



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

ÍCARO IBRAHIM DIAS DE RODRIGUES MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DO LEITO DE JORRO COMO
REATOR EM POTENCIAL DE PIRÓLISE DE
PARTÍCULAS CARTONADAS**

SÃO MATEUS – ES

2013

ÍCARO IBRAHIM DIAS DE RODRIGUES MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DO LEITO DE JORRO COMO
REATOR EM POTENCIAL DE PIRÓLISE DE
PARTÍCULAS CARTONADAS**

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

2013

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

M357i Marques, Ícaro Ibrahim Dias de Rodrigues, 1984-
Investigação do leito de jorro como reator em potencial de
pirólise de partículas cartonadas / Ícaro Ibrahim Dias de
Rodrigues Marques. – 2013.
84 f. : il.

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

1. Pirólise. 2. Energia. 3. Fluidodinâmica computacional. 4.
Alumínio nas embalagens. 5. Resíduos sólidos. I. Bacelos,
Marcelo Silveira. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

INVESTIGAÇÃO DO LEITO DE JORRO COMO REATOR EM POTENCIAL DE PIRÓLISE DE PARTÍCULAS CARTONADAS

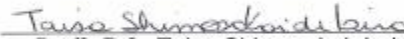
ÍCARO IBRAHIM DIAS DE RODRIGUES MARQUES

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: 16/08/2013.



Dr. Fernando Luiz Neves
Tetra Pak
Membro Externo



Prof. Dr. 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

Agradeço a Deus, meu amigo fiel e verdadeiro, que me deu forças para chegar até aqui. Obrigado.

Aos meus pais Beto e Zíbia e meus irmãos Gustavo e João Gabriel, pela confiança e suporte em cada etapa da minha vida.

À minha esposa Fernanda e às minhas filhas Isabel e Manuela, que são a razão de tudo que eu faço. Sem a compreensão de vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr Marcelo Silveira Bacelos, pela dedicação, empenho e, acima de tudo, pela amizade. O senhor foi fundamental não só para este trabalho, mas para minha formação como ser humano. Muito obrigado.

Aos demais professores do DETEC/UFES, em especial aos professores Leonardo Arrieche, Paulo Porto, Sandra Rocha e Taisa Shimosakai. Obrigado pelos ensinamentos e anos de convivência.

A todos os técnicos e servidores do CEUNES/UFES, em especial à técnica Cristiane Pitol, e aos que de forma direta e indireta colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradeço à Capes pelo suporte financeiro e à TETRA PAK pelo apoio à pesquisa.

RESUMO

Atualmente, a pirólise vem recebendo atenção especial em função do seu potencial de aplicação em áreas que constituem desafios do mundo contemporâneo, dentre as quais se destacam a necessidade de produção de energia renovável e a questão do gerenciamento dos resíduos sólidos. Dentre os resíduos sólidos urbanos, as embalagens cartonadas destacam-se pelos produtos primários (alumínio e parafina) com alto valor agregado obtidos a partir de sua pirólise, além de carvão com alto poder calorífico que pode ser utilizado como combustível para aumentar a eficiência energética do processo. Por apresentar bom contato gás-sólido, altas taxas de transferência de calor e massa e baixa segregação de partículas, o leito de jorro cônico surge como uma alternativa eficiente para a pirólise de embalagens cartonadas. Neste contexto, com o intuito de contribuir para a aplicação do leito de jorro cônico como reator de pirólise, o presente trabalho tem como objetivo estudar a fluidodinâmica de partículas cartonadas em leito de jorro. Para atingir tal meta, o comportamento fluidodinâmico de misturas de discos cartonados com partículas de diferentes massas específicas, a saber, polietileno e areia, foi investigado. Dados experimentais dessas misturas de queda de pressão em função da velocidade do ar no leito foram obtidos e analisados. As condições operacionais empregadas no leito de jorro cônico foram simuladas por meio da técnica de CFD. Para os leitos compostos por polietileno e discos cartonados com uma proporção mássica de 5 a 50% de cartonadas, a análise dos dados experimentais mostraram que o regime de jorro foi atingido. Para as misturas de areia e discos cartonados em leito de jorro, o regime de jorro foi atingido para os leitos contendo 5 e 10% em massa de cartonadas. Nas condições operacionais empregadas nesta pesquisa, as simulações CFD mostraram que o modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado com o modelo de arraste de Syamlal-O'Brien é capaz de prever qualitativamente o comportamento fluidodinâmico característico de um leito de jorro cônico operando com misturas de partículas não esféricas. Uma análise do reaproveitamento das embalagens cartonadas por meio da pirólise, sob os pontos de vista energético e ambiental, mostra que uma grande quantidade de energia e bauxita pode ser economizada em função do alumínio que é recuperado no processo.

Palavras-chave: Pirólise. Energia. Fluidodinâmica computacional. Alumínio nas embalagens. Resíduos sólidos.

ABSTRACT

Currently, pyrolysis has received special attention because of its potential application in areas that constitute challenges of the contemporary world, among which stand out the need for renewable energy production and the issue of solid waste management. Among the modern solid wastes, the post-consumer carton packaging highlights due to the high value-added of the primary products (aluminum and paraffin, obtained from its pyrolysis), and coal presenting high calorific value that can be used as fuel to increase the energy efficiency of the process. For presenting good gas-solid contact, high rates of heat and mass transfer and low particle segregation, the conical spouted bed arises as an efficient alternative for the pyrolysis of carton packaging. In this context, in an attempt to use conical spouted beds (CSBs) as a pyrolysis reactor, this present research aims at analyzing the carton particles fluid dynamics in CSBs. To achieve this goal, the fluid dynamics behavior of carton disks mixtures with particles of different specific masses, namely, polyethylene and sand, was investigated. Experimental data of bed pressure drop as a function of air velocity were obtained and analyzed. The operating conditions employed in the conical spouted bed were simulated by CFD technique. For beds composed of polyethylene and carton disks in a range of mass proportion of 20 and 50% carton disk, the analyses established in this research show that the spouting regime is established. For beds comprise mixtures with 5 and 10% carton disk (in mass) stable spouting regime was achieved. At the set of operating conditions, the Eulerian Granular Multiphase Model applied with Syamlal-O'Brien drag model can qualitatively predict the typical fluid dynamics behavior of a conical spouted bed operating with mixtures of non-spherical particles. An analysis of reuse of the carton packaging via pyrolysis, from the energy and environmental points of view, shows that a large amount of bauxite and energy can be saved due to aluminum which is recovered in the process.

Keywords: Aluminum in the packages. Computational Fluid dynamics. Pyrolysis. Energy. Solid wastes.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_D	Coeficiente de arraste	[-]
C_{fr}	Coeficiente de fricção	[-]
d_s	Diâmetro de partícula	[m]
D_p	Diâmetro médio de peneira	[mm]
e_{ss}	Coeficiente de restituição entre sólidos	[-]
E	Erro	[-]
$g_{0,ss}$	Função de distribuição radial	[-]
\vec{g}	Aceleração gravitacional	[m.s ⁻²]
k_{θ_s}	Coeficiente de difusão de temperatura granular	[kg.m ⁻² .s ¹]
\vec{v}	Velocidade	[m.s ⁻¹]
v_r	Correlação de velocidade terminal para a fase sólida	[m.s ⁻¹]
V_{mj}	Velocidade de mínimo jorro	[m.s ⁻¹]
\bar{I}	Tensor unitário	[-]
P	Pressão	[Pa]
ΔP_{max}	Queda de pressão máxima para vazões decrescentes de ar	[Pa]
ΔP_{mj}	Queda de pressão de mínimo jorro	[Pa]

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica	[-]
β	Coeficiente de troca de momento entre fases	[kg.m ⁻³ .s ⁻¹]
γ_{θ_s}	Energia de dissipação colisional	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]

ε_0	Porosidade	[-]
θ	Temperatura granular	[m ² .s ⁻²]
λ	Viscosidade <i>bulk</i> de sólidos	[Pa.s]
μ	Viscosidade cisalhante de sólidos	[Pa.s]
$\bar{\tau}$	Tensor tensão de sólidos	[N.m ⁻²]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ϕ	Esfericidade	[-]
ϕ_{gs}	Troca de energia entre fases	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]

Abreviaturas

CFD	Fluidodinâmica Computacional
DC	Discos Cartonados
DEM	Discrete Element Method
EGMM	Modelo Euleriano Granular Multifásico
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
TFM	Two Fluid Model

Subscritos

g	Fase fluida, gasosa
s	Fase granular, sólida

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de uma embalagem cartonada	17
Figura 2.2 – Ciclo de vida das embalagens cartonadas	18
Figura 2.3 – Esquema de um leito de jorro	23
Figura 2.4 – Leitos de jorro cônicos: (a) convencional (b) <i>Jet Spouted Bed</i>	27
Figura 2.5 – Curva característica do leito de jorro.....	29
Figura 2.6 – Etapas no desenvolvimento de um regime de jorro: (a) arco compacto; (b) jato Externo; (c) jorro desenvolvido	29
Figura 2.7 – Principais formatos de jorro de acordo com Mathur e Epstein (1974)...	31
Figura 2.8 – Mapa do vetor de velocidades de sólidos: (a) região anular; (b) região de jorro; (c) fonte	32
Figura 2.9 – Representação esquemática do mapa de velocidade de ar para leitos de jorro cônicos.....	34
Figura 3.1 – Condições de contorno do problema em estudo	43
Figura 4.1 – Partículas utilizadas nos experimentos: 1) Discos cartonados; 2) Pellets de polietileno; 3) Areia.....	44
Figura 4.2 – Dimensões da partícula de disco cartonado	46
Figura 4.3 – Dimensões da partícula de polietileno.....	48
Figura 4.4 – Carta de esfericidade x arredondamento	49
Figura 4.5 – Dimensões utilizadas no cálculo do volume de leito estático	50
Figura 4.6 – Esquema do aparato experimental.....	51
Figura 5.1 – Teste de independência da malha: magnitude da velocidade do ar em função da distância axial	54

Figura 5.2 – Malha computacional utilizada nas simulações.....	55
Figura 6.1 – Fotografias do leito de jorro: (a) cartonadas puras (b) discos cartonados e polietileno	59
Figura 6.2 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar para o polietileno puro e para as misturas de polietileno e discos cartonados.....	60
Figura 6.3 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar para a areia pura e para as misturas de areia e discos cartonados	61
Figura 6.4 – Fotografias da superfície do leito de misturas contendo 10% em massa de cartonadas: (a) polietileno e discos cartonados, (b) areia e discos cartonados.	62
Figura 6.5 – Contornos de fração volumétrica de polietileno e discos cartonados para os leitos compostos com 20% de cartonadas em massa, parametrizados na velocidade de ar de 25 m/s (a) Polietileno; (b) Discos cartonados. Estudos de caso detalhados na Tabela 5.1	64
Figura 6.6 – Mapa vetores de velocidade de sólidos para o polietileno em função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. (a) fonte; (b) regiões anular e de jorro	66
Figura 6.7 – Mapa vetores de velocidade do ar em função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien.....	67

Figura 6.8 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de mistura de polietileno e discos cartonados contendo 30 % em massa de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 30, 25, 15 e, 5 m/s utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. a) Polietileno;	
(b) Discos cartonados.	68
Figura 6.9 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de mistura de areia e discos cartonados contendo uma proporção mássica de 10% de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 40, 30, 20 e 10m/s utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. a) Areia;	
(b) Discos cartonados	69
Figura 6.10 – Balanço de massa do processo de reciclagem das embalagens cartonadas	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro	40
Tabela 3.2 – Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro	41
Tabela 5.1 – Parâmetros empregados nas simulações CFD	56
Tabela 6.1 – Propriedades físicas das partículas utilizadas nos experimentos.....	57
Tabela 6.2 – Misturas de polietileno e discos cartonados estudadas em leito de jorro	58
Tabela 6.3 – Misturas de areia e discos cartonados estudadas em leito de jorro	58
Tabela 6.4 – Dados experimentais e simulados de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro	70
Tabela 6.5 – Erros relativos nas medidas de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro.....	71
Tabela 6.6 – Dados experimentais e simulados de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de areia e discos cartonados em leito de jorro	71
Tabela 6.7 – Erros relativos nas medidas de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de areia e discos cartonados em leito de jorro	71
Tabela 6.8 – Consumo de energia na produção do alumínio referente ao ano de 2010	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 EMBALAGENS CARTONADAS.....	17
2.1.1 Aspectos gerais.....	17
2.1.2 O processo de reciclagem das embalagens cartonadas.....	19
2.2 O LEITO DE JORRO.....	22
2.2.1 Aspectos gerais.....	22
2.2.2 Leitos de jorro não convencionais.....	25
2.2.3 Fluidodinâmica do leito de jorro.....	28
2.2.4 Fluidodinâmica da mistura de partículas em leito de jorro.....	34
3 MODELAGEM	37
3.1 ASPECTOS GERAIS	37
3.2 MODELO EULERIANO	38
3.2.1 Condições de contorno e inicial.....	42
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	44
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS E MISTURAS.....	44
4.1.1 Massa específica.....	45
4.1.2 Diâmetro.....	45
4.1.3 Esfericidade.....	46
4.1.4 Porosidade	49
4.2 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	50

4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
4.4	MEDIDAS.....	52
4.4.1	Altura de fonte.....	52
4.4.2	Velocidade e queda de pressão.....	52
5	METODOLOGIA DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO	54
5.1	MALHA COMPUTACIONAL.....	54
5.2	SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	55
5.3	CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO CFD	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
6.1	EXPERIMENTAL.....	57
6.1.1	Caracterização das partículas e misturas.....	57
6.1.2	Análise fluidodinâmica.....	59
6.2	SIMULAÇÃO	63
6.2.1	Análise qualitativa dos resultados simulados	63
6.2.2	Análise quantitativa dos resultados simulados	70
6.3	ASPECTOS ENERGÉTICOS DA PIRÓLISE DE RESÍDUOS CARTONADOS..	72
7	CONCLUSÕES	76
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

Concebido originalmente em 1954 como uma alternativa ao leito fluidizado para a secagem de grãos de trigo, o leito de jorro passou a ser utilizado em diversas aplicações da indústria tais como granulação, recobrimento de sólidos, secagem de pastas e transporte pneumático. A principal característica que torna o leito de jorro mais adequado para certas aplicações do que a maioria dos sistemas de contato ar-sólido convencionais é o seu padrão cíclico de movimentação de partículas. O movimento contínuo da fase sólida promove um alto contato fluido-partícula no leito, promovendo altos coeficientes de transferência de calor e massa, bem como alta taxa de recirculação de partículas.

O leito de jorro de coluna cônica comparado ao convencional (coluna cônico-cilíndrica) apresenta alta taxa de circulação de sólidos e baixa segregação de partículas. Tais características favorecem o uso do leito de jorro cônico como reator. Alguns exemplos da aplicação de reatores de leito de jorro cônico são a gaseificação, a polimerização catalítica e a pirólise.

Atualmente, a técnica de pirólise vem recebendo atenção especial em função do seu potencial de aplicação em áreas que constituem desafios do mundo contemporâneo. Dentre estas se destacam a necessidade de produção de energia renovável, o gerenciamento e tratamento dos resíduos sólidos urbanos.

No que tange à questão do lixo urbano no Brasil, a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, promulgada no dia 2 de agosto de 2010, estabelece a erradicação dos lixões até agosto 2014. Isso reforça a importância da pesquisa sobre o uso de novas tecnologias que promovam uma destinação adequada para o resíduo sólido como é o caso da tecnologia de pirólise.

Dentre os resíduos sólidos modernos com potencial de reaproveitamento por meio da pirólise, os resíduos de embalagens cartonadas destacam-se sob o ponto de vista ambiental e econômico. Em 2011, no Brasil, foram comercializados 12 bilhões de embalagens cartonadas, apresentando uma taxa de reciclagem de 27,1%. Embora a empresa tenha tornado viável o reaproveitamento da embalagem pós-consumo, a coleta seletiva ainda representa um dos principais obstáculos para a reciclagem destas embalagens.

Na literatura, a pirólise de resíduos cartonados é reportada como uma tecnologia limpa e inovadora. O uso desta tecnologia na reciclagem de embalagens cartonadas permite separar o polietileno das lâminas de alumínio e obter carvão, produto com alto poder calorífico e baixo teor de cinzas. Ainda, o elevado valor agregado dos produtos primários obtidos na pirólise de resíduos cartonados (parafina e alumínio) contribui para tornar o processo lucrativo. Segundo estudos recentes a respeito da pirólise, a necessidade de integrar estágios ao processo, com o objetivo de agregar mais valor aos produtos primários, constitui o maior obstáculo para que a pirólise se torne economicamente viável.

Como alternativa tecnológica de reaproveitamento de resíduo sólido urbano em pequena escala de produção, a técnica de pirólise em leito de jorro cônico pode desempenhar um papel importante. Apesar disso, a complexidade da fluidodinâmica em leitos de jorro composto por misturas de tamanhos de partículas permanece como sendo o principal obstáculo do uso de reatores de leito de jorro em aplicações comerciais.

Recentemente, a dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), apoiada por resultados experimentais, tem se tornado uma ferramenta poderosa na investigação da fluidodinâmica em leitos de jorro. A principal vantagem da técnica de CFD é a possibilidade de investigar um módulo experimental através de uma ampla faixa de condições operacionais, parâmetros geométricos e materiais com diferentes propriedades.

Nesse contexto, com o intuito de contribuir para a aplicação do leito de jorro cônico como reator de pirólise, o presente trabalho tem como objetivo estudar a fluidodinâmica de partículas cartonadas em leito de jorro. Para atingir tal meta, esta pesquisa é dividida nas seguintes etapas: 1) obtenção e análise de dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade do ar no leito 2) simulação das condições operacionais empregadas no leito de jorro cônico por meio da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Embalagens Cartonadas

2.1.1 Aspectos gerais

Atualmente, os impactos ambientais associados ao consumo de energia e à poluição causada pelos resíduos sólidos geram preocupação mundial, levando à elaboração de projetos que criem mecanismos capazes de otimizar a utilização de energia e promover o reaproveitamento dos resíduos sólidos. Dentre os resíduos sólidos, gerados nas grandes áreas urbanas, destacam-se os resíduos de embalagens cartonadas por apresentarem matérias-primas de alto valor agregado.

As embalagens cartonadas, também denominadas embalagens longa vida, são formadas por multicamadas de papel, plástico e alumínio. Em sua constituição, o papel representa 75% em massa da embalagem, enquanto que o plástico e o alumínio representam 20% e 5% respectivamente. Estes materiais encontram-se dispostos em uma ordem determinada e passam por um processo de laminação que consiste, basicamente, em realizar uma compressão sobre as folhas dos diversos constituintes. A Figura 2.1 mostra a estrutura de uma embalagem cartonada.

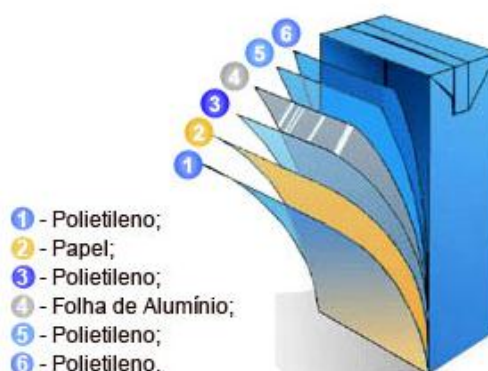


Figura 2.1 – Estrutura de uma embalagem cartonada.

Fonte: Tetra Pak (2010).

No Brasil, em 2011, somente a empresa Tetra Pak comercializou 12 bilhões de embalagens cartonadas no Brasil e a taxa de reciclagem de embalagens Longa Vida foi de 27,1% (CEMPRE, 2013).

Nesse contexto, a reciclagem das embalagens cartonadas constitui uma alternativa viável e atraente, tanto do ponto de vista ambiental como também do ponto de vista socioeconômico. A análise do ciclo de vida das embalagens cartonadas, apresentado na Figura 2.2, permite verificar que processo de reciclagem destas embalagens envolve e integra indústrias de diferentes ramos como o de papel, de plástico, de alumínio além de produtores de placas e telhas e cooperativas de catadores.

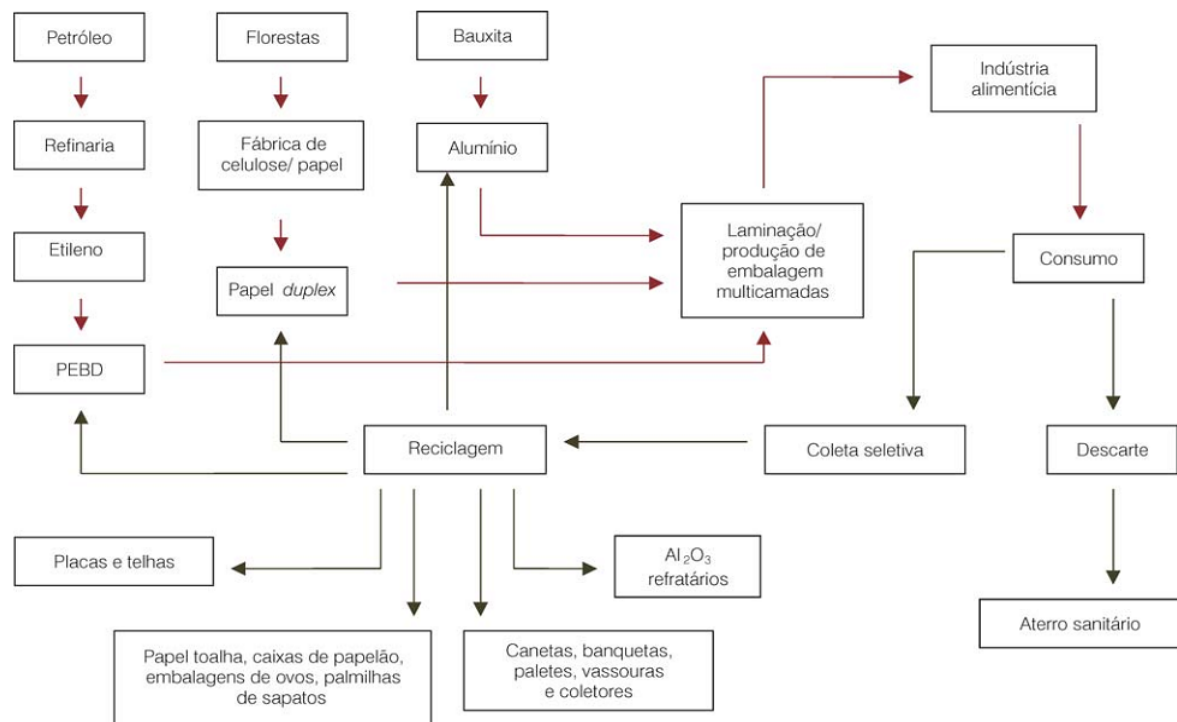


Figura 2.2 – Ciclo de vida das embalagens cartonadas.

Fonte: Nascimento et al. (2007).

As principais vantagens trazidas pela reciclagem das embalagens cartonadas são:

- possibilita o reaproveitamento de materiais nobres com elevado valor agregado;

- fornece produtos que podem ser vendidos a menores preços no mercado;
- colabora com a geração de emprego relacionada à coleta seletiva e ao processamento dos materiais, possibilitando o resgate de cidadania dos envolvidos;
- estabelece uma vantagem competitiva mercadológica na venda do produto e melhora a imagem da empresa, e
- contribui para o desenvolvimento sustentável.

2.1.2 O processo de reciclagem das embalagens cartonadas

Os processos de reciclagem do papel, do plástico e do alumínio já estão bem consolidados. Entretanto, o reaproveitamento destes materiais a partir da embalagem cartonada não constitui uma extensão simples dos processos individuais de reciclagem de seus constituintes em separado. Isso porque as embalagens cartonadas apresentam um caráter de compósito laminado, pois são formadas por uma combinação de papel cartão, polietileno e alumínio, além da tinta usada na impressão dos rótulos (NASCIMENTO et al., 2007).

Segundo Nascimento et al. (2007), os compósitos são combinações de dois ou mais materiais que oferecem ao produto acabado uma associação das propriedades de cada componente. As diferentes interações físico-químicas entre os componentes podem formar compósitos difíceis de reciclar, uma vez que a pré-separação de seus componentes para posterior processamento torna-se complicada.

No processo tradicional de reciclagem das embalagens cartonadas, o papel é quase totalmente removido. O resíduo resultante é formado por um compósito de plástico e alumínio com traços de papel.

De acordo com Neves (1999), a etapa primária da reciclagem é realizada na indústria papelreira, onde as embalagens são introduzidas em um equipamento denominado *hidrapulper* que promove a separação das fibras de papel das camadas de polietileno e alumínio. A desagregação das fibras é feita por meio da agitação mecânica das embalagens com água. Essas fibras podem ser usadas na confecção

de papelão ondulado, bandeja de ovos e papel toalha, por exemplo. Nessa etapa não é necessária a adição de aditivos químicos ou calor.

Na etapa secundária é realizado o beneficiamento do compósito de polietileno/alumínio. Algumas rotas de reaproveitamento desse compósito são:

- 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;
- fabricação de placas e telhas que podem ser utilizadas na construção civil e na indústria moveleira;
- fabricação de materiais plásticos, com alumínio incorporado, como brindes, coletores de lixo e bases de vassouras pelo processo de termo-injeção; e
- obtenção de alumínio de alta pureza na forma de lingotes por meio da tecnologia de plasma térmico. Esta técnica permite a separação total do alumínio e do plástico. Desta forma o alumínio pode ser transformado em folhas e utilizado novamente na fabricação de embalagens longa vida, enquanto que o plástico pode ser transformado em parafina e vendido para indústria petroquímica.

Recentemente, a pirólise dos resíduos cartonados vem sendo empregada na separação do polietileno e do alumínio. A pirólise representa uma alternativa limpa e inovadora que permite a obtenção de alumínio com alto teor de pureza. Em oposição à incineração, a pirólise ocorre em atmosfera inerte, isenta de oxigênio. Desta forma, não há combustão dos resíduos, fato que evita a produção de gases de efeito estufa ou emissões tóxicas e a oxidação do alumínio.

Em 2005, foi inaugurada no Brasil, na cidade de Piracicaba, interior de São Paulo, a primeira planta de pirólise do mundo para reciclagem de embalagens cartonadas. A planta, que surgiu de uma parceria entre as empresas Tetra Pak Ltda., Klabin S.A., Alcoa S.A. e TSL Ambiental, emprega a tecnologia a Plasma para o processamento do plástico e do alumínio que sobram após a remoção do papel das embalagens. A unidade possui a 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).

A tecnologia de plasma utiliza energia elétrica para produzir um jato de plasma a 12 mil graus Celsius para aquecer a mistura de plástico e alumínio. Neste processo, o plástico é transformado em parafina e o alumínio totalmente recuperado em forma de lingotes de alta pureza. Estes lingotes são transformados em novas folhas de alumínio usadas na fabricação de embalagens cartonadas e, assim, fecham o ciclo de reciclagem do material. A parafina é vendida para a indústria petroquímica nacional (ZUBEN, 2005).

Em 2011, a empresa finlandesa Stora Enso inaugurou a segunda planta de pirólise do mundo para separação do alumínio e do polietileno de embalagens cartonadas. A planta de beneficiamento do compósito laminado, localizada na cidade de Barcelona na Espanha, tem capacidade para processar 20.000 toneladas de embalagens cartonadas por ano. O processo de pirólise ocorre em uma câmara livre de oxigênio a 500 °C. Além de alumínio puro, são gerados no processo gases a partir do polietileno. Esses gases são capazes de fornecer 20% da energia consumida na fábrica de papel, à qual a planta de pirólise encontra-se integrada (TAIMISTO, 2011).

Nas duas plantas de pirólise supracitadas, o papel, que já possui um mercado estabelecido, é extraído na primeira etapa da reciclagem ainda na indústria de papel, sendo transformado em papelão.

Nos últimos anos, alguns trabalhos a respeito da pirólise de embalagens cartonadas foram desenvolvidos. Wu e Chang (2001), Korkmaz et al. (2009) e Alvarenga et al. (2012) realizaram estudos sobre a pirólise de embalagens Tetra Pak em atmosfera inerte de nitrogênio. Os autores mostraram que no processo, além de alumínio puro e parafina, é possível obter carvão com alto poder calorífico e baixo teor de cinzas a partir do papel.

2.2 O Leito de Jorro

2.2.1 Aspectos gerais

O leito de jorro original foi desenvolvido em 1954 no Canadá, por Gishler e Mathur, durante suas pesquisas visando à otimização de um secador de leito fluidizado para grãos de trigo. Utilizando-se a técnica de jorro, os autores puderam aplicar na secagem do trigo uma vazão de ar quente superior à utilizada nos métodos convencionais existentes na época, sem gerar danos ao grão (EPSTEIN; GRACE, 2011). Por meio de novos estudos, os autores puderam expandir a aplicação do leito de jorro que passou a ser empregado em sistemas compostos por partículas de difícil fluidização, isto é, partículas com diâmetro superior a 1 mm, e em processos que requerem um eficiente contato gás-sólido como a secagem de pastas e suspensões (PASSOS et al., 1998).

Estudos posteriores demonstraram que o leito de jorro possui características peculiares que tornava inadequada sua classificação como uma versão modificada do leito fluidizado, sendo a principal delas a execução de operações cíclicas em partículas sólidas.

O leito de jorro na forma como foi concebido, conhecido atualmente como leito de jorro convencional, consiste de um vaso cilíndrico carregado com uma determinada carga de partículas, cuja base geralmente possui geometria cônica, que é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. O sistema pode ser dividido em três regiões: a região anular, o jorro e a fonte, conforme ilustrado na Figura 2.3.

O princípio de funcionamento de um leito de jorro consiste na injeção de ar por um orifício situado na região central da base cônica. Se a taxa de injeção do fluido for suficientemente alta, uma corrente ascendente de partículas é formada acompanhando o movimento do fluido através de uma cavidade localizada no centro do leito de sólidos denominado jorro. A região de jorro caracteriza-se por ter uma baixa concentração de sólidos. As partículas lançadas verticalmente atingem uma determinada altura na região de fonte e então invertem o sentido do seu movimento, caindo na forma de fonte sobre a região anular, situada entre a região

de jorro e a parede da coluna que forma o leito. A região anular caracteriza-se pela por uma alta concentração de sólidos. Nesta, as partículas iniciam um movimento descendente, contracorrente ao fluido, que prossegue até que elas atinjam a região de jorro, sendo novamente lançadas verticalmente. A repetição sistemática dessa trajetória ascendente e descendente percorrido pelas partículas no interior do equipamento dá origem ao movimento cíclico de sólidos característico do leito de jorro.

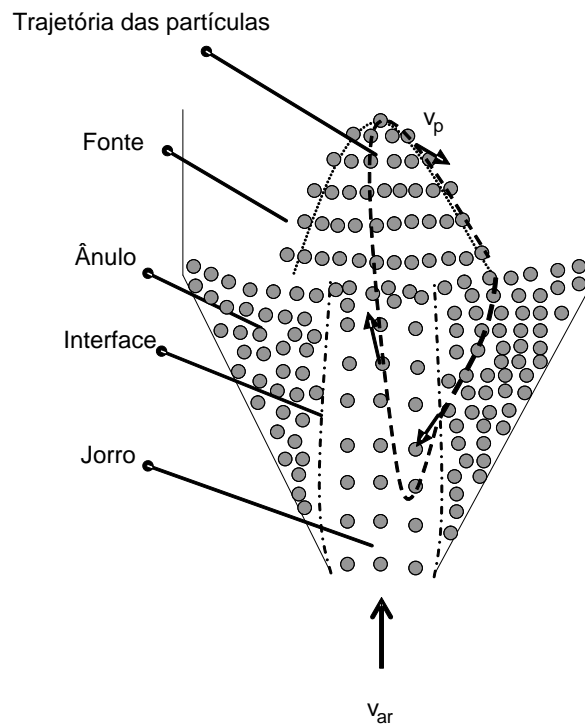


Figura 2.3 – Esquema de um leito de jorro.

Fonte: Bacelos; Freire (2009).

Tal padrão de movimentação produz um efetivo contato gás-sólido, o qual, por sua vez, induz elevadas taxas de transferência de massa e energia. Além destas vantagens, o baixo investimento inicial e custo operacional vêm incentivando pesquisas para a aplicação do leito de jorro em diversas áreas da indústria como a secagem de pastas (BENELLI; SOUZA; OLIVEIRA, 2013) e sólidos particulados (BEZERRA et al., 2013), o recobrimento de partículas (MARTINS et al., 2008) e a extração mecânica de substâncias (BARROZO; SANTOS; CUNHA, 2013).

Recentemente, o leito de jorro vem sendo utilizado em processos reativos tais como a gaseificação, combustão e pirólise. A aplicação dessas três tecnologias em reatores de leito de jorro vem ganhando cada vez mais importância no cenário ambiental e energético, uma vez que possibilitam o reaproveitamento de materiais como biomassa, resíduos sólidos e lodo de esgoto que, em geral, servem como matéria-prima para obtenção de energia.

A seguir são apresentados alguns trabalhos recentes que tratam da aplicação da técnica de leito de jorro em processos de gaseificação, combustão e pirólise.

Gaseificação

- Paterson et al. (2004) estudam a composição do alcatrão gerado na pirólise do lodo de esgoto em um reator de leito de jorro. Os autores observam que a quantidade de alcatrão obtida no processo é pequena, indicando que os voláteis contidos na amostra de lodo de esgoto foi eficientemente craqueada nas condições de operação do gaseificador.
- Bernocco, Bosio e Arato (2012) analisam a viabilidade da construção de uma planta de gaseificação de biomassa utilizando-se um reator de leito de jorro cônico para a geração de energia distribuída. Os autores avaliam que uma planta com capacidade nominal de geração de 100 kW é viável tecnicamente.

Combustão

- Rasul (2001) investiga a eficiência do processo de combustão de carvão vegetal em leito de jorro utilizando três configurações de entrada de ar no leito. O autor mostra que a entrada de ar do tipo fenda circular proporciona o maior contato gás-sólido e a menor emissão de monóxido de carbono (CO).
- Albina (2006) realiza um estudo sobre as emissões de CO e CO₂ em reator de leito de jorro, utilizando diferentes configurações do equipamento e empregando casca de arroz como combustível. O autor observa que com um determinado tipo de configuração do leito de jorro é possível obter maior eficiência na combustão e menor emissões de CO.

Pirólise

- Olazar et al. (2010) realizam um estudo comparativo sobre a aplicação de um reator de leito de jorro cônico operando em diferentes regimes (contínuo e batelada) na pirólise de resíduos de pneus. Os autores avaliam que a operação do leito em regime contínuo apresenta vantagens em relação ao modo batelada.
- Arabiourrutia et al. (2012) investigam a viabilidade da aplicação do leito de jorro cônico como reator na pirólise de plásticos (poliolefinas). Os autores observam que as ceras produzidas são formadas basicamente por hidrocarbonetos parafínicos longos que podem ser aproveitados como matéria-prima em unidades de craqueamento. O estudo mostra, também, que o leito de jorro cônico é uma alternativa viável para a produção de elevadas quantidades de cera a baixas temperaturas.
- Olazar et al. (2012) avaliam a influência da temperatura na pirólise rápida da serragem da madeira de pinheiro em leito de jorro cônico. Os autores mostram que a temperatura exerce grande efeito na composição do produto obtido e que o bio-óleo produzido pode ser utilizado como combustível.
- Olazar et al. (2013) estudam a viabilidade do bio-óleo obtido por meio da pirólise rápida em leito de jorro a partir de biomassa composta por resíduos florestais (determinados tipos de arbustos) da região central de Portugal. Os autores observam que o leito de jorro é capaz de suportar os sistemas compostos pelos resíduos de biomassa com texturas irregulares e que o bio-óleo produzido pode ser utilizado como matéria-prima em biorefinarias.

2.2.2 Leitos de jorro não convencionais

Apesar de suas vantagens, o leito de jorro convencional apresenta algumas limitações citadas por Mujumdar (2006):

- dificuldades na ampliação de escala;
- elevada queda de pressão para o estabelecimento de um jorro estável;

- existência de uma altura máxima de leito que limita a carga do equipamento;
- fluxo de gás limitado mais pelas exigências de formação de um jorro estável do que pelas trocas de calor e massa.

Com o intuito de superar as limitações da técnica de leito de jorro e expandir sua aplicação, o leito de jorro convencional vem sofrendo diversas modificações e adaptações em sua configuração, dando origem a diferentes tipos, dentre os quais se destacam:

- Leito de jorro aerado: a porção cônica do leito recebe uma vazão auxiliar, promovendo um aumento na porosidade nesta região, aumentando a eficiência dos processos de transferência de calor e massa.
- 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.
- Leito vibro-jorrado: a movimentação das partículas é auxiliada pela agitação oriunda de um sistema de vibração mecânica localizada na base do leito.
- Leito de jorro cônico: tem como principal característica a ausência de partículas na região cilíndrica, verificando-se somente a presença de partículas na região cônica. Tal característica permite uma maior flexibilidade da altura de leito estático quando comparado ao leito de jorro cônico-cilíndrico. No equipamento tradicional, a altura de leito estático é limitada por problemas de estabilidade. Outra vantagem do leito de jorro cônico é que, utilizando-se sistemas com monopartículas e uma carga menor de sólidos (menor altura de leito estático) estes leitos 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*.

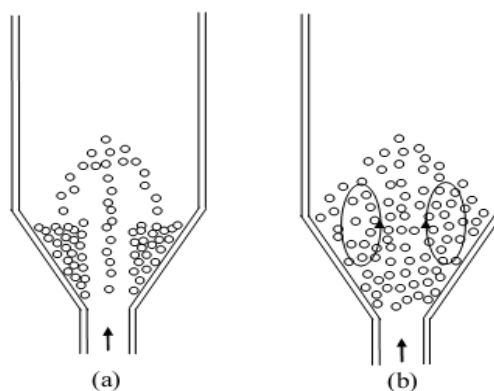


Figura 2.4 – Leitos de jorro cônicos: (a) convencional (b) *Jet Spouted Bed*.

Fonte: Béttega (2009).

- Leito de jorro com tubo interno (tubo *draft*): Consiste na inserção de um tubo vertical no centro do equipamento, na região de jorro de um leito convencional. Este tubo proporciona de uma maior flexibilidade de operação e jorros estáveis para menores vazões de gás. A inserção deste tubo direciona o ar para a região central de jorro, permitindo o estabelecimento de jorro com menores quedas de pressão. Além disso, obtém-se um melhor controle da circulação de sólidos no interior do equipamento, evitando um fenômeno típico do leito de jorro conhecido como “curto circuito”. Este fenômeno é caracterizado pelo arraste prematuro de partículas localizadas próximas ao canal de jorro, evitando que as mesmas continuem seu movimento descendente na região anular em direção à base do leito. Este movimento é fundamental para uma circulação homogênea das partículas no equipamento (BÉTTEGA, 2009). As desvantagens decorrentes da colocação de um tubo *draft* são a menor permeação de ar na região anular e a consequente diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, fatores que podem limitar a aplicação deste tipo de leito em operações como a secagem e recobrimento. Para contornar estes problemas um tubo *draft* poroso pode ser utilizado. Por meio deste dispositivo é possível alcançar uma melhor aeração da região anular e reduzir os problemas da redução das taxas de transferência e calor, e, ainda, manter uma boa homogeneização na circulação das partículas.

2.2.3 Fluidodinâmica do Leito de jorro

O comportamento fluidodinâmico do leito de jorro pode ser caracterizado por meio de um gráfico da queda de pressão através do leito em função da velocidade superficial do fluido, conhecido como curva característica do leito de jorro e ilustrado na Figura 2.5. Esta curva representa o mecanismo de transição de um leito estático a um leito em regime de jorro. As etapas deste mecanismo de transição encontram-se ilustradas na Figura 2.6 e são descritas pela sequência a seguir (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

- 1) O gás a baixas velocidades apenas percola o leito de partículas, sem perturbá-las, ocasionando um aumento da queda de pressão praticamente linear com o incremento da velocidade do gás (trecho AB);
- 2) Ao se atingir uma determinada velocidade de gás, inicia-se o arraste das partículas localizadas na vizinhança de entrada do leito, formando uma pequena cavidade vazia pouco acima desta entrada. As partículas em torno desta cavidade são comprimidas contra o restante do leito, formando um arco compacto que oferece uma resistência maior para o fluido escoar e faz com que a queda de pressão do leito continue a aumentar (Figura 2.6a);
- 3) Aumentando-se a velocidade do gás, a cavidade evolui para um jato interno (Figura 2.6b). A compactação do arco de sólidos acima do jorro interno aumenta a tal ponto que a queda de pressão através do leito atinge o valor máximo (ΔP_{\max}) no ponto B. Nesse ponto, a velocidade é denominada velocidade de mínimo jorro para velocidades crescentes (U_M).
- 4) Se a velocidade do gás é aumentada, a queda de pressão diminui (trecho BC). Tal fato ocorre porque a altura do jorro interno se torna grande em comparação com os sólidos empacotados acima do jorro, diminuindo a resistência ao escoamento do gás.
- 5) Próximo ao ponto C, nota-se uma expansão significativa do leito proporcionada pelo deslocamento de sólidos da região central. Esta expansão do leito causa uma diminuição da queda de pressão.
- 6) Com um pequeno incremento da velocidade do gás, atinge-se o jorro incipiente (ponto C). Nesta região da curva podem ocorrer oscilações acentuadas de pressão devido ao surgimento ocasional do jorro no topo leito.

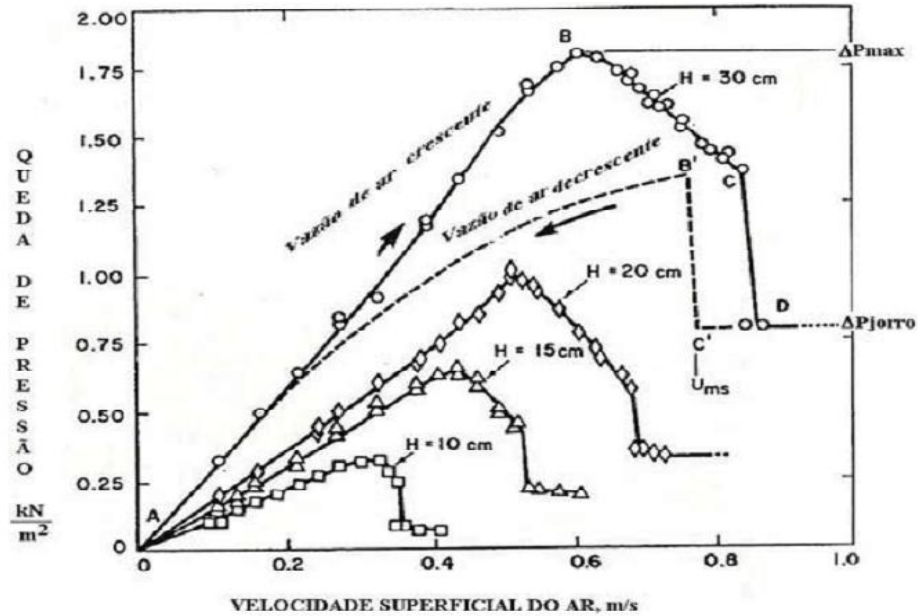


Figura 2.5 – Curva característica do leito de jorro.

Fonte: Mathur; Epstein (1974).

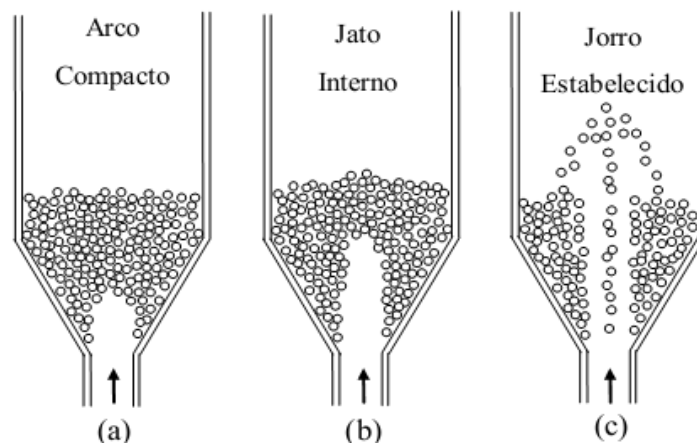


Figura 2.6 – Etapas no desenvolvimento de um regime de jorro: (a) arco compacto (b) jato interno (c) jorro desenvolvido.

Fonte: Béttega (2009).

- 7) Com apenas um pequeno acréscimo na vazão de gás além do ponto C, o jorro interno rompe a superfície do leito. A concentração de sólidos na região acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma considerável redução na queda de pressão para o ponto D, no qual se dá início o regime de jorro contínuo (Figura 2.6c).

- 8) A partir do ponto D, o aumento da velocidade de gás causa elevação da fonte sem variações significativas da queda de pressão (ΔP_{jorro}). A quantidade adicional de fluido simplesmente atravessa a região de jorro, uma vez que esse representa o trajeto que oferece menor resistência ao escoamento.

Com velocidades de gás decrescentes, a altura da fonte diminui até o ponto de velocidade de jorro mínimo (U_{MS}) representado na Figura 2.5 pelo ponto C'. O decréscimo gradual da vazão de gás a partir desse ponto leva ao colapso do jorro, causando um aumento repentino na queda de pressão para o ponto B'. A velocidade de mínimo jorro é definida como a velocidade mínima de gás capaz de romper o leito de partículas e formar o jorro, a uma pressão considerada constante. Esta pressão constante no interior do leito é definida como queda de pressão de mínimo jorro (ΔP_{mj}). Com a diminuição da velocidade de gás a queda de pressão decresce continuamente ao longo do trecho B'A. Verifica-se que existe uma histerese entre as curvas características para velocidades crescentes e decrescentes, com a curva para velocidades decrescentes se situando numa posição abaixo daquela para velocidades crescentes. Isso ocorre devido ao fato de não haver perda de energia associada ao rompimento do leito pelo jato de gás quando é utilizado o processo de velocidade decrescente.

A velocidade de jorro incipiente e o início do jorro dependem da história do leito, isto é, do estado inicial de compactação do leito e por isso não são exatamente reproduzíveis, visto que a porosidade inicial do leito afeta diretamente essas medidas. Desta forma, a condição de mínimo jorro é obtida por meio do decréscimo gradual e progressivo da vazão de gás a partir do leito remanescente do estado de jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

O estudo fluidodinâmico é fundamental no projeto e *scale-up* do leito de jorro. A partir das curvas características de um leito de jorro podem-se determinar parâmetros fluidodinâmicos importantes como as condições de mínimo jorro e a máxima queda de pressão no leito. Outros parâmetros relevantes nesse estudo são a altura de leito estável e o formato e diâmetro médio do jorro.

Em um projeto de leito de jorro, a queda de pressão máxima pode ser usada no cálculo da potência do soprador necessária para se atingir o regime de jorro estabelecido. A queda de pressão de jorro estável juntamente com a velocidade de

mínimo jorro determinam a potência e operação do leito. A altura de leito estável determina a altura máxima do leito em que é possível se obter um sistema estável, sem que ocorra fluidização heterogênea ou movimento empistonado.

Estudos sobre o formato e o diâmetro do jorro também são realizados desde a concepção do equipamento. Quando o leito de jorro atinge o regime de jorro estável, a região de jorro adquire um formato estável, que depende das condições de operação do leito. A Figura 2.7 apresenta os formatos de jorro obtidos em diferentes condições experimentais por Mathur e Epstein (1974).

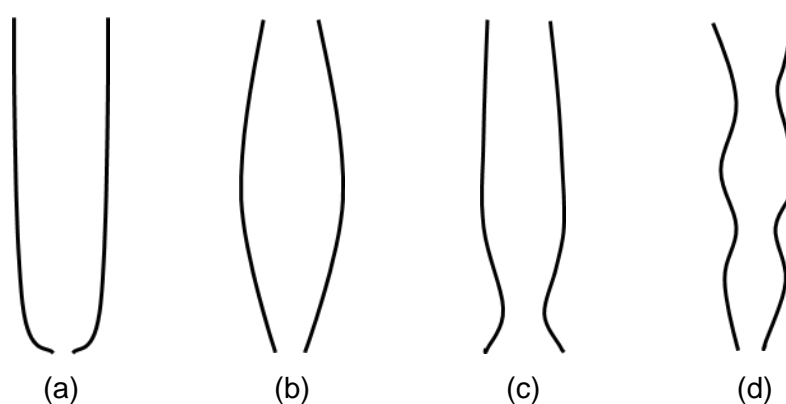


Figura 2.7 – Principais formatos de jorro de acordo com Mathur e Epstein (1974).
Fonte: Mathur; Epstein (1974).

De um modo geral, os parâmetros fluidodinâmicos são afetados por fatores como geometria da coluna, propriedades e dimensões das partículas e pela carga de sólidos no leito.

Além do conhecimento desses parâmetros, o conhecimento do comportamento dos sólidos no interior do leito de jorro é de suma importância para o projeto deste equipamento, pois a trajetória dos sólidos deve atender às exigências do processo durante a operação. Segundo Olazar et al. (2001) a modelagem do escoamento de sólidos no interior do leito de jorro pode ser realizada por meio de estudos experimentais sobre a velocidade de sólido em diferentes alturas do leito.

Olazar et al. (2001) realizaram medidas de velocidade das partículas na região anular, jorro e fonte utilizando-se uma sonda de fibra ótica. Os autores estudaram ainda o efeito das condições operacionais e da geometria do leito na velocidade

destas partículas. Com base nos resultados obtidos para os componentes vertical e horizontal de velocidade, Olazar et al. (2001) calcularam o vetor velocidade de sólidos em diferentes posições do leito. A Figura 2.8 apresenta os mapas do vetor de velocidade obtidos pelos autores. Os resultados encontrados para as três regiões estão resumidos a seguir.

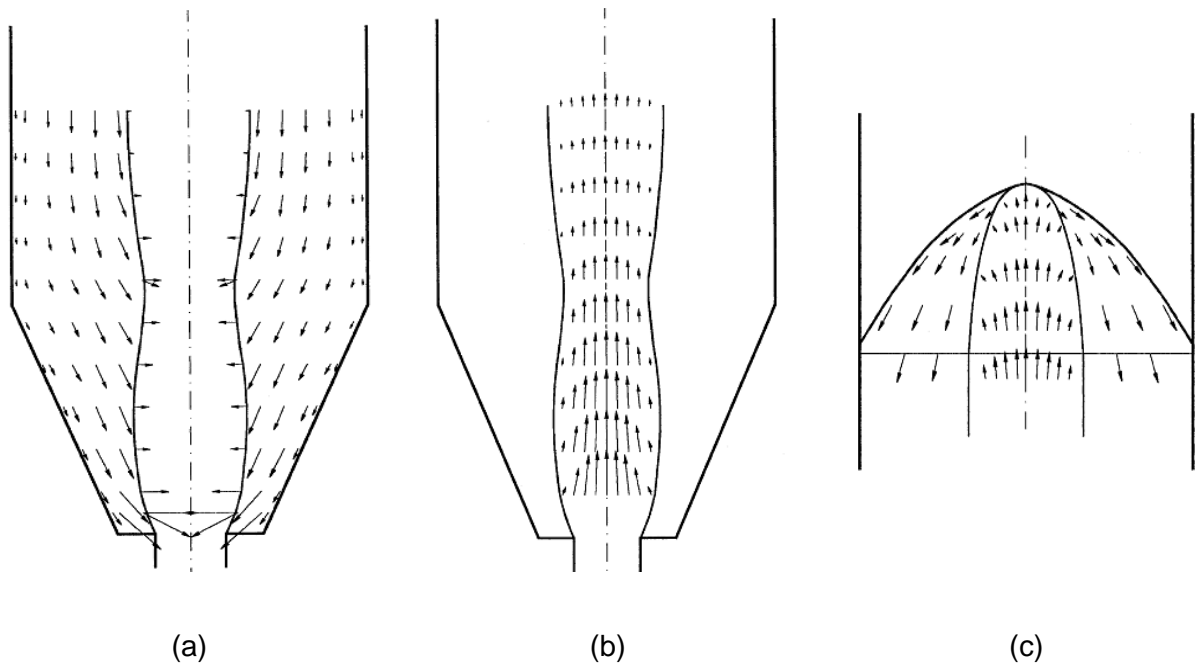


Figura 2.8 – Mapa do vetor de velocidades de sólidos: (a) região anular; (b) região de jorro; (c) fonte.
Fonte: Olazar et al. (2001).

Região anular

O componente vertical da velocidade de partículas aumenta de zero na interface na interface jorro-ânulo para um valor máximo em uma dada posição axial e diminui a partir desse ponto até atingir um valor característico próximo à parede do leito. Segundo alguns autores (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN, 2011), esse valor é aproximadamente o da velocidade média das partículas na região anular.

O componente horizontal de velocidade apresentam valores da mesma ordem de magnitude daqueles obtidos para o componente axial da velocidade. Os maiores valores da componente horizontal de velocidade são encontrados na interface jorro-ânulo da seção cônica do leito. Seu valor máximo decresce de maneira acentuada

da interface até a parede do leito. Na seção cilíndrica do leito, a componente horizontal da velocidade diminui e atinge um valor próximo de zero na superfície.

Região de jorro

A componente vertical de velocidade da partícula decresce de um valor máximo no eixo de simetria do leito para zero na interface da região jorro-ânulo, em toda a altura do leito. Os perfis radiais da componente axial de velocidade dos sólidos são parabólicos e se achatam à medida que a superfície do leito é atingida.

As componentes horizontais de velocidade são nulas no eixo de simetria do leito e apresentam uma tendência de comportamento até a região de interface jorro-ânulo que varia de acordo com a altura no leito. Perto da base do leito, as componentes horizontais aumentam seguindo um perfil parabólico para atingir um valor máximo em uma posição radial intermediária entre o eixo e a interface jorro-ânulo. Perto da superfície do leito, a componente horizontal de velocidade muda de direção e as partículas atingem um mínimo de velocidade próximo à região de interface.

Fonte

Olazar et al. (2001) dividem a fonte em duas regiões distintas: o núcleo (zona de ascensão as partículas) e periferia (zona de queda das partículas).

No núcleo e na periferia da fonte, a componente vertical da velocidade diminui no sentido do topo da fonte e aumenta no sentido radial. No núcleo, o módulo da componente horizontal da velocidade cresce ao longo do raio, partindo de um valor igual a zero no eixo até atingir seu valor máximo na interface núcleo-periferia. Na periferia da fonte, o módulo da componente horizontal aumenta em direção à superfície externa da fonte e também ao longo da altura da fonte.

Para leitos de jorro cônicos, San José et al. (1995) apresentaram o mapa dos vetores de velocidade do ar, conforme mostra esquematicamente a Figura 2.9. Para uma dada posição no leito (z), os vetores velocidades (isto é, as velocidades intersticiais) apresentam um perfil quase plano com a direção radial no jorro, tornando-se parabólico com a direção radial no ânulo. Para uma dada posição radial (r), os vetores velocidades diminuem com o aumento da direção z . Dessa forma, as maiores componentes da velocidade do ar encontram-se na base do leito.

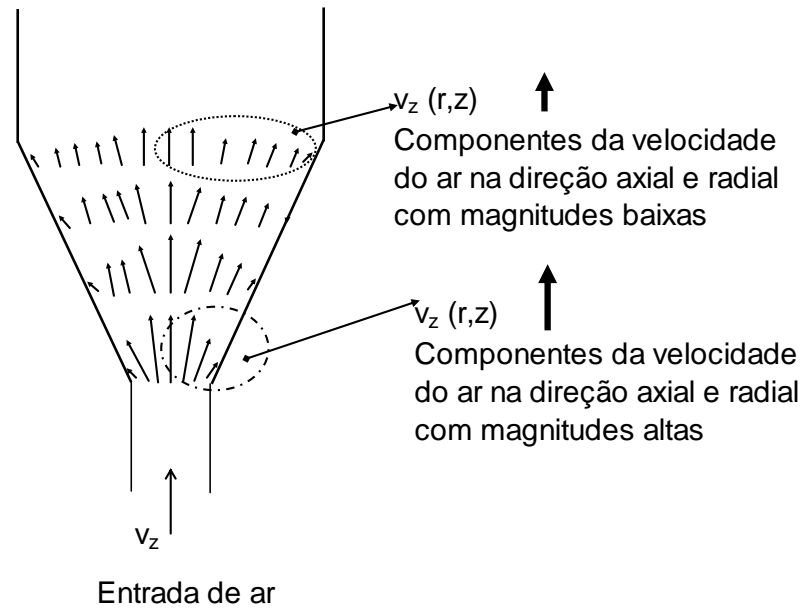


Figura 2.9 – Representação esquemática do mapa de velocidade de ar para leitos de jorro cônicos.
Fonte: San José et al. (1995).

2.2.4 Fluidodinâmica da mistura de partículas em leito de jorro

Por causa dos baixos índices de segregação, o leito de jorro vem sendo aplicado em diversas operações da indústria envolvendo sistemas de partículas com distribuição de tamanhos ou mistura de diferentes partículas, tais como secagem (BENELLI; SOUZA; OLIVEIRA, 2013), granulação (BORINI; ANDRADE; FREITAS, 2009), polimerização catalítica (NIÑO et al., 2007), craqueamento catalítico (SAN JOSÉ et al., 2009), pirólise (OLAZAR et al., 2009).

No caso da pirólise, material inerte, geralmente areia, é adicionado ao leito de partículas com o intuito de aumentar a estabilidade do leito de jorro e facilitar o aquecimento do material pirolisável. Dessa forma, é fundamental que o equipamento opere em uma condição que mantenha um bom nível de mistura das partículas.

Como nos sistemas monodispersos, no leito de jorro operando com uma mistura binária de partículas com tamanho e/ou densidade diferentes, pode ocorrer a segregação das partículas. Assim, torna-se fundamental o conhecimento da fluidodinâmica de misturas de partículas em leito de jorro para o projeto de reatores de pirólise de leito de jorro.

A fluidodinâmica de misturas de partículas em leito de jorro é altamente afetada pelas propriedades das partículas, como a densidade e o tamanho, principalmente. Com base nessas duas propriedades, as misturas binárias são classificadas e estudadas:

- (a) Segregação da mistura binária por densidade: partículas de mesmo tamanho e densidades diferentes.
- (b) Segregação da mistura binária pelo tamanho: partículas de tamanhos diferentes e densidades iguais.
- (c) Segregação da mistura binária por tamanho e densidade: tamanho e densidade diferentes.

Nos anos 70 e 80, estudos de segregação foram realizados em leitos cilíndricos de base cônica com o objetivo de determinar a trajetória das partículas e seus respectivos tempos de ciclos, definidos como os intervalos de tempo em que as partículas percorrem uma trajetória a qual se inicia no topo do ânulo e se encerra onde começa o jorro (COOK; BRIDGWATER, 1978; ROBINSON; WALDIE, 1978). Mais tarde, o trabalho de Olazar et al. (1993) despertou um grande interesse em quantificar a segregação de misturas binárias e ternárias para uma ampla faixa de diâmetro de partícula, isto é, $1 < d_p < 8$ mm. Os autores mostraram a capacidade do leito de jorro cônico em processar uma grande variedade de misturas binárias de partículas de inertes em regime de jorro estável e com baixos níveis de segregação, aumentando assim, o seu potencial de aplicação (BACELOS, 2006).

A segregação ocorre principalmente devido à diferença de velocidade terminal das partículas (ISHIKURA; SHINOHARA; TANAKA, 1983). Segundo Grace et al. (2006), as partículas maiores e mais densas possuem um tempo de recirculação menor devido à uma trajetória mais curta. Essas partículas são arrastadas pelo o ar na região de jorro, sobem a uma altura menor na fonte e caem mais distantes da parede do leito, em uma região mais interna da região anular.

Grace et al. (2006) afirmam que a colisão das partículas na região de fonte pode ser considerada o principal fator da segregação. As colisões afetam a trajetória das partículas na região de fonte promovendo um espalhamento das partículas, que é mais pronunciado nas partículas menores do que nas maiores.

Para o leito de jorro cônico com distribuição de tamanho de partículas esféricas de mesma massa específica, Bacelos et al. (2007), baseado em observações visuais, verificaram que na região de fonte as partículas percorrem uma trajetória aproximadamente parabólica em movimento desacelerado, alcançam uma altura máxima e caem aceleradas, atingindo a superfície da região anular. O deslocamento de cada partícula na direção radial depende da sua inércia, ou seja, quanto menor o diâmetro da partícula maior é o seu deslocamento na direção radial uma vez que se trata de partículas de mesma densidade. Os autores concluíram que o fenômeno de segregação, caracterizado pela variabilidade de concentração de partículas de tamanho diferentes ao longo da coluna cônica, é predominantemente governado pela ação da inércia das partículas, da força gravitacional e interpartícula sobre as mesmas.

3 MODELAGEM

3.1 Aspectos gerais

A Fluidodinâmica computacional (CFD – *Computacional Fluid Dynamics*) baseia-se na solução de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia através de métodos numéricos. A técnica de CFD vem sendo amplamente aplicada à solução de problemas de escoamento multifásicos. Atualmente, existem duas principais abordagens físico-matemáticas para a modelagem de sistemas multifásicos compostos por fases granulares: a abordagem Lagrangiana (discrete element method – DEM) e a abordagem Euleriana (two fluid model – TFM).

Na abordagem Lagrangiana a fase fluida é tratada como contínua pela resolução das equações de *Navier-Stokes*, enquanto que na fase dispersa cada partícula é tratada discretamente e a sua trajetória mapeada individualmente. Na abordagem Lagrangeana o esforço computacional cresce acentuadamente com o aumento do número de partículas da fase dispersa. Tal fato limita a aplicação do modelo DEM a sistemas diluídos, nos quais a fase dispersa ocupa uma baixa fração volumétrica (geralmente menor 10-12%). Desta forma, a abordagem Lagrangiana torna-se inapropriada para a modelagem de sistemas multifásicos ar-sólido nos quais a fração volumétrica da fase sólida não pode ser negligenciada, como acontece em leitos de jorro.

A abordagem Euleriana trata as diferentes fases como contínuas e interpenetrantes, isto é, o volume de uma fase não pode ser ocupado pelas outras. Desta descrição do escoamento multifásico surge o conceito de fração volumétrica das fases que representa o espaço ocupado por cada fase do sistema, cuja soma da fração volumétrica de cada fase é igual a um. As leis de conservação de massa e momento são satisfeitas para cada fase individualmente. Ao conjunto das equações governantes de massa e momento, acrescentam-se as equações constitutivas que são obtidas a partir de informações empíricas, ou, no caso do escoamento granular, pela aplicação da teoria cinética granular. Diversos estudos têm demonstrado que o modelo Euleriano é capaz de prever adequadamente o comportamento

fluidodinâmico de leitos móveis como, por exemplo, o leito de jorro (HUILIN et al., 2001; SANTOS, 2008; BÉTTEGA et al., 2009).

O software comercial ANSYS FLUENT 13.0 disponibiliza três diferentes modelos sob a abordagem Euleriana aplicáveis a escoamentos multifásicos: o Modelo de Volume de Fluidos, o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano. Dentre estes modelos multifásicos, recomenda-se a aplicação do Modelo Euleriano em sistemas de contato gás-sólido como leitos fluidizados e leitos de jorro (ANSYS FLUENT Theory Guide, 2010), embora o Modelo de Mistura, também, possa ser aplicado a tais sistemas. O Modelo Euleriano resolve um conjunto de 'n' equações de momento e da continuidade para cada fase, enquanto o Modelo de Mistura resolve uma equação de momento e continuidade para a mistura, independente do número de fases do sistema. Além disso, as interações entre as fases no Modelo de Mistura seguem formulações algébricas que são mais simples que as relações utilizadas pelo Modelo Euleriano.

3.2 Modelo Euleriano

Com base na análise do modelo Euleriano e nas características intrínsecas do escoamento ar-partícula em leito de jorro, o problema, pode ser modelado mediante as principais considerações:

- Geometria esférica;
- Regime transiente;
- Escoamento multifásico composto por fases contínuas;
- Transporte de quantidade de movimento bidimensional (r e z), com as seguintes contribuições para cada uma das fases envolvidas: taxa de acúmulo de quantidade de movimento por mecanismo convectivo, gradiente de pressão no escoamento, transferência de quantidade de movimento pelo mecanismo molecular, força de campo gravitacional, transferência de

momento entre as fases bem como ao transporte de momento devido a transferência de massa;

- Forças de ascensão e mássica virtual são desprezadas;
- Sem reação química.

As principais equações governantes (T1-1 a T1-6) e equações constitutivas (T2-1 a T2-12) do Modelo Euleriano empregadas são mostradas na Tabela 3.1 e a Tabela 3.2. Nota-se que para escoamentos gás-sólido, além dos coeficientes de troca de momento, o Modelo Euleriano introduz duas novas equações que são utilizadas no acoplamento com a equação de conservação de momento da fase sólida: a pressão de sólido e o tensor de sólidos.

A pressão de sólidos (T2-1 e T2-2), p_s , é usada para o termo do gradiente de pressão, ∇p_s , presente na equação do momento da fase granular (T1-5), e é composta por um termo cinético e de um segundo termo que surge em virtude das colisões das partículas. Outra equação constitutiva introduzida pelo Modelo Euleriano granular é o tensor tensão de sólidos (T2-3), $\bar{\tau}_s$, que provém da troca de momento devido à translação e à colisão das partículas, e contém a viscosidade cisalhante (T2-4 e T2-5), μ_s , e a viscosidade *bulk* (T2-6), λ_s . A pressão de sólidos e as viscosidades são funções da temperatura granular (T1-6), θ_s , e da função de distribuição radial (T2-7 e T2-8), g_0 . A temperatura granular é proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas, e funciona como uma medida da flutuação de velocidade das partículas. A função de distribuição radial pode ser interpretada como a distância adimensional entre as partículas. Os conceitos de pressão de sólidos e temperatura granular são introduzidos pela Teoria Cinética Granular, teoria desenvolvida por Lun et. al. (1984) a partir da Teoria Cinética dos Gases.

Como descrito por Bacelos e Freire (2009), nos leitos de jorro cônicos, o regime de jorro estável é mantido pela ação da força de arraste, que surge pelo escoamento do ar no leito e não é balanceada pela força da gravidade sobre as partículas e, também, por qualquer outra força interpartícula existente no leito. Dessa maneira, pela ação da força inercial, o movimento contínuo e cíclico das partículas é estabelecido dentro da coluna cônica, caracterizando o regime de jorro.

Tabela 3.1 – Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro

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

Uma consideração comum, feita em relação à equação de conservação de momento (T1-4 e T1-5), é negligenciar a força de ascensão e a força mássica virtual e considerar apenas as forças da gravidade e de arraste. Na maioria dos casos, a força de ascensão (que age sobre a fase secundária devido aos gradientes de velocidade no campo de escoamento da fase primária) é insignificante quando comparada à força de arraste. A força mássica virtual surge quando a fase secundária granular acelera em relação à fase primária fluida, e se torne importante quando a densidade da fase secundária é significativamente menor do que a densidade da fase primária.

Baseado nas características previamente descritas dos leitos de jorro cônicos, a força de ascensão e a força mássica virtual podem ser negligenciadas. Consequentemente, a força de arraste e a força da gravidade representam as principais forças atuantes no leito de partículas durante o regime de jorro.

Tabela 3.2 – Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro

Equações constitutivas	
4.	<i>Modelos de pressão de sólidos</i>
(a)	Lun et al. (1984) $p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s$ (T2-1)
(b)	Syamlal et al. (1993) $p_s = 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s$ (T2-2)
5.	<i>Tensor tensão de sólidos</i> $\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \left(\alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I}$ (T2-3)
6.	<i>Viscosidade cisalhante</i>
(a)	Gidaspow et al. (1992) $\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s + \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right]$ (T2-4)
(b)	Syamlal et al. (1993) $\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} (1 + e_{ss}) \alpha_s g_{0,ss} \right]^2 \alpha_s$ (T2-5)
7.	<i>Viscosidade bulk</i> $\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2}$ (T2-6)
8.	<i>Distribuição radial</i>
(a)	Lun et al. (1984) $g_{0,ii} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_i \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{d_k}$ (T2-7)
(b)	Syamlal et al. (1993) $g_{0,ki} = \left(\frac{1}{1 - \alpha_s} \right) + 3 \left(\sum_{k=1}^N \frac{a_k}{d_k} \right) \frac{d_k d_i}{(1 - \alpha_s)^2 (d_k + d_i)}$ (T2-8)
9.	<i>Modelos de arraste</i>
(f)	Gidaspow et al (1992) (coeficiente de troca gás-sólido) $\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g \vec{v}_s - \vec{v}_g }{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad \alpha > 0,8$ (T2-9)
	$\beta = 150 \frac{\alpha_s (\alpha_g - 1) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g \vec{v}_s - \vec{v}_g }{d_s}, \quad \alpha \leq 0,8$ (T2-10)
(g)	Syamlal et al. (1989) (coeficiente de troca gás-sólido) $\beta = \frac{3 \alpha_s \alpha_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} C_D \frac{d_s \alpha_g \rho_g \vec{v}_s - \vec{v}_g }{v_{r,s}}$ (T2-11)
(h)	Syamlal et al. (1987) (coeficiente de troca sólido-sólido) $\beta = \vec{v}_s - \vec{v}_g \frac{3(1 + e_{gs}) \left(\frac{\pi}{2} + C_{fr,gs} \cdot \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_s \rho_s \alpha_g \rho_g (d_s + d_g)^2 g_{0,gs}}{2\pi(\rho_g d_g^3 + \rho_s d_s^3)}$ (T2-12)

Para o Modelo Euleriano, o acoplamento das equações de momento de cada fase do sistema depende da força de arraste, que representa a força de interação entre as fases, e é função do coeficiente de troca de momento, β . Du et al. (2006a) estudaram o efeito da escolha dos diferentes modelos de arraste nas simulações CFD em leitos de jorro e constataram que os modelos de Gidaspow (T2-9 e T2-10) e de Syamlal-O'Brien (T2-11 e T2-12) podem prever qualitativamente o regime fluidodinâmico característico dos leitos de jorro.

Por fim, além das pesquisas citadas anteriormente, diversos estudos sobre a modelagem CFD de leitos de jorro (DU et al., 2006b; WANG; BI; LIM, 2006; SOBIESKI, 2008; DÍAZ et al., 2008; HOSSEINI; ZIVDAR; RAHIMI, 2009) foram utilizados como suporte na escolha dos parâmetros de simulação empregados nesta pesquisa. Estes são apresentados na seção 5 deste trabalho.

3.2.1 Condições de contorno e inicial

A Figura 3.1 apresenta um esquema do sistema sob análise. Este constitui-se de um meia coluna cônica, onde há o escoamento ar-partícula característico do regime de jorro. Nesta, também, são evidenciados os pontos 1, 2, 3 e 4, os quais tratam das condições de contorno necessárias à solução do modelo apresentado na Tabela 3.1.

Especificamente, tais condições são definidas como:

(1) Na entrada do leito:

- o ar é injetado na direção axial com um perfil plano de velocidade;
- a velocidade de sólidos é nula.

(2) Na fonte:

- os gradientes axiais de velocidade para as duas fases são nulos e a pressão é atmosférica.

(3) Simetria:

- Eixo de simetria axial (eixo x), com gradientes radiais de temperatura granular e de velocidade para as duas fases (sólida e gasosa) nulos.

(4) Paredes:

- Condição de não deslizamento para ambas as fases.

Leito de partículas:

- Altura de leito estático definida de 0,18 m;
- Porosidade definida para cada mistura de acordo com as Tabelas 6.2 e 6.3.

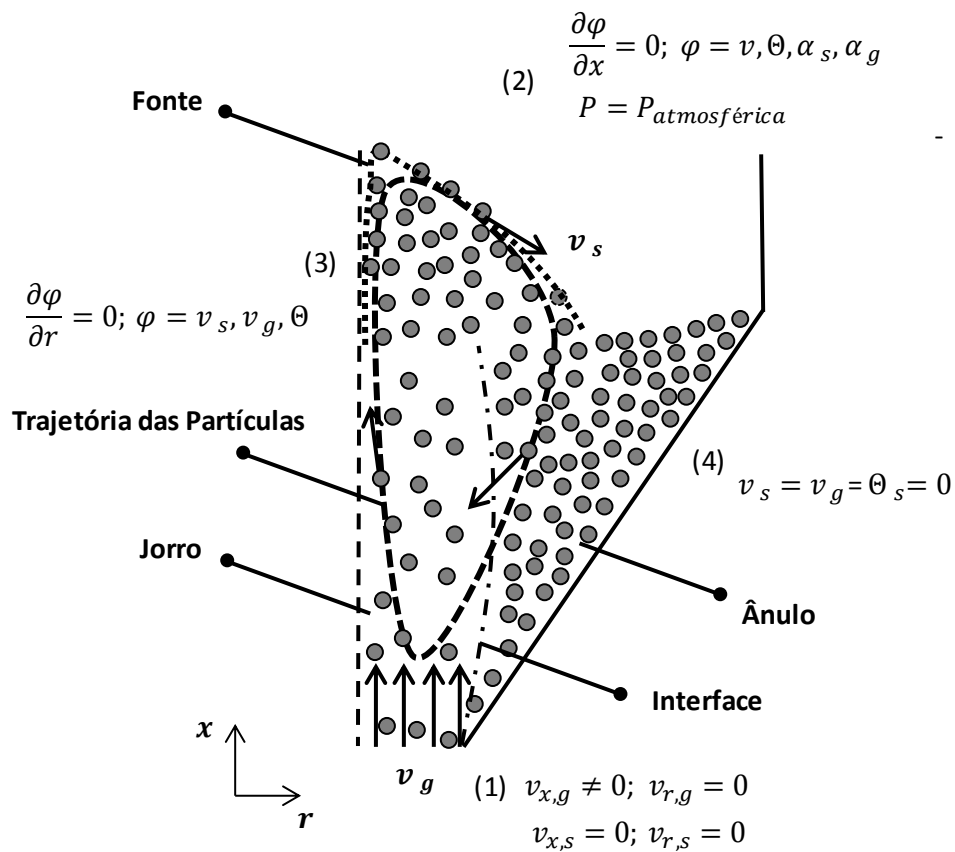


Figura 3.1– Condições de contorno do problema em estudo.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Caracterização das partículas e misturas

Para a obtenção dos dados de fluidodinâmica no leito de jorro cônico, três diferentes tipos de partículas, mostradas na Figura 4.1, são empregadas: 1) discos cartonados, obtidos por meio de um perfurador de papel; 2) pellets de polietileno de baixa densidade, (componentes puros utilizados na fabricação de embalagens cartonadas) fornecidos pela empresa Tetra Pak; 3) areia, material inerte comumente utilizado em reatores de leito de jorro. As partículas de polietileno e de areia utilizadas pertencem ao grupo D de Geldart (1986), isto é, são partículas capazes de alcançar o regime de jorro estável.

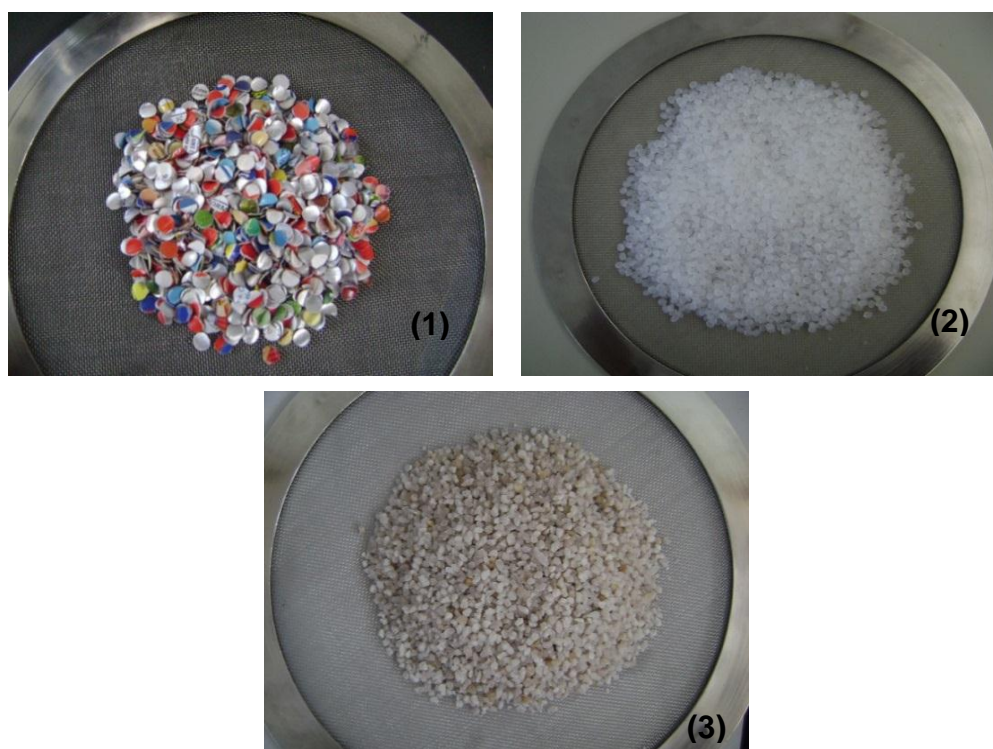


Figura 4.1– Partículas utilizadas nos experimentos: 1) Discos cartonados; 2) Pellets de polietileno; 3) Areia.

Nesta seção são apresentadas as técnicas utilizadas na determinação das propriedades físicas das partículas que são mostradas na Tabela 6.1, e das misturas apresentadas nas Tabelas 6.2 e 6.3 no capítulo 6.

4.1.1 Massa específica (ρ_p)

A massa específica das partículas (ρ_p) foi determinada por picnometria líquida. Na técnica empregada, metade do volume do picnômetro (previamente calibrado com água destilada a uma temperatura média de 25 °C) foi preenchida com partículas (discos cartonados, polietileno ou areia). O picnômetro contendo a amostra foi então preenchido com um fluido – água para areia, e querosene para as partículas de polietileno e de cartonadas. A adição de fluido ao sistema picnômetro/amostra gerou bolhas que foram removidas por meio de um banho ultrassônico. O volume do picnômetro foi então completado. Assim, por meio de um balanço de massa no sistema, que leva em consideração a massa de líquido e de partículas adicionado ao picnômetro juntamente com a massa específica dos líquidos, é possível obter a massa específica das partículas por meio da relação abaixo:

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

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.

4.1.2 Diâmetro (D_p)

O diâmetro dos discos cartonados utilizado é o diâmetro volumétrico, ou seja, o diâmetro de uma esfera de volume igual ao volume de uma partícula de disco cartonado. O volume do disco cartonado foi calculado pela equação do volume de um cilindro, cujas dimensões são apresentadas na Figura 4.2.

Conforme a Figura 4.2, a altura do cilindro, h , representa a espessura do disco cartonado e D_p o diâmetro da base do cilindro.

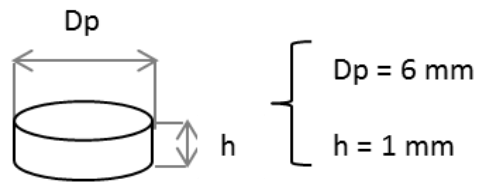


Figura 4.2 – Dimensões da partícula de disco cartonado.

Assim, o diâmetro volumétrico, d_v , pode ser obtido a partir do seguinte equacionamento:

$$V_{esfera} = V_{disco\ cartonado} \quad (4.2)$$

$$\frac{\pi d_v^3}{6} = \frac{\pi D_p^2}{4} \times h \quad (4.3)$$

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{3D_p^2}{2} \times h} \quad (4.4)$$

O diâmetro dos pellets de polietileno e da areia foi determinado pela técnica de peneiramento. Na técnica empregada, as amostras de polietileno e areia utilizadas nos experimentos foram selecionadas dentro de uma faixa granulométrica específica. Para os pellets de polietileno, foram escolhidas partículas com uma faixa de tamanho entre 2,80/2,36 mm, enquanto que para a areia essa faixa foi entre 3,36/2,80 mm (equivalente a 6/7 mesh e 7/8 mesh na escala Tyler, respectivamente). Deste modo, pôde-se utilizar uma medida de diâmetro de peneira mais representativa para as amostras de polietileno e areia. Conseqüentemente, foi possível adotar condições de simulação mais próximas às condições experimentais, favorecendo a precisão dos resultados simulados via CFD.

4.1.3 Esfericidade (ϕ)

A esfericidade das partículas de cartonadas e polietileno foi calculada por meio da equação proposta por Wadell (1933):

$$\Phi = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (4.5)$$

onde, d_v é o diâmetro volumétrico e d_s o diâmetro superficial da partícula. Este último é definido como o diâmetro da esfera que possui a mesma área superficial da partícula de interesse, S_p .

$$S_{disco\ cartonado} = 2x \frac{\pi D_p^2}{4} + \pi D_p h = \frac{\pi D_p^2}{2} + \pi D_p h \quad (4.6)$$

Pela definição do diâmetro superficial, d_s , tem-se que

$$S_{esfera} = S_{disco\ cartonado} \quad (4.7)$$

$$\pi d_s^2 = \frac{\pi D_p^2}{2} + \pi D_p h \quad (4.8)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{D_p^2 + 2D_p h}{2}} \quad (4.9)$$

Para a determinação da esfericidade dos pellets de polietileno, a forma das partículas de polietileno foi considerada como sendo a forma de um esferoide oblato, cujas dimensões são apresentadas na Figura 4.3.

Na Figura 4.3, a representa o comprimento do semieixo maior e b o comprimento do semieixo menor da partícula de polietileno.

Para se determinar o diâmetro volumétrico, d_v , da partícula de polietileno, a seguinte equação do volume de um esferoide oblato foi utilizada:

$$V_{polietileno} = \frac{4\pi a^2 b}{3} \quad (4.10)$$

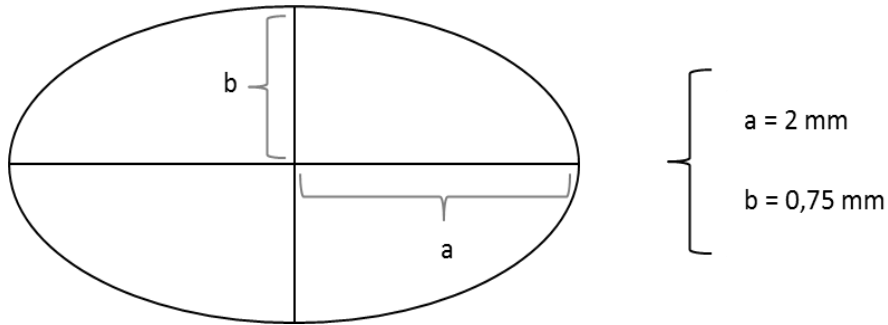


Figura 4.3 – Dimensões da partícula de polietileno.

Assim,

$$V_{esfera} = V_{polietileno} \quad (4.11)$$

$$\frac{\pi d_v^3}{6} = \frac{4\pi a^2 b}{3} \quad (4.12)$$

$$d_v = \sqrt[3]{8a^2 b} \quad (4.13)$$

Para o cálculo do diâmetro superficial, d_s , a seguinte equação da área superficial, S_p , de um esferoide oblato foi empregada:

$$S_{polietileno} = \pi \left(2a^2 + \frac{b^2}{e} \log \left(\frac{1+e}{1-e} \right) \right) \quad (4.14)$$

Na equação acima, e é a excentricidade do esferoide que pode ser calculada de acordo com a equação:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (4.15)$$

Com base no valor obtido para $S_{polietileno}$, o diâmetro superficial da partícula de polietileno pode ser determinado:

$$S_{esfera} = S_{polietileno} \quad (4.16)$$

$$d_s = \sqrt{\left(2a^2 + \frac{b^2}{e} \log\left(\frac{1+e}{1-e}\right)\right)} \quad (4.17)$$

Com base nos valores de d_v e d_s calculados para os pellets de polietileno, e retomando a equação 4.5, tem-se a esfericidade da partícula de polietileno.

A esfericidade da areia foi determinada através da carta de esfericidade vs arredondamento apresentada na Figura 4.4, segundo a metodologia de Cho, Dodds e Santamarina (2006). Nesta técnica, a esfericidade é determinada pela comparação da forma do grão de areia com as formas geométricas em duas dimensões (2D) das figuras presentes na carta. Uma amostra contendo trinta grãos de areia foi selecionada, e a esfericidade de cada partícula determinada por meio da avaliação visual das fotos digitais obtidas e comparação com as figuras da carta.

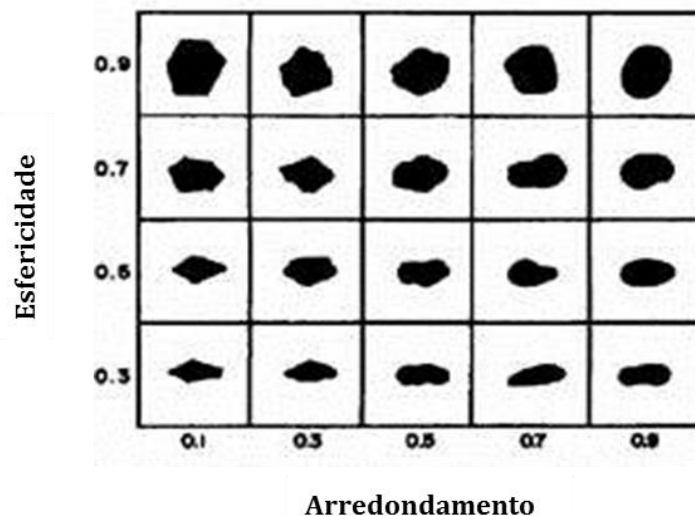


Figura 4.4 – Carta de esfericidade x arredondamento.

4.1.4 Porosidade (ϵ_0)

A porosidade do leito das partículas puras e das misturas foi determinada por meio de um balanço de massa aplicado ao leito de jorro cônico, para uma altura de leito estático de 18 cm. A equação utilizada para o cálculo da porosidade, ϵ_0 , foi a seguinte:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{leito\ est\ atico} - V_{part\ iculas}}{V_{leito\ est\ atico}} \quad (4.18)$$

Com base nas dimensões apresentadas na Figura 4.5, o volume de leito estático, $V_{leito\ est\ atico}$, isto é, o volume da região cônica preenchida por partículas, foi calculado de acordo com a equação:

$$V_{leito\ est\ atico} = \frac{\pi h}{3} [R^2 + Rr + r^2] \quad (4.19)$$

onde R e r são os raios da base e h a altura do leito estático.

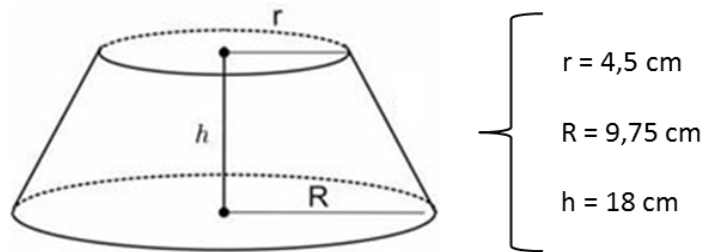


Figura 4.5 – Dimensões utilizadas no cálculo do volume de leito estático.

O volume de partículas, $V_{part\ iculas}$, foi obtido pela soma dos volumes individuais dos componentes da mistura ($V_{part\ iculas} = V_1 + V_2$). Os volumes individuais, V_1 e V_2 , foram calculados pela expressão $V = M_c / \rho_p$, onde M_c é a massa de cada componente na mistura. Os valores de M_c foram obtidos através das Tabelas 6.2 e 6.3.

4.2 Unidade Experimental

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados em uma unidade experimental instalada no Laboratório de Desenvolvimento de Produto do DETEC/UFES. A Figura 4.6 apresenta um esquema do aparato experimental, composto de um leito de jorro cônico e seus periféricos.

O ar é fornecido por um soprador tipo centrífugo da marca IBRAM, com capacidade de fornecer até $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$ de ar e uma potência de 2,0 cv. O aquecimento do ar é realizado por meio de resistências elétricas e o controle de temperatura é do tipo PID. A vazão volumétrica de ar é medida em um medidor Venturi. Um transdutor de pressão instalado na tubulação de entrada do ar, 15 cm abaixo da base cônica do leito, e um termopar (para medir a temperatura de entrada do ar) encontram-se acoplados ao leito. As informações sobre a queda de pressão no leito, a velocidade e a temperatura de ar injetado foram obtidas diretamente no painel de controle do equipamento.

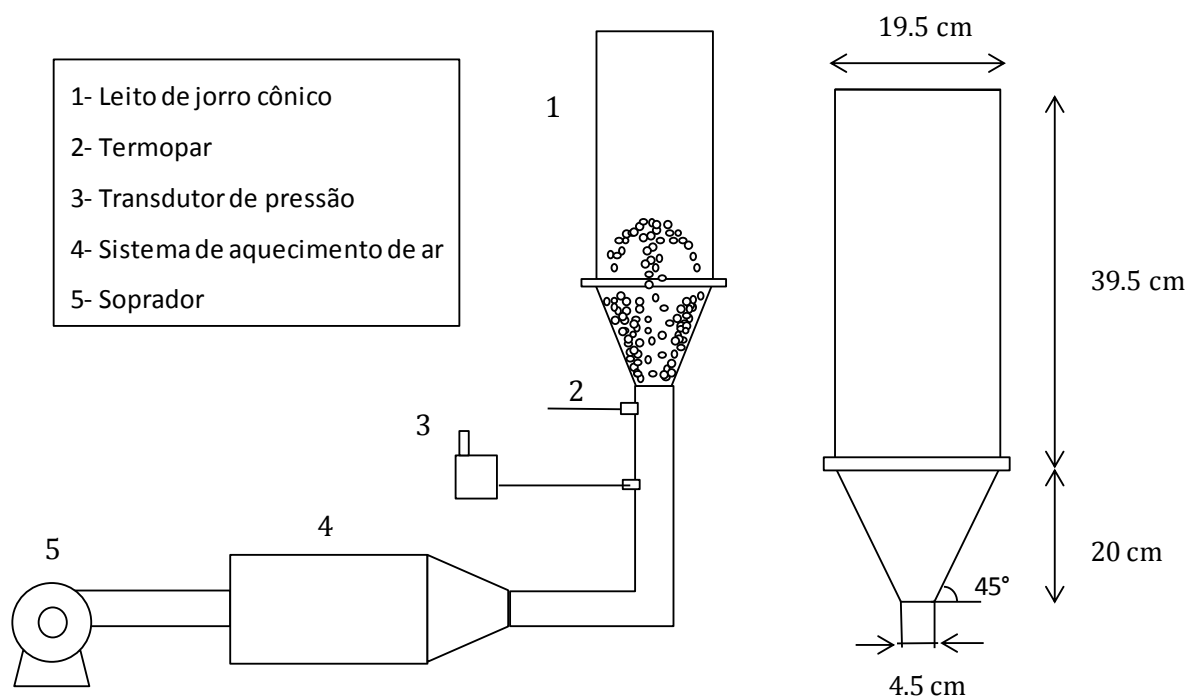


Figura 4.6 – Esquema do aparato experimental.

4.3 Procedimento Experimental

Primeiramente, o leito foi preenchido com um dos tipos de misturas de partículas apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3. Em todas as condições testadas, a altura do leito de partículas foi de 18 cm. Então, acionava-se o soprador para que o ar entrasse em contato com as partículas e mantivesse sua temperatura constante na

entrada do leito em torno de 30°C. A partir deste instante, a curva característica do leito de jorro foi determinada aumentando-se a velocidade do ar no leito até aproximadamente 10% acima da velocidade de mínimo jorro, sendo posteriormente, reduzida até o valor zero.

Para analisar a reprodutibilidade, os dados foram obtidos em trélicas, mantendo-se a mesma condição de compactação do leito. Esta condição foi atingida mantendo-se o leito na condição de mínimo jorro por 5 minutos e, em seguida, reduzia-se lentamente à velocidade do ar até o valor zero.

4.4 Medidas

4.4.1 Altura de fonte

A altura de fonte (H_f) foi medida através de um papel milimetrado inserido na face da parte cilíndrica do leito. A altura da fonte resulta da média de três medidas das alturas de fonte mínima e máxima (totalizando 6 medidas de H_f) atingidas durante o regime de jorro.

4.4.2 Velocidade e queda de pressão

A velocidade de mínimo jorro (V_{mj}) foi definida como sendo a menor velocidade do ar em que o regime de jorro pudesse ser atingido. Esta velocidade foi obtida pelo processo de velocidade decrescente do ar no leito. A queda de pressão de mínimo jorro foi definida como sendo a queda de pressão (ΔP_{mj}) no leito correspondente a velocidade do ar de mínimo jorro. A queda de pressão máxima (ΔP_{max}) foi definida como a máxima queda de pressão no leito atingida durante o colapso do jorro com o decréscimo da velocidade.

A queda de pressão no leito foi medida pelo transdutor de pressão Dwyer, modelo 616C-4, com faixa de operação entre 0 a 20 inH₂O (correspondente a 0-4981 Pa).

A vazão de ar do soprador foi determinada por meio de um medidor Venturi padrão e ajustada por um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-08. A medida de vazão de ar do soprador e o ajuste do inversor de frequência foram feitos pela empresa fabricante do leito de jorro, a Labmaq do Brasil Ltda. A seguir, apresenta-se a equação de ajuste do inversor de frequência que relaciona a vazão de ar do soprador com a frequência do inversor.

$$Q = 0,0419f \quad (4.20)$$

sendo: Q é a vazão volumétrica (m^3/min) e f (Hz) é frequência do inversor de frequência

Com os dados de vazão volumétrica obtidos pela equação 5.20 determina-se a velocidade média do ar:

$$v = Q/(Ax60) \quad (4.21)$$

sendo: $A = \pi d_0^2/4$ é a área da secção transversal do orifício de entrada do leito de jorro (m^2).

5 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO

5.1 Malha computacional

O domínio computacional foi discretizado em uma malha estruturada bidimensional, com um eixo de simetria na direção axial, utilizando o *software* ANSYS ICEM CFD. A malha construída inicialmente foi composta de 5500 elementos quadriláteros. Um teste de malha foi realizado de modo que, por meio de sucessivas divisões das células da malha inicial, duas diferentes malhas contendo 14544 e 59073 células foram geradas.

As malhas foram testadas para uma condição de vazão de ar 10% superior a de jorro mínimo para uma mistura de polietileno contendo 10% em massa de cartonadas. Com base no modelo Euleriano Granular adotado, não foi possível realizar as simulações com a malha de 5500 células.

Para as malhas com 14544 (malha a) e 59073 (malha b) elementos, a Figura 5.1 apresenta os resultados para a magnitude da velocidade do ar em função da distância axial. A análise da Figura 5.1 permite verificar que valores próximos para a velocidade do ar foram obtidos com as malhas testadas. Deste modo, a malha composta por 14544 células, mostrada na Figura 5.2, foi escolhida por apresentar um tempo de simulação muito menor quando comparada à malha com 59073 elementos (aproximadamente 72 horas a menos em tempo real de simulação).

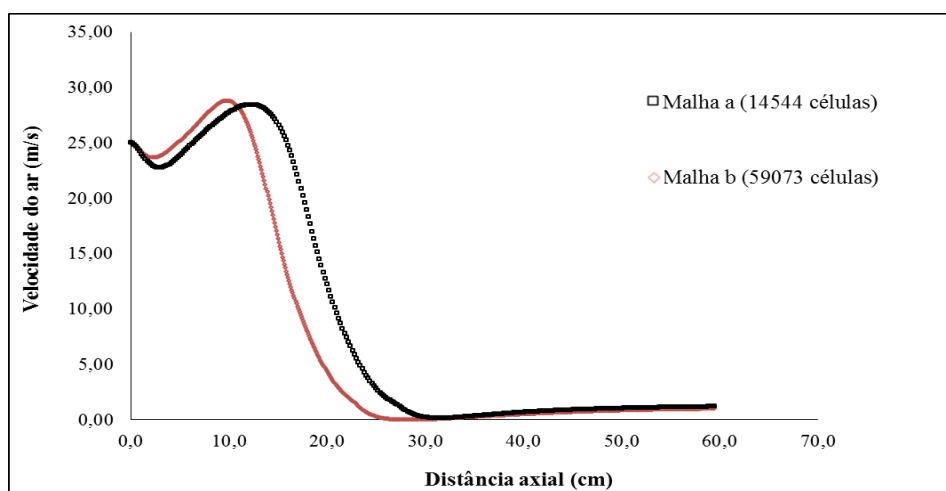


Figura 5.1 – Teste de independência da malha: magnitude da velocidade do ar em função da distância axial.

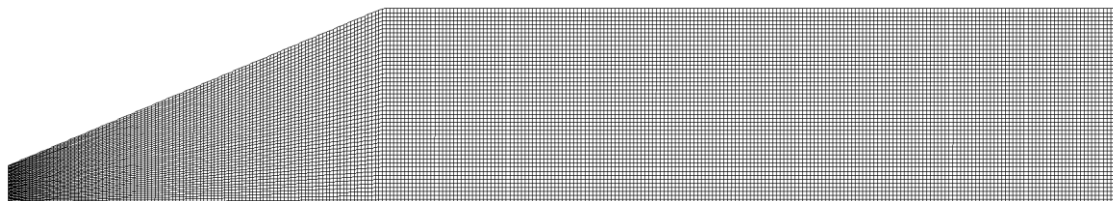


Figura 5.2 – Malha computacional utilizada nas simulações.

5.2 Solução numérica

As simulações foram realizadas por meio do software ANSYS FLUENT 13.0. O software resolve o conjunto das equações de balanço e equações constitutivas pelo método de volumes finitos. Adotou-se o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. O esquema de interpolação *Upwind* de primeira ordem foi aplicado a todas as equações do modelo. Uma simulação em regime transiente foi empregada, com um intervalo de tempo máximo de 1×10^{-3} . O critério de convergência estabelecido foi da ordem de 1×10^{-3} e os fatores de relaxação escolhidos entre 0,2 e 0,5. O regime estacionário foi alcançado após 8 segundos de tempo de simulação.

5.3 Condições de Simulação CFD

A Tabela 5.1 sumariza a relação dos parâmetros de simulação CFD empregados nesta pesquisa. A escolha desses parâmetros baseou-se nas características do sistema de leito de jorro estudado, bem como nos modelos apresentados na seção 3.2, os quais têm sido utilizados por diversos pesquisadores para descrever a fluidodinâmica de sistemas ar-sólido similares ao desta pesquisa.

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 (polietileno e ar) 2 fases (areia e ar) 3 fases (ar, polietileno e discos cartonados) 3 fases (ar, areia e discos cartonados)				
	Modelo de Turbulência	K-epsilon (padrão)				
Materiais	Densidade do ar	1,162 kg·m ⁻³				
	Viscosidade do ar	1,862 x 10 ⁻⁵ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹				
		Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	
	Modelo de arraste	Gidaspow	Gidaspow	Syamlal-O'brien	Syamlal-O'brien	
	Viscosidade granular	Gidaspow	Syamlal-O'brien	Syamlal-O'brien	Syamlal-O'brien	
	Viscosidade granular <i>bulk</i>	Lun et al.	Lun et al.	Lun et al.	Lun et al.	
	Temperatura granular	Algebraic	Algebraic	Algebraic	Algebraic	
	Pressão de sólidos	Lun et al.	Lun et al.	Lun et al.	Syamlal-O'brien	
	Distribuição radial	Lun et al.	Lun et al.	Lun et al.	Syamlal-O'brien	
	Diâmetro de partícula	Areia	0,00258 m			
		Polietileno	0,00308 m			
Discos cartonados		0,00378 m				
Densidade	Areia	2340 kg·m ⁻³				
	Polietileno	906 kg·m ⁻³				
	Discos cartonados	955 kg·m ⁻³				
Condições de contorno	Entrada	<i>Inlet velocity</i> – o gás entre 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 as Tabelas 6.2 e 6.3				

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Experimental

6.1.1 Caracterização das partículas e misturas

Nesta seção são apresentados os valores experimentais obtidos de acordo com as metodologias descritas no Capítulo 4.

As propriedades físicas das partículas utilizadas nos testes fluidodinâmicos são apresentadas nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3.

A Tabela 6.1 mostra a massa específica, porosidade, esfericidade e o diâmetro de partícula dos sólidos puros investigados.

Tabela 6.1 – Propriedades físicas das partículas utilizadas nos experimentos

	Massa específica (ρ), kg/m ³	Porosidade (ϵ_0)	Diâmetro de partícula (D_p), mm	Esferecidade (ϕ)
Discos cartonados	955	0,76	3,78	0,59
Polietileno	906	0,46	3,08	0,93
Areia	2340	0,45	2,58	0,7

A Tabela 6.2 apresenta as misturas de polietileno e discos cartonados que foram utilizadas em leito de jorro cônico. O estudo preliminar destas misturas serve para a investigação de regimes de jorro em leitos compostos por partículas com pequena diferença de densidade, neste caso, os discos cartonados e os pellets de polietileno. Além disso, este estudo fornece um ponto de partida para o conhecimento e melhor ajuste dos parâmetros de simulação CFD, uma vez que leitos de partículas com densidade similares apresentam baixa segregação e, conseqüentemente, atingem regimes de jorro mais facilmente.

Com o intuito de contribuir para a aplicação de leitos de jorro como reatores de pirólise, misturas de cartonadas e areia foram investigadas, conforme mostra a Tabela 6.3.

Tabela 6.2 – Misturas de polietileno e discos cartonados estudadas em leito de jorro

Mistura	Massa de amostra (kg)	Fração mássica (%)		Porosidade (ϵ_0)
		Polietileno	Discos cartonados	
1	1,10	100	0	0,46
2	1,03	95	5	0,49
3	1,01	90	10	0,50
4	0,99	80	20	0,52
5	0,92	70	30	0,55
6	0,85	60	40	0,58
7	0,75	50	50	0,63
9	0,48	0	100	0,76

Tabela 6.3 – Misturas de areia e discos cartonados estudadas em leito de jorro

Mistura	Massa de amostra (kg)	Fração mássica (%)		Porosidade (ϵ_0)
		Areia	Discos cartonados	
1	3,0	100	0	0,45
2	2,5	95	5	0,49
3	2,0	90	10	0,56
4	1,3	80	20	0,62

Nota-se pelos valores de porosidade, apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3, que há um aumento da porosidade nas misturas de polietileno e nas misturas de areia com as partículas cartonadas, à medida que a concentração de discos cartonados na mistura aumenta. Segundo ZOU e YU (2003) leitos compostos por partículas não esféricas tendem a apresentar maior porosidade à medida que a esfericidade das partículas diminui. Verifica-se, pela Tabela 6.1, que a esfericidade dos discos cartonados é menor que a das partículas de polietileno e areia. Sendo assim, pode-se afirmar que a adição de discos cartonados aos leitos de polietileno e areia puros causa um aumento da quantidade de espaços vazios na matriz de partículas desses

leitos. O aumento desta quantidade de espaços vazios, preenchidos com ar, aumenta a porosidade do leito.

6.1.2 Análise fluidodinâmica

A Figura 6.1 mostra as fotografias do leito de jorro operando com as partículas de embalagens cartonadas e de polietileno. Observa-se na Figura 6.1a que as partículas de embalagens cartonadas não atingem o regime de jorro.

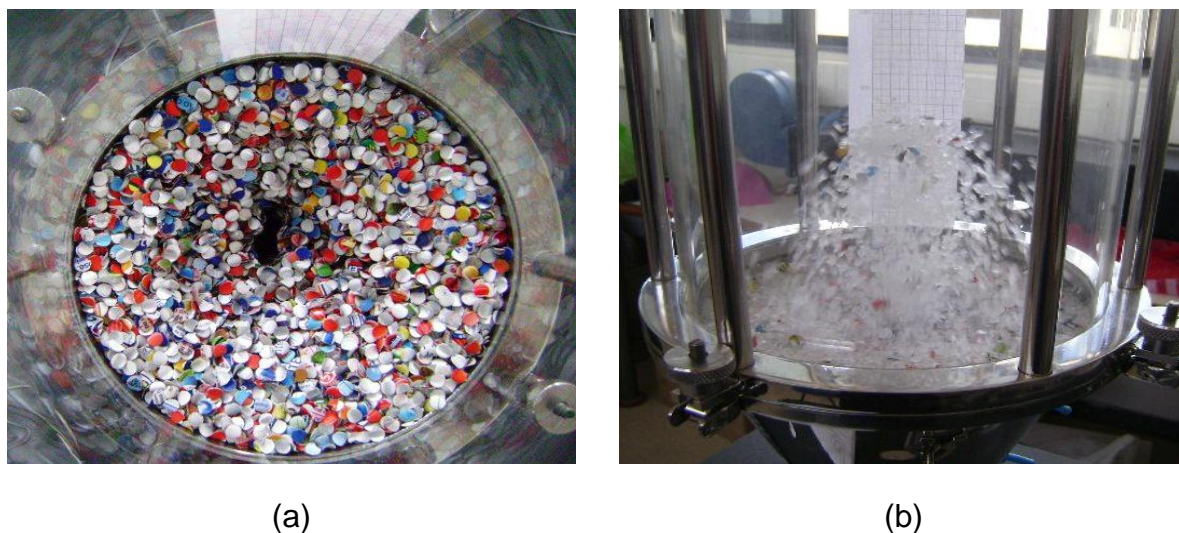


Figura 6.1 – Fotografias do leito de jorro: (a) cartonadas puras (b) discos cartonados e polietileno.

Neste caso, após o rompimento do jorro, observou-se a formação de um canal preferencial para passagem de ar com as partículas aderidas entre si na região anular, conforme mostra a Figura 6.1a. No entanto, para as misturas de polietileno e discos cartonados na proporção de 5 a 50% em massa de cartonadas, o regime de jorro estável foi observado. A Figura 6.1b mostra a fotografia do regime de jorro estável para a mistura de 5%.

A Figura 6.2 apresenta os dados de queda de pressão em função da velocidade do ar para as misturas de polietileno e discos cartonados. Para os leitos compostos por polietileno puro e misturas na faixa de 5 a 50% em massa de cartonadas, observa-se na Figura 6.2 que, para uma velocidade igual à de mínimo jorro ou maior, a queda de pressão no leito se mantém com o mesmo valor, considerando o desvio

padrão das medidas de pressão (apresentado pelos símbolos em barras). Isto indica que o regime de jorro estável foi atingido para tais leitos.

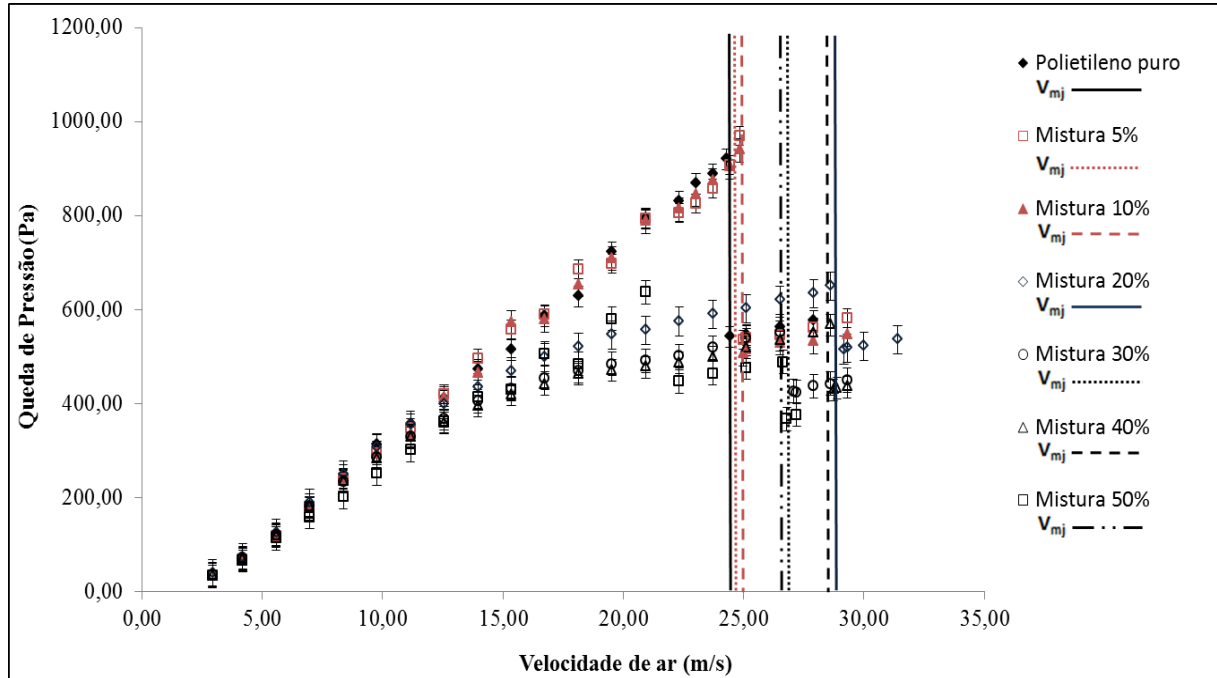


Figura 6.2 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar para o polietileno puro e para as misturas de polietileno e discos cartonados.

Observa-se, também, que a adição de partículas de embalagens cartonadas a 5 e 10% em massa ao polietileno não altera significativamente a fluidodinâmica de partículas puras de polietileno em leito de jorro.

Todavia, para leitos contendo misturas de polietileno e discos cartonados com uma proporção mássica de cartonadas maior que 60%, o regime de jorro não se estabelece. Neste caso, observa-se um comportamento semelhante ao descrito anteriormente para o leito composto de discos cartonados puros.

Comparando os dados na Figura 6.2 para todas as misturas analisadas, nota-se que a queda de pressão no leito decresce com o aumento da concentração de discos cartonados no leito. Tal comportamento pode ser explicado pelo o aumento da porosidade do leito com o aumento da concentração de partículas cartonadas, conforme mostra a Tabela 6.2. O aumento da porosidade faz com que a passagem

do ar pelo leito ocorre preferencialmente pela região de jorro ao invés da interface ânulo-jorro, e dessa forma, a queda de pressão no leito diminui.

A Figura 6.3 apresenta a queda de pressão no leito em função da velocidade do ar para leitos contendo areia pura e misturas de areia e discos cartonados. Para os leitos de jorro cônicos compostos por areia pura e misturas com 5 e 10% em massa de discos cartonadas, o regime de jorro estável é atingido. Para tais leitos, verifica-se que a queda de pressão de mínimo jorro decresce com o aumento da concentração de discos cartonados no leito. Tal comportamento é semelhante àquele verificado para os leitos de polietileno e discos cartonados contendo de 5 a 50% em massa de cartonadas.

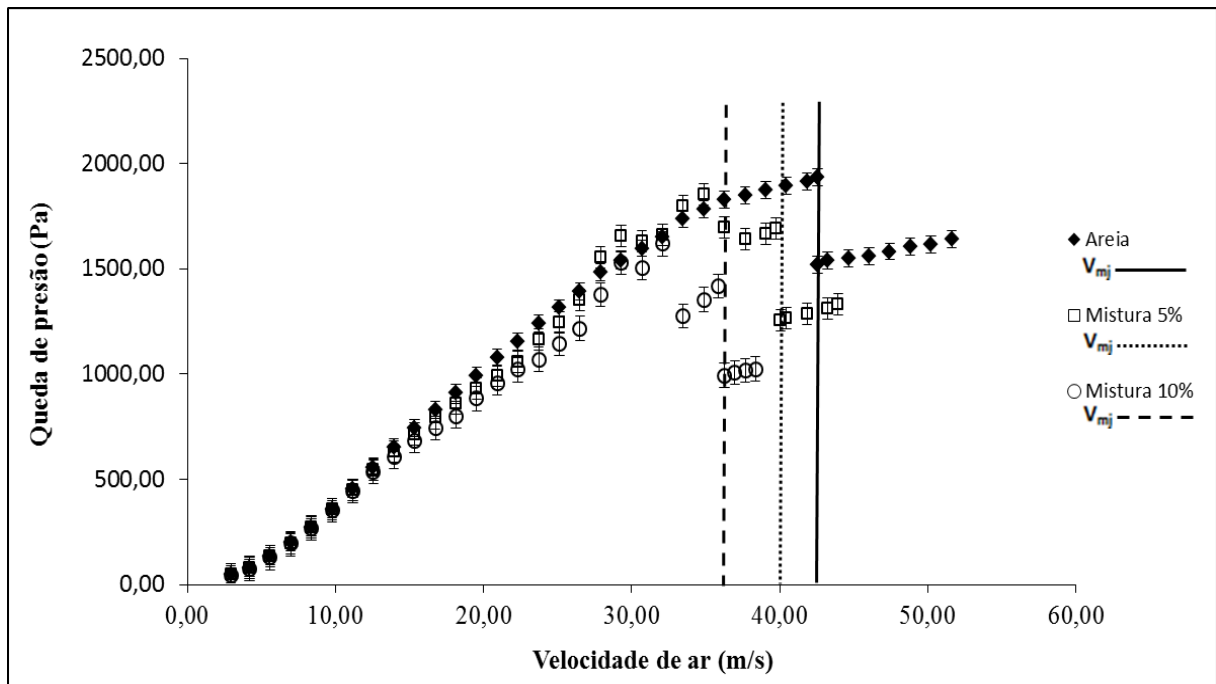


Figura 6.3 – Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar para a areia pura e para as misturas de areia e discos cartonados.

Para leitos compostos por misturas de areia e discos cartonados com uma proporção mássica de cartonadas maior que 10%, o regime de jorro não é atingido. Esses leitos apresentam o mesmo comportamento das misturas de polietileno e discos cartonados com uma proporção mássica de cartonadas maior que 60%, conforme relatado anteriormente.

De um modo geral, tanto para as misturas de polietileno e discos cartonados quanto para as misturas de areia e cartonadas em leito de jorro, é possível notar que o aumento da concentração de discos cartonados no leito leva à diminuição da passagem de partículas da região anular para a região de jorro, diminuindo a capacidade de tais leitos atingirem o regime de jorro.

A respeito do fenômeno da segregação, a Figura 6.4 a fotografia da superfície do leito de jorro compostos por misturas de polietileno (Figura 6.4a) e de areia (Figura 6.4b) com 10% em massa de discos cartonados. Observa-se, pela Figura 6.4a, um bom nível de mistura entre as fases sólidas envolvidas, o que pode ser explicado pela pequena diferença de massa específica entre as partículas de polietileno e cartonadas. Resultados semelhantes, não apresentados aqui, foram obtidos para as outras misturas de polietileno e cartonadas utilizadas.

Segundo Bacelos et al. (2007), o deslocamento de cada partícula na direção radial depende da sua inércia. Deste modo, partículas de discos cartonados, menos densas que as partículas de areia, atingiriam uma altura maior na fonte e, provavelmente, cairiam sobre a região anular mais próximas da parede da coluna. Entretanto, para as misturas de areia e cartonadas em leito de jorro, não se pôde notar nitidamente maior concentração das partículas cartonadas próxima da parede da coluna, como pode ser visto na Figura 6.4b.

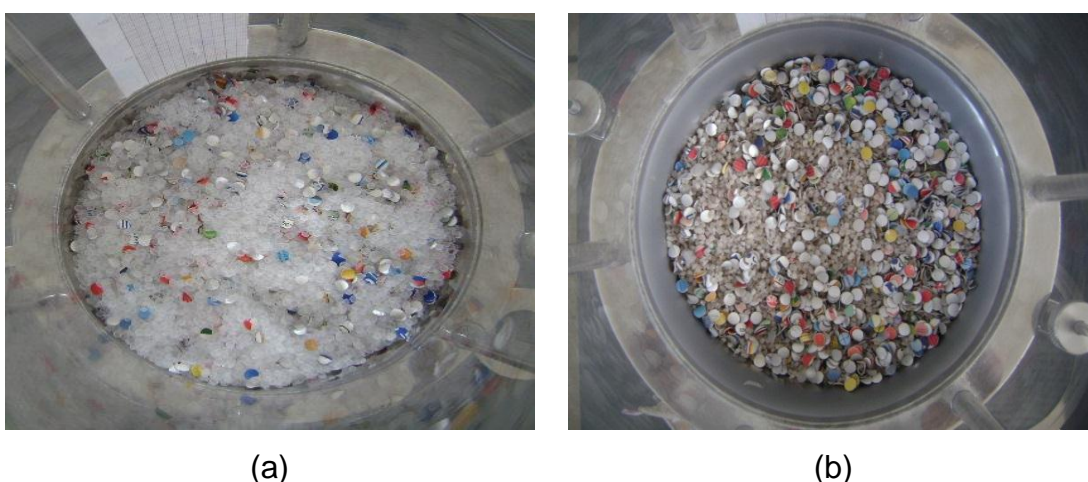


Figura 6.4 – Fotografias da superfície do leito de misturas contendo 10% em massa de cartonadas: (a) polietileno e discos cartonados (b) areia e discos cartonados.

Tal fato pode ser explicado devido à ação das forças de gravidade e arrasto. Como as partículas cartonadas não são esféricas, à medida que caem sobre a região anular estas apresentam diferentes orientações (considerando o eixo central da partícula), e isto provavelmente ocasiona diferentes forças de arrasto sobre as partículas. Sendo assim, durante a trajetória de partículas da fonte para a região anular, a ação da gravidade e da variabilidade da força de arrasto sobre as partículas cartonadas causam uma boa distribuição das mesmas sobre a região anular da coluna.

6.2 Simulação

6.2.1 Análise qualitativa dos resultados simulados

A Tabela 5.1 especifica as quatro condições de simulação testadas empregando-se o modelo Euleriano: 1) Na condição 1, o modelo de arraste de Gidaspow é utilizado juntamente com o modelo de viscosidade granular de Gidaspow, a viscosidade bulk de Lun et al., a formulação algébrica para a temperatura granular e a pressão de sólidos e distribuição radial de Lun et al; 2) Em relação à condição 1, o modelo de viscosidade granular de Syamlal-O'Brien é utilizado ao invés do modelo de Gidaspow; 3) Em relação à condição 2, o modelo de arraste de Syamlal-O'Brien é utilizado ao invés do modelo de Gidaspow; 4) Em relação à condição 3, os modelos de Syamlal-O'Brien para a pressão de sólidos e para a distribuição radial são escolhidos.

Para os quatro estudos de caso testados da Tabela 5.1, a Figura 6.5 apresenta os contornos de fração volumétrica de polietileno e discos cartonados parametrizados em uma velocidade de ar de 25 m/s e 20% em massa de cartonadas. A análise dos dados da Figura 6.5 permite verificar que:

Condição 1) na região de jorro localizada próxima ao topo do leito, não há formação clara da região de fonte e pode-se verificar uma abrupta mudança de concentração da fase sólida bloqueando a passagem de ar e não permitindo que o regime de jorro seja estabelecido;

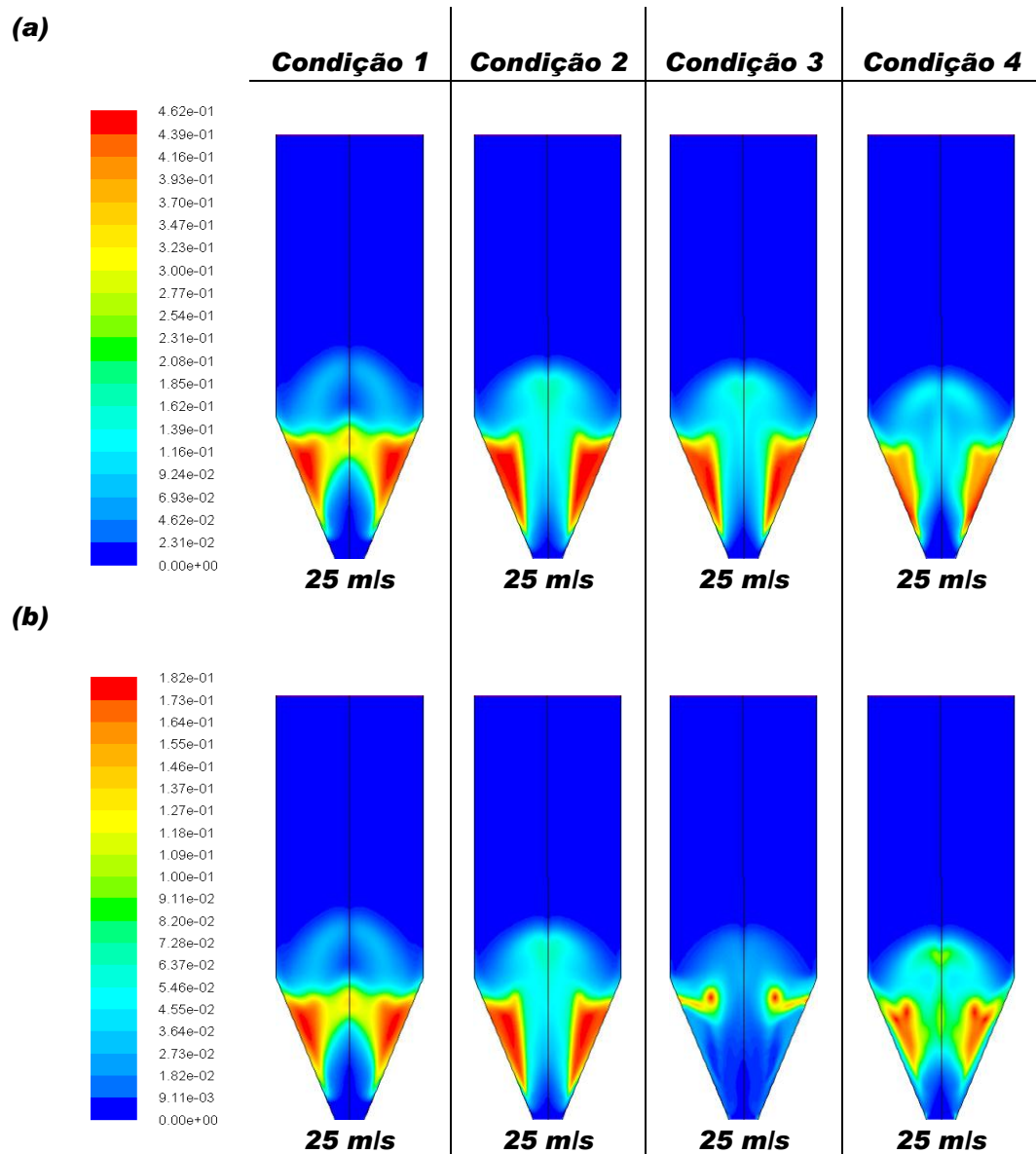


Figura 6.5 – Contornos de fração volumétrica de polietileno e discos cartonados para os leitos compostos com 20% de cartonadas em massa, parametrizados na velocidade do ar de 25 m/s. (a) Polietileno; (b) Discos cartonados. Estudos de caso detalhados na Tabela 5.1.

Condição 2) apesar da formação da região de fonte ser notória, não há uma diferença clara entre os perfis de concentração de sólidos das partículas de polietileno (Figura 6.5a) e de discos cartonados (Figura 6.5b);

Condição 3) é possível notar a diferença entre as fases sólidas no leito, entretanto, verifica-se por meio dos perfis simulados de concentração de sólidos que há segregação das partículas;

Condição 4) observa-se uma região de fonte característica do regime de jorro estável e um bom nível de mistura de partículas por meio dos contornos volumétricos das fases sólidas.

Baseado nas análises dos dados da Figura 6.5, pode-se afirmar que as condições de simulação empregadas no estudo de caso 4 (mostrado na Tabela 5.1) representam melhor a fluidodinâmica do leito de jorro cônico para as misturas de partículas estudadas nesta pesquisa. No regime de jorro (isto é, $v = 25$ m/s), para ambas as fases sólidas, verifica-se pela Figura 6.5, que o padrão de escoamento característico do leito de jorro pode ser claramente identificado pela distinção entre as regiões de jorro, anular e fonte. O fato do modelo de Syamlal-O'Brien (estudo de caso 4 na Tabela 5.1) apresentar um coeficiente de troca β específico para a modelagem das interações sólido-sólido pode explicar o melhor desempenho desse modelo em prever os dados fluidodinâmicos dos leitos de misturas quando comparado ao modelo de Gidaspow (casos de estudo 1 e 2 na Tabela 5.1). De acordo com Bahramian and Olazar (2011), isto é especificamente verdade em moderadas e altas velocidades do ar, como aquelas que ocorrem nas regiões de jorro e fonte de leitos de jorro.

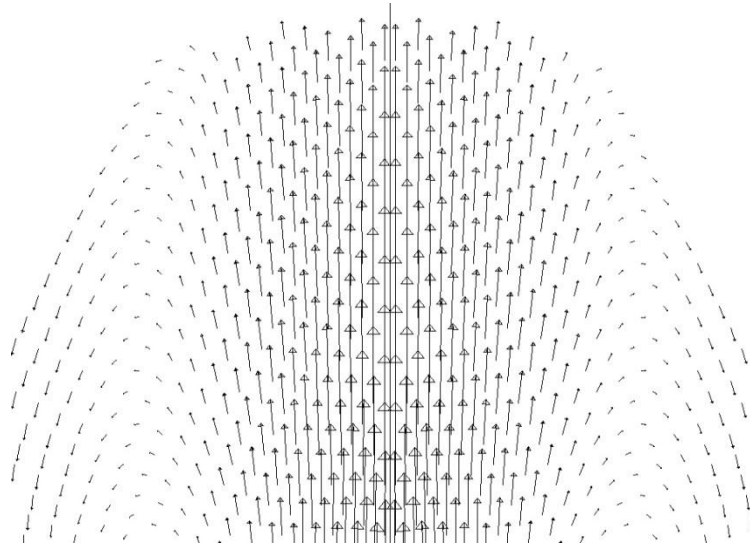
A Figura 6.6 mostra os vetores de velocidade de sólidos para o polietileno como função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien (estudo de caso 4 na Tabela 5.1).

A Figura 6.6a traz a trajetória simulada das partículas de polietileno pelo vetor velocidade de sólidos na região de fonte. A análise da Figura 6.6a permite verificar que as partículas percorrem uma trajetória aproximadamente parabólica em movimento desacelerado, alcançam uma altura máxima e caem aceleradas, atingindo a superfície da região anular. Comparando-se a Figura 6.6a e a Figura 2.8c, nota-se que há uma boa concordância entre o resultado simulado (estudo de caso 4 na Tabela 5.1) e o apresentado por Olazar (2001) para a região de fonte.

Analisando-se a Figura 6.6b, pode-se notar que as partículas atingem a superfície do leito na região anular e realizam um movimento descendente nessa região até atingirem à interface jorro-ânulo. Esse movimento da fase sólida na região anular caracterizado pelo deslizamento das partículas em contracorrente ao escoamento do ar (regime de leito deslizante), observado na Figura 6.6b pela trajetória simulada das

partículas pelo vetor velocidade de sólidos, está de acordo com o mapa de velocidade de sólidos descrito por Olazar (2001) apresentado na Figura 2.8a.

(a)



(b)

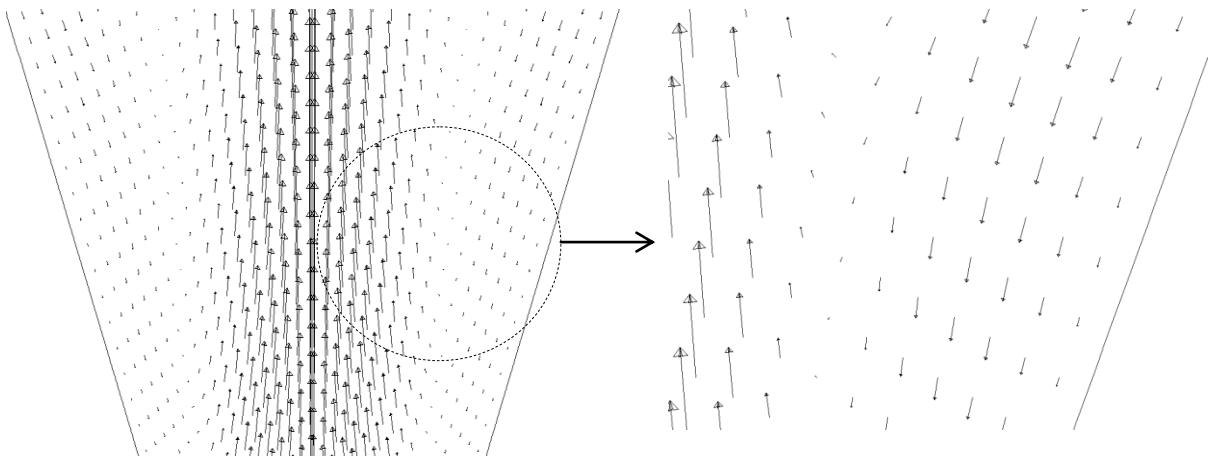


Figura 6.6 – Mapa vetores de velocidade de sólidos para o polietileno em função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. (a) fonte; (b) regiões anular e de jorro.

Ainda na Figura 6.6b, pode-se observar que as partículas provenientes da região anular que atingem a interface ânulo-jorro, entram na região de jorro onde são

arrastadas pelo ar e apresentam um movimento acelerado ascendente até atingirem a superfície do leito. Tal comportamento, mostrado na Figura 6.6b, é semelhante ao apresentado na Figura 2.8b para a região de jorro.

A Figura 6.7 mostra os vetores de velocidade do ar como função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien (estudo de caso 4 na Tabela 5.1). Observa-se que a componente axial do ar que escoava pela região de jorro cisalha a camada de partículas localizada na interface jorro-ânulo, enquanto a componente radial pressiona o conjunto de partículas firmemente, expandindo o canal de jorro na direção radial. Esse comportamento, mostrado esquematicamente na Figura 6.7, é semelhante ao apresentado por San José et al. (1995) para leitos de jorro cônicos, conforme mostrado na Figura 2.9.

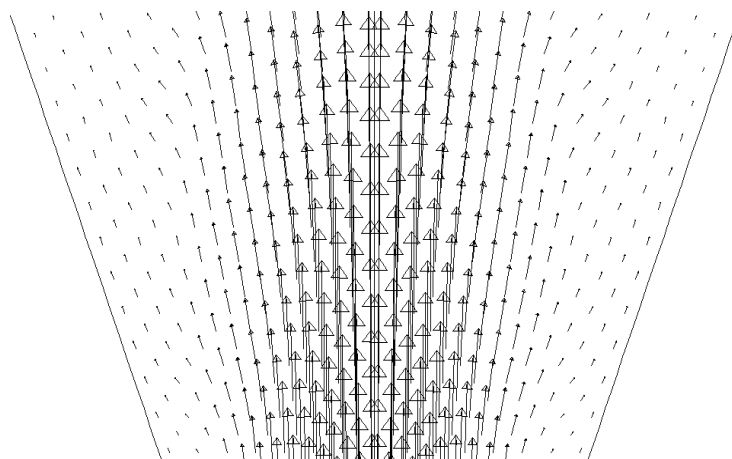


Figura 6.7 – Mapa vetores de velocidade do ar em função da posição axial e radial no leito cônico, parametrizados na velocidade de ar de 30 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien.

Tal comportamento característico do escoamento de ar em leito de jorro permite a passagem das partículas sólidas da interface jorro-ânulo para a região de jorro, fazendo com que a concentração de sólidos aumente à medida que a posição axial no jorro aumenta. Isto provavelmente explica o comportamento da dinâmica de escoamento ar-sólido do leito de jorro cônico mostrado na Figura 6.5.

Para as outras misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro cônico (vide Tabela 6.2), foram encontrados resultados de contornos simulados de fração

volumétrica de sólidos semelhantes aos resultados obtidos para o leito de misturas de polietileno e discos cartonados contendo 20 % em massa de cartonadas. Como exemplo, a Figura 6.8 mostra os contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de mistura de polietileno e discos cartonados contendo 30 % em massa de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 30, 25, 15 e 5 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien (estudo de caso 4 na Tabela 5.1).

Através da Figura 6.8, pode-se observar o leito inicialmente na condição de jorro estável até a condição de leito fixo e identificar as condições de mínimo jorro, caracterizadas pelas variáveis ΔP_{mj} e V_{mj} . Ainda, na condição de regime de jorro estável, analisando os contornos de fração de sólidos para a região de jorro na Figura 6.8, parametrizados na velocidade de ar de 25 e 30 m/s, nota-se que o canal de jorro possui um formato semelhante ao formato de jorro (c) da Figura 2.7 descrito por Mathur e Epstein (1974).

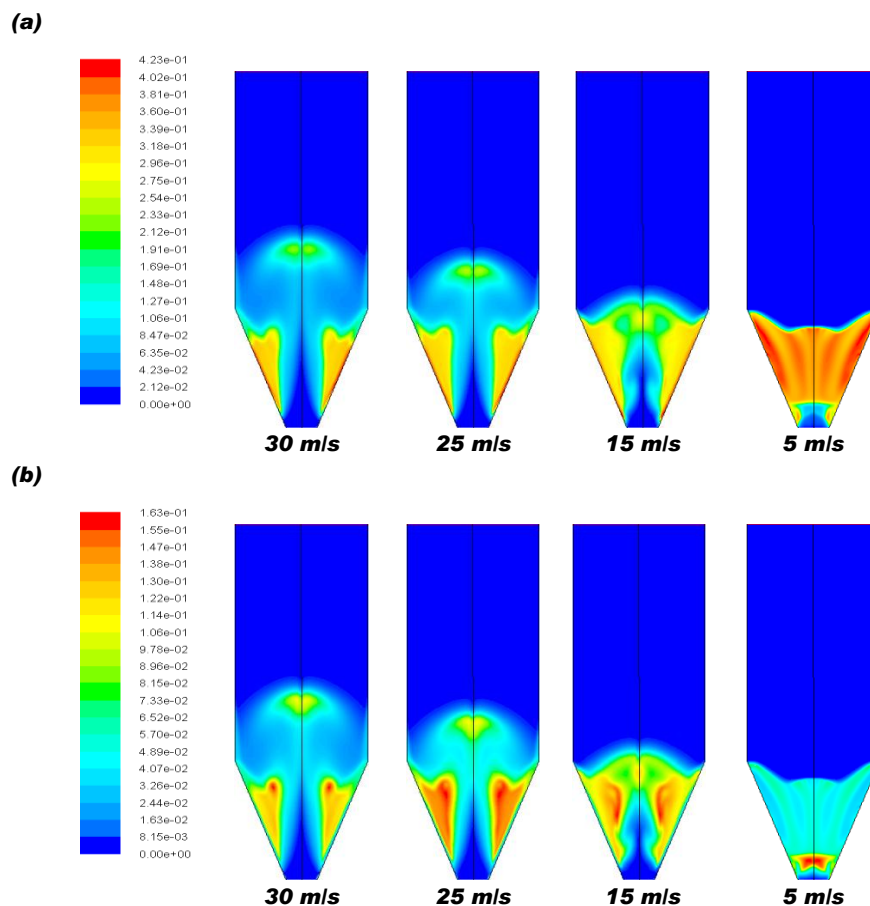


Figura 6.8 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de mistura de polietileno e discos cartonados contendo 30 % em massa de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 30, 25, 15 e 5 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. (a) Polietileno; (b) Discos cartonados.

Baseado nos bons resultados obtidos com o modelo de Syamlal-O'Brien (condição 4 Tabela 5.1) na previsão do escoamento ar-sólido das misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro cônico, esse modelo foi escolhido para a simulação da fluidodinâmica dos leitos compostos por misturas de areia e discos cartonados.

Utilizando o modelo de arraste de Syamlal-O'Brien, a Figura 6.9 apresenta os contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de misturas de areia e discos cartonados com 10% em massa de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 40, 35, 25, 15 e 5 m/s.

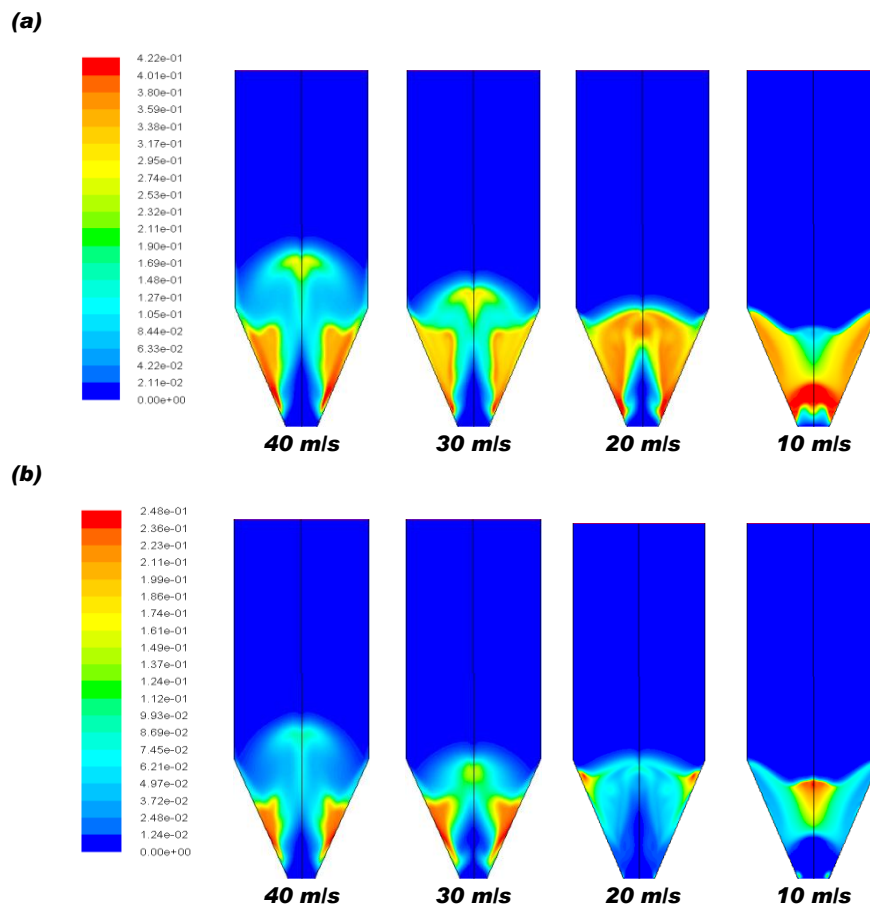


Figura 6.9 – Contornos de fração volumétrica de sólidos para o leito de misturas de areia e discos cartonados contendo uma proporção mássica de 10% de cartonadas, parametrizados na velocidade do ar de 40, 30, 20 e 10 m/s, utilizando o modelo de Syamlal-O'Brien. (a) Areia; (b) Discos cartonados.

A análise da Figura 6.9 permite verificar que as simulações CFD reproduziram adequadamente o padrão de escoamento típico de um leito jorro cônico. Além disso, na condição de regime de jorro estável, é possível notar através dos contornos de fração de sólidos para a região de jorro na Figura 6.9, parametrizados na velocidade de ar de 40 m/s, que o canal de jorro possui um formato semelhante ao formato de jorro (d) da Figura 2.7 descrito por Mathur e Epstein (1974).

6.2.2 Análise quantitativa dos resultados simulados

As Tabelas 6.4 e 6.6 exibem os valores experimentais e simulados de queda de pressão máxima (ΔP_{\max}) e de mínimo jorro (ΔP_{mj}) e de velocidade de mínimo jorro (V_{mj}) com seus respectivos erros relativos (Tabelas 6.5 e 6.7) obtidos nos ensaios fluidodinâmicos. As Tabelas 6.4 e 6.6 mostram os valores de ΔP_{\max} , ΔP_{mj} e V_{mj} para os leitos de misturas de polietileno e discos cartonados e para os leitos de misturas de areia e discos cartonados, respectivamente. Os erros relativos foram calculados de acordo com a seguinte equação:

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

Tabela 6.4 – Dados experimentais e simulados de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{\max} para as misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro

Composição mássica (%)		Dados experimentais			Dados simulados		
PE	DC	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{\max} (Pa)	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{\max} (Pa)
100	0	24,4 ± 0,3	541,8 ± 45,9	919,6 ± 38,4	25,5 ± 3,5	550,0 ± 25,5	967,7 ± 49,6
95	5	24,9 ± 0,1	536,9 ± 39,8	969,9 ± 22,2	25,0 ± 3,5	525,0 ± 33,5	1176,2 ± 69,3
90	10	24,9 ± 0,4	505,5 ± 50,6	938,9 ± 49,2	24,5 ± 3,5	519,7 ± 41,4	1093,4 ± 55,6
80	20	29,1 ± 0,5	514,5 ± 62,9	650,2 ± 57,7	25,0 ± 1,5	474,3 ± 49,4	807,7 ± 42,5
70	30	27,2 ± 0,9	424,9 ± 52,5	551,8 ± 41,6	23,5 ± 2,0	461,2 ± 24,8	868,1 ± 45,7
60	40	28,7 ± 0,5	429,5 ± 43,5	567,2 ± 29,8	22,5 ± 2,5	396,5 ± 30,4	916,9 ± 48,3
50	50	26,6 ± 0,4	489,0 ± 47,5	637,4 ± 48,2	21,5 ± 3,5	417,9 ± 42,4	829,6 ± 43,7

Tabela 6.5 – Erros relativos nas medidas de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de polietileno e discos cartonados em leito de jorro

Composição mássica (%)		Erro relativo (%)		
		(relativo ao dado experimental)		
PE	DC	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{max} (Pa)
100	0	5	2	5
95	5	1	-3	21
90	10	-2	3	16
80	20	-14	-8	24
70	30	-14	9	57
60	40	-22	-8	62
50	50	-19	-15	30

Tabela 6.6 – Dados experimentais e simulados de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de areia e discos cartonados em leito de jorro

Composição mássica (%)		Dados experimentais			Dados simulados		
Areia	DC	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{max} (Pa)	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{max} (Pa)
100	0	$43,3 \pm 1,4$	$1538,0 \pm 45,0$	$1933,5 \pm 70,0$	$33,5 \pm 1,5$	$1277,9 \pm 65,7$	$1777,6 \pm 55,7$
95	5	$40,0 \pm 0,7$	$1255,3 \pm 29,0$	$1691,7 \pm 52,5$	$32,5 \pm 2,0$	$1203,5 \pm 64,8$	$1640,7 \pm 25,3$
90	10	$36,3 \pm 0,5$	$994,0 \pm 35,0$	$1417,4 \pm 89,8$	$31,5 \pm 2,5$	$717,5 \pm 34,6$	$1163,7 \pm 23,6$

Tabela 6.7 – Erros relativos nas medidas de V_{mj} , ΔP_{mj} e ΔP_{max} para as misturas de areia e discos cartonados em leito de jorro

Composição mássica (%)		Erro relativo (%)		
		(relativo ao dado experimental)		
Areia	DC	V_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{max} (Pa)
100	0	-23	-17	-8
95	5	-19	-4	-3
90	10	-13	-28	-18

Para as misturas de polietileno e discos cartonados, na Tabela 6.4, comparando os resultados simulados e experimentais verifica-se que V_{mj} e ΔP_{mj} concordam

razoavelmente pelo modelo Euleriano utilizado de acordo com a condição 4 especificada na Tabela 5.1. Na Tabela 6.5, erros relativos máximos de -22 e -15% foram obtidos para V_{mj} e ΔP_{mj} , respectivamente. Já os dados simulados de ΔP_{max} superestimam os dados experimentais, apresentando um erro relativo máximo de 62%.

Analisando os dados simulados e experimentais ΔP_{max} , ΔP_{mj} e V_{mj} , na Tabela 6.6, para os leitos de misturas de areia e discos cartonados, pode-se notar que os dados simulados subestimam os dados experimentais. Na Tabela 6.7, para os valores de ΔP_{max} , ΔP_{mj} e V_{mj} , verifica-se que os erros relativos máximos foram de -23, -28 e -18%, respectivamente. Este comportamento está de acordo com aquele reportado por Diaz et al. (2008). Para leitos compostos por areia, os autores verificaram que os dados experimentais desviam consideravelmente dos dados simulados. De acordo com esses autores, o fator de forma exerce uma forte influência sobre os resultados encontrados via CFD. Isto provavelmente explica os desvios dos valores de velocidade e queda de pressão no leito em relação aos valores experimentais obtidos nesta pesquisa para os leitos compostos por misturas de areia.

Em geral, é provável que as diferenças entre os resultados experimentais e simulados encontradas para os sistemas em leito de jorro estudados nesta pesquisa ocorram porque o modelo Euleriano trata as partículas como esféricas. Assim, as mudanças de porosidade no leito com o aumento da concentração de cartonadas não pôde ser prevista pelos resultados simulados.

6.3 Aspectos energéticos da pirólise de resíduos cartonados

A análise do ciclo de vida das embalagens cartonadas, previamente apresentado na Figura 2.2, permite verificar os diversos processos sofridos pelo produto, desde sua fabricação até sua destinação final. Logo, nota-se que o desperdício de uma embalagem representa a perda de um valor energético incorporado por esses processos. Por isso, materiais reciclados a partir das embalagens cartonadas apresentam menor custo de produção do que suas matérias-primas.

Na pirólise das embalagens cartonadas, a economia de energia que o processo de reciclagem introduz ao ciclo de vida da embalagem pode ser avaliada por meio do alumínio que é recuperado e volta à cadeia produtiva como matéria-prima. Neste caso, considera-se que os produtos da pirólise do papel e do plástico são utilizados como combustível no próprio processo, para reduzir o consumo de energia elétrica do mesmo.

A reciclagem do alumínio pelo processo tradicional (i.e., pela fusão da sucata a uma temperatura superior a 700 °C) requer menos de 5% da energia necessária para obter o alumínio primário a partir da bauxita, conforme pode ser visto na Tabela 6.8.

Com base no processo de pirólise da Stora Enso e de reciclagem do alumínio pelo processo tradicional, pode-se afirmar que o consumo de energia na reciclagem do alumínio por meio da pirólise de cartonadas é, no máximo, igual àquele obtido no processo de reciclagem tradicional.

O balanço de massa do processo de reciclagem da embalagem cartonada, apresentado na Figura 6.10, mostra que a partir de 1 t de cartonadas é possível obter 45 kg de alumínio pelo processo de pirólise.

Tabela 6.8 – Consumo de energia na produção do alumínio referente ao ano de 2010

	Alumínio Primário	Reciclagem*
Produção (mil t)	1536	488
Consumo de energia (GWh)	23982	342
Consumo específico de energia (MWh/t)	15,6	0,7

*referente à recuperação da sucata.

Fonte: ABAL (2012).

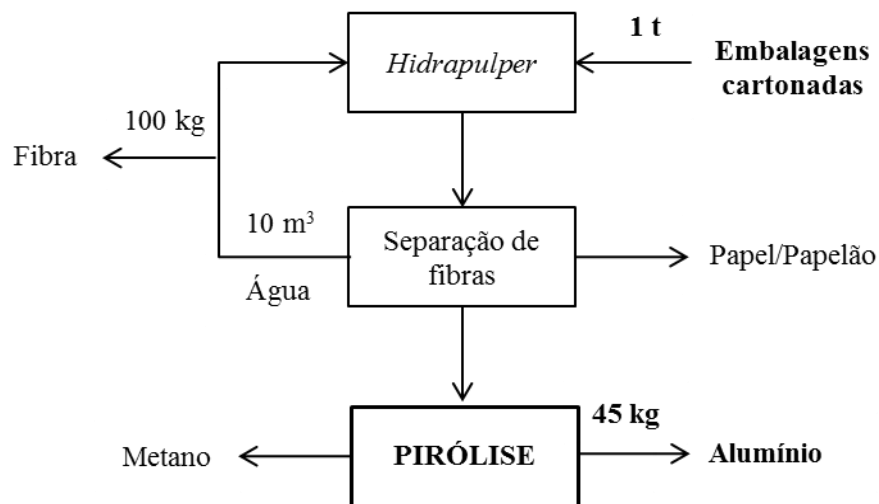


Figura 6.10 – Balanço de massa do processo de reciclagem das embalagens cartonadas.

Fonte: Adaptado de Neves (1999).

Utilizando esse balanço de massa e assumindo que o consumo específico de energia na reciclagem do alumínio por meio do processo de pirólise das cartonadas seja igual àquele do processo tradicional tem-se que a quantidade de energia consumida na obtenção de 45 kg de alumínio pelo processo de pirólise, $E_{C_{pirólise}}$, é:

$$E_{C_{pirólise}} = 0,7 \frac{MWh}{t} \times 0,045 t = 0,0315 MWh \quad (4.2)$$

Pelo processo tradicional de obtenção de alumínio primário a partir da bauxita, $E_{C_{tradicional}}$, a quantidade de energia demandada na produção de 45 kg de alumínio é:

$$E_{C_{tradicional}} = 15,6 \frac{MWh}{t} \times 0,045 t = 0,702 MWh \quad (4.3)$$

Assim, a quantidade de energia recuperada pelo processo de pirólise, $E_{R_{pirólise}}$, de 1 t de embalagens de cartonadas é:

$$E_{R_{pirólise}} = 0,702 - 0,0315 = 0,6705 MWh/t \text{ cartonadas} \quad (4.4)$$

No Brasil, em 2011, a taxa de reciclagem de embalagens Longa Vida foi de 27,1% totalizando mais de 59 mil toneladas (CEMPRE, 2013). Se todas essas embalagens fossem reaproveitadas pelo processo de pirólise, a energia recuperada seria aproximadamente igual a 40 GWh e a quantidade de alumínio reciclada igual a 2.655 t.

No aspecto ambiental, a reciclagem das embalagens cartonadas pelo processo de pirólise também é altamente vantajosa. A produção de 1 t de alumínio consome aproximadamente 5 t do minério bauxita (ABAL, 2012). Dessa forma, a pirólise de 59 mil t de cartonadas além de evitar o descarte inadequado dessas embalagens em lixões, representa a economia de 13.275 t de bauxita.

Além disso, no processo de produção do alumínio primário são geradas 2 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de alumínio. O CO₂ equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de gases de efeito (GEE) estufa pelo seu potencial de aquecimento global. Atualmente, a produção mundial de alumínio responde a 1% das emissões antrópicas de GEE (ABAL, 2012). Em contraste, na pirólise de resíduos cartonados não há emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, pois os gases produzidos são consumidos no próprio processo.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas com base nas análises realizadas nesta pesquisa.

A análise experimental do comportamento fluidodinâmico das misturas de partículas cartonadas em leito de jorro cônico permite verificar que:

- para os leitos compostos por polietileno e discos cartonados com uma proporção mássica de 5 a 50% de cartonadas, o regime de jorro é estabelecido;
- para os leitos compostos por areia e discos cartonados com 5 e 10% de cartonadas, o regime de jorro é estabelecido; todavia, para os leitos de areia e discos cartonados com uma proporção mássica de cartonadas maior do que 10%, o regime de jorro não é atingido, e
- para todos os leitos investigados (isto é, leitos de misturas de polietileno e discos cartonados, bem como, leito de misturas de areia e cartonadas), é possível notar que o aumento da concentração de discos cartonadas no leito leva à diminuição da passagem de partículas da região anular para a região de jorro, diminuindo a capacidade de tais leitos atingirem o regime de jorro.

Nas condições operacionais empregadas nesta pesquisa, o modelo Euleriano Granular Multifásico aplicado com o modelo de arraste de Syamlal-O'Brien é capaz de prever o comportamento fluidodinâmico característico de um leito de jorro cônico. Além disso, é possível reproduzir os perfis de distribuição de fração de volume de sólidos tanto para os leitos de misturas de polietileno e cartonadas quanto para os leitos de areia e discos cartonados. Por meio desses perfis simulados, é possível identificar as condições de mínimo jorro, caracterizadas pela queda de pressão no leito e pela velocidade do ar no mínimo jorro.

Para as misturas de polietileno e discos cartonados, a metodologia numérica adotada é capaz de prever as condições de mínimo jorro, caracterizadas pelas variáveis V_{mj} e ΔP_{mj} , com uma concordância razoável com os dados experimentais; todavia, os valores simulados de ΔP_{max} superestimam os experimentais. Para as

misturas de areia e discos cartonados, os dados simulados de V_{mj} , ΔP_{mj} , ΔP_{max} subestimam os valores experimentais.

No âmbito energético, uma análise da reciclagem das embalagens cartonadas pelo processo de pirólise mostra que uma grande quantidade de energia pode ser economizada por meio do alumínio que é recuperado e volta à cadeia produtiva como matéria-prima.

No aspecto ambiental, a pirólise de embalagens cartonadas além de evitar o descarte inadequado dessas embalagens em lixões, representa a economia de uma grande quantidade de bauxita e uma redução na quantidade de gases de efeito estufa emitida para a atmosfera em função do alumínio que é reciclado.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisadores interessados no tema deste trabalho, apresentam-se as seguintes sugestões:

- a realização de testes fluidodinâmicos em leito de jorro com pellets de compósito do polietileno e alumínio, visando a pirólise deste e o reaproveitamento do papel que já possui mercado estabelecido;
- a obtenção de trabalhos experimentais visando a aquisição de dados de distribuição de velocidades de partículas e porosidade no interior do leito;
- o uso do planejamento experimental com o objetivo de avaliar o efeito da composição da mistura e altura de leito estático sobre a fluidodinâmica do leito de jorro, e
- a introdução e análise de fatores forma para as partículas não-esféricas, usando o *UDF (user-defined function)* nas simulações via CFD.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Sustentabilidade da Indústria Brasileira do Alumínio**. São Paulo: CNI, 2012. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/downloads/abal-rio20.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2013.

ALBINA, D.O. Emissions from multiple-spouted and spout-fluid fluidized beds using rice husks as fuel. **Renewable Energy**, v. 31, n. 13, p. 2152-2163, 2006.

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

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

ARABIOURRUTIA, M. et al. Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 230-237, 2012.

BACELOS, M. S.; FREIRE, J. T. Capítulo 4 - Segregação de partículas esféricas em leitos de jorro cônicos. In: Freire, J. T.; Ferreira, M. C (Eds.). (Org.). Aplicações em Sistemas Particulados. São Carlos: Suprema, 2009, v. 1, p. 96-112.

BACELOS, M. S.; PASSOS, M. L.; FREIRE, J. T. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. **Powder Technology**, v. 174, n. 3, p. 114-126, 2007.

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.

BAHRAMIAN, A; OLAZAR, M. Profiling solid volume fraction in a conical bed of dry micrometric particles: measurements and numerical implementations. **Powder Technology**., v.212, p. 181-192, 2011.

BARROZO, M.A.S.; SANTOS, K.G.; CUNHA, F.G. Mechanical extraction of

natural dye extract from *Bixa orellana* seeds in spouted bed. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 279-282, 2013.

BENELLI, L.; SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA W. P. Spouted bed performance on drying of an aromatic plant extract. **Powder Technology**, v. 239, p. 59-71, 2013.

BERNOCCO, D.; BOSIO, B.; ARATO, E. Feasibility study of a spouted bed gasification plant. **Chemical Engineering Research and Design**, 2012

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.

BÉTTEGA, R. et al. CFD Modelling of a semi-cylindrical spouted bed: numerical simulation and experimental verification. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 177–184, 2009

BEZERRA, C. V. et al. Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed – Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. **Industrial Crops and Products**, v.41, p. 241-249, 2013.

BORINI, G.B.; ANDRADE, T.C.; FREITAS, L.A.P. Hot melt granulation of coarse pharmaceutical powders in a spouted bed. **Powder Technology**, v. 189, n. 3, p. 520-527, 2009.

CEMPRE – Compromisso empresarial para a reciclagem. 2013. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/ft_longavida.php>. Acesso em: 31 mar. 2013.

CHO, G.; DODDS, J; SANTAMARINA, J. C. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 132, n. 5, p. 591-602, 2006.

COOK, H. H.; BRIDGWATER, J. Segregation in spouted beds. **Canadian**

Journal of Chemical Engineering, v. 56, p. 636-638, 1978.

DÍAZ, et al. A First Approach to CFD Simulation of Hydrodynamic Behaviour in a Conical Spouted Bed Contactor, **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 6, n.1, p.1542-6580, 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, 2006a.

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, 2006.

EPSTEIN, N. Empirical and analytical hydrodynamics. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. (Eds.). **Spouted bed and spouted-fluid beds: Fundamentals and Applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. cap. 3, p. 29-54.

EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Introduction. In:_____. **Spouted bed and spouted-fluid beds: Fundamentals and Applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. cap. 1, p. 1-14.

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

GRACE, J.R.; Effect of particle shape on liquid-fluidized beds of binary (and ternary) solids mixtures: segregation vs. mixing. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 5, p. 1528-1539, 2006.

HOSSEINI, S.H; ZIVDAR, M; RAHIMI, R. CFD simulation of gas–solid flow in a spouted bed with a non-porous draft tube, **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.48, n.11-12, p.1539–1548, 2009.

HUILIN, L. et al. Numerical simulations of hydrodynamic behaviour in spouted beds. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 79, n. 5, p. 593-599. 2001.

ISHIKURA, T.; SHINOHARA, H.; TANAKA, I. Behavior of fine particles in a

spouted beds consisting of fine particles and coarse particles. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, n. 3, p. 317-324, 1983.

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

LUN, C. K. K. et al. 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.

MARTINS, G. Z. et al. Effect of process variables on fluid dynamics and adhesion efficiency during spouted bed coating of hard gelatine capsules. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 12, p. 2238-2246, 2008.

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

MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**, 3. ed., CRC Press, 2006.

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

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

NIÑO, M. et al. Simulation of a spouted bed reactor for solid catalyst alkylation. **Fuel**, v. 86, n. 9, p.1313-1324, 2007.

OLAZAR, M. et al. Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, n. 1-2, p. 345-351, 2009.

OLAZAR, M. et al. Continuous pyrolysis of waste tyres in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, v.89, n. 8, p. 1946-1952, 2010.

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. Flash pyrolysis of forestry residues from the Portuguese Central Inland Region within the framework of the BioREFINA-Ter. **Bioresource Technology**, v. 129, p. 512-518, 2013.

OLAZAR, M. et al. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Resources, Conservation and Recycling**, v.59, p. 23-31, 2012.

OLAZAR, M. et al. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**., v. 32, n. 11, p. 2826-2835,1993.

PASSOS M. L. et al. Bixin powder production in conical spouted bed units. **Drying Technology** ,v. 16, n. 9-10, p.1855-1879,1998.

PATERSON, N. et al. The characterisation of tars produced during the gasification of sewage sludge in a spouted bed reactor. **Fuel**, v. 83, n.14-15, p. 949-1960, 2004.

RASUL, M. G. Spouted bed combustion of wood charcoal: performance comparison of three different designs. **Fuel**, v. 80, n.15, p. 2189-2191, 2001.

ROBINSON, T.; WALDIE, B. Particle cycle times in a spouted bed of polydisperse particles. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, 632-635. 1978.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Correlation for calculation of the gas dispersion coefficient in conical spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 50, n.13, p. 2161-2172, 1995.

SAN JOSÉ, M.J. et al. Hydrodynamics of catalyst in conical spouted. **Catalysis Today**, v. 147, p. S162-S169, 2009.

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.

SOBIESKI, W. Influence of selected Eulerian multiphase model parameters on the simulation results for a spouted bed grain dryer. **Task Quarterly**, v.12, p. 45-70, 2008.

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

TETRA PAK – Protege o que é bom. 2010. Disponível em: <www.tetrapak.com.br/negocios/embalagens/familias.asp> Acesso em: 31 mar. 2013.

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

WANG, Z.G; BI, H.T; LIM, C.J. Numerical simulations of hydrodynamic behaviors in conical spouted beds. **China Particuology**, v.4, n. 3–4, p.194-203, 2006.

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.

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

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.