, aproximadamente, 680 Kg de papel kraft. No Brasil, é previsto um aumento constante da reciclagem dessas embalagens devido à expansão das iniciativas de coleta seletiva com organização de municípios, cooperativas e comunidade e ao desenvolvimento de novos processos tecnológicos (CEMPRE, 2014).

A estrutura multifoliada e a composição desse resíduo, que é formado de papel (75%), polietileno (20%) e alumínio (5%), são fatores que dificultam sua degradação na natureza e o tornam um potente poluidor do meio ambiente. Por outro lado, o alto valor agregado dos componentes da embalagem cartonada torna possível o seu aproveitamento em diversos processos industriais. A Figura 2.1 exibe a estrutura física das embalagens cartonadas:

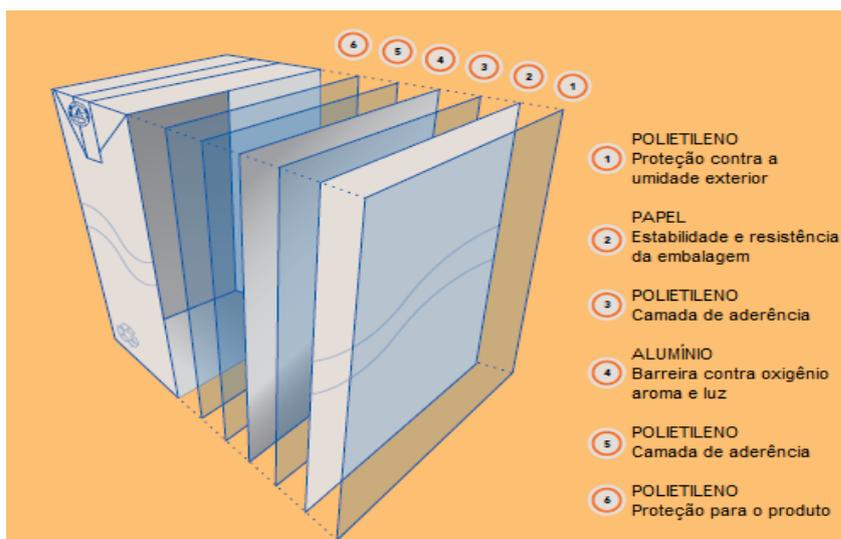


Figura 2.1 – Estrutura física da embalagem cartonada.

Fonte: Tetra Pak (2011).

Analisando a Figura 2.1 é possível perceber que a estrutura física da embalagem cartonada é formada por um aglomerado de materiais. Segundo Nascimento *et al.* (2007), tal aglomerado é denominado um compósito laminado, que por possuir materiais agregados com características químicas e físicas distintas a reciclagem se torna complicada.

Entretanto, existem tecnologias que tornam possível a reciclagem de embalagens cartonadas. A Figura 2.2 ilustra um esquema com as principais tecnologias aplicadas a reciclagem das embalagens cartonadas.

Segundo Neves (1999) para reciclar a embalagem cartonada é necessário inicialmente separar as diversas camadas de materiais presentes na embalagem. A primeira etapa do processo é realizada em um equipamento denominado *hidrapulper*, com finalidade de desagregar as fibras de papel das camadas de polietileno e alumínio através da agitação mecânica com água, tal processo não requer o uso de aditivo químico nem calor ao processo. Em seguida, é realizado o processo de separação das fibras de papel do material composto de polietileno e alumínio. As fibras de papel são destinadas à produção de produtos como: papel ondulado, papel cartão, embalagem para ovos, palmilhas para sapatos, etc. A próxima etapa consiste no reaproveitamento das fibras de polietileno e alumínio.

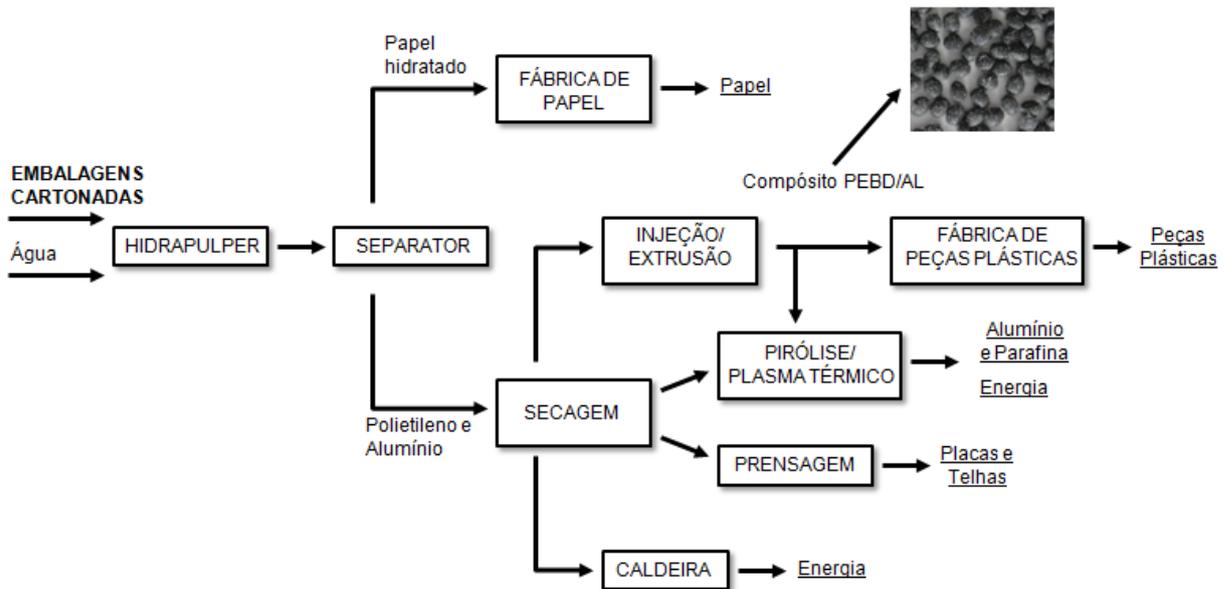


Figura 2.2 – Esquema da reciclagem de embalagens cartonadas.

As fibras de polietileno e alumínio oriundas do *hidrapulper* passam pelo processo de secagem e em seguida são reaproveitadas utilizando diferentes tecnologias. Nascimento *et al.* (2007) destacam as principais alternativas de reaproveitamento:

- incineração com obtenção de energia, produzindo vapor d'água, dióxido de carbono e trióxido de alumínio, sendo que este último pode ser usado como agente floculante em tratamentos de água ou como refratário em altos fornos. Pode ser implantada em regiões periféricas, longe dos grandes centros, onde tende a ser uma alternativa para possível falta de energia;
- injeção/Extrusão, para fabricação de materiais plásticos com alumínio incorporado;
- prensagem, para a fabricação de placas e telhas que podem ser utilizadas na construção civil e na indústria moveleira;
- pirólise, para recuperação do alumínio, em fornos com baixo teor de oxigênio, em que o plástico serve como combustível para o próprio forno. Nesse caso, o polietileno reage com o oxigênio, liberando energia.

## 2.2 Pirólise de Embalagens Cartonadas

O processo de pirólise aplicado à reciclagem dos resíduos de embalagens cartonadas oferece vantagens ambientais e financeiras em relação à incineração direta em caldeiras. Durante a pirólise dos resíduos não ocorre a combustão, evitando emissão de gases de efeito estufa, e os subprodutos das embalagens cartonadas (alumínio, parafina e gases) possuem alto valor de mercado. Korkmaz *et al.* (2009) destacam que a pirólise pode ser uma melhor rota para o tratamento de resíduos de embalagens cartonadas, os autores destacam ainda que a pirólise têm sido amplamente aplicada na recuperação de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas, pneus inutilizados, esgoto, lamas e resíduos de plástico. Nos últimos anos, pesquisadores desenvolveram diversas pesquisas de aplicações da pirólise, nos quais se destacam os apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Pesquisas referentes à pirólise de resíduos.

Referência	Material pirolizado	Descrição
Liu <i>et al.</i> (2007)	Biomassa	A pesquisa apresenta um estudo de caso de um reator de cone rotativo para pirólise rápida de biomassa para a produção de combustível líquido.
Gómez (2002)	Biomassa (capim elefante)	O trabalho tem por objetivo um estudo teórico das condições operacionais e fluidodinâmicas do reator de leito fluidizado no processo de pirólise rápida biomassa vegetal (capim elefante).
Korkmaz <i>et al.</i> (2009)	Embalagens cartonadas	Experimentos de pirólise foram realizadas sob atmosfera inerte em um reator de batelada em diferentes temperaturas.
Wu e Chang (2001)	Embalagens cartonadas	A pirólise de tetra pak em nitrogênio, foi investigada com uma análise termogravimétrica (TGA) do sistema de reação.
Alvarenga <i>et al.</i> (2012) e Alvarenga (2013)	Embalagens cartonadas	Nesta pesquisa, um estudo da cinética das reações de pirólise foi realizada a fim de estimar a energia de ativação global. Foram realizadas análises termogravimétricas.

No processo de pirólise, o material orgânico é aquecido em uma atmosfera inerte. Os produtos de pirólise são gases, óleo e resíduo carbonado. O gás pode ser usado como combustível, frequentemente para o aquecimento do reator de pirólise e o óleo pode ser utilizado como combustível ou como matéria-prima para a produção de diferentes produtos químicos. O resíduo carbonado pode ser queimado como combustível, além disso, este resíduo também é adequado para a produção de carvão ativado Korkmaz *et al.* (2009).

O Brasil é pioneiro na implantação de um processo de separação por pirólise do alumínio e o plástico que compõem a embalagem cartonada. Uma planta foi inaugurada em 2005, na cidade de Piracicaba, interior de São Paulo através de uma parceria entre as empresas Klabin, Tetra Pak, Alcoa e TSL Ambiental. A nova fábrica faz uso inédito da tecnologia de Plasma (desenvolvida no Brasil), que permite a separação total do alumínio e do plástico que compõem a embalagem. O processo muda o modelo atual de reciclagem das embalagens longa vida, que até então separava o papel, mas mantinha o plástico e o alumínio unidos. A nova unidade de Plasma tem capacidade para processar 8 mil toneladas por ano de plástico e alumínio, o que equivale à reciclagem de 32 mil toneladas de embalagens longa vida. A emissão de poluentes na recuperação dos materiais é próxima de zero, feita na ausência de oxigênio, sem queimas, e com eficiência energética próxima de 90% (ZUBEN, 2005).

No processo de plasma a energia elétrica é utilizada para produzir um jato de plasma a 15 mil graus Celsius para aquecer a mistura de plástico e alumínio. Com o processo, o plástico é transformado em parafina e o alumínio, totalmente recuperado em forma de lingotes de alta pureza. O alumínio reciclado é utilizado para fabricação de novas folhas, fechando o ciclo do material. A parafina é vendida para a indústria petroquímica nacional. Já o papel, extraído na primeira etapa da reciclagem ainda na indústria de papel, mantém seu ciclo normal de reciclagem (ZUBEN, 2005).

A empresa finlandesa Stora Enso inaugurou em 2011 uma planta de pirólise de resíduo das embalagens cartonadas em Barcelona, na Espanha. A planta tem capacidade de processar 20.000 toneladas de embalagens cartonadas anualmente. Segundo Taimisto (2011) a pirólise ocorre através do aquecimento do composto de PEBD/AL a uma temperatura de 500 °C, na ausência de oxigênio. Assim, não ocorre

a combustão dos materiais plásticos. Os produtos gerados são: alumínio puro, óleo e gás, onde o gás é utilizado para geração de energia e tem capacidade de suprir cerca de 20% da necessidade energética da planta.

### **2.3 O Leito de Jorro**

O Leito de Jorro foi desenvolvido por Gishler e Mathur em 1955 com finalidade de solucionar problemas encontrados na fluidização de partículas com diâmetro superior a 1 mm. Os autores aplicaram o leito de jorro na secagem de trigo e verificaram que o movimento das partículas e o escoamento do ar eram significativamente diferentes dos leitos fluidizados. No Brasil, referências atuais sobre este assunto podem ser encontradas em vários trabalhos tais como: LOURENÇO, 2006; CUNHA, 2008; BÉTTEGA, 2009; ROSA, 2010; NETO, 2007; MARQUES, 2013.

O leito de jorro convencional consiste em uma coluna cilíndrica com base cônica, as quais são preenchidas com as partículas a serem processadas. Um fluxo de ar é injetado no orifício presente na parte cônica do leito para promover o movimento das partículas.

O início da circulação dos sólidos, que caracteriza o leito de jorro, acontece quando a vazão do ar torna-se suficiente para arrastar pneumáticamente as partículas acima do nível do leito (LOURENÇO, 2006). As partículas são arrastadas em um movimento ascendente por uma região de alta porosidade denominada canal de jorro, ao alcançar um equilíbrio entre as forças envolvidas no escoamento na posição vertical (peso, gravidade e arraste) as partículas passam a apresentar um movimento descendente através de uma região de menor porosidade (região anular). As partículas retornam ao canal de jorro na interface jorro-anulo, porém a maioria das partículas retornam ao canal de jorro na base da região cônica, promovendo assim o movimento cíclico. A Figura 2.3 apresenta um esquema de um leito de jorro convencional operando em regime de jorro, e evidencia a trajetória das partículas no interior do leito.

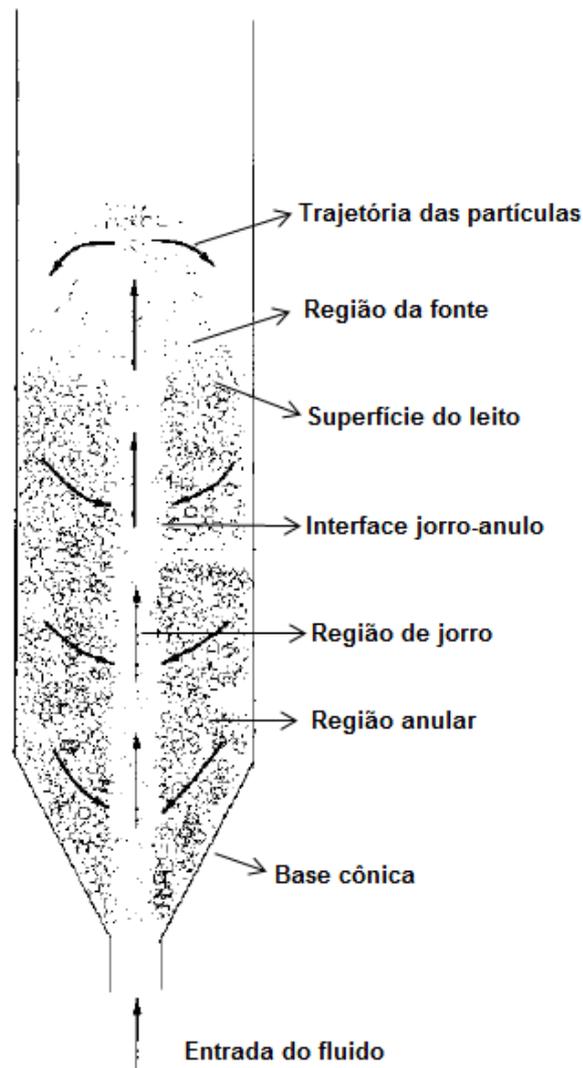


Figura 2.3 – Esquema de um leito de jorro convencional.

Fonte: Yang (2003)

Desde sua descoberta, o leito de jorro vem sendo aplicado a diferentes processos como secagem, granulação, recobrimento, pirólise entre outras. As inúmeras aplicações citadas ocorrem pelo eficiente contato fluido partícula e pelos altos coeficientes de transferência de calor e massa no regime de jorro, além do baixo investimento inicial e custo operacional. A seguir são apresentadas algumas pesquisas referentes à aplicação do leito de jorro:

Cunha (2008) apresenta um estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro, evidenciando o efeito da inserção do tubo *draft* e da variação da carga de sementes no leito. O autor concluiu que a presença do tubo

causou maior efeito nas respostas estudadas, onde o tubo interno governa a cinética de atrito das sementes maximizando a produção de corante.

Martins e Oliveira (2003) analisam a viabilidade da aplicação de revestimento gastro resistente em cápsulas gelatinosas duras pelo processo leito de jorro. A qualidade e eficiência do processo foram avaliadas através da taxa de aumento da massa das cápsulas. Os altos valores de eficiência de adesão foram obtidos, o que mostra a viabilidade do processo em análise para a aplicação de revestimento em cápsulas gelatinosas duras.

Duarte *et al.* (2004) realizaram um estudo experimental e de simulação da distribuição em massa da camada de revestimento de sementes de soja em leito de jorro. Os autores utilizaram um atomizador pneumático para o revestimento, e concluíram que o uso de um tubo interno no bocal do leito de jorro diminui o índice de dispersão e torna a camada revestida mais uniforme.

Bezerra *et al.* (2013) investigaram a secagem em leito de jorro da farinha de banana verde com o objetivo de agregar valor nutricional a produtos alimentícios. Os resultados obtidos com a secagem em leito de jorro foram satisfatórios, onde os produtos obtidos apresentaram boa qualidade.

Erkiaga *et al.* (2013) estudaram o efeito da temperatura na gaseificação de vapor de polietileno no reator de leito de jorro cônico. Os autores concluíram que o leito de jorro é uma tecnologia interessante para a gaseificação de resíduos plásticos, devido elevada taxa de transferência de calor.

Makibar *et al.* (2011) analisaram o desempenho da fluidodinâmica e transferência de calor de um reator de leito de jorro cônico projetado para pirólise de resíduos de biomassa. Foi mostrado que a fluidodinâmica do leito é fortemente afetada pela temperatura e que a eficiência do sistema melhora com o uso de um tubo interno na região de jorro.

Olazar *et al.* (2006) avaliaram o efeito da temperatura na velocidade de mínimo jorro para misturas de areia (material inerte) e resíduo de pneu em diferentes proporções, os autores concluíram que para as partículas finas, o efeito da densidade impera sobre o efeito da viscosidade, já para as partículas grosseiras, o efeito da viscosidade do gás é insignificante em comparação com o efeito da densidade.

Alvarez *et al.* (2014) realizaram a pirólise rápida da casca do arroz no reator leito de jorro, com remoção contínua do carvão gerado no processo. Os autores obtiveram alto rendimento na obtenção do bio-óleo e carvão, evidenciando a adequação do leito de jorro para a pirólise rápida da casca do arroz.

As aplicações citadas demonstram a versatilidade do uso do leito de jorro em processos na escala industrial.

### 2.3.1 Leitos de jorro não convencionais

Apesar da versatilidade e das inúmeras vantagens apresentadas pelo uso do leito de jorro, DUTRA, (1984) apresenta algumas limitações da aplicação do leito de jorro convencional:

- dificuldade na ampliação da escala (*scale-up*);
- elevada perda de carga para atingir o jorro estável;
- existência de uma altura máxima de leito que limita a carga do equipamento;
- grande faixa de residência das partículas no leito.

Assim, para superar tais limitações surge a necessidade de promover algumas modificações e adaptações no leito de jorro convencional. Na literatura encontra-se as diversas modificações implantadas no leito de jorro convencional, dentre as quais se destacam:

- leito de jorro com tubo *draft*. Consiste na inserção de um tubo concêntrico, na parte cilíndrica do leito convencional. Esta modificação possibilita o direcionamento do ar na região central de jorro, reduzindo a queda de pressão máxima no leito. Sua principal vantagem é o aumento do tempo de residência das partículas, bem como na homogeneização da circulação de partículas. Como desvantagens, destaca-se o comprometimento da permeação do ar na região anular e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região (LOURENÇO, 2006);

- leito de jorro aerado: a porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, causando um aumento da porosidade nesta região, melhorando as taxas de transferência de calor e massa do processo (CONCEIÇÃO FILHO, 1997);
- leito de seção retangular: leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis de processo de recobrimento, por exemplo (CONCEIÇÃO FILHO, 1997);
- leito vibro jorrando: a movimentação das partículas é auxiliada pela agitação oriunda de um sistema de vibração mecânica localizada na base do leito (CONCEIÇÃO FILHO, 1997);
- leito de jorro cônico: tem como principal característica a flexibilidade da altura de leito estático quando comparado ao leito de jorro cônico-cilíndrico. Outra vantagem que deve ser destacada no leito de jorro cônico é que, utilizando-se diâmetros de partículas equivalentes e uma carga menor de sólidos (menor altura de leito estático) estes podem operar em altas velocidades de fluidização, obtendo-se regimes pneumáticos como o regime denominado *Jet Spouted Bed* (BÉTTEGA, 2009). A Figura 2.4 apresenta um esquema do leito de jorro operando em regimes normal e *Jet*.

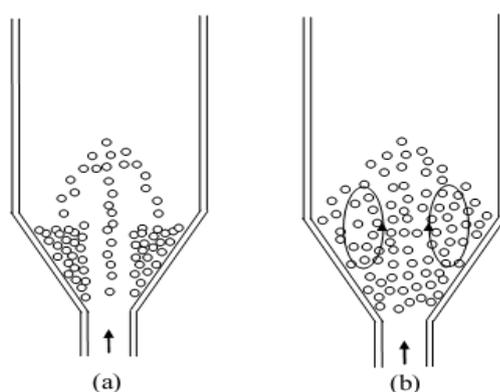


Figura 2.4 – Leitos de jorro cônicos: (a) convencional (b) *Jet Spouted Bed*.  
Fonte: Béttega (2009).

Pesquisas relacionadas à aplicação do leito de jorro cônico ao processo de pirólise têm sido desenvolvidas (Marques, 2013; Santos 2011). As altas taxas de transferência de calor e massa obtidos nesse tipo de reator bem como a flexibilidade na altura do leito fixo tende a contribuir para a utilização deste tipo de reator na pirólise, já que durante o processo torna-se imprescindível variações na altura do leito.

### 2.3.2 Características fluidodinâmicas de um leito de jorro

O regime de jorro é um fenômeno visualmente observável, ocorrendo sob uma determinada faixa de parâmetros específicos, dentre os quais têm-se, por exemplo: diâmetro de partícula, altura do leito estático, vazão do fluido de entrada e ângulo de abertura da base cônica. O conhecimento destes parâmetros e a faixa sob a qual eles devem ser mantidos para possibilitar um regime de jorro estável são fundamentais (Bettega, 2009).

O comportamento das partículas no leito de jorro deve atender as exigências do processo durante a operação. Assim, durante o projeto do leito de jorro é necessário conhecer suas condições operacionais: velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ), queda de pressão de mínimo jorro ( $\Delta P_{mj}$ ), queda de pressão máxima do leito ( $\Delta P_{max}$ ) e a altura de fonte ( $H_f$ ). O valor da  $\Delta P_{max}$  é usado no dimensionamento da potência do soprador necessária para atingir o jorro, a  $\Delta P_{mj}$  e a  $V_{mj}$  determinam a potência de operação do leito e a  $H_f$  determina a altura máxima da fonte de partículas onde o escoamento permanece estável.

A transição de leito fixo para leito jorrando pode ser mostrado através da curva característica da queda de pressão em função da vazão do ar ilustrada na Figura 2.5. A linha sólida é obtida para velocidade do ar crescente, enquanto que a linha tracejada é obtida para velocidade decrescente. Observa-se que há histerese na curva, de acordo com Bacelos (2006), isso ocorre porque no processo de redução da velocidade do ar no leito, não se necessita de uma energia mecânica, suficientemente alta para romper o jorro, como ocorre na operação inversa (linha pontilhada). Mathur e Epstein (1974) apresentaram o mecanismo de transição de um leito estático a um leito jorrando, descrito pela seguinte sequência:

- (trecho O-A) em baixa velocidade de entrada do gás este simplesmente percola através das partículas sem perturbá-las, e a queda de pressão no leito aumenta com a elevação da velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático;
- (trecho A-B) em uma determinada velocidade do gás, inicia-se o arraste das partículas da vizinhança imediata da entrada de gás, formando uma cavidade relativamente vazia pouco acima desta entrada. As partículas que rodeiam a cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compactado, que oferece uma resistência maior ao escoamento do gás. Deste modo, apesar da existência de uma cavidade oca, a queda de pressão total através do leito continua a aumentar;
- (ponto B) com o aumento da velocidade do gás, a pequena cavidade alonga-se para um jorro interno. O arco de sólidos compactados acima do jorro interno aumenta de maneira que a queda de pressão através do leito de jorro alcance o valor máximo;
- (trecho B-C) se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno torna-se relativamente grande comparados com os sólidos empacotados acima do jorro e assim a pressão cai;
- (trecho B-C) muitos sólidos são deslocados da região central causando uma expansão significativa do leito. Esta expansão do leito resulta em uma diminuição na queda de pressão;
- (trecho C-D) com um pequeno aumento na velocidade do gás, atinge-se o chamado ponto de jorro incipiente; rompe-se o jorro interno e a concentração de sólidos na região exatamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma redução considerável na queda de pressão. Assim, todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro;
- (ponto D em diante) aumentando-se a velocidade do gás, a quantidade adicional de gás simplesmente passa através da região de jorro, que possui menor resistência ao escoamento, causando uma elevação da fonte sem efeito significativo na queda de pressão.

A velocidade de jorro incipiente e o início do jorro dependem da história do leito, ou seja, da compactação inicial das partículas no leito. Devido tal fator, as condições de iniciais de jorro não são exatamente reproduzíveis, visto que a porosidade inicial do leito influencia diretamente as medidas. Assim, a velocidade mais reprodutível da condição de mínimo jorro é obtida por meio do decréscimo progressivo da vazão de gás a partir do leito remanescente do estado de jorro. Este ponto representa a condição de mínimo jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

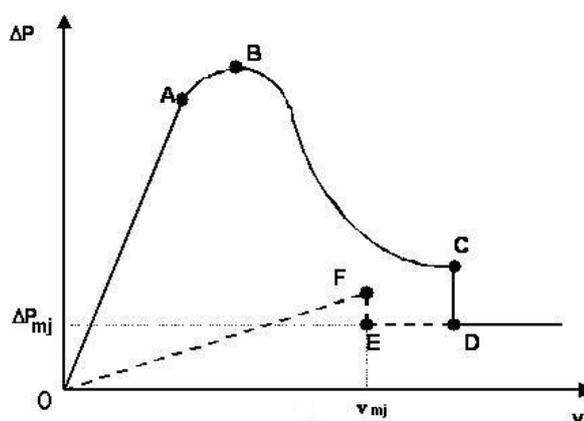


Figura 2.5 – Curva característica do leito de jorro.

Fonte: Bacelos (2006).

Os regimes de escoamento podem ser identificados pela curva característica do leito de jorro, entretanto, com relação a sua qualidade (se o jorro é estável ou instável) nenhuma informação pode ser retirada desta curva.

Pesquisadores tem utilizado a técnica de análise da flutuação de pressão nos leitos de jorro no domínio da frequência para identificar a estabilidade dos regimes de escoamento. Esta técnica consiste na análise do desvio padrão ( $\sigma$ ) da flutuação do sinal de queda de pressão total no leito em função da velocidade do ar. Ela desempenha um papel importante na identificação dos regimes de escoamento, visto que, geralmente, em equipamentos em escala industrial a observação visual não é possível (Bacelos, 2006). A Figura 2.6 apresenta o desvio padrão da flutuação do sinal de queda de pressão total no leito ( $\sigma$ ) em função da velocidade do ar, obtido por Xu *et al.* (2004).

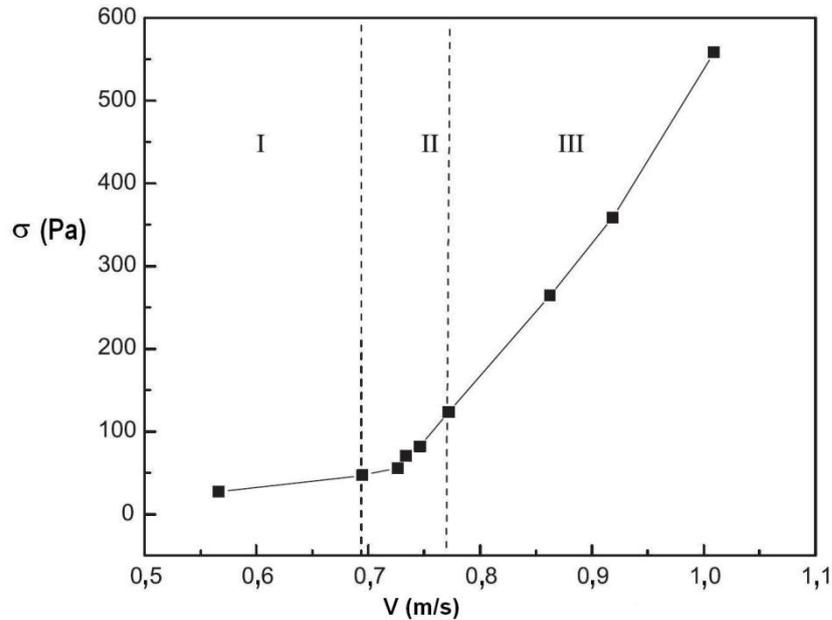


Figura 2.6 - Desvio padrão da flutuação do sinal de queda de pressão ( $\sigma$ ) do leito em função da velocidade do ar para vários regimes de escoamento. I - leito fixo; II - jorro estável; III - jorro instável. Leito de jorro cilíndrico operando com esferas de vidro com  $d_p = 1,6$  mm.

Fonte: Xu *et al.* (2004).

Observa-se na Figura 2.6 que o desvio padrão da flutuação do sinal de queda de pressão total no leito ( $\sigma$ ) aumenta sensivelmente com o aumento da velocidade do ar na região de leito fixo. Isto significa que há um aumento da complexidade da dinâmica do escoamento ar-sólido com o aumento da velocidade do ar. Assim, com o aumento da velocidade do ar, ocorre a transição de leito fixo para o jorro, onde, embora ocorra o aumento no desvio padrão da queda de pressão o jorro apresenta-se estável. O aumento abrupto do desvio padrão acontece quando a velocidade do ar é significativamente superior à velocidade de mínimo jorro ( $v > 0,8$  m/s), gerando assim, o regime de jorro instável.

### 3 MODELAGEM

A modelagem de fenômenos físicos tem nos últimos anos apoiado pesquisadores na obtenção de respostas satisfatórias e precisas em diversos aspectos. Tradicionalmente, métodos experimentais e analíticos foram usados para estudar os diversos aspectos da fluidodinâmica e para auxiliar os engenheiros na concepção de equipamentos e processos industriais que envolvem escoamento de fluidos e transferência de calor. Com a chegada do computador digital, a simulação numérica surgiu como outra abordagem viável. Embora o método experimental ainda seja praticado em muitas pesquisas e continuará a ser realizada de forma significativa, a tendência é o uso mais frequente da abordagem computacional para compreensão de fenômenos, principalmente quando o fenômeno apresenta-se muito complexo, como por exemplo, escoamento de fluidos, transferência de calor e massa e turbulência (Tu, Yeoh e Liu, 2008).

A técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) vem sendo aplicada por diversos autores na modelagem e simulação de sistemas multifásicos, como é o caso do leito de jorro. Existem duas aproximações para o cálculo dos escoamentos multifásicos disponíveis no software ANSYS FLUENT 13.0: Euler-Lagrange e Euler-Euler.

Na abordagem Euler-Lagrange a fase fluida é tratada como contínua pela resolução das equações de *Navier Stokes*, e a fase dispersa aplicando a 2ª Lei de Newton, onde a fase dispersa pode trocar momento, massa e energia com a fase fluida o que representa aumento significativo de esforço computacional. É apropriado para sistemas onde a fase particulada pode ser considerada diluída, ou casos de escoamento de partículas isoladas, onde o escoamento do fluido determina a trajetória da partícula e a partícula não influencia o escoamento do fluido.

Já abordagem Euler-Euler mostra-se adequada para a modelagem de escoamento em leito de jorro. A abordagem trata as diferentes fases como fluidas e interpenetrantes, introduzindo o conceito de fração volumétrica de fases, que representa o espaço ocupado por cada fase do sistema, cuja soma da fração volumétrica de cada fase é um. O software ANSYS FLUENT 13.0 disponibiliza três modelos multifásicos Euler-Euler: o modelo de volume de fluidos (VOF), o modelo de mistura e o modelo Euleriano.

O modelo Euleriano é o mais complexo dentre os disponíveis. Ele resolve um conjunto de "n" equações dentre elas, as equações de momento e continuidade para cada fase. O agrupamento é executado através do coeficiente de pressão e troca na interface. A forma com que cada agrupamento é tratado depende do tipo de fases envolvidas. Fluxos granulares (fluido-sólido) são tratados diferentemente de não granulares (fluido-fluido). A troca de momento entre as fases é também dependente do tipo de mistura modelada. O modelo multifásico Euleriano é indicado para a modelagem do escoamento em leito de jorro (ANSYS FLUENT Theory Guide, 2010).

### 3.1 Sistema sob análise

A Figura 3.1 apresenta um esquema do sistema sob análise, evidenciando as condições de contorno e iniciais empregadas.

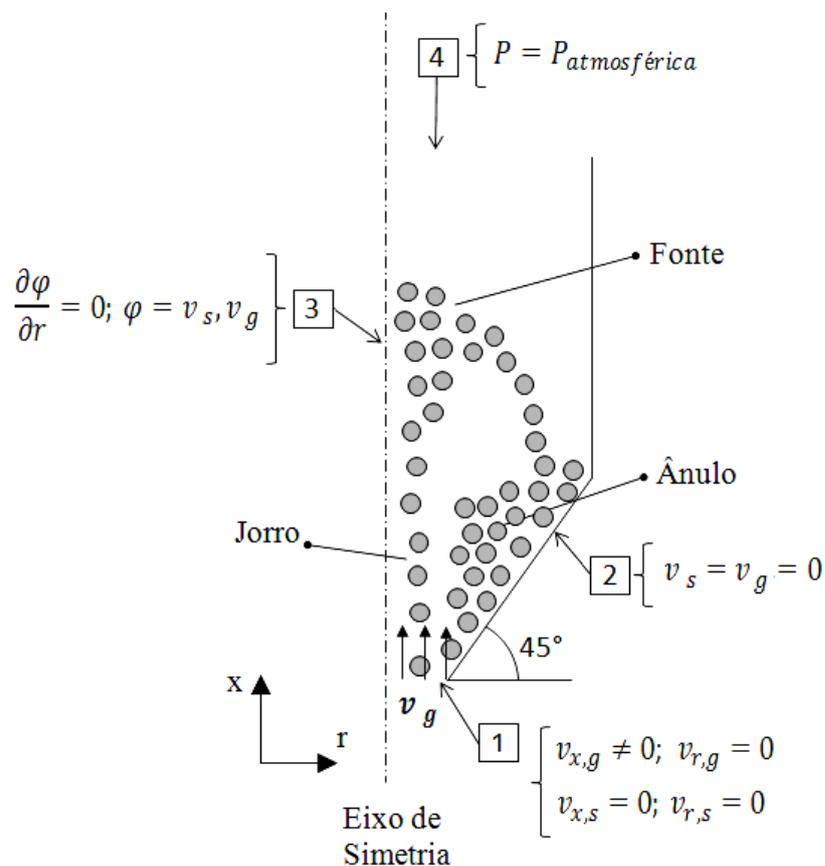


Figura 3.1– Esquema do sistema sob análise com condições de contorno especificadas.

Onde as principais condições de contorno são:

- (1) Velocidade nula das partículas na direção radial e axial (leito inicialmente estático). Velocidade axial do ar com perfil plano (definido de acordo com dados experimentais);
- (2) Não deslizamento para ambas as fases (gás e sólido) na parede do equipamento;
- (3) Simetria axial (2D), e gradiente radial de temperatura granular e velocidade nula para ambas as fases;
- (4) Pressão atmosférica na saída do leito.

### **3.2 Modelo Euleriano multifásico aplicado ao leito de jorro**

Durante a formulação do modelo são realizadas algumas considerações em relação ao sistema sob análise. As principais hipóteses empregadas ao modelo são:

- partículas consideradas esféricas;
- regime transiente;
- escoamento multifásico (ar-sólido) com fases contínuas;
- escoamento ar-sólido bidimensional (x,r);
- no volume de controle definido no modelo não ocorre a transferência de massa entre as fases gás-sólido;
- sem reação química

As principais equações governantes e as equações constitutivas empregadas ao modelo são apresentadas respectivamente nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

A Tabela 3.1 apresenta as equações da continuidade (T1-1 e T1-2) para o escoamento das fases (T1-3) contidas no leito de jorro. Adota-se nula a

transferência de massa entre as fases primária (fluida  $g$ ) e secundária (sólida  $s$ ). A força mássica virtual é desprezada, esta força só é significativa quando a densidade da fase sólida é muito menor que da fase fluida ( $\rho_s \ll \rho_g$ ). A força de ascensão também é desprezada, tal força é significativa apenas para leito de jorro com baixo empacotamento, o que geralmente não acontece no leito de jorro cônico. Assim as equações (T1-4 e T1-5) representam a conservação da quantidade de movimento para as fases fluida e sólida, desconsiderando a força de ascensão e a força de massa virtual. A temperatura granular (T1-6) é proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas, e funciona como uma medida da flutuação de velocidade das partículas.

Tabela 3.1 – Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido

<b>Equações governantes</b>	
<i>1. Equações da continuidade</i>	
(a) Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (T1-1)$
(b) Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (T1-2)$
(c)	$\alpha_g + \alpha_s = 1 \quad (T1-3)$
<i>2. Equações de momento</i>	
(a) Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \beta(\vec{v}_s - \vec{v}_g) \quad (T1-4)$
(b) Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (T1-5)$
3. Equação da temperatura granular	$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s + (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{gs} \quad (T1-6)$

A pressão de sólidos representada pela equação T2-1 é constituída por um termo cinético e um segundo termo que surge devido à colisão das partículas. É calculada de forma independente e usada para expressão do gradiente de pressão  $\nabla p_s$  da equação de momento da fase granular. O tensor tensão de sólidos (T2-2) expressa a troca de momento devido à translação e à colisão das partículas, onde são inseridos os termos de viscosidade cisalhante (T2-3) e viscosidade *bulk* (T2-4), que

é um parâmetro responsável pela resistência à compressão e expansão das partículas granulares. A função de distribuição radial (T2-5) pode ser interpretada como a distância adimensional entre as partículas. A interação das fases gás-sólido é representada pelo modelo Gidaspow e Syamlal-O'brien, onde suas expressões são resumidas respectivamente pelas Equações T2-6 e T2-7.

Tabela 3.2 – Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido

Equações constitutivas	
4. Modelo pressão de sólidos	
Syamlal <i>et al.</i> (1993)	$p_s = 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (T2-1)$
5. Tensor tensão de sólidos	
	$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \left( \alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (T2-2)$
6. Viscosidade cisalhante	
Syamlal <i>et al.</i> (1993)	$\begin{aligned} \mu_s = & \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s \\ & + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} (1 + e_{ss}) \alpha_s g_{0,ss} \right]^2 \alpha_s \end{aligned} \quad (T2-3)$
7. Viscosidade bulk	
Lun <i>et al.</i> (1984)	$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (T2-4)$
8. Distribuição radial	
Syamlal <i>et al.</i> (1993)	$g_{0,ki} = \left( \frac{1}{1 - \alpha_s} \right) + 3 \left( \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k}{d_k} \right) \frac{d_k d_i}{(1 - \alpha_s)^2 (d_k + d_i)} \quad (T2-5)$
9. Modelo de arraste	
(a) Gidaspow <i>et al.</i> (1992) (coeficiente de troca gás-sólido)	$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g  \vec{v}_s - \vec{v}_g }{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad \alpha > 0,8 \quad (T2-6)$
	$\beta = 150 \frac{\alpha_s (\alpha_g - 1) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g  \vec{v}_s - \vec{v}_g }{d_s}, \quad \alpha \leq 0,8$
(b) Syamlal <i>et al.</i> (1989) (coeficiente de troca gás-sólido)	$\beta = \frac{3 \alpha_s \alpha_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} C_D \frac{d_s \alpha_g \rho_g  \vec{v}_s - \vec{v}_g }{v_{r,s}} \quad (T2-7)$
Syamlal <i>et al.</i> (1987) (coeficiente de troca sólido-sólido)	$\beta =  \vec{v}_s - \vec{v}_g  \frac{3(1 + e_{gs}) \left( \frac{\pi}{2} + C_{fr,gs} \cdot \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_s \rho_s \alpha_g \rho_g (d_s + d_g)^2 g_{0,gs}}{2\pi(\rho_g d_g^3 + \rho_s d_s^3)}$

A inserção da turbulência em escoamentos multifásicos é pouco abordada na literatura, não existindo consenso quanto ao modelo padrão para representar o fenômeno. O modelo k-ε é utilizado por diversos autores (Du *et al.*, 2006; Santos, 2008; Béttega, 2009; Marques, 2013) para a modelagem da turbulência em leite de jorro.

A Tabela 3.3 exibe as principais equações constitutivas do modelo Euleriano para a turbulência considerando o modelo k-ε: de mistura (T3-1), disperso (T3-2) e por fase (T3-3).

Tabela 3.3 – Equações constitutivas de turbulência do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido

---

**Equações constitutivas**

10. Turbulência (k-ε)

(a) mistura

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) &= \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) &= \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1,\varepsilon} G_{k,m} - C_{2,\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \end{aligned} \quad (T3-1)$$

Onde:  $G_{k,m} = \mu_{t,m}(\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) : \nabla \vec{v}_m$ ;  $\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

(b) disperso

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g k_g) &= \nabla \cdot \left( \alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} k_g \right) + \alpha_g G_{k,g} - \alpha_g \rho_g \varepsilon_g + \alpha_g \rho_g \Pi_{k,g} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g \varepsilon_g) &= \nabla \cdot \left( \alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_g \right) + \alpha_g \frac{\varepsilon_g}{k_g} (C_{1,\varepsilon} G_{k,g} - C_{2,\varepsilon} \rho_g \varepsilon_g) + \alpha_g \rho_g \Pi_{\varepsilon,g} \end{aligned} \quad (T3-2)$$

Onde:  $G_{k,g} = \mu_{t,g}(\nabla v_g + (\nabla v_g)^T) : \nabla v_g$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $C_{1,\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2,\varepsilon} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$

(c) por fase

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{U}_g k_g) &= \nabla \cdot \left( \alpha_g \left( \mu_{t,g} + \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \right) \nabla k_g \right) + (\alpha_g G_{k,g} - \alpha_g \rho_g \varepsilon_g) \\ &+ \sum_{l=1}^N k_{lg} (C_{lg} k_{lg} - C_{gl} k_g) - \sum_{l=1}^N k_{lg} (\vec{U}_l - \vec{U}_g) \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \sigma_l + \sum_{l=1}^N k_{lg} (\vec{U}_l - \vec{U}_g) \frac{\mu_{t,g}}{\alpha_g \sigma_g} \nabla \sigma_g \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{U}_g \varepsilon_g) &= \nabla \cdot \left( \alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_g \right) + \frac{\varepsilon_g}{k_g} \left[ C_{1,\varepsilon} \rho_g G_{k,g} - C_{2,\varepsilon} \alpha_g \rho_g \varepsilon_g \right. \\ &\left. + C_{3,\varepsilon} \left( \sum_{l=1}^N k_{lg} (C_{lg} k_{lg} - C_{gl} k_g) - \sum_{l=1}^N k_{lg} (\vec{U}_l - \vec{U}_g) \frac{\mu_{t,l}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \sigma_l + \sum_{l=1}^N k_{lg} (\vec{U}_l - \vec{U}_g) \frac{\mu_{t,g}}{\alpha_g \sigma_g} \nabla \sigma_g \right) \right] \end{aligned} \quad (T3-3)$$

Onde:  $C_{l,g} = 2$ ;  $C_{g,l} = 2 \left( \frac{n_{l,g}}{1+n_{l,g}} \right)$

---

O modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$ , é um modelo de duas equações, onde “ $k$ ” (energia cinética turbulenta) é definida como a variação das flutuações em velocidade e “ $\epsilon$ ” é a dissipação do vórtice de turbulência, ou seja, a taxa de dissipação das flutuações de velocidade. As três variações do modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  disponíveis no software ANSYS FLUENT são: modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  da mistura,  $k$ - $\epsilon$  disperso e  $k$ - $\epsilon$  para cada fase.

O modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  da mistura é indicado para escoamento multifásico estratificado e quando a razão da densidade entre as fases é próxima a um. Já o modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  disperso é apropriado quando a concentração de fase secundária é diluída. O movimento aleatório das partículas é definido pela turbulência da fase primária. Por último, o modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  para cada fase é adequado para sistemas em que a transferência de momento turbulento entre as fases é dominante.

### 3.3 Malha computacional

Uma das etapas mais importantes na solução do modelo é a geração da malha computacional. O número de células interfere diretamente na precisão dos resultados obtidos, bem como no tempo de simulação e no esforço computacional. Segundo Santos (2011) as malhas podem ser classificadas como:

a) Malha estruturada

A malha estruturada é disposta em um padrão regular repetido, denominado bloco. Utilizam elementos quadriláteros em 2D e hexahédricos em 3D. Malhas estruturadas apresentam vantagens sobre outros tipos, pois permite ao usuário condensar pontos nas regiões de altos gradientes de fluxo da grandeza de interesse e também gerar regiões menos densas quando necessário.

b) Malha não estruturada

São compostas por elementos distribuídos de forma aleatória, sem padrão definido e sem uniformidade. A vantagem é elas requerem menor esforço do usuário e tempo

para construção, e a principal desvantagem é a falta de controle do usuário sobre a disposição dos volumes ou células, além de demandar mais tempo e memória computacional comparadas às malhas estruturadas.

c) Malha híbrida

Consiste na utilização simultânea das malhas estruturadas e não estruturadas em regiões específicas de forma a evidenciar as vantagens de cada método.

Duarte (2006) descreve as etapas de pré-processamento da malha como sendo:

- construção da geometria do equipamento;
- definição das faces e/ou volumes;
- determinação de efeitos como camada limite, ou outro tipo de refinamento desejado;
- aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetraédrica, hexaédrica ou híbrida);
- definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
- determinação das fases que compõem o interior do equipamento, por exemplo, fluido (ar) e/ou sólido;
- conversão do arquivo (com extensão .msh) contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo software FLUENT® (extensão .cas);
- uma vez lido o arquivo, são definidas as condições de contorno e iniciais, os modelos (Euler-Euler Granular, Modelos de Troca de momentum entre as fases, tensão de sólidos, Pressão de Sólidos, etc...) e os tipos de algoritmos de solução numérica a serem adotados.

## 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.1 Caracterização das partículas e misturas

O material sólido escolhido para realização do trabalho é o compósito de polietileno e alumínio e a areia, ilustrados na Figura 4.1. O compósito é oriundo do processo de extrusão/injeção de resíduos de embalagens cartonadas e fornecido pela empresa Tetra Pak, já a areia é geralmente utilizada no reator de leito de jorro como material inerte por fornecer estabilidade ao processo além de facilitar a troca térmica pela condução e convecção. As partículas estudadas pertencem ao grupo D de Geldart (1986), isto é, são partículas capazes de alcançar o regime de jorro estável.

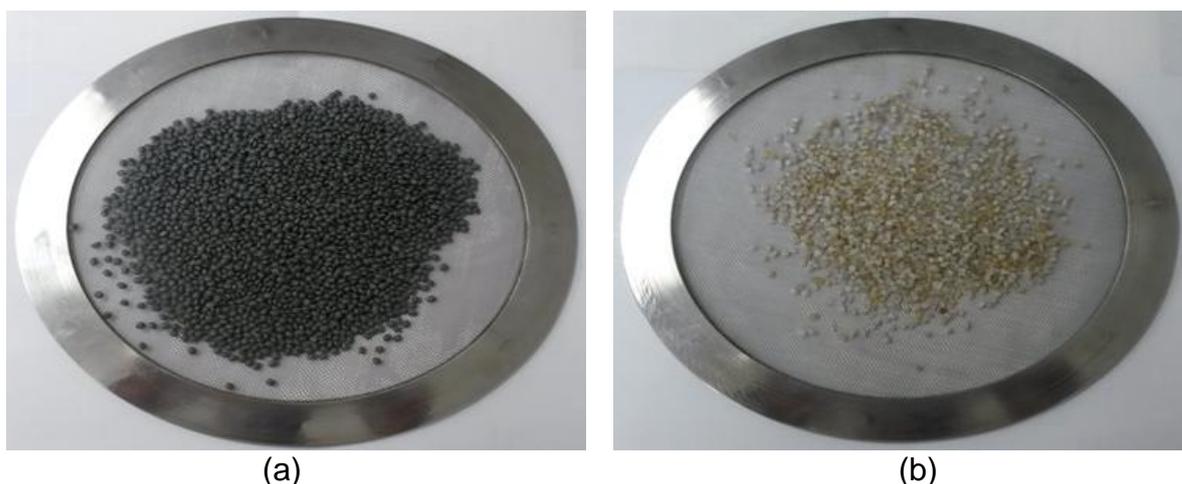


Figura 4.1– Material utilizado: (a) Compósito PEBD/AL; (b) Areia.

As propriedades físicas das partículas apresentadas na Figura 4.1, bem como das misturas são obtidas pelas seguintes metodologias:

#### 4.1.1 Massa específica ( $\rho_p$ )

A técnica de picnometria é usada para definir a massa específica ( $\rho_p$ ) das partículas. Inicialmente, o picnômetro é calibrado com água destilada (temperatura 25°C), em seguida o picnômetro é preenchido com a amostra até aproximadamente a metade do seu volume e a massa determinada utilizando uma balança analítica (precisão de

$\pm 0,5 \times 10^{-4}$  g). Em seguida, o picnômetro contendo a amostra é preenchido com um fluido (água para areia e querosene para o compósito). O querosene é escolhido por possuir massa específica conhecida e inferior à massa específica do compósito. Além disso, o querosene não apresenta interação química ou física significativa com a amostra, evitando assim, uma possível interferência na determinação da massa específica. Banho ultrassônico é usado para remover as bolhas de ar contidas após a adição do fluido a amostra. Assim, usando a Equação 4.1, é possível obter a massa específica das partículas em análise.

$$\rho_p = \frac{m}{v_p - v_l} \quad (4.1)$$

Onde,  $m$  é a massa de partículas adicionada ao picnômetro;  $v_p$  é o volume do picnômetro;  $v_l$  é o volume de líquido adicionado ao picnômetro.

O procedimento descrito é realizado em triplicata para permitir maior confiabilidade nos valores obtidos.

#### 4.1.2 Diâmetro ( $D_p$ )

O diâmetro médio das partículas ( $D_p$ ) é obtido através da técnica de peneiramento com peneira de base vibratória. As partículas são alimentadas no conjunto de peneiras com aberturas distintas (1,70; 2,00; 2,36; 2,80; 3,35 e 4,00 mm). Após aproximadamente 10 minutos de peneiramento o equipamento é desligado e observada a faixa de peneiras onde fica retida a maior fração de partículas. São selecionadas as partículas passantes na peneira de 2,80 e retidas na de 2,36 mm (equivalente a 7 e 8 mesh na escala Tyler, respectivamente) por apresentarem maior quantidade de material. Logo o diâmetro médio das partículas é estimado através de média aritmética entre o limite superior (2,80 mm) e o limite inferior (2,36 mm).

#### 4.1.3 Porosidade ( $\epsilon_0$ )

A porosidade do leito de partículas puras bem como das misturas é determinada utilizando uma proveta graduada de 1000 ml (precisão  $\pm 10$  ml). Este método consiste em preencher a proveta com as partículas (ou misturas) e, utilizando a Equação 4.2 é possível determinar a porosidade para o leito de jorro estático.

$$\epsilon_0 = \frac{V_{mp} - V_p}{V_{mp}} \quad (4.2)$$

Onde,  $V_{mp}$  é o volume do meio poroso e o  $V_p$  é o volume das partículas.

O volume das partículas puras é obtido pela razão massa de partícula e massa específica. Já para as misturas o volume de partículas é dado pela soma das frações volumétricas de areia e compósito.

#### 4.1.4 Esfericidade ( $\phi$ )

A esfericidade das partículas de areia é calculada utilizando a carta de esfericidade proposta por Cho, Dodds e Santamarina (2006). A Figura 4.2 mostra a carta de esfericidade em função do arredondamento proposta pelos autores.

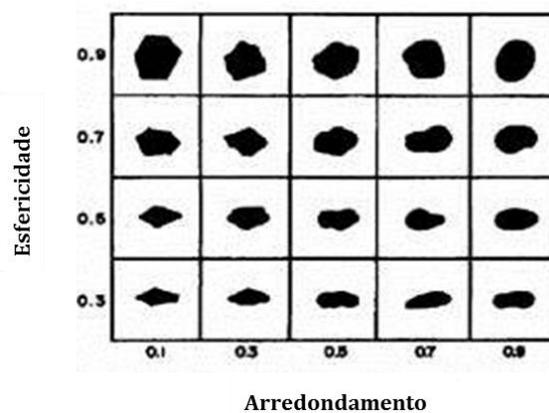


Figura 4.2 – Carta de esfericidade.

Fonte: Cho, Dodds e Santamarina (2006).

Onde a esfericidade é determinada por meio de uma análise visual (em duas dimensões) utilizando como amostra 10 grãos de areia e comparando com as figuras apresentadas na carta. Para cada grão é determinado um valor de esfericidade, e a esfericidade final das partículas é obtida através de uma média aritmética entre os valores.

Para o cálculo da esfericidade do compósito PEBD/AL foi utilizada a Equação 4.3, proposta por Wadell (1933), que considera a esfericidade como a relação entre a superfície externa da esfera de mesmo volume que a partícula e a superfície externa da partícula.

$$\Phi = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (4.3)$$

Onde,  $d_v$  é o diâmetro volumétrico e  $d_s$  o diâmetro superficial da partícula.

As partículas de compósito PEBD/AL possuem formato semelhante a um esferoide oblato, assim é utilizada a Equação 4.4 para determinar o volume do esferoide oblato (partícula de compósito PEBD/AL).

$$V_{particula} = \frac{4\pi a^2 b}{3} \quad (4.4)$$

Onde,  $a$  representa o comprimento do semieixo maior e  $b$  o comprimento do semieixo menor da partícula. A Figura 4.3 apresenta um esquema com as dimensões das partículas de compósito PEBD/AL.

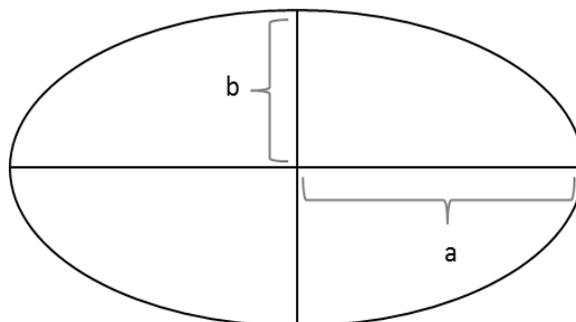


Figura 4.3 – Esquema com dimensões das partículas de compósito PEBD/AL.

As dimensões dos semieixos são medidas para uma amostra com 10 partículas e os valores determinados pela média aritmética.

Igualando o volume da esfera ao volume da partícula é possível determinar o diâmetro volumétrico  $d_v$  equivalente:

$$V_{esfera} = V_{particula} \quad (4.5)$$

$$\frac{\pi d_v^3}{6} = \frac{4\pi a^2 b}{3} \quad (4.6)$$

$$d_v = \sqrt[3]{8a^2 b} \quad (4.7)$$

É empregada a Equação 4.8 para o cálculo da área superficial ( $S_p$ ) do esferoide oblato.

$$S_p = \pi \left( 2a^2 + \frac{b^2}{e} \log \left( \frac{1+e}{1-e} \right) \right) \quad (4.8)$$

Onde,  $e$  é a excentricidade do esferoide, que é calculada de acordo com a Equação 4.9.

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (4.9)$$

Assim, sabendo a área superficial da esfera ( $S_{esfera}$ ) e igualando com a área superficial da partícula ( $S_p$ ) é possível determinar o diâmetro superficial da partícula de compósito de PEBD/AL:

$$S_{esfera} = S_p \quad (4.10)$$

$$\pi d_s^2 = \pi \left( 2a^2 + \frac{b^2}{e} \log \left( \frac{1+e}{1-e} \right) \right) \quad (4.11)$$

$$d_s = \sqrt{\left(2a^2 + \frac{b^2}{e} \log\left(\frac{1+e}{1-e}\right)\right)} \quad (4.12)$$

Substituindo os valores de  $d_v$  e  $d_s$  calculados na Equação 4.3, determina-se a esfericidade das partículas de composto PEBD/AL.

## 4.2 Unidade Experimental

Os ensaios fluidodinâmicos são realizados na unidade experimental do PPGEN/CEUNES/UFES, usando o leito de jorro cônico em escala piloto. A Figura 4.4 ilustra o leito de jorro e seus periféricos evidenciando suas dimensões físicas.

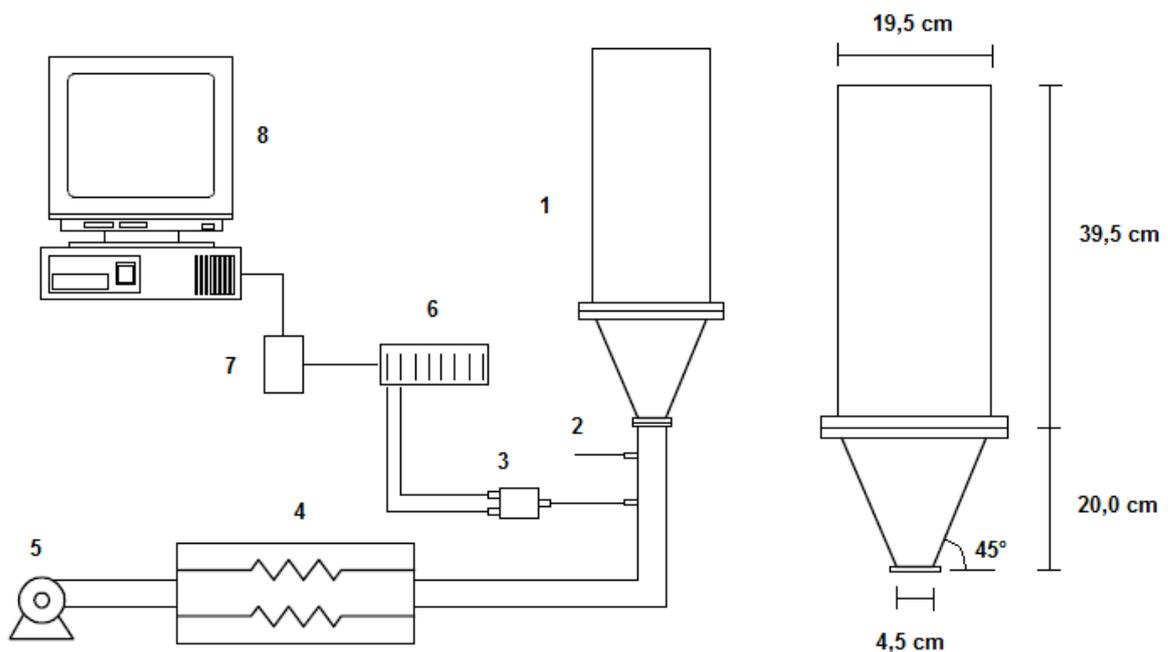


Figura 4.4 – Esquema da unidade experimental. 1) leito de jorro cônico-cilíndrico, 2) termopar, 3) transdutor de pressão, 4) aquecedor, 5) soprador, 6) condicionador de sinais, 7) placa de aquisição de dados, 8) microcomputador.

Este é constituído de um ventilador centrífugo IBRAM com vazão de ar máxima de  $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$  e 2 CV de potência, sistema de aquecimento de ar com controle automático de temperatura do tipo PID, transdutor de pressão (marca Dwyer,

modelo 616C-4, operando em uma faixa de 0-20 pol. H<sub>2</sub>O ± 1%) localizado na tubulação de entrada de ar, ou seja, a 15 cm abaixo da base cônica do leito, leito de jorro cônico-cilíndrico, com ângulo da base cônica de 45°. A aquisição de dados é realizada em um computador (CORE I3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM), acoplado a um condicionador de sinais e uma placa de aquisição de dados A/D (analógico digital) do fabricante National Instruments.

### 4.3 Procedimento Experimental

Inicialmente, a coluna cônica do leito é preenchida até uma altura de 18 cm com as partículas puras ou com misturas. Em seguida, o soprador é acionado permitindo que o ar seja injetado no leito. A vazão de ar é aumentada manualmente no painel do equipamento até que o jorro se estabeleça e a fonte das partículas alcance uma altura média entre 30 e 35 cm. A obtenção dos dados de perda de pressão do leito, em função da velocidade do ar é realizada na forma decrescente. A temperatura do ar é mantida constante na entrada, através do sistema de aquecimento, em torno de 27 °C.

A altura de fonte ( $H_f$ ) é determinada visualmente, com o auxílio de um papel milimetrado sobre a parede da coluna cilíndrica do leito. Para cada valor de vazão de ar no leito é obtido um valor médio entre a altura de fonte máxima e mínima.

O valor de vazão de fluido no soprador é obtido pelo inversor de frequência localizado no painel do equipamento. Com os dados de vazão do fluido  $Q$  e conhecendo a área da abertura de entrada do leito  $A$  é possível determinar a velocidade de entrada do fluido no leito. Tal velocidade é calculada de acordo com a equação 4.3.

$$v = Q/A \quad (4.3)$$

A aquisição de dados de queda de pressão é realizada usando rotina Labview conforme ilustrado na Figura 4.5. Para cada valor de velocidade do ar injetada no

leito (v), uma frequência de amostras de queda de pressão igual a 100 pontos por segundo são armazenados em um computador. O transdutor de pressão diferencial (4-20 mA) capta o sinal analógico do leito, e os mesmos são endereçados a uma interface A/D, da National Instruments. A comunicação USB permite que os dados de queda de pressão no leito sejam processados em um microcomputador pelo programa de aquisição de dados, desenvolvido em linguagem de programação gráfica utilizando o Labview 10.0.

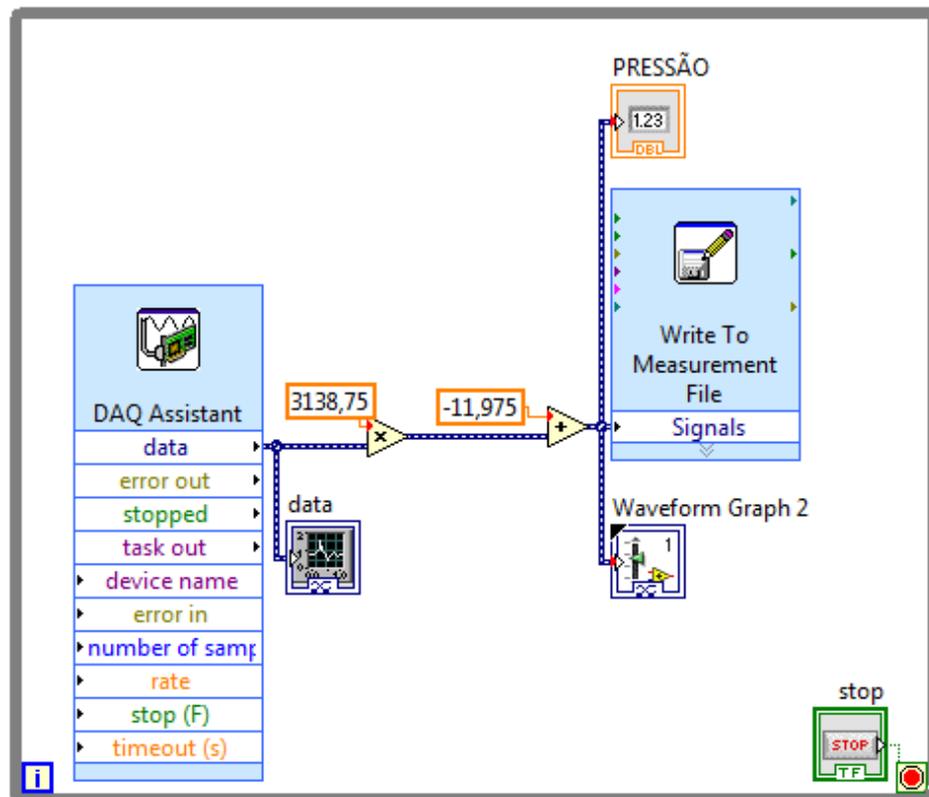


Figura 4.5 – Rotina Labview para aquisição de dados.

Para permitir melhor reprodutibilidade dos experimentos e melhor confiabilidade estatística o procedimento é realizado em triplicata.

## 5 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO DO MODELO

### 5.1 Estudo da malha

A qualidade da malha computacional é um fator de suma importância na determinação correta do padrão de escoamento do leito de jorro. Visto que a quantidade e o formato das células em uma determinada malha podem alterar os resultados obtidos e influenciar no tempo de processamento do modelo, é realizado teste de independência de malhas. O software ANSYS ICEM CFD é utilizado para geração da malha.

Testes de independência são realizados para as diferentes malhas geradas, utilizando o Modelo Euleriano Multifásico de duas fases (ar-compósito) com velocidade 10% acima da velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ) e aplicando as condições de simulação descritas no capítulo 5.2. Os testes possibilitam determinar a partir de qual refinamento do volume de controle o escoamento não sofre grande influência. Quando isso acontece, pode-se dizer que o refinamento da malha não trará alterações significativas nos resultados da simulação.

A Figura 5.1 ilustra a geometria do equipamento e a malha utilizada no modelo.

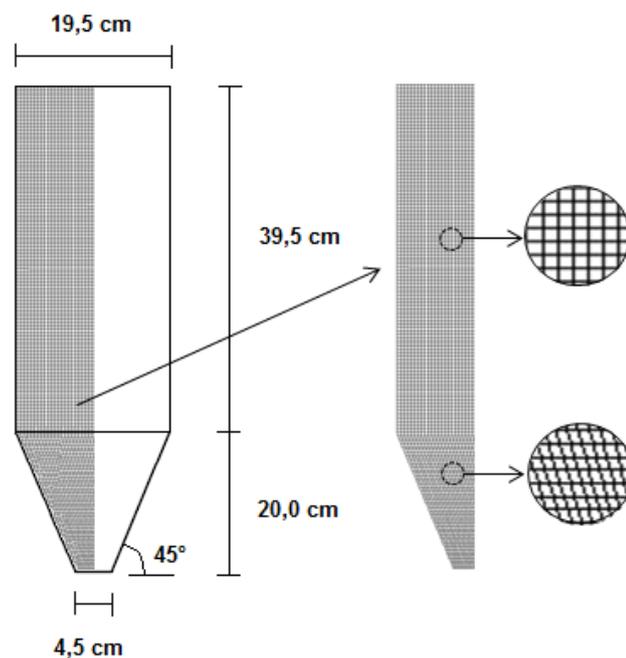


Figura 5.1 – Detalhe da geometria do leito de jorro e da malha computacional.

## 5.2 Modelos Empregados nas Simulações CFD

As condições empregadas na simulação estão baseadas nas características do equipamento e partícula estudadas, bem como nas condições empregadas ao modelo. A Tabela 5.1 exibe os parâmetros utilizados.

Tabela 5.1 – Parâmetros empregados nas simulações CFD

Item Setup	Parâmetro	Descrição/valor			
Solver	<i>Pressure-based</i>				
	Transiente 2D axissimétrico				
Modelos	Modelo Euleriano Multifásico	2 fases (compósito PEBD/Al e ar) 2 fases (areia e ar) 3 fases (ar, areia e compósito PEBD/Al)			
	Modelo de Turbulência	<b>Condição 1</b>	<b>Condição 2</b>	<b>Condição 3</b>	<b>Condição 4</b>
		Laminar	K-epsilon Mixture	K-epsilon Per Phase	K-epsilon Dispersed
Materiais	Densidade do ar	1,162 kg·m <sup>-3</sup>			
	Viscosidade do ar	1,862 x 10 <sup>-5</sup> kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>			
	Modelo de arraste	Gidaspow			
		Syamlal-O'brien			
	Viscosidade granular	Syamlal-O'brien			
	Viscosidade granular <i>bulk</i>	Lun et al.			
	Temperatura granular	Algebraic			
	Pressão de sólidos	Syamlal-O'brien			
	Distribuição radial	Syamlal-O'brien			
	Diâmetro	Areia	0,00258 m		
Compósito PEBD/Al		0,00258 m			
Densidade	Areia	2340 kg·m <sup>-3</sup>			
	Compósito PEBD/Al	828 kg·m <sup>-3</sup>			
Condições de contorno	Entrada	<i>Inlet velocity</i> – o gás entra na direção axial com um perfil plano de velocidade			
	Saída	Pressão definida ( <i>Outlet pressure</i> ) – pressão atmosférica			
	Eixo	Axissimétrico			
	Parede	Condição de não deslizamento para ambas as fases			
Condição inicial	Altura de leito estático	0,18 m			
	Porosidade	Definida para cada mistura de acordo com a Tabela 6.2			

A solução numérica das condições apresentadas na Tabela 5.1 é realizada utilizando o software ANSYS FLUENT. A simulação em regime transiente é adotada em todos os casos. É utilizado o esquema de interpolação *Upwind* de primeira ordem na resolução das equações, com o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. O critério de convergência é definido com base na característica do escoamento e através de testes preliminares para quantificar a influência do mesmo nos resultados simulados. Para o estudo de caso o critério de convergência adotado está na ordem de  $1 \times 10^{-3}$ . O passo de tempo é determinado entre  $1 \times 10^{-3}$  e  $1 \times 10^{-4}$ . Os fatores de relaxação escolhidos estão entre 0,2 e 0,5. O software foi programado para gravar os resultados a cada 0,2 segundos de tempo real de simulação, evitando perda dos dados em caso de falhas no equipamento ou para identificar problemas de convergência.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Experimental

#### 6.1.1 Caracterização das partículas e misturas

As partículas estudadas pertencem ao grupo D (Geldart), isto é, as partículas são capazes de atingir o regime de jorro estável. A Tabela 6.1 apresenta as propriedades físicas dos materiais sólidos estudados. Tais propriedades foram obtidas a partir das técnicas apresentadas no Capítulo 4.1.

Tabela 6.1 – Propriedades físicas das partículas

	Massa específica ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>	Porosidade ( $\epsilon_0$ )	Diâmetro de partícula ( $D_p$ ), mm	Esferecidade ( $\phi$ )
Compósito PEBD/AL	828	0,43	2,58	0,92
Areia	2340	0,49	2,58	0,62

Conforme observado na Tabela 6.1, o diâmetro das partículas de compósito PEBD/AL e de areia são iguais, considerando a técnica de medida adotada. Entretanto, as partículas de areia apresentam valores de massa específica aproximadamente 280 % maior em relação ao compósito PEBD/AL. Tal fato pode proporcionar a segregação das partículas no leito de jorro.

A Tabela 6.2 exhibe os valores de massa e de porosidade para as misturas investigadas.

Tabela 6.2 – Porosidade das misturas de areia e compósito PEBD/AL

Mistura	Massa de amostra (kg)	Fração mássica (%)		Porosidade ( $\epsilon_0$ )
		Areia	Compósito PEBD/AL	
1	2,945	100	0	0,49
2	2,410	90	10	0,48
3	2,135	80	20	0,47
4	1,730	70	30	0,46
5	1,515	60	40	0,46
6	1,437	50	50	0,46
7	1,335	40	60	0,46
8	1,215	30	70	0,45
9	1,125	20	80	0,44
10	1,050	10	90	0,43
11	0,965	0	100	0,43

Analisando da Tabela 6.2, é possível notar que a porosidade do leito com mistura de partículas diminui à medida que a fração mássica do compósito PEBD/AL aumenta. Isso pode ser explicado pela maior esfericidade das partículas de compósito PEBD/AL e conseqüentemente menor porosidade. Tal comportamento também é constatado por Zou e Yu (2003).

### 6.1.2 Fluidodinâmica em leito de jorro com misturas

A Figura 6.1 ilustra o leito de jorro com mistura de partículas contendo 20% em massa de compósito PEBD/AL. Observa-se visualmente na Figura 6.1a, a formação nítida de uma fonte, caracterizando o regime de jorro.

Para misturas com 20% de compósito PEBD/AL em massa, nota-se na Figura 6.1b, que apesar da diferença considerável de massa específica entre as partículas de areia e compósito PEBD/AL (Tabela 6.1), não ocorre o fenômeno da segregação. Os bons níveis de mistura entre as partículas também são obtidos para as demais amostras investigadas nesta pesquisa.

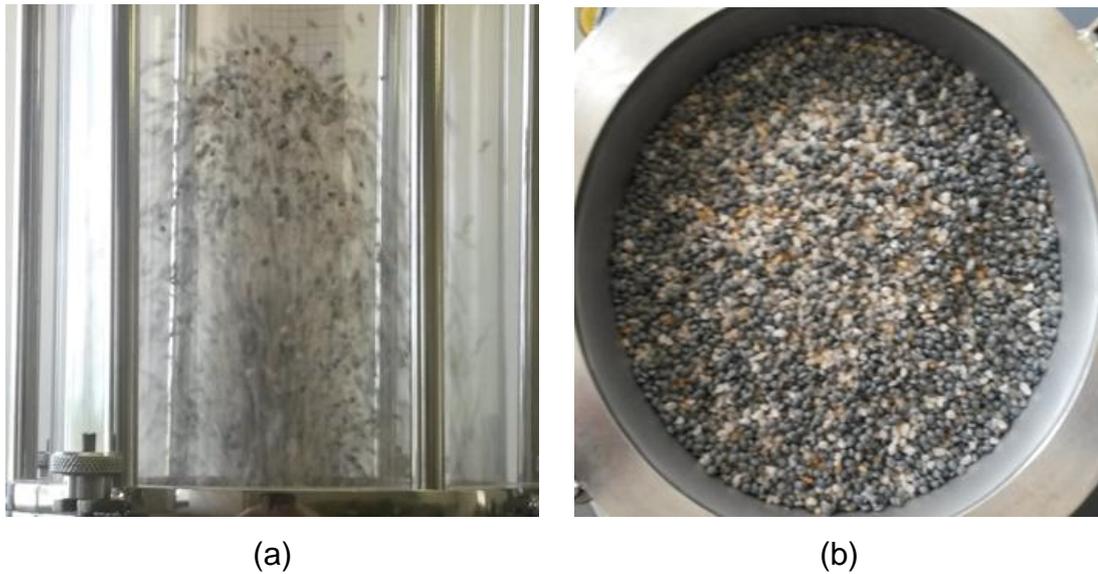


Figura 6.1 – Fotografias do leito de jorro com mistura contendo 20% em massa de composto PEBD/AL: (a) regime de jorro (b) regime de leito fixo.

A Figura 6.2 mostra os dados de queda de pressão do leito de partículas em função da velocidade de entrada do ar para a areia e o composto PEBD/AL, bem como para as misturas na faixa de 20 a 80% de composto PEBD/AL em massa.

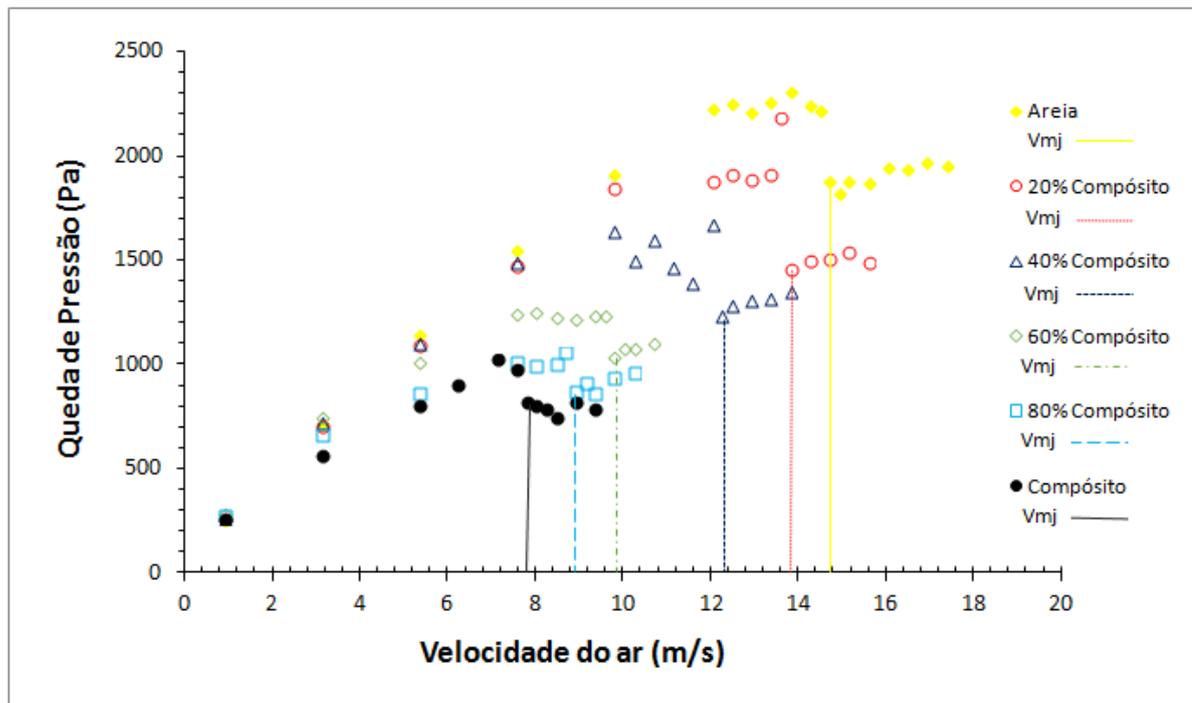


Figura 6.2 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade de entrada do ar.

Analisando os dados da Figura 6.2, pode-se constatar que a queda de pressão não se altera significativamente durante regimes de jorro para as partículas de compósito PEBD/AL e misturas. Observa-se na Figura 6.2 que o regime de leito fixo é atingido à medida que a velocidade do ar é reduzida, este é evidenciado pela queda brusca de pressão no leito. Também, verifica-se na região de leito fixo, que a queda de pressão no leito diminui de forma linear conforme a velocidade de injeção de ar é reduzida.

Nota-se ainda, que à medida que ocorre o aumento na concentração do compósito PEBD/AL o valor da velocidade de mínimo jorro e queda de pressão diminuem. Tal comportamento da  $V_{mj}$  pode ser explicado pela redução da massa específica média da mistura. As partículas com maior massa específica requerem velocidades de ar superiores quando comparadas aquelas apresentadas pela partícula com menor massa específica. A redução da queda de pressão é influenciada pela porosidade do leito de jorro. Desta forma, no regime de jorro, à medida que a porosidade do leito com partículas na região anular diminui, o ar tende a escoar preferencialmente pelo canal de jorro, reduzindo assim, os valores de queda de pressão no leito.

A Figura 6.3 apresenta os dados de desvio padrão da queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade de entrada de ar para a areia, compósito PEBD/AL, e misturas na faixa de 20 a 80% de compósito PEBD/AL em massa.

Para os leitos de jorro cônicos compostos por areia e compósito PEBD/AL, nota-se que os diferentes regimes são atingidos à medida que a velocidade é reduzida, denominados de jorro estável (JE) e de leito fixo (LF), conforme apresenta a Figura 6.3. A estabilidade pode ser caracterizada pela flutuação do desvio padrão da queda de pressão na mesma ordem de grandeza da precisão de medida do transdutor de pressão ( $\pm 50$  Pa) durante o regime de jorro, à medida que a velocidade do ar é reduzida. Observa-se também, o regime estável para as misturas, entretanto para misturas com fração mássica de compósito PEBD/AL de 60% e 80% o regime de transição entre o jorro estável e de leito fixo não está evidente, pois não há nenhuma redução abrupta no desvio padrão do sinal da pressão entre os regimes, indicando que esta transição, provavelmente, ocorre dentro de uma ampla faixa de  $V_{mj}$  (Figura 6.3 d-e-f). Já as misturas com fração mássica de compósito PEBD/AL de 20% e 40% apresentam queda brusca do desvio da queda de pressão ( $\sigma$ ) durante a transição do

leito jorrando para o leito fixo, evidenciando assim maior estabilidade em manter a condição de mínimo jorro. Os dados de desvio padrão da queda de pressão obtidos nos experimentos apresentam comportamento semelhante àqueles reportados na literatura (Bacelos e Freire, 2006), o que permite verificar que o comportamento padrão do regime de jorro estável foi obtido.

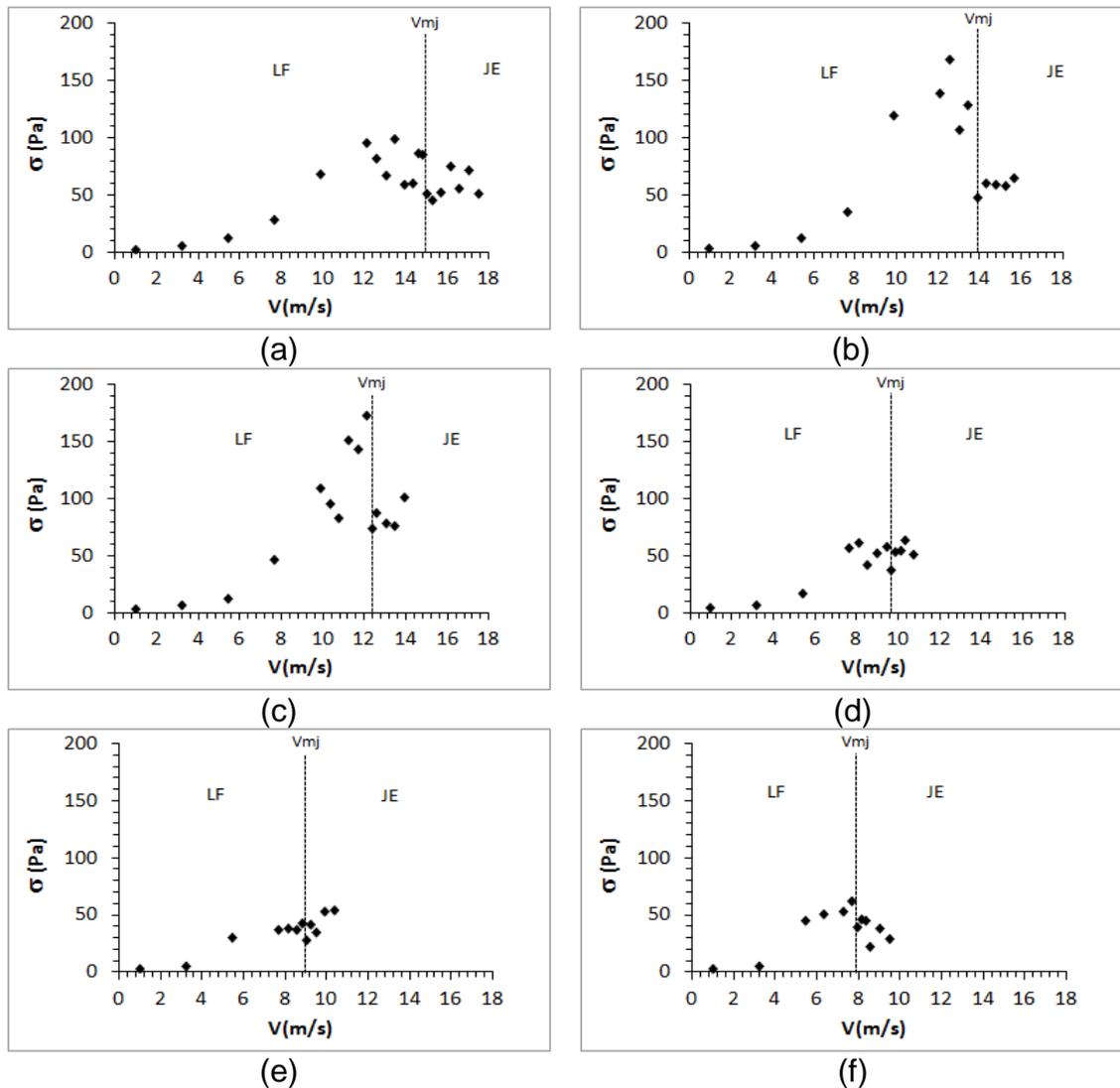


Figura 6.3 – Desvio padrão da flutuação dos sinais de pressão ( $\sigma$ ) no leito em função da velocidade de entrada do ar: (a) areia, (b) 20% compósito PEBD/AL, (c) 40% compósito PEBD/AL, (d) 60% compósito PEBD/AL, (e) 80% compósito PEBD/AL, (f) compósito PEBD/AL.

## 6.2 Simulação

### 6.2.1 Teste de malha

Inicialmente, utilizando o software ANSYS ICEM CFD, é gerada uma malha estruturada bidimensional “grosseira” (5628 células), com elementos quadriláteros e eixo de simetria axial, com a finalidade de reduzir o esforço computacional. Em seguida é realizado um refinamento na malha obtendo uma malha com 16884 células e outra com 50652 células.

A Figura 6.4 apresenta os dados da velocidade do ar em função da distância axial do leito, obtidos no teste de independência de malha, utilizando as condições de simulação descritas no capítulo 5.2 para as fases ar-compósito PEBD/AL com velocidade 10% acima da velocidade de mínimo jorro.

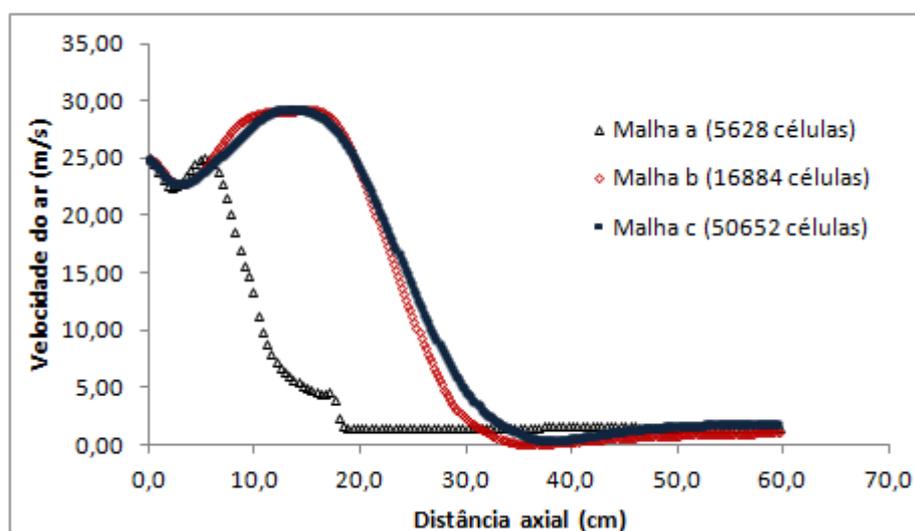


Figura 6.4 – Teste de independência de malha.

Analisando a Figura 6.4 é possível observar a influência do refinamento da malha. Pode-se constatar que os resultados obtidos na malha “a” apresentam um desvio considerável em relação às malhas “b” e “c”, no entanto não se percebe grande influência do refinamento entre as malhas “b” e “c”. Assim, a malha escolhida para as demais simulações foi a malha “b” por apresentar menor esforço computacional

(aproximadamente 48 horas a menos em tempo real de simulação) em relação a malha “c”.

## 6.2.2 Resultados qualitativos

Para quantificar a influência do arraste no escoamento ar-partícula, são realizados testes com os modelos de arraste Syamlal-O’Brien e o modelo de Gidaspow utilizando a malha computacional com 16884 células e empregando as condições de simulação descritas na Tabela 5.1. Os perfis de concentração de sólidos apresentados na Figura 6.5 representam o leito de jorro operando com 2 fases (areia e ar) parametrizados a uma velocidade de ar igual a 17 m/s (regime de jorro).

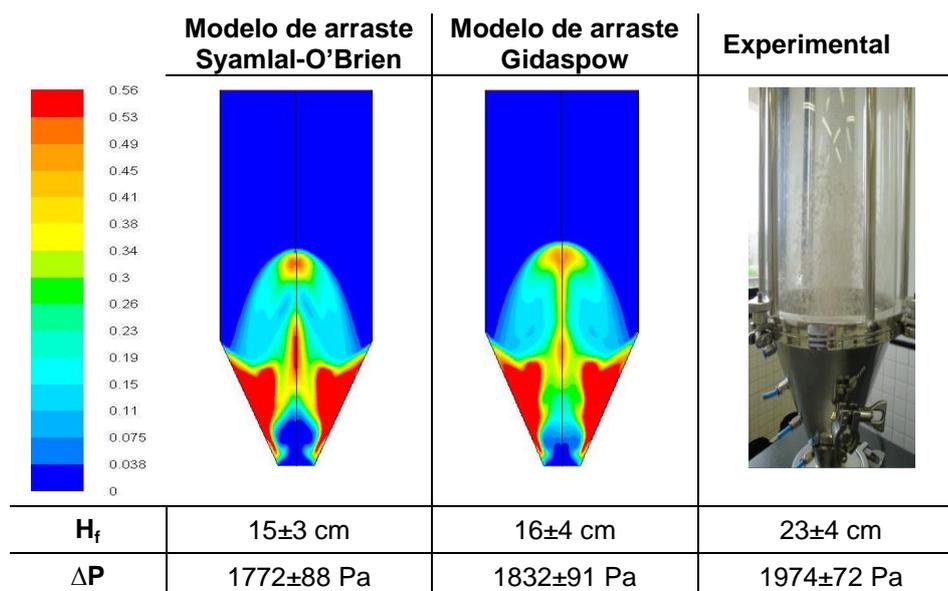


Figura 6.5 – Contornos de fração volumétrica de areia para velocidade do ar igual 17 m/s, utilizando os modelos de arraste Syamlal-O’Brien e Gidaspow.

Comparando os contornos volumétricos de sólidos obtidos utilizando o modelo de arraste Syamlal-O’Brien e o modelo de Gidaspow, nota-se a concordância de ambos com os obtidos nos experimentos. Porém, baseado nas análises dos dados de altura de fonte ( $H_f$ ) e queda de pressão no leito ( $\Delta P$ ), apresentados na Figura 6.5, pode-se afirmar que as condições de simulação empregadas utilizando o modelo Gidaspow representam melhor a fluidodinâmica do leito de jorro cônico para as partículas

utilizadas nesta pesquisa. O resultado obtido para os modelos de arraste estão de acordo com aqueles obtidos por Du *et al.* (2006) e Zhong *et al.* (2006), os autores constataram que os modelos de Gidaspow e de Syamlal-O'brien são capazes de prever o escoamento característico do leito de jorro.

Baseado nos bons resultados obtidos com o modelo de arraste Gidaspow na previsão do escoamento ar-sólido da areia em leito de jorro cônico, esse modelo foi escolhido para a simulação da fluidodinâmica dos leitos compostos por misturas de areia e compósito PEBD/AL.

A Figura 6.6 apresenta os perfis de fração volumétrica obtidos para o compósito PEBD/AL utilizando diferentes tipos de modelos de turbulência parametrizados a uma velocidade do ar de 10 m/s (velocidade de jorro estável, obtido experimentalmente).

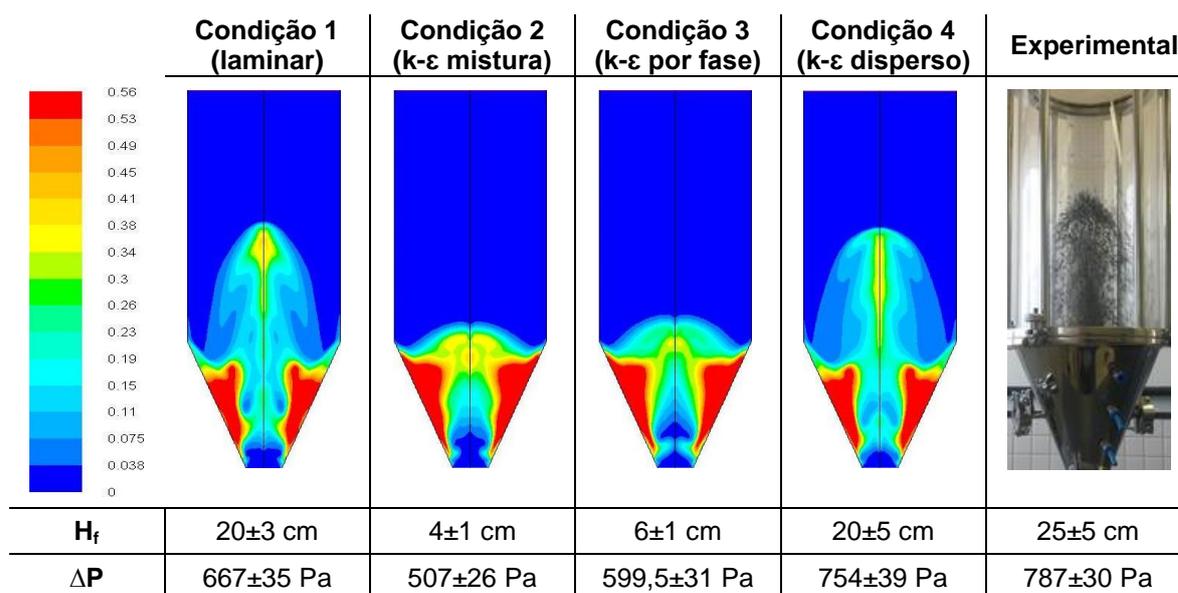


Figura 6.6 – Contornos de fração volumétrica de compósito PEBD/AL com velocidade do ar igual 10 m/s, para as condições de turbulência testadas.

Analisando os perfis de concentração de sólidos, os dados de altura de fonte ( $H_f$ ) e queda de pressão no leito ( $\Delta P$ ) apresentados na Figura 6.6 é possível notar os seguintes eventos. Na condição 1 (modelo laminar), observa-se que o regime de jorro é atingido, caracterizado pelas regiões de jorro, fonte e ânulo. Entretanto, considerando o intervalo de confiança, pode-se afirmar que os valores das variáveis

( $\Delta P$ ,  $H_f$ ) analisadas são subestimados pelo modelo quando comparados aos dados experimentais. Para a condição 2 (modelo de turbulência k- $\epsilon$  mistura) o modelo não representa de forma adequada o escoamento ar-compósito PEBD/AL típico de leito de jorro, o que pode ser explicado pela diferença entre massa específica das fases. Comparando os dados  $H_f$  e  $\Delta P$  experimentais e simulados nota-se que estes são significativamente subestimados pelo modelo de turbulência k- $\epsilon$  mistura. Para a condição 3, o modelo de turbulência k- $\epsilon$  por fase apresenta resultados semelhantes àqueles encontrados pelo modelo de turbulência k- $\epsilon$  mistura (condição 2). A condição 4 (modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso) representa de maneira adequada o escoamento ar-compósito PEBD/AL característico do leito de jorro. Para esta condição, pode-se observar regiões distintas entre jorro, fonte e ânulo. Também, nota-se que as medidas de  $H_f$  e  $\Delta P$  estão de acordo com aqueles previstos pelo modelo, considerando o desvio padrão das medidas. Durante o regime de jorro a concentração da fase secundária (partículas) torna-se diluída, tal fato pode justificar a boa concordância qualitativa e quantitativa dos experimentos com o modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso.

Considerando a qualidade da previsão do escoamento ar-compósito PEBD/AL pelo modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso, este foi escolhido para descrever o escoamento ar-sólido nas demais condições operacionais.

A Figura 6.7 ilustra a fração volumétrica de sólidos para as fases ar-compósito PEBD/AL (6.7a) e para as fases ar-areia (6.7b) com diferentes velocidades do ar na entrada do leito. Para velocidade do ar de 10 m/s, observa-se, na figura 6.7a, o regime de jorro estável para o leito de compósito PEBD/AL, caracterizado pela distinção visual da concentração de sólidos nas regiões de escoamento: ânulo, fonte e jorro. Também, à medida que a velocidade de injeção do ar no leito é reduzida, observa-se na Figura 6.7a os seguintes regimes de escoamento: transição jorro-leito fixo para velocidades na faixa de 5 a 8m/s e leito fixo para velocidade de até 2m/s. Qualitativamente, os perfis de porosidade de sólidos apresentados na Figura 6.7a estão de acordo com aqueles reportados na literatura por Olazar *et al.* (1998).

Resultados semelhantes são encontrados na Figura 6.7b para leito de jorro composto de partículas de areia.

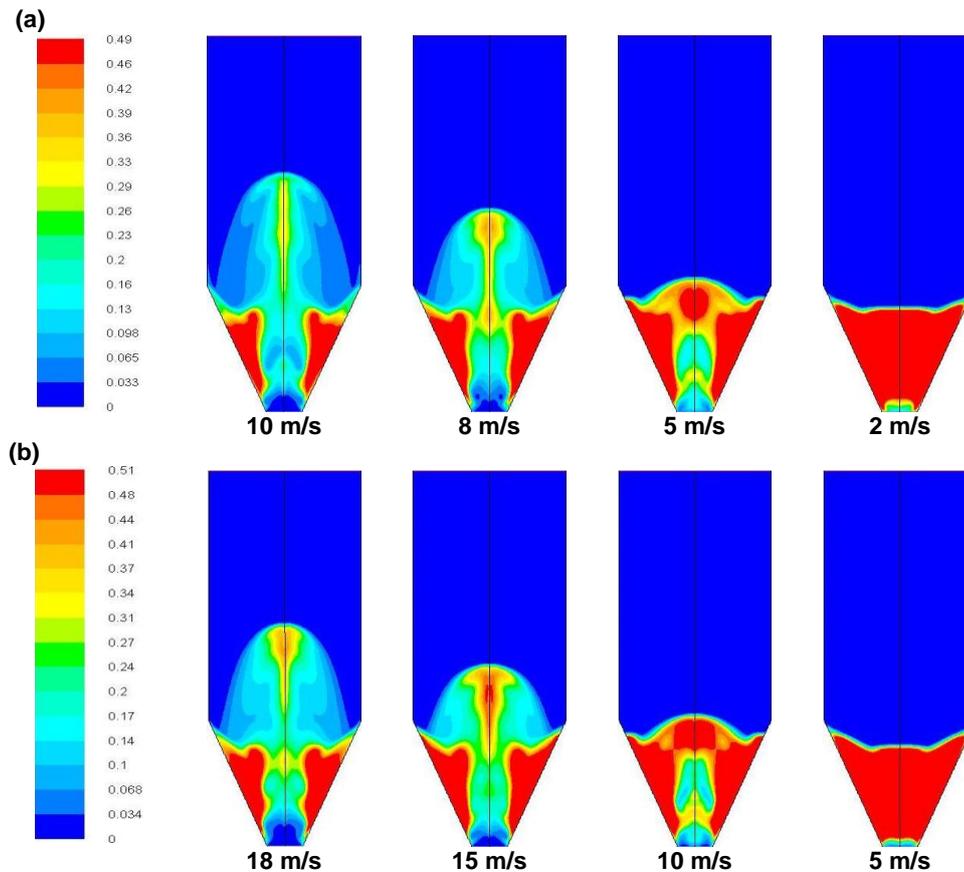
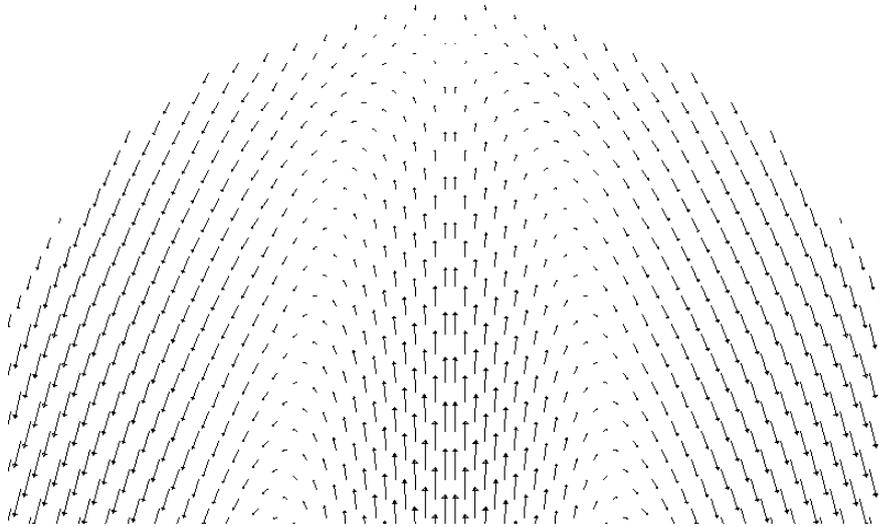


Figura 6.7 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para diferentes velocidades de entrada de ar no leito, para as condições de turbulência  $k-\epsilon$  disperso. (a) compósito PEBD/AL; (b) areia.

A Figura 6.8 ilustra o mapa de vetores de velocidade na região de fonte e na região cônica do leito para as partículas de compósito PEBD/AL simuladas, em regime de jorro estabelecido ( $V=10\text{m/s}$ ). Através da orientação e intensidade dos vetores pode-se observar o movimento das partículas no interior do leito. As partículas seguem uma trajetória cíclica com movimento ascendente na região de jorro (Figura 6.8b), e atingem o topo do leito desacelerando. Na sequência, na fonte (Figura 6.8a), as partículas mudam de direção, caindo sobre a região anular em movimento descendente.

As partículas possuem velocidade máxima na região de jorro, na ordem de  $2,2\text{ m/s}$ , já na região anular a velocidade máxima obtida é de  $0,34\text{ m/s}$ . Comparando qualitativamente o mapa de vetores obtidos via simulação com aqueles reportados por Olazar et al. (2001), verifica-se que estes são semelhantes.

(a)



(b)

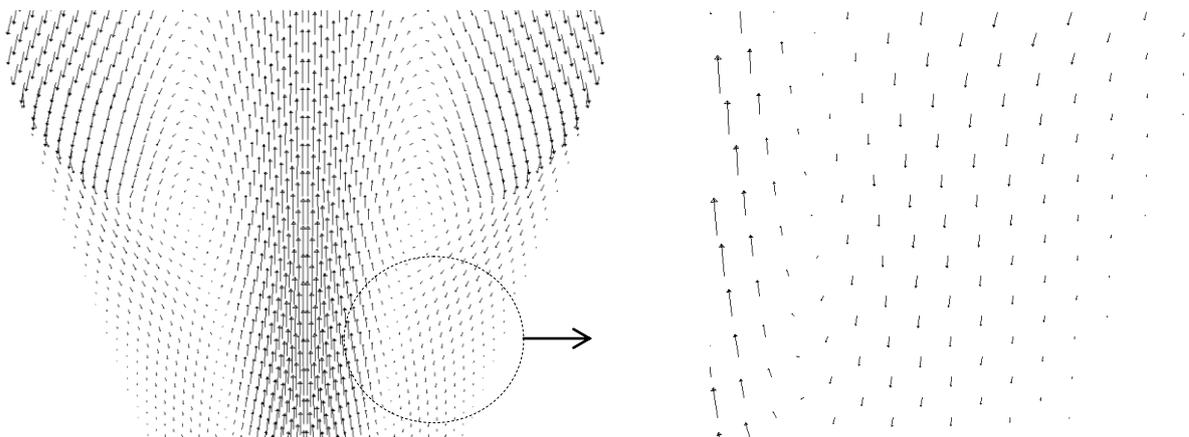


Figura 6.8 – Mapa de vetores de velocidade para partículas de composto PEBD/AL com velocidade do ar igual 10 m/s, para a condição 4 (modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso): a) região de fonte; b) região de jorro e anular.

A Figura 6.9 apresenta os resultados de fração volumétrica de sólidos simulados na condição de jorro estável para as misturas de areia e composto PEBD/AL, com 20, 40, 60 e 80% de fração mássica de composto PEBD/AL. Nestas condições, embora as partículas apresentem massa específica significativamente diferente (areia = 2340 kg/m<sup>3</sup> e composto PEBD/AL = 828 kg/m<sup>3</sup>), é evidenciada uma mistura efetiva,

caracterizada pelo perfil de distribuição de sólidos para ambas as fases (compósito PEBD/AL e Areia), observados na Figura 6.9. Verifica-se ainda, um comportamento qualitativamente semelhante para todos os casos simulados. Nota-se a presença das três regiões que caracterizam um leito de jorro estável (fonte, jorro, anulo), demonstrando que o modelo empregado e o procedimento numérico utilizado são capazes de representar qualitativamente o escoamento ar-partícula no interior do leito de jorro para as misturas utilizadas nesta pesquisa.

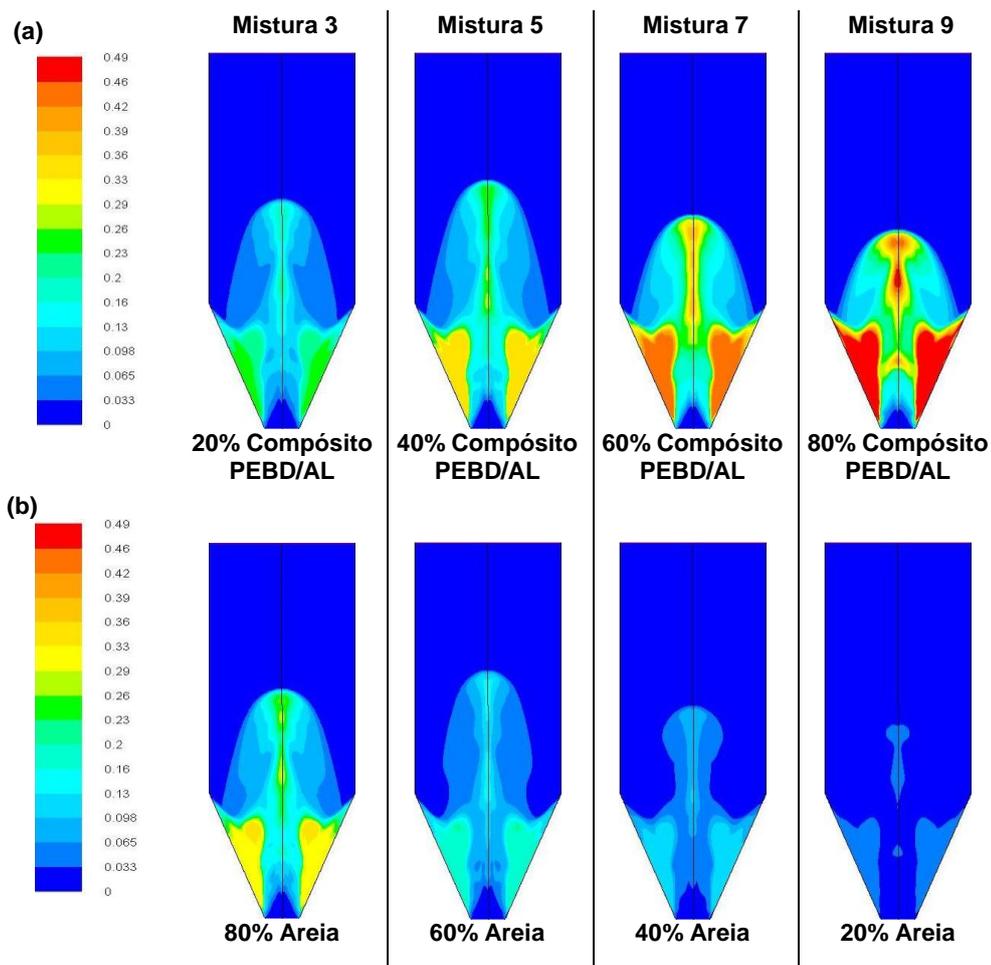


Figura 6.9 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito com misturas de areia e compósito PEBD/AL em regime de jorro, contendo 20%, 40%, 60% e 80% em massa compósito PEBD/AL. (a) Compósito PEBD/AL; (b) Areia.

### 6.2.3 Comparação dos dados Experimentais e Simulados

A Tabela 6.3 apresenta os dados experimentais e simulados das condições de velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ), queda de pressão de mínimo jorro ( $\Delta P_{mj}$ ) e queda de pressão máxima do leito ( $\Delta P_{max}$ ).

Tabela 6.3 – Dados experimentais e simulados de  $V_{mj}$ ,  $\Delta P_{mj}$  e  $\Delta P_{max}$  para as misturas de areia e compósito PEBD/AL em leito de jorro

Composição mássica (%)		Dados experimentais			Dados simulados		
Areia	Compósito	$V_{mj}$ (m/s)	$\Delta P_{mj}$ (Pa)	$\Delta P_{max}$ (Pa)	$V_{mj}$ (m/s)	$\Delta P_{mj}$ (Pa)	$\Delta P_{max}$ (Pa)
100	0	14,7±0,3	1884±85	2309±85	14,0±0,5	1709±112	2256±118
80	20	13,8±0,6	1463±48	1919±129	12,5±0,5	1426±75	1684±176
60	40	12,2±0,4	1233 ±74	1591±84	10,5±0,5	1169±58	1361±136
40	60	9,8±0,2	1034 ±54	1235±67	9,5±0,5	946±47	1114±111
20	80	8,9±0,3	866 ±29	1055±51	8,5±0,5	785±39	812±82
0	100	7,8±0,3	748 ±40	978±98	7,0±0,5	674±67	824±82

A Tabela 6.4 exibe os dados referentes ao erro relativo, onde, para o cálculo do mesmo é adotada a seguinte expressão:

$$Erro\ relativo = \frac{E_{simulado} - E_{experimental}}{E_{experimental}} \times 100 \quad (6.1)$$

Analisando os dados experimentais e simulados de  $V_{mj}$ ,  $\Delta P_{mj}$  e  $\Delta P_{max}$  apresentados na Tabela 6.3 para as misturas de areia e compósito PEBD/AL, note-se que os resultados obtidos na simulação subestimam aqueles obtidos experimentalmente. Entretanto, considerando o desvio padrão das medidas, observa-se que estes estão de acordo.

Tabela 6.4 – Erros relativos nas medidas de  $V_{mj}$ ,  $\Delta P_{mj}$  e  $\Delta P_{max}$  para as misturas de areia e compósito PEBD/AL em leito de jorro

Composição mássica (%)		Erro relativo (%)		
		(relativo ao dado experimental)		
Areia	Compósito	$V_{mj}$ (m/s)	$\Delta P_{mj}$ (Pa)	$\Delta P_{max}$ (Pa)
100	0	-4,8	-9,3	-2,3
80	20	-9,4	-2,5	-12,2
60	40	-13,9	-5,2	-14,4
40	60	-3,1	-8,5	-9,8
20	80	-4,5	-9,3	-23,0
0	100	-10,2	-9,9	-15,7

Na Tabela 6.4 para os valores de  $V_{mj}$ ,  $\Delta P_{mj}$  e  $\Delta P_{max}$ , observa-se que os erros relativos máximos estão na ordem de -13,9; -9,9; e -23,0 respectivamente. O modelo Euleriano considera o escoamento de partículas esféricas. Tal fato pode justificar as diferenças entre os resultados obtidos de velocidade e queda de pressão nos experimentos e nas simulações, já que no presente estudo são utilizados leitos compostos por partículas não esféricas. O fator de forma das partículas exerce influência sobre os resultados encontrados via CFD.

Além disso, o modelo Euleriano é baseado em algumas suposições e considerações, o que pode explicar os valores dos resultados obtidos via simulação abaixo dos experimentais. Entretanto, os erros máximos obtidos são pequenos levando em consideração as flutuações típicas do leito de jorro e as aplicações pretendidas em engenharia.

## 7 CONCLUSÕES

Considerando a análise dos dados e o conjunto de condições operacionais estabelecidas neste trabalho pode-se concluir que:

- para o leito de jorro operando com as misturas de compósito PEBD/AL e areia com proporção mássica de 0 a 100% de compósito PEBD/AL o regime de jorro estável é estabelecido. Tal fato é comprovado através da análise dos dados de desvio padrão da queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade de entrada de ar.
- a queda brusca do desvio da queda de pressão ( $\sigma$ ) durante a transição do leito jorrando para o leito fixo para misturas com fração mássica de compósito PEBD/AL entre 20% e 40%, evidenciam maior estabilidade em manter a condição de mínimo jorro em relação as misturas com fração mássica entre 60% e 80% de compósito PEBD/AL.
- o aumento na concentração de compósito PEBD/AL na mistura com areia provoca uma redução no valor da velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ).
- o modelo Euleriano Granular Multifásico é capaz de prever o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro. O modelo de arraste Gidaspow mostrou-se adequado para representar a fluidodinâmica do leito com as partículas utilizadas nesta pesquisa.
- qualitativamente, o modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso representa o padrão de escoamento característico do leito de jorro, identificado pelas regiões distintas (fonte, ânulo e jorro), bem como a reprodução coerente dos perfis de porosidade dos sólidos observados na literatura.
- pode-se constatar que o modelo de turbulência k- $\epsilon$  disperso estima bem os dados experimentais de  $V_{mj}$ ,  $\Delta P_{mj}$ ,  $\Delta P_{max}$  com desvios percentuais máximos de -13,9; -9,9; e -23,0%, respectivamente.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- estudar a fluidodinâmica em leito de jorro de misturas compósito PEBD/AL e areia, com areia em diferentes diâmetros, visando avaliar a tendência a segregação das partículas;
- analisar o comportamento fluidodinâmico em leito de jorro de misturas compósito PEBD/AL e areia, com o leito preenchido com as partículas em diferentes alturas;
- realizar um estudo fluidodinâmico do compósito PEBD/AL utilizando esferas de vidro como material inerte;
- simulação com malhas em 3 dimensões e inserção de reações de pirólise ao modelo;
- incorporar o comportamento térmico ao modelo, para analisar a influência da temperatura na fluidodinâmica do leito de jorro
- inserção do termo de viscosidade de fricção na modelagem da viscosidade de cisalhamento.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA et al. Analysis of Reaction Kinetics of Carton Packaging Pyrolysis, **Procedia Engineering**, v.42, p.113-122, 2012.

ALVARENGA, L. M. **Pirólise de resíduos de embalagens cartonadas e seus componentes puros: uma avaliação cinética**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

ALVAREZ, J. et al. Syngas Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, v. 128, p. 162-169, 2014.

ANSYS FLUENT Theory Guide. Multiphase Flows. ANSYS, Inc. 2010.

BACELOS, M.S. **análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BACELOS, M. S.; FREIRE, J. T. Stability of spouting in conical spouted beds with inert particle mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 2, p. 808-817, 2006.

BÉTTEGA, R. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro utilizando-se CFD**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

BEZERRA, C. V.; RODRIGUES, A. M. C.; AMANTE, E. R.; SILVA, L. H. M. Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 4, p. 1140-1146, 2013.

CEMPRE. **Relatório Sócio ambiental 2004-2005**. Disponível em <http://www.tetrapak.com/br/sobre-a-tetra-pak/publicacoes/sustentabilidade>. Acesso em 06 de Março de 2014.

CHO, G.; DODDS, J; SANTAMARINA, J. C. Particle Shape Effects on Packing

Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands, 2006.

CONCEIÇÃO FILHO, R. S. **Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997.

CUNHA, F. G. **Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

DU, W. et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: assessment of drag coefficient correlations. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 5, p.1401-1420, 2006.

DU, W. et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n.14, p. 4558-4570, 2006a.

DUARTE, C. R.; NETO, J. L. V.; LISBOA, M. H.; SANTANA, R. C.; BARROSO, M. A. S.; MURATA, V. V. Experimental study and simulation of mass distribution of the covering layer of soybean seeds coated in a spouted bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 1, p. 59-67, 2004.

DUARTE, C.R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. 2006. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

DUTRA, C. H. M. C. **Dinâmica do leito de jorro não convencional**. Dissertação Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1984.

ERKIAGA, A. et al. Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, v. 109, p. 461-469, 2013.

GELDART, D. Gas fluidization technology, John Willey & Sons, London, 1986.

GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., and Ding, J., Hydrodynamics of circulating

fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization, Proceedings of the 7<sup>th</sup> **Engineering Foundation Conference on Fluidization**, p. 75-82, 1992.

GOMÉZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, 2002.

KORKMAZ, A. et al. Pyrolysis of Tetra Pak, Waste management, v. 29, n. 11, p. 2836-2841, 2009.

LAN, X. et al. Influence of solid-phase wall boundary condition on CFD simulation of spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 69, p. 419-430, 2012.

LIU, R. et al. Biomass pyrolysis for liquid fuel. **Special Feature: Biomass Energy Technologies**, p. 51-55, 2007.

LOURENÇO, R. O. **Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

LUN, C.K.K., SAVAGE, S.B., JEFFREY, D.J. and CHEPURNIY, N., Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 140, p. 223–256, 1984.

MAKIBAR, J. et al. Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering and Processing**, v. 50, p. 790-798, 2011.

MARQUES, I. I. D. R. **Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirólise partículas cartonadas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

MARTINS, G. Z.; OLIVEIRA, W. P. Utilização do leito de jorro para a aplicação de revestimento entérico em cápsulas gelatinosas duras. **Revista Brasileira de**

**Ciências Farmacêuticas**, v. 39, n. 3, p. 299-307, 2003.

MATHUR, K. B; EPSTEIN, N. **Spouted beds**, New York: Academic Press, Inc., 1974. 304 p.

NASCIMENTO et al. Embalagem cartonada longa vida: Lixo ou luxo?. **Química Nova na Escola**, São Paulo. n.25, p. 3-7, 2007.

NETO, J. L. V. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

NEVES, F.L. Reciclagem de Embalagens Cartonadas Tetra Pak. **Revista O Papel**, São Paulo, p. 38-45, fev. 1999.

OLAZAR, M. et al. Effect of operating conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 11, p. 3585-3594, 2001.

OLAZAR, M., et al. Local Bed Voidage in Conical Spouted Beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v.37, 2553-2558, 1998.

OLAZAR, M. et al. Minimum spouting velocity for the pyrolysis of scrap tyres with sand in conical spouted beds. **Powder Technology**, v. 165, p. 128-132, 2006.

ROSA, C. A. **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo: uso da técnica CFD** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, 2010.

SANTOS, D. A. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – Estudos experimentais e de simulação via CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com**

**malhas tridimensionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SYAMLAL, M., ROGERS, W. and O'BRIEN, T. J., MFIX documentation: Vol. 1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993.

SYAMLAL, M. and O'BRIEN, T. J., Computer simulation of bubbles in a fluidized bed, **A.I.Ch.E. Symp. Series**, Vol. 85, p. 22-31, 1989.

SYAMLAL, M. and O'Brien, T.J., Generalized drag correlation for multiparticle systems. **Morgantown Energy Technology Center DOE Report**, 1987.

TAIMISTO, E. From juice carton to car parts. **Rethink**, v. 2, p. 12-16, 2011.

TU, J., YEOH, G. H., LIU C. Computational fluid dynamics: A practical approach. 2008.

WADELL, H. 1933. Sphericity and roundness of rock particles. **Journal of Geology**, v. 41, p. 310-331, 1933.

WU, C. H.; CHANG, H. S. Pyrolysis of tetra pack in municipal solid waste. **Journal Chemical Technology Biotechnology**, v. 76, n.8, p. 779-792, 2001.

XU, J; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN; S.; BI, H. T.; GRACE, J.R.; LIM, C. J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds, **Powder Technol.**, 140, 141-154, 2004.

YANG, W.C. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems. 2003.

ZOU, R.; YU, A. Porosity calculation of mixtures of fibrous particles, **China particuology**, v.1, p.27-32, 2003.

ZHONG, W.; CHEN, X., ZHANG, M. Hydrodynamic characteristics of spouted bed pressure drop and minimum spouting-fluidization velocity. **Chemical**

**Engineering Journal**, v. 118, p. 37-46, 2006.

ZUBEN, F.V. The Thermal Plasma Technology Separates Aluminum from Plastic Packages. In:\_\_\_\_\_. **Proceedings of International Conference on Energy, Environment and Disasters (INCEED)**. Charlotte, North Carolina, USA, p. 24-30, 2005.