



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

DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE RECUPERAÇÃO DE
ALUMÍNIO DO COMPÓSITO PEBD/AI VIA PIRÓLISE:
SEGREGAÇÃO EM LEITO DE JORRO**

SÃO MATEUS – ES

2020

DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE RECUPERAÇÃO DE
ALUMÍNIO DO COMPÓSITO PEBD/AI VIA PIRÓLISE:
SEGREGAÇÃO EM LEITO DE JORRO**

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 Bacelos.

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Padovani Xavier.

SÃO MATEUS – ES

2020

M291p Mantegazini, Diunay Zuliani, 1992-
Potencial energético de recuperação de alumínio do compósito
PEBD/Al via pirólise : segregação em leito de jorro / Diunay
Zuliani Mantegazini. - 2020.
70 f. : il.

Orientador: Marcelo Silveira Bacelos.
Coorientador: Thiago Padovani Xavier.
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Energia. 2. Sistemas particulados. 3. Resíduos sólidos. 4.
Alumínio. 5. Compósito PEBD/Al. I. Bacelos, Marcelo Silveira.
II. Xavier, Thiago Padovani. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV.
Título.

CDU: 620.9



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por MARCELO SILVEIRA BACELOS - SIAPE 1649986 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 30/03/2020 às 14:30

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/13486?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por THIAGO PADOVANI XAVIER - SIAPE 2886430 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 31/03/2020 às 10:47

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/13810?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
TAISA SHIMOSAKAI DE LIRA - SIAPE 1758896
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES
Em 31/03/2020 às 13:04

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/13856?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Juberto Mantegazini e Maria Aparecida Vignatti Mantegazini, a minha irmã Dhangeli Zuliani Mantegazini e aos familiares.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos, pela competência, dedicação, profissionalismo, educação, respeito e amizade. O senhor foi fundamental para a realização deste trabalho. E ao meu coorientador Prof. Dr. Thiago Padovani Xavier pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Aos demais professores do PPGEN/UFES, em especial aos professores, Paulo Sérgio da Silva Porto e Taisa Shimosakai de Lira. Obrigado pela dedicação e empenho.

A todos os técnicos e servidores do CEUNES/UFES, que de forma direta e indireta colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradeço o apoio da TETRA PAK e do Fernando Luiz Neves à pesquisa.

À FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Dentre os processos de recuperação dos resíduos de embalagens cartonadas, a pirólise é reportada como uma tecnologia sustentável, limpa e inovadora. A sua utilização possibilita a obtenção de produtos com elevado valor agregados, como óleos parafínicos e alumínio, além de contribuir para a recuperação de um resíduo sólido. O leito de jorro composto por misturas binárias (sólido + inerte) tem sido investigado como um promissor reator para a pirólise de sólidos, devido a sua alta taxa de troca térmica. Entretanto, ainda é necessária uma maior compreensão sobre a segregação de partículas binárias, com o intuito de obter condições operacionais que apresentem baixos índices de segregação. Nesse contexto, este trabalho é dividido em duas partes. A primeira tem como objetivo investigar o efeito da velocidade do ar, razão de diâmetro e concentração de partículas sobre a segregação, evidenciada pelo índice de mistura (I_m), tendo como base experimentos estatisticamente planejados. A segunda parte visa realizar uma análise do potencial econômico e energético do processo em leito de jorro. Dentre os fatores analisados, apenas a concentração de composto PEBD/Al (X_c) e a razão de diâmetro das partículas (D_{ps}/D_{pc}) apresentaram efeito sobre o índice de mistura (I_m). Para todas as regiões, é possível afirmar que o modelo prevê satisfatoriamente os efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m) com um erro menor do que 8%. As condições operacionais desejáveis ($I_m \approx 1$) para o processo são atendidas para os fatores $D_{ps}/D_{pc} = 1,39$ e $X_c = 10\%$. Em relação ao consumo energético do processo, pode-se constatar que o uso da pirólise pode recuperar 0,745 MWh/tonelada de embalagem cartonada quando comparada ao processo tradicional.

Palavras-chave: Energia. Sistemas particulados. Resíduos sólidos. Alumínio. Compósito PEBD/Al.

ABSTRACT

Among the carton packages waste recovery processes, pyrolysis is reported as a sustainable, clean and innovative technology. Its use makes it possible to obtain products with high added value, such as paraffinic oils and aluminum ingots, in addition to contributing to the recovery of a solid residue. The spouted bed composed of binary mixtures (solid + inert) has been investigated as a promising reactor for pyrolysis of solids, due to its high rate of thermal exchange. However, a greater understanding of the segregation of binary particles is still necessary, in order to obtain operational conditions that present low segregation rates. In this context, this work is divided into two parts. The first aims to investigate the effect of air velocity, diameter ratio and particle concentration on segregation, as evidenced by the mixture index (I_m), based on design of experiments. The second part aims to carry out an analysis of the economic and energetic potential of the spouted bed process. Among the factors analyzed, only the concentration of LDPE/Al composite (X_c) and the particle diameter ratio (D_{ps}/D_{pc}) had an effect on the mixing index (I_m). For all regions, it is possible to state that the model satisfactorily predicts factor effects on the mixing index (I_m) with an error of less than 8%. The desirable operational conditions ($I_m \approx 1$) for the process are met for the factors $D_{ps}/D_{pc} = 1.39$ and $X_c = 10\%$. Regarding the energy consumption of the process, it can be seen that the use of pyrolysis can recover 0.745 MWh/ton of carton when compared to the traditional process.

Keywords: Energy. Particulate systems. Solid waste. Aluminum. LDPE/Al composite.

LISTA DE SÍMBOLOS

D_c	Diâmetro da coluna	[m]
D_p	Diâmetro de partícula	[m]
D_o	Diâmetro de entrada	[m]
$\frac{D_{ps}}{D_{pc}}$	Razão de diâmetro entre as partículas de areia e de compósito PEBD/Al	[-]
$\frac{D_{pl}}{D_{ps}}$	Razão entre diâmetros de partículas maiores e menores	[-]
H_c	Altura do cone	[m]
I_m	Índice de mistura	[-]
m	Massa	[kg]
$M_{C,Ri}$	Massa das partículas de compósito PEBD/Al em cada região do leito	[kg]
$M_{S,Ri}$	Massa de areia em cada região do leito	[kg]
n	Eficiência do soprador	[-]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[Pa]
P_{in}	Pressão entrada no soprador	[Pa]
P_{out}	Pressão saída no soprador	[Pa]
P_w	Potência consumida pelo soprador	[W]
Q	Vazão	[m ³ .s ⁻¹]
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m.s ⁻¹]
v_p	Volume do picnômetro	[m ³]
v_l	Volume de líquido adicionado ao picnômetro	[m ³]

V	Velocidade	[m.s ⁻¹]
V_{mj}	Velocidade de mínimo jorro	[m.s ⁻¹]
V_{mp}	Volume do meio poroso	[m ³]
$\frac{V}{V_{mj}}$	Razão entre a velocidade do ar e de mínima fluidização	[-]
X_c	Fração mássica de compósito PEBD/Al	[-]
$X_{C,Ri}$	Fração mássica de partículas de compósito PEBD/Al em cada região do leito	[-]
$\frac{X_{C,Ri}}{X_{C0}}$	Fração mássica de compósito PEBD/Al inicial no leito	[-]

Símbolos Gregos

ε_0	Porosidade	[-]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ΔP_{max}	Queda de pressão máxima	[Pa]

Abreviaturas

Al	Alumínio
CFD	Fluidodinâmica Computacional
DEM	Método de elementos discretos
DMS	Diferença mínima significativa
IPR	Reações Paralelas Independentes
MFM	Modelo Múltiplos Fluidos
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
TGA	Análise Termogravimétrica

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura de uma embalagem cartonada.....	21
Figura 2.2 - Principais tecnologias aplicadas à recuperação das embalagens cartonadas.	26
Figura 2.3 - Esquema representativo baseado no diagrama de regimes de fluidização de Grace e Olazar em relação ao módulo da velocidade (u^*) e ao módulo relacionado à densidade e tamanho da partícula (dp^*).	28
Figura 2.4 - Fluxograma embrião do processo de pirólise dos pellets do compósito PEDB/Al.	28
Figura 2.5 - Diagrama de blocos proposto para a reciclagem de embalagens cartonadas.	29
Figura 2.6 - Diagrama de processo proposto para a recuperação do alumínio.....	30
Figura 2.7 - Análise SWOT.....	35
Figura 3.1 - (a) Compósito PEBD/Al ($d_p=0,00258$ m); (b) areia ($d_p=0,00258$ m).	37
Figura 3.2- Esquema da unidade experimental: 1 – soprador de ar; 2 - aquecedor; 3 - leito de jorro cônico-cilíndrico; 4 - termopar; 5 - transdutor de pressão; 6 - placa de aquisição de dados; 7 – microcomputador.	40
Figura 3.3 - (a) Base cônica do leito inseridas as guilhotinas; (b) Intervalo entre as guilhotinas.	41
Figura 4.1 - Gráficos de superfície para o índice de mistura (I_m): (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).....	50
Figura 4.2 - Probabilidade normal x Resíduos: (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).	51
Figura 4.3 - Valores preditos x Resíduos: (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).	52
Figura 4.4 - Representação do efeito da força de arraste do ar.	53
Figura 4.5 - Esquema do leito de jorro constituído por misturas com diferentes razões de diâmetro.	54

Figura 4.6 - Imagens do leito de jorro constituído por: (a) $D_{ps}/D_{pc} = 1$, $X_c = 10\%$ e $V/V_{mj} = 1,1$; (b) $D_{ps}/D_{pc} = 1,39$, $X_c = 10\%$ e $V/V_{mj} = 1,1$; (c) $D_{ps}/D_{pc} = 2,54$, $X_c = 10\%$ e $V/V_{mj} = 1,1$	55
Figura 4.7 - Índice de Mistura: a) índice de mistura (I_m) como uma função da razão de diâmetro (D_{ps}/D_{pc}), parametrizado em uma dada fração de compósito (X_c) ; b) Índice de mistura (I_m) com uma função da fração de compósito parametrizado em uma dada razão de diâmetro (D_{ps}/D_{pc}).	56
Figura 4.8 - Análise econômica para a reciclagem de embalagens cartonadas.	58
Figura B.1 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade de entrada do ar: (a) $X_c = 10\%$, (b) $X_c = 30\%$ e (c) $X_c = 50\%$	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estudos relacionados à recuperação de embalagens cartonadas.	22
Tabela 2.2 - Estudos relacionados à segregação de partículas em leito de jorro.	32
Tabela 3.1 – Níveis fatoriais.	41
Tabela 3.2 - Planejamento experimental para misturas compostas de compósito PEBD/Al e areia.	43
Tabela 3.3 - Tabela Tukey com significância de 5%.	46
Tabela 3.4 – Níveis fatoriais para a validação dos resultados experimentais.	47
Tabela 4.1 - Efeitos dos fatores D_{ps}/D_{pc} e $X_c(\%)$ sobre o índice de mistura (I_m).	49
Tabela 4.2 - Modelos para prever o índice de mistura (I_m) nas na Região1 (Fundo), Região 2 (Meio) e Região 3 (Topo).	51
Tabela 4.3 - Índice de mistura experimental e erro relativo percentual.	56
Tabela 4.4 - Custos de Matérias-Primas e Produtos.	57
Tabela 4.5 - Consumo de energia na produção do alumínio em 2010.	58
Tabela A.1 - Propriedades físicas das partículas.	65
Tabela B.1 - Resultados dos experimentos de fluidodinâmica em leito de jorro.	66
Tabela C.1 - Índices de mistura obtidos após o planejamento experimental.	68
Tabela D.1 - Tabela Anova.	69
Tabela D.2 - Valor absoluto das diferenças médias do índice de mistura (intervalo de confiança de 95%).	70
Tabela D.3 - Resultados obtidos após o teste de Tukey.	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO...	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Embalagens cartonadas.....	21
2.2 Recuperação de alumínio das embalagens cartonadas.....	25
2.3 Reatores de Pirólise	27
2.4 Diagramas do processo de pirólise	28
2.5 Segregação de misturas de partículas	32
2.6 Matriz SWOT.....	35
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	37
3.1 Caracterização das partículas e misturas	37
3.1.1 Massa específica	38
3.1.2 Diâmetro	38
3.1.3 Porosidade	39
3.2 Unidade experimental	39
3.3 Planejamento experimental.....	41
3.4 Procedimento experimental.....	44
3.4.1 Condição de mínimo jorro.....	44
3.4.2 Segregação de partículas	44
3.5 Teste de significância Tukey	45
3.6 Validação dos resultados experimentais	47
3.7 Função desejabilidade	47

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m)	48
4.2 Validações do índice de mistura (I_m)	55
4.3 Função desejabilidade	56
4.4 Potencial econômico	57
5. CONCLUSÕES	60
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
7. REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A	65
APÊNDICE B	66
APÊNDICE C	68
APÊNDICE D	69

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem de embalagens cartonadas cresce a cada ano, e é indicada como uma alternativa para diminuir o impacto ambiental decorrente da disposição de seus resíduos. O processamento de embalagens cartonadas pós-consumo via pirólise, permite a separação e recuperação de produtos com alto valor agregado, como óleos parafínicos e alumínio.

Os leitos de jorro cônicos têm sido investigados como um reator promissor para a pirólise de embalagens cartonadas devido ao movimento cíclico de partículas, produzindo uma boa mistura entre as fases envolvidas. Isso permite obter altas taxas de transferência de calor e massa em comparação com os reatores de leitos fluidizados (BACELOS et al., 2011; MAKIBAR et al., 2011; SALDARRIAGA et al., 2015).

Do ponto de vista fluidodinâmico, os desafios relacionados à recuperação de alumínio através da pirólise do compósito PEBD/Al em leitos de jorro cônicos surgem devido às lacunas encontradas na literatura na tentativa de obter regimes de jorro estáveis com baixos níveis de segregação de partículas (BACELOS; FREIRE, 2006; KIANI et al., 2017; MELO et al., 2016; OLAZAR et al., 1993; SAN JOSE et al., 1994; SAN JOSÉ et al., 2006; SANTOS et al., 2019).

Para a pirólise de resíduos de embalagens cartonadas, é necessário que os leitos de jorro cônicos operem com uma mistura binária, composta por material inerte e compósito PEBD/Al. Com base na literatura, o uso de material inerte esférico pertencente ao grupo D de Geldart (GELDART, 1973) aumenta a estabilidade do leito e a taxa de transferência de calor. No entanto, misturas binárias de partículas de tamanho, densidade ou forma desiguais podem causar segregação de partículas.

Estudos realizados sobre a segregação de partículas em leitos com jorro cônicos utilizando misturas de partículas com a mesma densidade foram revisados por Rovero e Piccini no livro *Spouted and spout-fluid beds* (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Esses resultados experimentais mostraram que a estabilidade do jorro e a segregação de partículas estavam fortemente relacionadas. Utilizando misturas binárias de esferas de vidro ($1 < D_p < 8$ mm), San José et al. (SAN JOSE et al., 1994) investigaram o efeito dos parâmetros geométricos do reator (d_0 , d_i , d_c), concentração de partículas, velocidade do ar e razão de diâmetro ($2 < D_{pL}/D_{pS} < 8$) sobre o índice de mistura. Para tamanhos diferentes, as misturas de partículas com a mesma composição apresentaram a maior segregação. Para esses leitos, a segregação de partículas foi mais evidente para velocidade do ar 40% maior do que a velocidade de mínimo jorro.

Bacelos e Freire (BACELOS; FREIRE, 2006) utilizaram misturas binárias de esferas de vidro ($0,78 < D_p < 4,38$ mm), e aplicaram a mesma análise que San José et al. (SAN JOSE et al., 1994). Concluindo que seus leitos de jorro cônico produzem mais segregação de partículas do que as de San José et al. (SAN JOSE et al., 1994), apesar das diferenças das razões de diâmetros utilizados por esses autores. Isso ocorreu devido à diferença do ângulo do cone utilizado: 60° para Bacelos e Freire (BACELOS; FREIRE, 2006) e 36° para San José et al. (SAN JOSE et al., 1994). Com a redução do ângulo de cone há o aumento da taxa de circulação de partículas, aumentando assim, a mistura de partículas.

Mais tarde, Santos et al. (SANTOS et al., 2019) realizaram estudos em leitos de jorro cônicos utilizando esferas de vidro como partículas inertes, para quantificar a segregação de partículas. Os autores utilizaram esferas de vidro e partículas de polietileno com diâmetro de 0,004 m, investigando a dinâmica de fluidos e a segregação de partículas com diferentes densidades. Concluindo que em relação à segregação de misturas, as partículas com maiores densidades (esferas de vidro) tendem a se concentrar perto do fundo, na interface anular do leito, porque elas possuem uma trajetória mais curta do que as partículas com menores densidades (partículas de polietileno) na região da fonte.

Para a recuperação do alumínio e poliolefinas (materiais termoplásticos) de embalagens cartonadas torna-se necessário investigar parâmetros que permitam obter as melhores condições operacionais para o reator de leito de jorro. Nesse contexto, este trabalho é dividido em duas partes. A primeira tem como objetivo

investigar o efeito da velocidade do ar, razão de diâmetro e concentração de partículas sobre a segregação de partículas do compósito PEBD/Al e areia, tendo como base experimentos estatisticamente planejados. A segunda parte visa realizar uma análise do potencial econômico do processo de pirólise em leito de jorro cônico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Embalagens cartonadas

A estrutura física da embalagem cartonada é formada por um aglomerado de materiais (Figura 2.1). O papel corresponde a maior parte do peso da embalagem e possui a finalidade de dar suporte mecânico, além de receber a impressão. O alumínio, que é extraído da bauxita, está presente em uma pequena camada e é utilizado para proteger o alimento contra a entrada de luz, oxigênio e evitar a troca de aromas com o meio externo. Já o polietileno de baixa densidade, derivado de combustíveis fósseis, e agora também produzido a partir da cana-de-açúcar, possui as funções de impedir o contato do alumínio com o alimento e do papel com a umidade, servindo também como elemento de adesão entre as camadas (NASCIMENTO et al., 2007).

Figura 2.1 - Estrutura de uma embalagem cartonada.



Fonte: Adaptado de Tetra Pak.

Através dos bancos de dados da *ISI Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*, foram encontradas as principais publicações relacionadas à recuperação de embalagens cartonadas apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Estudos relacionados à recuperação de embalagens cartonadas.

TÍTULO DO ARTIGO	AUTORES	ANO
<i>Pyrolysis of tetra pak in municipal solid waste</i>	Wu e Chang	2001
<i>Recyclability of milk carton packages for composites production</i>	Leao, Ribeiro e Caraschi	2001
<i>Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene</i>	Mastellone et al.	2002
<i>Pyrolysis of the tetra pak</i>	Korkmaz et al.	2009
<i>The use of the fluidized bed boiler for the disposal of the multi-material packaging waste</i>	Zabaglo et al.	2010
<i>Analysis of reaction kinetics of carton packaging pyrolysis</i>	Alvarenga et al.	2012
<i>Dynamic analysis of reaction kinetics of carton packaging pyrolysis</i>	Alvarenga et al.	2012
<i>Air-Carton packaging waste flow dynamics in a conical spouted bed</i>	Marques et al.	2012
<i>Analysis of conical spouted bed fluid dynamics using carton mixtures</i>	Marques e Bacelos	2013
<i>Kinetics of thermal decomposition of aseptic packages</i>	Haydary e Susa	2013
<i>Pyrolysis of aseptic packages (tetra pak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition</i>	Haydary, Susa e Dudáš	2013
<i>CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite</i>	Melo et al.	2016
<i>Determination of activation energy of pyrolysis of carton packaging wastes and its pure components using thermogravimetry</i>	Alvarenga et al.	2016
<i>CFD analysis of fluidized beds using wastes from post-consumer carton packaging</i>	Freitas et al.	2017

De acordo com a Tabela 2.1 foram realizados estudos sobre a recuperação das embalagens cartonadas, com o intuito de compreender a fluidodinâmica das partículas e estimar os parâmetros cinéticos das reações de pirólise.

Na tentativa de utilizar leitos de jorro cônicos como reatores de pirólise para o processamento de embalagens cartonadas, Marques et al. (MARQUES et al., 2012) e Marques e Bacelos (MARQUES; BACELOS, 2013) investigaram o comportamento do escoamento das misturas através da análise dos dados de queda de pressão no leito, velocidade do ar e altura da fonte. Marques et al. (MARQUES et al., 2012) simularam as condições de operação no leito utilizando a dinâmica de fluidos computacional (CFD). Os autores verificaram que as partículas de embalagens cartonadas em forma de discos não atingem o regime de jorro. No entanto, para leitos com misturas compostas por polietileno e discos de papel cartão (5 e 10% de peso cartonado), os regimes de jorro foram obtidos. Marques e Bacelos (MARQUES; BACELOS, 2013) analisaram a dinâmica de fluidos de misturas ar-papelão e estabeleceram comparações com a dinâmica de fluidos obtida pela técnica de CFD. Com base nas análises os autores concluíram que o regime de jorro é estabelecido para leitos compostos por polietileno e discos de papel cartão numa gama de proporções em massa de 20 e 50% de papel cartão, no entanto, para leitos compreendendo misturas com uma proporção de massa superior a 60% de papel cartão, o regime de jorro não é alcançado.

Através de testes experimentais e simulações CFD, Freitas et al. (FREITAS et al., 2017) e Melo et al. (MELO et al., 2016) modelaram e analisaram o fluxo gás-sólido em leitos compostos por misturas de compósito PEBD/Al e areia. Freitas et al. (FREITAS et al., 2017) investigaram partículas pertencentes ao grupo B de Geldart, ou seja, na faixa de 600 a 500 μm em leitos fluidizados. Os autores concluíram que, os leitos fluidizados são adequados para a pirólise com até 20% de compósito PEBD/Al. Para evitar a segregação de partículas, o leito precisa ser operado a uma velocidade do ar acima de 0,36 m/s, ou seja, $u = 1,60 u_{mf}$ (mínima fluidização). Melo et al. (MELO et al., 2016) investigaram o escoamento de misturas de compósito PEBD/Al e areia em leito de jorro cônico, com partículas pertencentes ao grupo D Geldart, com diâmetro de 2,58 mm. Concluindo que o modelo de arraste Gidaspow e de turbulência $k-\epsilon$ disperso tornou-se adequado para representar características de

escoamento em leitos de jorro cônicos compostos de compósito PEBD/Al (15 a 85% em massa). Além disso, foi possível estimar a queda de pressão do leito com até 20% de erro.

Alvarenga et al. (ALVARENGA et al., 2016) e Wu e Chang (WU; CHANG, 2001) realizaram estudos sobre reações de pirólise de resíduos de embalagens cartonadas, para estimar os parâmetros cinéticos dessas reações, com o auxílio de análises termogravimétricas. Alvarenga et al. (ALVARENGA et al., 2016) concluíram que a pirólise de embalagens cartonadas, seguem três estágios separados de desvolatilização. No primeiro passo ocorre a perda de umidade, seguida pela desvolatilização do papelão e por último a desvolatilização do polietileno. Os modelos isoconversional e IPR (Reações Paralelas Independentes) foram adequados para estimar os parâmetros cinéticos da reação de pirólise da embalagem cartonada e seus componentes puros, entretanto, o método isoconversional subestimou a energia de ativação para pirólise de polietileno. Wu e Chang (WU; CHANG, 2001) realizaram pirólise de resíduos de embalagens tetra pak em nitrogênio. Os experimentos cinéticos de pirólise para os principais componentes das embalagens cartonadas (papel e polietileno de baixa densidade) foram realizados em taxas de aquecimento (β) de 5,2; 12,8; 21,8 K.min⁻¹. Os resultados indicaram que o modelo de uma reação e o modelo de duas reações poderiam ser usados para descrever a pirólise de PEBD e papel respectivamente.

Korkmaz et al. (KORKMAZ et al., 2009) e Haydary et al. (HAYDARY; SUSA; DUDÁŠ, 2013) investigaram a pirólise de embalagens cartonadas, visando maximizar e quantificar o rendimento de produtos (carvão, líquido e gás). Korkmaz et al. (KORKMAZ et al., 2009) realizaram experimentos de pirólise sob atmosfera inerte em reator em batelada a diferentes temperaturas e diferentes modos de pirólise (um e dois passos). Os autores apontaram que os resíduos de embalagens cartonadas são recursos úteis para reciclagem, pois a conversão dos resíduos geram produtos com alto valor agregado, além de poderem ser usados na geração de energia. Haydary et al. (HAYDARY; SUSA; DUDÁŠ, 2013) estudaram um reator de fluxo do tipo parafuso e um reator catalítico secundário para o craqueamento de alcatrão. Os experimentos de pirólise foram realizados em temperaturas variando de 650°C a 850°C, visando à maximização da quantidade do produto gasoso e a redução do

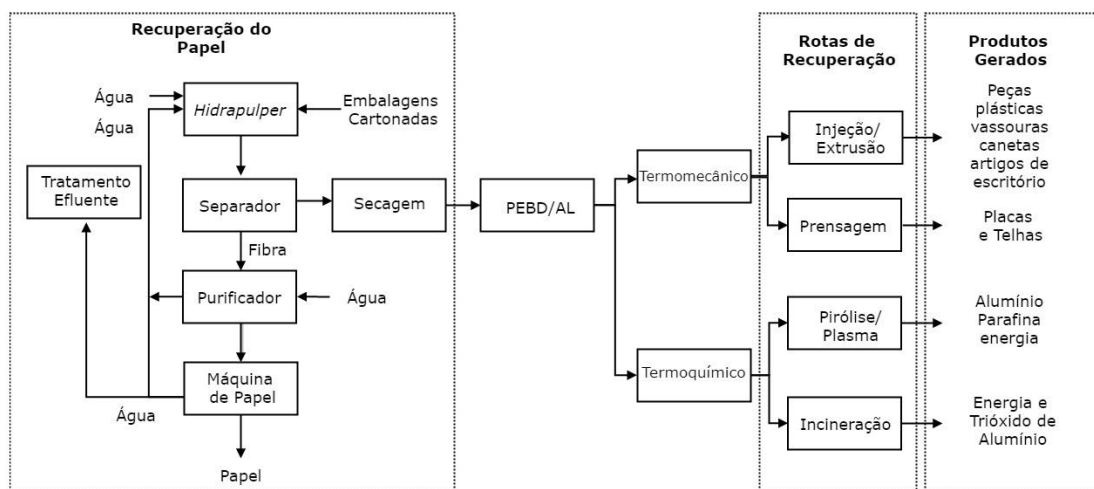
teor de alcatrão. A folha de alumínio foi facilmente separada do produto sólido. Em temperaturas inferiores a 750°C, a folha de alumínio foi obtida sem quaisquer alterações estruturais ou químicas visíveis. Dois tipos de catalisadores foram usados para a decomposição térmica catalítica do alcatrão (dolomita e argila vermelha). Ambos os tipos de catalisadores afetaram significativamente o teor de alcatrão. O efeito dos catalisadores foi mais evidente a temperaturas acima de 750°C. No processo usando dolomita como catalisador, a quantidade total de alcatrão foi reduzida e a 850°C foi produzido um rendimento não mensurável de alcatrão.

Mastellone et al. (MASTELLONE et al., 2002) realizaram investigações através da injeção de polietileno reciclado em um reator de leito fluidizado em escala laboratorial, em lotes ou em operação contínua. Os experimentos em lotes permitiram investigar as interações polímero-partículas dentro do reator de leito fluidizado, que afetam fortemente a fenomenologia e a taxa de degradação do polímero. Os experimentos contínuos indicaram como o rendimento e a composição dos produtos é afetada por duas variáveis operacionais fundamentais do processo: a temperatura do leito e o tempo de permanência no reator.

2.2 Recuperação de alumínio das embalagens cartonadas

A Figura 2.2 ilustra as principais tecnologias aplicadas para recuperação de resíduos de embalagens cartonadas. No Brasil, estas podem ser recuperadas de variadas formas, tais como injeção/extrusão, prensagem, pirólise/plasma ou por incineração.

Figura 2.2 - Principais tecnologias aplicadas à recuperação das embalagens cartonadas.



Fonte: Autor.

O processo de recuperação das embalagens cartonadas inicia-se com a recuperação do papel mediante a hidratação e agitação das fibras. O resíduo desta separação primária (mistura de polietileno e alumínio) pode ser recuperado por processos termomecânicos ou termoquímicos.

A recuperação do papel das embalagens é realizado por processo de hidratação das fibras pela Tetra Pak (NEVES, 1999). Este consiste na desagregação das fibras de papel das camadas de polietileno e alumínio através da agitação mecânica (280 a 450 rpm) com água. As fibras de papel se desprendem e ficam em suspensão, sendo retiradas por bombeamento. Os resíduos, lâminas de polietileno e alumínio são prensados e secos ao ar livre (NEVES, 1999).

O aumento na eficiência do uso das matérias-primas por meio de reciclo é importante para reduzir custos operacionais. Dessa forma, é vantajoso reciclar parte da água utilizada na etapa de *hydropulping*. Segundo Neves (NEVES, 1999), nessa etapa ocorre à agitação do material cartonado com água apenas, sem qualquer aditivo químico ou calor. Portanto, a água recirculada estaria nas mesmas condições de temperatura e pressão que a água não reutilizada e teria aproximadamente a mesma composição. A diferença estaria na presença de certa quantidade de resíduos de fibra de papel, polietileno e alumínio.

A recuperação do polietileno e do alumínio ocorre pelos processos termomecânicos e termoquímicos. Na extrusão, as lâminas de polietileno e alumínio são transformadas em compósito PEBD/Al com o formato de pellets. Estes são utilizados como matéria-prima para produção de peças plásticas por injeção, rotomoldagem ou sopro. Na prensagem, o compósito é transformado em placas ou telhas, comumente utilizadas na construção civil. Na pirólise, tecnologia inovadora, que permite a completa separação das camadas de polietileno e alumínio. Tal processo permite obter óleo parafínico e o alumínio de alta pureza. Na incineração, a energia liberada com a combustão dos resíduos possibilita a geração de vapor e energia. Além do vapor d'água, a combustão do compósito produz gás carbônico e trióxido de alumínio na forma sólida que pode ser usado como agente floculante em estações de tratamento de água ou como agente refratário em altos fornos. Esta rota é usada por alguns países europeus que possuem incineradores com controles ambientais rigorosos e preparados para a recuperação energética.

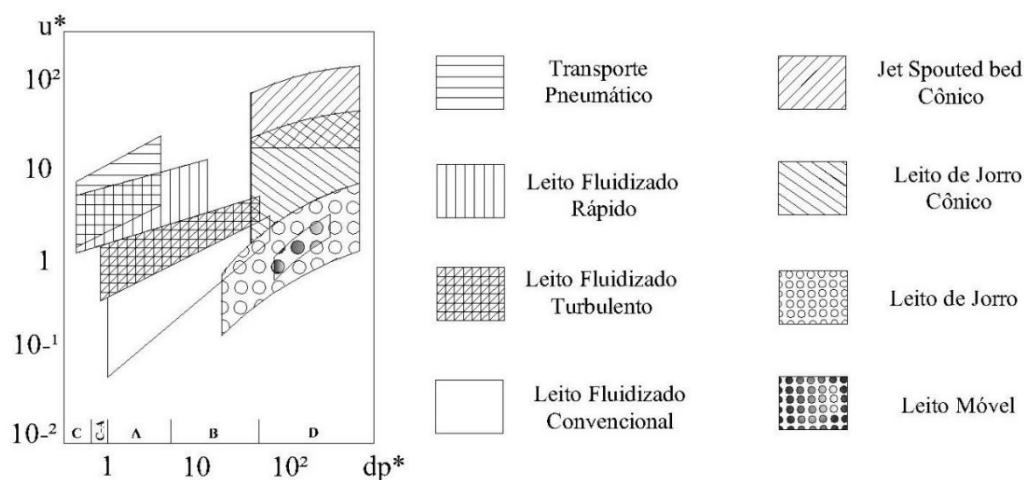
2.3 Reatores de Pirólise

Atualmente, na Espanha, a recuperação do alumínio das embalagens cartonadas é obtida pela pirólise dos resíduos de polietileno e alumínio (lâminas de polietileno e alumínio) em um reator de tambor rotativo realizada pela Stora Enzo. No Brasil o processo é realizado em um reator de plasma térmico (Planta de Piracicaba).

Os leitos de jorro e fluidizado são considerados alternativas inovadoras para a pirólise, devido à sua eficiência no contato com gás-partícula. Tal característica tem sido evidenciada pelo sucesso destes sistemas de contato em uma ampla variedade de processos como secagem, revestimento, granulação e extração mecânica, entre outras aplicações (XAVIER et al., 2016).

Com base no esquema de mapas de regimes de fluidização apresentado na Figura 2.3 nota-se que para uma dada velocidade de gás injetada no leito, opera-se satisfatoriamente com o leito fluidizado empregando-se partículas do grupo A (20 e 100 μm), B (40 a 500 μm) e C (menores de 20 μm) e com jorro usando partículas principalmente do grupo D (maiores que 1 mm).

Figura 2.3 - Esquema representativo baseado no diagrama de regimes de fluidização de Grace e Olazar em relação ao módulo da velocidade (u^*) e ao módulo relacionado à densidade e tamanho da partícula (dp^*).

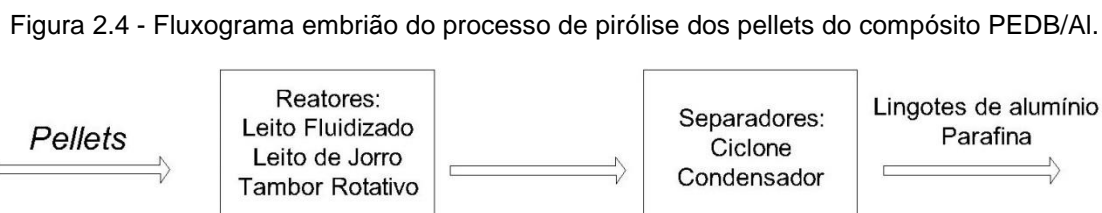


Fonte: Adaptado de Olazar et al. (OLAZAR et al., 1992).

De acordo com Olazar et al. (OLAZAR et al., 1993) e Mathur e Epstein (MATHUR; EPSTEIN, 1974) devido seu baixo índice de segregação, o leito de jorro se torna um promissor reator gás-sólido.

2.4 Diagramas do processo de pirólise

O ponto de partida para a geração do fluxograma de um processo é chamado de fluxograma embrião, sendo consideradas apenas as operações de natureza material. Na Figura 2.4 é apresentado um fluxograma embrião do processo de pirólise dos pellets do composto PEBD/Al, na forma de um diagrama de blocos.

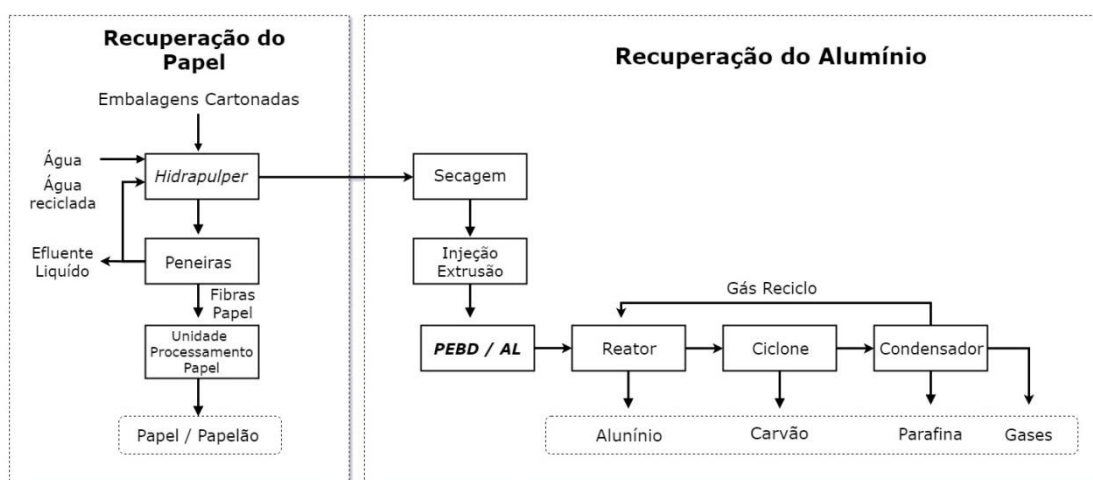


Fonte: Autor.

O fluxograma embrião consiste nos subsistemas de reação (leito fluidizado, leito de jorro e tambor rotativo) e nos subsistemas de separação (ciclones e condensadores). Os ciclones e condensadores são utilizados para separar possíveis sólidos suspensos na corrente gasosa e promover a condensação dos produtos, respectivamente.

Na Figura 2.5 é apresentado um esquema geral do processo de recuperação de embalagens cartonadas na forma de um diagrama de blocos, partindo dos subsistemas de reação e separação apresentados anteriormente.

Figura 2.5 - Diagrama de blocos proposto para a reciclagem de embalagens cartonadas.



Fonte: Autor.

A reciclagem de embalagens cartonadas é realizada por meio da hidratação e separação das fibras de papel seguido por pirólise. O reator de pirólise é alimentado pelo compósito PEBD/Al, onde um conjunto de equipamentos de separação se faz necessário, como ciclones e condensadores. Em relação à integração energética, os gases produzidos na pirólise podem ser usados como combustível para o aquecimento do próprio processo de pirólise ou utilizados para geração de energia elétrica.

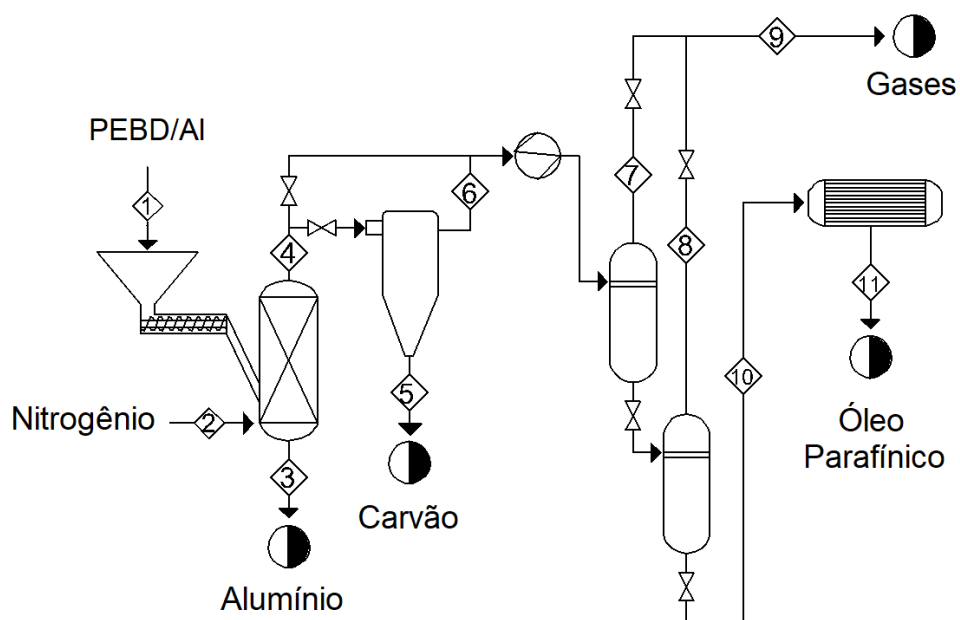
A matéria-prima para a pirólise em questão consiste em pellets do compósito PEBD/Al, com partículas de diâmetros de 0,00102; 0,00185 e 0,00258 m. Essas partículas pertencem ao grupo D no diagrama proposto por Geldart (1973). Visando possibilitar o aumento do índice de reciclagem de embalagens cartonadas, é necessário operar com altas velocidades do gás, o que resulta em movimentação

vigorosa dos sólidos, boa mistura das partículas, decomposição térmica mais rápida e maior produção.

Para atingir tal finalidade, é indicado o uso de reatores de leito de jorro. Neste caso, utiliza-se ainda material inerte (areia), para garantir maior homogeneidade do processo e elevadas taxas de transferência de calor. De acordo com Artetxe et al. (ARTETXE et al., 2010) leitos de jorro com geometria totalmente cônica combinam as características de leitos de jorro cilíndricos (como a capacidade de lidar com partículas grossas, pequena queda de pressão, movimento cíclico das partículas) com aquelas inerentes à sua geometria, como operação estável em uma ampla faixa de vazões de gás.

Dessa forma, é obtido o processo de recuperação através do reator de leito de jorro com integração energética, sendo o mais adequado para a pirólise de resíduos de embalagens cartonadas.

Figura 2.6 - Diagrama de processo proposto para a recuperação do alumínio.



Fonte: Autor.

Para iniciar o processo de pirólise, o reator de leito de jorro cônico é alimentado com o compósito PEBD/Al. As partículas de polietileno absorvem o calor pela condução devido ao contato entre o polietileno e areia. De acordo com estudos realizados por

Artetxe et al. (ARTETXE et al., 2010) o uso da velocidade do gás de entrada duas vezes ao jorro mínimo pode resultar em um bom contato gás-sólido para a pirólise, pois a circulação da velocidade da partícula no leito é significativamente dependente da velocidade do gás. Além disso, para altas temperaturas (acima de 600°C) foi verificado que um resíduo pirolítico fino e duro (resíduo carbonáceo) depositado na superfície das partículas de areia pode ser minimizado. Logo, para operação em leito contínuo, há baixa acumulação desse resíduo carbonáceo (não pegajoso) em partículas de areia ($\pm 2\%$ em massa) a altas temperaturas (600°C), o resíduo pirolítico formado pode não comprometer o regime de jorro. Além disso, para a pirólise de compósito PEBD/Al, a temperatura do leito precisa atingir pelo menos 660.3 °C (ponto de fusão do alumínio a pressão de 101.325 Pa), nesta temperatura o alumínio derrete e pode ser coletado no fundo do reator. Segundo Alvarenga et al. (ALVARENGA et al., 2016), a degradação térmica do polietileno fundido apresenta uma etapa de desvolatilização. Então, no reator, ele é convertido em óleos parafínicos na forma de vapores que podem ser coletados no topo da coluna.

Esse vapor é encaminhado aos ciclones, cuja função é separar o carvão presente na fase gasosa. A corrente gasosa entra tangencialmente em alta velocidade na câmara formando uma espiral descendente externa e uma espiral ascendente interna. A aceleração centrífuga impulsiona as partículas contidas no gás contra a parede. A componente vertical da força e a gravidade forçam as partículas para a parte inferior do ciclone, de onde elas vão para um local de armazenamento e são separadas da fase gás. Já os condensadores, promovem a separação dos vapores. A mistura é resfriada até uma temperatura abaixo do ponto de liquefação dos vapores. Desta forma, os vapores passam para a fase líquida e podem ser facilmente separados da fase gasosa e direcionados para um coletor de líquido.

Os gases produzidos na pirólise podem ser usados como combustível para aquecimento do próprio processo de pirólise ou utilizados para geração de energia elétrica. Na empresa Stora Enso, o gás é utilizado para geração de energia e tem capacidade de suprir cerca de 20% da necessidade energética da planta.

2.5 Segregação de misturas de partículas

O leito de jorro opera com uma mistura binária de partículas com tamanho e/ou densidade diferentes. 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. No entanto, devido à diferença de tamanho, massa específica e forma das partículas podem dar origem à segregação, sendo o tamanho o mais importante em um sistema de fase única (WILLIAMS, 1968). A Tabela 2.2 exibe os principais e recentes estudos relacionados a segregação de partículas em leito de jorro.

Tabela 2.2 - Estudos relacionados à segregação de partículas em leito de jorro.

TÍTULO DO ARTIGO	AUTORES	ANO
<i>Spouting behavior of binary particle mixtures of different densities: Fluid dynamics and particle segregation</i>	Santos et al.	2019
<i>Mixing and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density</i>	Kiani et al.	2017
<i>Numerical investigation of particle mixing and segregation in spouted beds with binary mixtures of particles</i>	Du et al.	2016
<i>Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed</i>	Xavier et al.	2016
<i>Fluid Dynamics of a Sand-Biomass Mixture in a Spouted-Bed Reactor for Fast Pyrolysis</i>	Santos et al.	2013
<i>Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method</i>	Ren et al.	2012
<i>Characteristics of flow in wet conical spouted beds of unequal-sized spherical particles</i>	Bacelos e Freire	2008
<i>Stability of spouting regimes in conical spouted beds with inert particle mixtures</i>	Bacelos e Freire	2006

Por causa dos baixos índices de segregação, os leitos de jorro cônicos tem desempenhado um papel importante como reator na gaseificação do carvão (S.HANSON;J.W.PATRICK;A.WALKER, 2002), na polimerização catalítica (OLAZAR et al., 1994), na pirólise de plásticos e de serragem (OLAZAR et al., 2000) (AGUADO et al., 2005) e tem sido apontado na literatura como um secador em potencial no processamento de pastas e/ou suspensões termicamente sensíveis (SILVA-MORIS; ROCHA, 2006).

Kiani et al. (KIANI et al., 2017), Xavier et al. (XAVIER et al., 2016) e Santos et al. (SANTOS et al., 2013) investigaram experimentalmente a dinâmica de fluidos para misturas binárias, com diferentes condições de operação e propriedades das partículas. Kiani et al. (KIANI et al., 2017) utilizaram uma mistura binária de partículas sólidas, incluindo areia, gesso e poliuretano. Foram avaliados os efeitos da velocidade do ar, tamanho de partícula e fração mássica da mistura. Os resultados mostraram que a segregação das partículas e o tempo para o equilíbrio diminuíram quando a velocidade do ar ultrapassou a velocidade mínima de jorro. A segregação axial aumentou com a razão de diâmetro das partículas. Xavier et al. (XAVIER et al., 2016) analisaram uma mistura de areia e casca de macadâmia com diferentes frações de massa e alturas de leito estático. As partículas apresentaram boa circulação no leito para frações de massa de 25 a 75%, com níveis aceitáveis de segregação para o processo de pirólise. O aumento da fração mássica de areia na mistura diminuiu o nível de segregação. Santos et al. (SANTOS et al., 2013) trabalharam com misturas binárias de areia e bagaço de cana com diferentes composições. Concluindo que os perfis axiais da fração volumétrica de partículas de bagaço de cana indicaram que uma maior proporção de partículas de biomassa está presente na parte superior do leito. Partículas mais densas (areia) percorrem uma trajetória mais curta do que a biomassa que circula preferencialmente ao longo do anel externo com pior fluidez, causando assim a segregação.

Ren et al. (REN et al., 2012) investigaram o comportamento e a segregação de partículas com diferentes densidades em leitos de jorro com misturas binárias, através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Os autores empregaram o método de elementos discretos (DEM) e o cálculo numérico foi baseado em um leito de jorro cilíndrico com diâmetro interno, altura e base cônica de 0,2 m, 0,7 m e 60°,

respectivamente, além de partículas esféricas com diâmetro igual a 0,004m. Os resultados mostram que o processo de mistura de partículas contém principalmente três estágios: estágio de macro mistura, estágio de micro mistura e estágio de mistura estável. A qualidade da mistura é descrita pelo índice de mistura Lacy, e é avaliada por dois parâmetros: grau de mistura na fase de equilíbrio de mistura e o tempo necessário para atingir o valor estável. A qualidade da mistura aumenta com o aumento da velocidade do gás e diminui com o aumento das diferenças de densidade de partículas da mistura binária. Além disso, verificou-se que o processo de mistura ao longo da direção axial é mais lento do que o da direção radial, e em ambas as direções, a mistura com menor diferença de densidade do componente mostra uma maior taxa de mistura e melhor uniformidade de mistura.

Bacelos e Freire (BACELOS; FREIRE, 2006) apresentaram uma investigação para quantificar a estabilidade de regimes de jorro por flutuações de pressão e de segregação de partículas em os leitos de jorro cônico operando a 60°C com uma variedade de combinações de partículas. Dados mostram que, ocorre um desvio padrão dos sinais de pressão de 50 Pa. Os leitos com misturas de partículas inertes podem atingir regimes de jato estáveis, reduzindo a razão de diâmetro de partículas (D_{pL}/D_{pS}) de 2,85 para 1,98 e aumentando a altura do leito de 0,105 para 0,195 m. Além disso, a análise dos índices de segregação revelou que o leito de jorro cônico utilizado por Bacelos e Freire, produzem mais segregação de partículas do que os utilizados por San José et al. (SAN JOSE et al., 1994), devido à diferença do ângulo do cone utilizado: 60° para Bacelos e Freire e 36° para San José et al. 1994. De modo geral, essa investigação permite aplicar os leitos de jorro cônicos ao processamento de sistemas particulados com largas proporções de diâmetro de partículas e distribuições de tamanhos de partículas largas e estreitas, úteis para muitos processos industriais: secagem de pastas, suspensões e fertilizantes, bem como pirólise de plásticos.

2.6 Matriz SWOT

Após a obtenção dos dados, são analisados e destacados os principais temas e subtemas relacionados à recuperação de embalagens cartonadas. Neste sentido, utilizou-se a ferramenta SWOT para melhor visualização dos resultados, a fim de melhor identificar as Forças (S), Fraquezas (W) Oportunidades (O) e Ameaças (T).

Esta técnica foi desenvolvida por Albert Humphrey (década de 1960) e destina-se a ser uma ferramenta usada para fazer análises de cenário ou ambiente. Está consolidado na gestão e planejamento estratégico das organizações devido à praticidade no uso. Dado o fato acima mencionado e selecionando os dados coletados pela metodologia, é possível construir a matriz SWOT:

Figura 2.7 - Análise SWOT.

Positivos	Negativos
Forças	Fraquezas
Reaproveitamento do alumínio, material com alto valor agregado.	Pequena escala de produção.
Oportunidades	Ameaças
Gerenciamento dos resíduos sólidos.	Segregação de partículas no reator.

Fonte: Autor.

Considerando os cenários relacionados à recuperação de embalagens cartonadas pela análise SWOT acima, pode-se destacar:

- **Forças:**

Conforme relatado por Wu e Chang (WU; CHANG, 2001) e Korkmaz et al. (KORKMAZ et al., 2009), a conversão de resíduos de embalagens cartonadas em materiais valiosos é importante do ponto de vista econômico e ambiental. A reciclagem possibilita à obtenção de produtos com altos valores agregados, como óleos parafínicos e alumínio, além de ser indicada como uma alternativa para

diminuir o impacto ambiental, devido ao descarte inadequado dos resíduos cartonados.

- **Fraquezas:**

Em detrimento ao elevado consumo, é de suma importância o estudo e aprimoramento de rotas para a recuperação dos resíduos cartonados visando sua viabilidade técnico-econômica. Ainda existe um pequeno número de empresas capazes de reciclar esse tipo de matéria-prima no mundo. As empresas Alcoa, Tetra Pak, Klabin e TSL Ambiental, lançaram sua nova planta de reciclagem no Brasil em maio de 2005. É a primeira planta do mundo que pode separar e classificar os componentes usados em embalagens cartonadas, através da tecnologia à plasma (KORKMAZ et al., 2009).

- **Oportunidades:**

Devido ao aumento na demanda do mercado, grande quantidade de resíduos de embalagens cartonadas são geradas diariamente. Dessa forma, a reciclagem desses resíduos torna-se cada vez mais importante, permitindo um destino adequado em vez de serem descartados em lixões e aterros sanitários (ALVARENGA et al., 2016). A pirólise surge como uma tecnologia verde para separar o alumínio do polietileno, permitindo que ambas as matérias-primas possam ser usadas para a fabricação de novas embalagens cartonadas (MELO et al., 2016).

- **Ameaças:**

O leito de jorro cônico se torna um reator gás-sólido promissor para a pirólise de compósito PEBD/Al. Entretanto, a segregação caracterizada por concentrações heterogêneas das diferentes partículas presentes, é um fenômeno que se apresenta quando existe diferença de tamanho e/ou massa específica entre as mesmas. Tornando-se o principal desafio a ser superado antes de ser ampliado para aplicações comerciais (MARQUES; BACELOS, 2013).

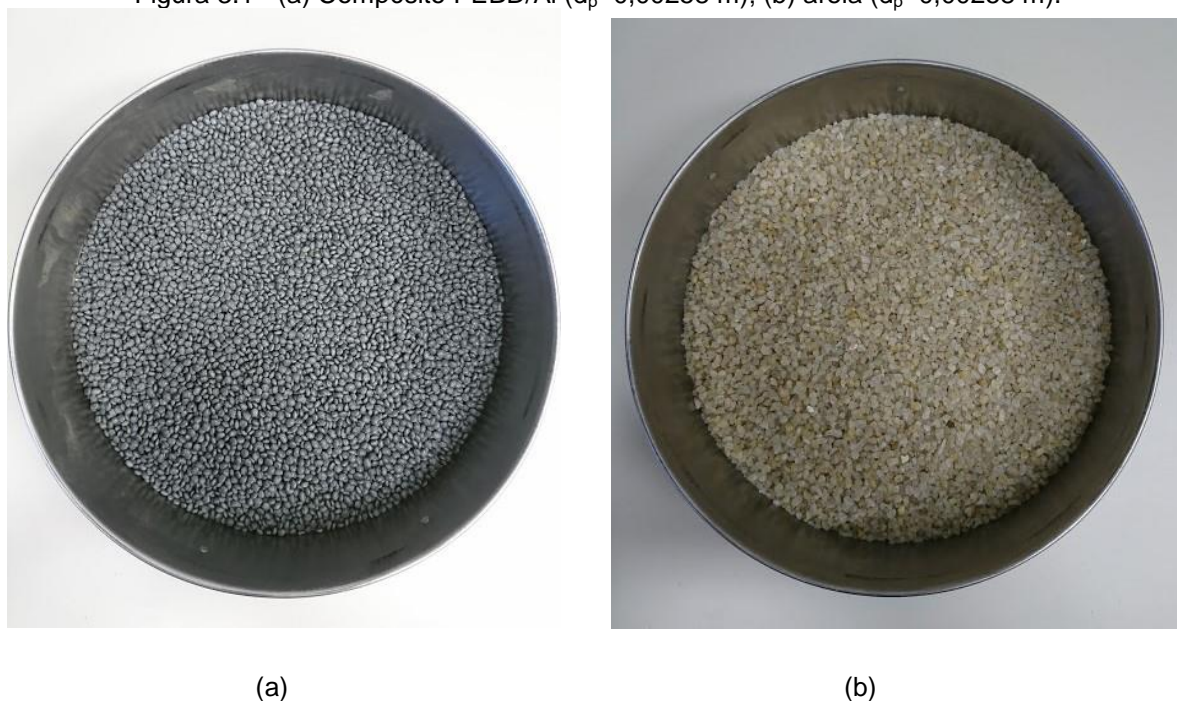
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta detalhes referentes aos materiais utilizados e aos métodos adotados na realização desta pesquisa, visando o cumprimento dos objetivos traçados. Inicialmente, descreve-se a metodologia e as técnicas utilizadas para a caracterização dos materiais utilizados. Posteriormente, detalham-se os equipamentos que compõem a bancada experimental, bem como, o procedimento adotado para a realização dos ensaios de segregação.

3.1 Caracterização das partículas e misturas

Para a realização dos experimentos de segregação em leito de jorro são escolhidas partículas de compósito PEBD/Al (composto por polietileno de baixa densidade e alumínio) e a areia, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - (a) Compósito PEBD/Al ($d_p=0,00258$ m); (b) areia ($d_p=0,00258$ m).



O compósito é considerado um valioso subproduto oriundo da reciclagem de embalagens cartonadas pós-consumo da Tetra Pak Company, através do processo de hidratação das fibras (*“hydro pulping process”*). Após a retirada do papel pela

indústria, os resíduos (polietileno e alumínio) são usados para produzir pellets por meio de injeção ou extrusão térmica. Já a areia é utilizada no reator de leito de jorro como material inerte por fornecer estabilidade ao processo, além de facilitar a troca térmica pela condução. As partículas estudadas pertencem ao grupo D de Geldart (1986), isto é, são partículas capazes de alcançar o regime de jorro estável.

3.1.1 Massa específica

Através da técnica de picnometria líquida são obtidas as massas específicas das partículas de compósito PEBD/Al e areia. Inicialmente, são adicionadas pequenas porções com massa conhecida de partículas de compósito PEBD/Al ou areia ao picnômetro (previamente calibrado com água destilada a uma temperatura média de 25 °C). O picnômetro contendo a amostra é então preenchido com um fluido (água destilada para areia, e querosene para o compósito PEBD/Al) despejando-o pela parede do picnômetro a fim de se evitar bolhas. Dessa forma, através da Equação 3.1 é possível obter a massa específica das partículas.

$$\rho = \frac{m}{v_p - v_l} \quad (3.1)$$

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

3.1.2 Diâmetro

Para a determinação do diâmetro médio das partículas de compósito PEBD/Al e areia é utilizada a técnica de peneiramento. Inicialmente as partículas tem seu tamanho reduzido. Para isso, é utilizado o moinho de facas tipo Willey (macro) com rotação fixa 1150 RPM. Após o processo de moagem, as partículas são classificadas por peneiramento.

As amostras de compósito PEBD/Al e areia são selecionadas dentro de uma faixa granulométrica específica. Para o compósito PEBD/Al, são escolhidas partículas com diâmetros de 0,00102; 0,00185 e 0,00258 m (equivalente a 14/20 mesh, 9/10

mesh e 7/8 mesh na escala Tyler, respectivamente), enquanto que para a areia, são escolhidas partículas com diâmetro de 0,00258 m (equivalente a 7/8 mesh na escala Tyler).

3.1.3 Porosidade

Para determinar a porosidade do leito de partículas puras (compósito PEBD/Al ou areia) bem como das misturas, é realizado um balanço de massa aplicado ao leito de jorro cônico.

São adicionadas pequenas porções com massa conhecida de partículas de areia e/ou compósito PEBD/Al no leito, até que o mesmo atinja uma altura de 0,18m. Utilizando a Equação 3.2 é possível determinar a porosidade para o leito de jorro estático.

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{mp} - V_p}{V_{mp}} \quad (3.2)$$

Onde, V_{mp} é o volume do meio poroso (volume da região cônica preenchida com partículas de areia e/ou compósito PEBD/Al) e o V_p é o volume das partículas.

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

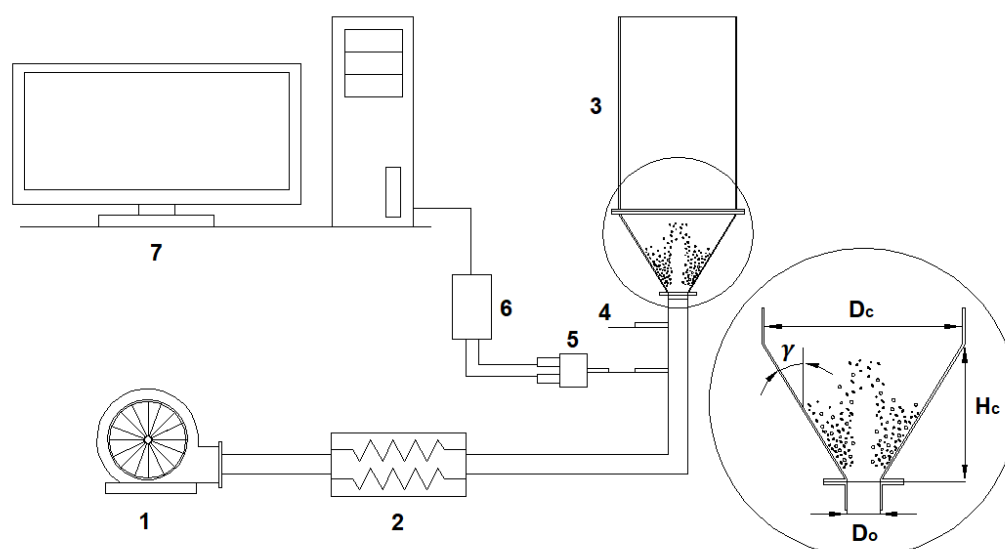
Os valores das propriedades físicas das partículas de areia e compósito PEBD/Al (massa específica, diâmetro e porosidade) obtidas após a realização dos procedimentos de caracterização estão dispostas no Apêndice A.

3.2 Unidade experimental

Os testes de segregação são realizados em uma unidade de leito de jorro cônico em escala piloto. A Figura 3.2 mostra um esboço esquemático da unidade experimental localizada no Laboratório de Eficiência Energética do PPGEN (Programa de Pós-

Graduação em Energia) no Brasil e seus periféricos, evidenciando suas dimensões físicas.

Figura 3.2- Esquema da unidade experimental: 1 – soprador de ar; 2 - aquecedor; 3 - leito de jorro cônico-cilíndrico; 4 - termopar; 5 - transdutor de pressão; 6 - placa de aquisição de dados; 7 – microcomputador.

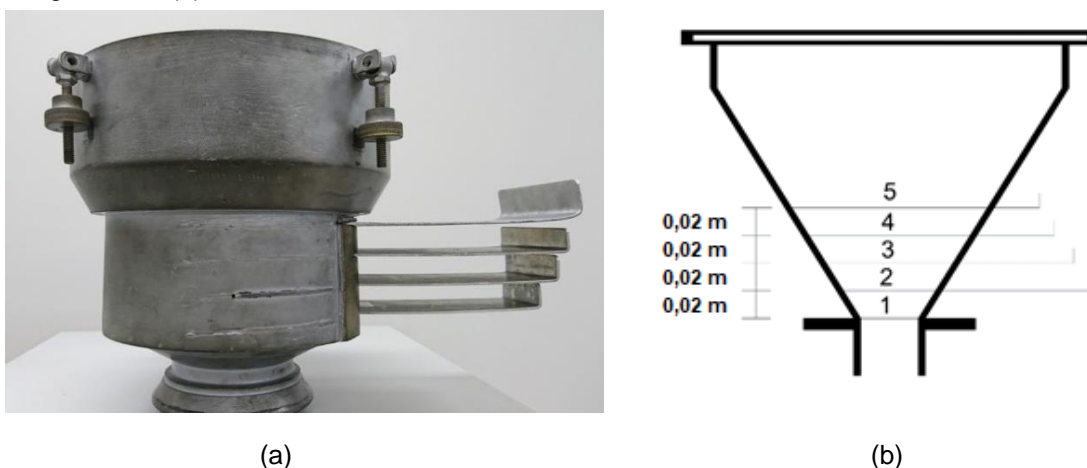


A unidade experimental de leito de jorro é constituída de um soprador de ar IBRAM com vazão de ar máxima de $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$ e 2 CV de potência, sistema de aquecimento de ar com controle automático de temperatura do tipo PID, leito de jorro cônico-cilíndrico, termopar, transdutor de pressão (marca Dwyer, modelo 616C-4, operando em uma faixa de $0\text{-}20 \text{ pol. H}_2\text{O} \pm 1\%$) localizado na tubulação de entrada de ar, ou seja, a $0,015 \text{ m}$ abaixo da base cônica do leito. A aquisição de dados é realizada em um computador (CORE I3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM), ligada a uma placa de aquisição de dados A/D (analógico digital) do fabricante National Instruments.

Os fatores geométricos do reator utilizado têm os seguintes valores: diâmetro da coluna, $D_c = 0,2 \text{ m}$; altura do cone, $H_c = 0,195 \text{ m}$; ângulo do cone, $\gamma = 44^\circ$; diâmetro de entrada, $D_o = 0,043 \text{ m}$.

O leito de jorro cônico é adaptado com um sistema de guilhotinas que permite realizar amostragens de misturas de partículas em diferentes posições axiais no leito (cinco regiões), conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 - (a) Base cônica do leito inseridas as guilhotinas; (b) Intervalo entre as guilhotinas.



3.3 Planejamento experimental

Testes preliminares mostraram que um planejamento fatorial de 2^k não é adequado para expressar adequadamente os efeitos dos parâmetros selecionados nas variáveis de resposta - é observada uma relação não linear entre os parâmetros selecionados e a variável de resposta.

Dessa forma, um novo planejamento fatorial 3^3 é realizado com o objetivo de analisar o efeito da razão de diâmetro das partículas de areia e de compósito PEBD/Al (D_{ps}/D_{pc}), da fração mássica de compósito (X_c) e da velocidade do ar (V/V_{mj}) sobre o índice de mistura (I_m).

Na Tabela 3.1 têm-se os parâmetros selecionados (fatores) e seus níveis correspondentes, para as condições experimentais.

Tabela 3.1 – Níveis fatoriais.

D_{ps}/D_{pc}	$X_c\%$	V/V_{mj}
1,00	10	1,1
1,39	30	1,2
2,54	50	1,3

Os valores dos fatores são escolhidos com base nos limites operacionais do leito e nas características das partículas.

As partículas de areia e compósito PEBD/Al são classificadas no grupo D de Geldart (1973), como partículas que permitem obter um regime de jorro estável. Além disso, partículas com diâmetros menores do que as escolhidas (0,001 a 0,00258 m) possuem baixa resistência à transferência de calor por condução.

São usadas frações mássicas de 10 a 50% de compósito PEBD/Al. Concentrações mássicas maiores do que 50% podem ser inadequadas, devido a menor densidade das partículas de compósito PEBD/Al em relação as partículas de areia. A menor densidade das partículas de compósito faz com as mesmas ocupem um maior volume no leito, dessa forma, a areia aquecida não permanece em contato direto com todo o compósito, reduzindo a transferência de calor e, portanto, a eficiência de conversão do reator.

A faixa de velocidade do ar é escolhida considerando principalmente os limites operacionais do equipamento. A uma velocidade do ar acima de 30% de mínimo jorro pode causar transbordamento de partículas. Além disso, o uso de 10 a 30% V_{mj} permite comparar o efeito da força de arrasto e da gravidade nas partículas durante o regime de jorro.

A Tabela 3.2 exhibe o planejamento experimental completo realizado para as misturas compostas de compósito PEBD/Al e areia a partir da Tabela 3.1.

Tabela 3.2 - Planejamento experimental para misturas compostas de compósito PEBD/Al e areia.

D_{ps}/D_{pc}	X_c	V/V_{mj}
2,54	10	1,1
2,54	10	1,2
2,54	10	1,3
2,54	30	1,1
2,54	30	1,2
2,54	30	1,3
2,54	50	1,1
2,54	50	1,2
2,54	50	1,3
1,39	10	1,1
1,39	10	1,2
1,39	10	1,3
1,39	30	1,1
1,39	30	1,2
1,39	30	1,2
1,39	30	1,2
1,39	30	1,2
1,39	30	1,3
1,39	50	1,1
1,39	50	1,2
1,39	50	1,3
1,00	10	1,1
1,00	10	1,2
1,00	10	1,3
1,00	30	1,1
1,00	30	1,2
1,00	30	1,3
1,00	50	1,1
1,00	50	1,2
1,00	50	1,3

3.4 Procedimento experimental

3.4.1 Condição de mínimo jorro

A condição de mínimo jorro é obtida através da análise de dados da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar - curva característica do leito de jorro. Esse conjunto de dados é determinado pela diminuição do fluxo de ar no leito. Inicialmente, o leito é preenchido com uma dada mistura de partículas de compósito PEBD/Al e areia até atingir a altura de 0,18 m e na sequência o soprador é acionado para que o ar entre em contato com as partículas. A vazão de ar é aumentada manualmente até que o jorro se estabeleça. A partir desse instante, a velocidade do ar é diminuída lentamente no leito até que o jorro entre em colapso, possibilitando a obtenção da velocidade de mínimo jorro e sua curva característica. Para analisar a reprodutibilidade, os dados foram obtidos em tréplicas. A aquisição de dados de queda de pressão foi realizada utilizando o Labview 10.0. Os dados de queda de pressão em função da velocidade do ar referente aos experimentos de fluidodinâmica em leito de jorro encontram-se no Apêndice B.

3.4.2 Segregação de partículas

Para quantificar a segregação de partículas de compósito PEBD/Al, é utilizado um sistema de guilhotinas (Figura 3.3) para uma dada condição operacional estabelecida pelo projeto de experimentos. Isso permite obter misturas de partículas em cinco regiões axiais do leito. Em seguida é realizada a separação das misturas de cada região, pela diferença de densidade ou por peneiramento.

Posteriormente é quantificada a massa de cada componente, para obter a fração mássica de partículas de compósito PEBD/Al ($X_{C,Ri}$) em cada região, como mostra a Equação 3.3:

$$X_{C,Ri} = \frac{M_{C,Ri}}{M_{C,Ri} + M_{S,Ri}} \quad (3.3)$$

Onde, $M_{C,Ri}$ é a massa das partículas de compósito PEBD/Al em cada região do leito e $M_{S,Ri}$ é a massa de areia em cada região do leito.

Para quantificar a segregação em leitos de jorro cônicos, Olazar et al. (OLAZAR et al., 1993) e San José et al. (SAN JOSE et al., 1994) desenvolveram variáveis adimensionais denominadas de índice de mistura (I_m).

Para misturas binárias o índice de mistura (I_m) pode ser calculado:

$$I_m = \frac{X_{C,Ri}}{X_{C0}} \quad (3.4)$$

Onde, $X_{C,Ri}$ é a fração mássica das partículas de compósito PEBD/AI em cada região do leito e X_{C0} é a fração mássica de compósito PEBD/AI inicial no leito.

Valores do índice de mistura (I_m) próximos a 1 indicam uma condição ideal de mistura. Porém, se $I_m > 1$ existe uma concentração de compósito PEBD/AI na respectiva região do leito, enquanto se $I_m < 1$ existe uma concentração de areia na respectiva região do leito.

Para cada região investigada, os resultados dos índices de mistura (I_m) obtidos após o planejamento experimental estão dispostos no Apêndice C.

3.5 Teste de significância Tukey

O Teste de significância de Tukey é aplicado com o objetivo de realizar comparações entre os índices médios de mistura (\bar{I}_m) obtidos para cada região de leito, mediante um planejamento experimental, que considera um intervalo de confiança de 95%.

O teste de significância de Tukey declara que duas médias são significativamente diferentes se o valor absoluto da diferença de \bar{I}_m entre as regiões $[\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}]$ excederem o DMS (diferença mínima significativa). A diferença significativa mínima (DMS) é obtida pela Equação 3.5, considerando um nível de significância de 5%:

$$DMS = q(k, N - k) * \sqrt{\frac{MQ}{NE}} \quad (3.5)$$

Onde $q(k, N-k)$ é o valor obtido na tabela Tukey, considerando o número de colunas (k) e o grau de liberdade dentro dos grupos ($N - k$); MQ é o quadrado médio dentro dos grupos e NE é o número de repetições.

Para a determinação de $q(k, N-k)$ na Tabela Tukey (Tabela 3.3), são utilizados o número de colunas (k) e o grau de liberdade dentro dos grupos ($N - k$). A tabela detalhada de Tukey (não mostrada aqui) pode ser encontrada em Tukey (TUKEY, 1949).

Tabela 3.3 - Tabela Tukey com significância de 5%.

L (N-K)	K								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	3,64	4,6	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,8	6,99
6	3,46	4,34	4,9	5,3	5,63	5,9	6,12	6,32	6,49
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6	6,16
.
.
.
60	2,83	3,4	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65
120	2,8	3,36	3,68	3,92	4,1	4,24	4,36	4,47	4,56
∞	2,77	3,31	3,63	<u>3,86</u>	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47

O teste de significância de Tukey permite a comparação entre as regiões do leite estudadas, considerando a seguinte afirmação:

$$\text{Se } [\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}] \geq DMS \text{ e } \frac{[\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}]}{DMS} > 1 \therefore R_i \neq R_j$$

$$\text{Se } [\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}] < DMS \text{ e } \frac{[\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}]}{DMS} < 1 \therefore R_i = R_j$$

Onde: $i = 1$ a 5 ; $j = 1$ a 5 .

O procedimento detalhado e o resultado obtido após a realização do teste de significância de Tukey encontram - se no Apêndice D.

3.6 Validação dos resultados experimentais

Um novo conjunto de dados é obtido para validar as equações do modelo. Na Tabela 3.4 são mostrados os parâmetros selecionados (fatores) e seus níveis correspondentes.

Tabela 3.4 – Níveis fatoriais para a validação dos resultados experimentais.

D_{ps}/D_{pc}	X_c (%)	V/V_{mj}
1,64	20	1,15
1,18	40	1,25

Os valores dos fatores da Tabela 3.4 são escolhidos, com base no nível de fatores mostrado na Tabela 3.1. Eles são representados pelos valores médios entre o limite inferior e médio ou o limite médio e superior.

3.7 Função desejabilidade

Através da função desejabilidade (Derringer e Suich, 1980), é possível obter a otimização dos fatores investigados, definindo o valor ideal para a variável resposta (I_m). Para cada uma das regiões 2 e 3 são definidos os limites inferior, médio e superior (fatores 0; 0,5 e 1, respectivamente) para otimização da variável respostas ($I_m \approx 1$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m)

Mediante a realização do teste de significância de Tukey, apresentado no Apêndice D, são evidenciadas apenas três regiões de leito com índices de mistura (I_m) diferentes. A região 1 (R_1), a nova região 23 (R_{23}), resultado da junção das regiões 2 e 3 e a região 45 (R_{45}) da união das regiões 4 e 5. Aqui, para facilitar a discussão, as regiões 23 e 45 são denominadas de regiões 2 (R_2) e 3 (R_3), respectivamente.

Os efeitos de cada variável independente (termos lineares e quadráticos) e interações são calculados para o índice de mistura (I_m) nas regiões do fundo (R_1), meio (R_2) e topo (R_3) do leito.

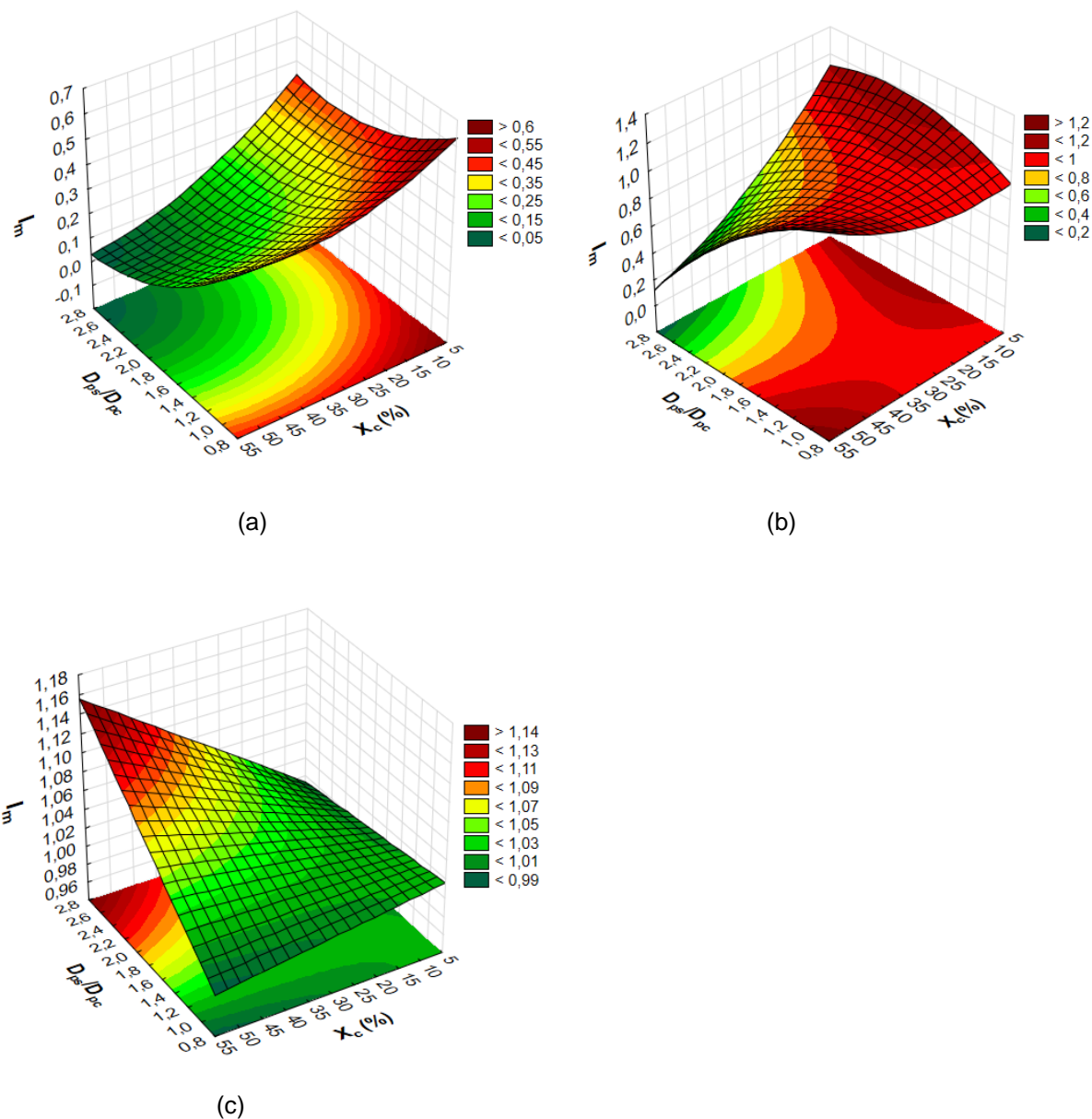
A Tabela 4.1 apresenta a estimativa dos efeitos significativos resultantes sobre essas variáveis, considerando apenas os efeitos que apresentaram p-valor $< 5\%$ (nível de significância). Dentre os fatores analisados, apenas a concentração do compósito PEBD/Al (X_c) e a razão de diâmetro das partículas (D_{ps}/D_{pc}) apresentaram efeito sobre o índice de mistura (I_m).

Tabela 4.1 - Efeitos dos fatores D_{ps}/D_{pc} e $X_c(\%)$ sobre o índice de mistura (I_m).

Região	Fator	Efeitos	Desvio Padrão	T	P-valor
R ₁	Média	0,2992	0,007613	39,3088	<0.01
	(1) D_{ps}/D_{pc} (L)	-0,2433	0,01878	-12,9543	<0.01
	D_{ps}/D_{pc} (Q)	-0,04051	0,01603	-2,5273	<0.02
	(2) X_c (L)	-0,2329	0,01912	-12,1819	<0.01
	X_c (Q)	-0,05112	0,01536	-3,32790	<0.01
	1L by 2L	-0,073039	0,02214	-3,2985	<0.01
	R ₂	Média	0,8795	0,01597	55,05072
(1) D_{ps}/D_{pc} (L)		-0,3544	0,03941	-8,9920	<0.01
D_{ps}/D_{pc} (Q)		0,07353	0,03364	2,1856	<0.04
(2) X_c (L)		-0,2337	0,04013	-5,8236	<0.01
X_c (Q)		-0,08662	0,03223	-2,6868	<0.02
1L by 2L		-0,4190	0,04646	-9,01759	<0.01
R ₃		Média	1,03599	0,001705	607,5222
	(1) D_{ps}/D_{pc} (L)	0,05729	0,004044	14,1665	<0.01
	(2) X_c (L)	0,04976	0,004300	11,5732	<0.01
	1L by 2L	0,06003	0,004978	12,05847	<0.01

Para todas as regiões, considerando o intervalo de confiança de 95%, a Figura 4.1 exibe os gráficos de superfície para o índice de mistura (I_m) nas regiões do fundo e topo.

Figura 4.1 - Gráficos de superfície para o índice de mistura (I_m): (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).



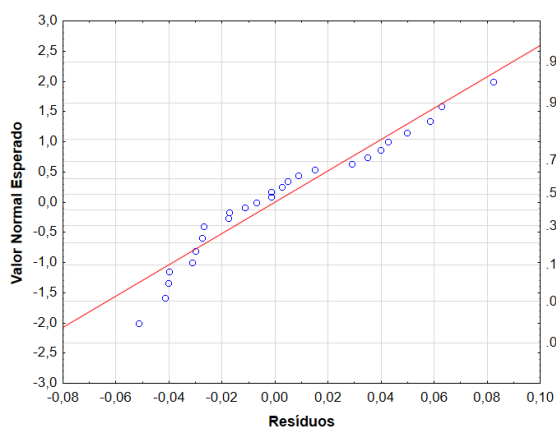
Para as Regiões 1-Fundo, 2-Meio e 3-Topo, os modelos estatísticos para prever o índice de mistura (I_m) são expressos respectivamente nas equações 1, 2 e 3 como mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Modelos para prever o índice de mistura (I_m) nas na Região1 (Fundo), Região 2 (Meio) e Região 3 (Topo).

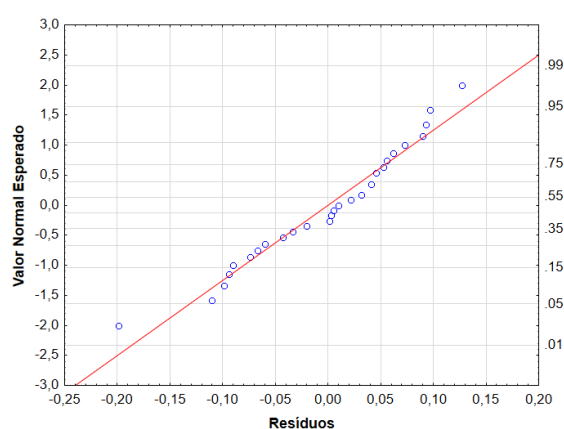
Região	R ²	Equações
1	0,93	$I_m = 0,9496 - 0,4037 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) + 0,08950 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right)^2 - 0,009299 (X) \quad (1)$ $+ 0,0001278 (X)^2 - 0,002368 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) * (X)$
2	0,90	$I_m = 0,4397 + 0,7530 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) - 0,1624 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right)^2 + 0,005226 (X) \quad (2)$ $+ 0,0002165 (X)^2 - 0,01358 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) * (X)$
3	0,94	$I_m = 1,03628 - 0,02124 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) - 0,002203 (X) + 0,001946 \left(\frac{dp_s}{dp_c} \right) * (X) \quad (3)$

A Figura 4.2 mostra o gráfico de probabilidade normal como uma função dos resíduos.

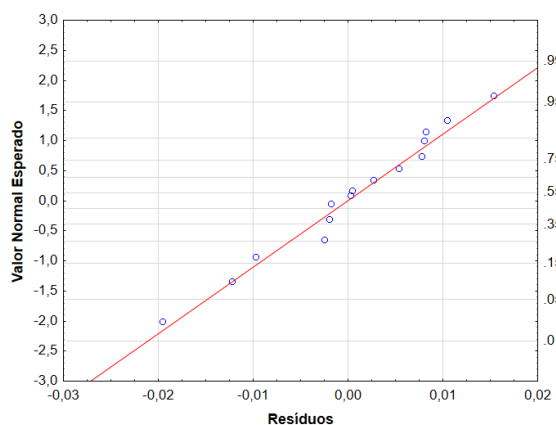
Figura 4.2 - Probabilidade normal x Resíduos: (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).



(a)



(b)

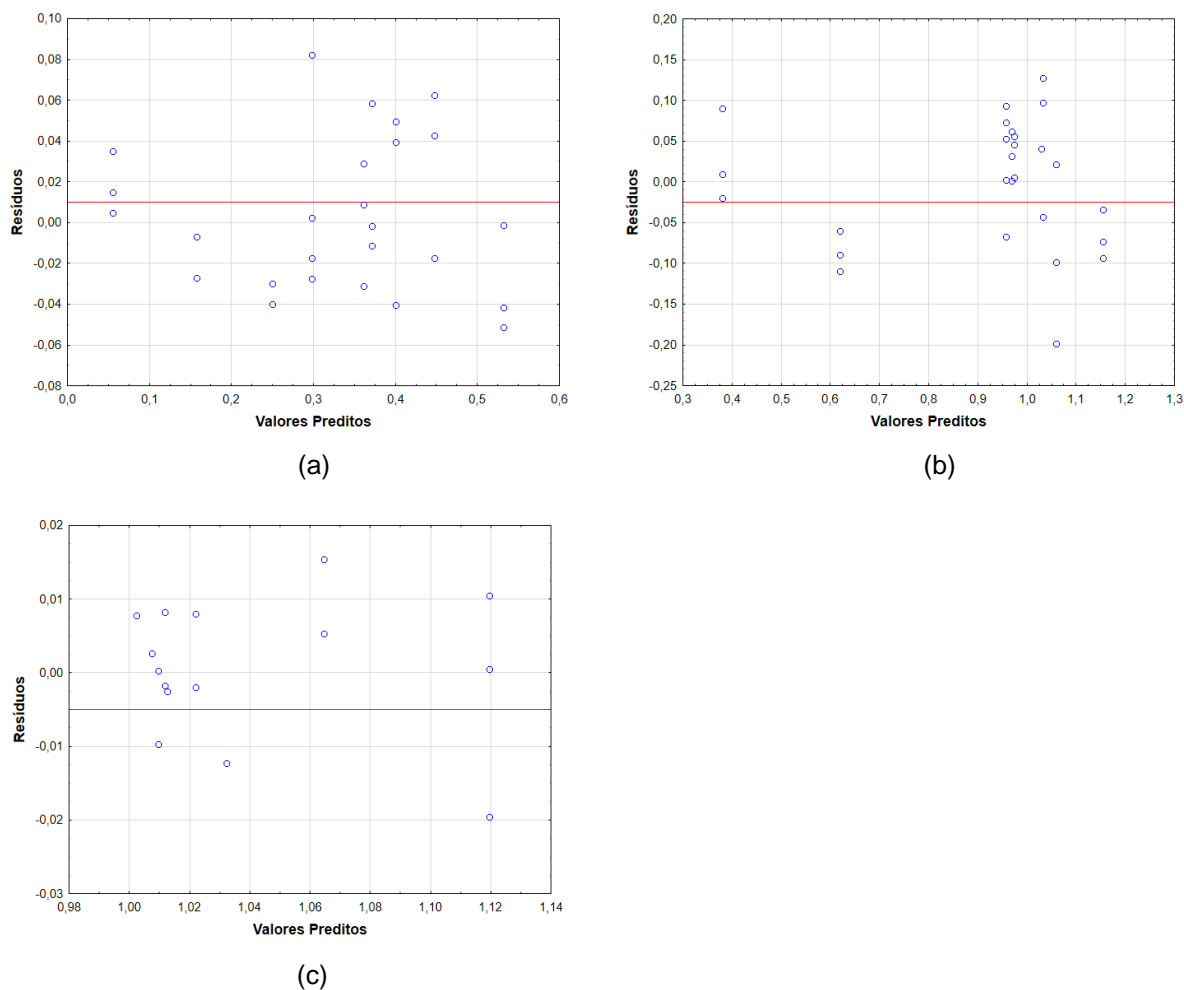


(c)

Com base na análise da Figura 4.2, pode notar-se que os resíduos são normalmente distribuídos ao longo da reta contínua normal esperada.

A Figura 4.3 exibe os resíduos como uma função dos valores preditos. Analisando os dados, pode-se comprovar que os resíduos estão aleatoriamente localizados em torno do zero.

Figura 4.3 - Valores preditos x Resíduos: (a) Região 1 (Fundo), (b) Região 2 (Meio) e (c) Região 3 (Topo).

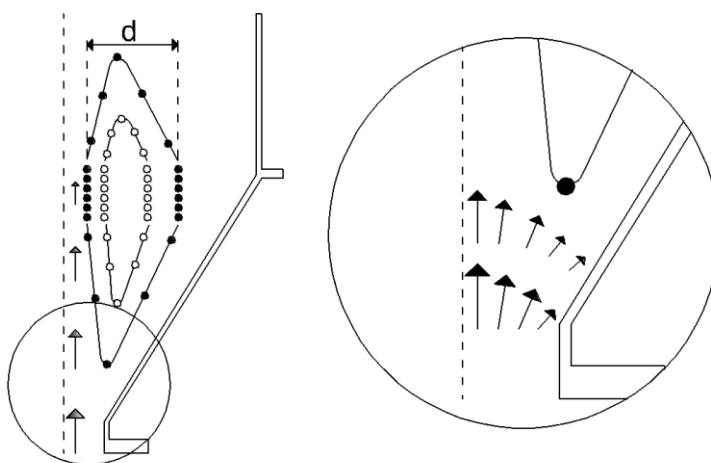


Com base no teste estatístico de adequação dos modelos mostrados nas Figuras 4.2 e 4.3, é possível afirmar que os modelos (equações 1, 2 e 3 mostradas na Tabela 4.2) conseguem prever todas as tendências apresentadas pelos dados experimentais, com base na distribuição normal e aleatória dos resíduos ao longo da reta e em torno do zero, respectivamente.

Os efeitos dos fatores observados estatisticamente mediante o planejamento de experimentos 3^3 pode ser explicado com base nas seguintes hipóteses físicas: ação da força gravitacional e inercial sobre as partículas de areia e composto PEBD/Al na coluna de jorro cônica.

Para o fundo do leito o efeito da razão de diâmetro das partículas de areia e de composto PEBD/Al sobre o índice de mistura (I_m) ocorre principalmente devido a atuação das componentes da força inercial sobre as partículas. A componente radial exerce um esforço de pressão sobre a parede da interface jorro-ânulo não arrastando partículas para a fonte, ao passo que a componente axial cisalha o leito de partículas arrastando-as para a região de jorro em direção à fonte do leito como mostra a figura 4.4. A característica do escoamento do ar nesta região (fundo) gera turbulência sobre as partículas. Como a interface jorro-ânulo é formada por camadas de partículas de areia e composto, o efeito da força de arraste do ar nesta região torna-se menos efetivo para as partículas mais densas, fazendo com que estas se concentrem no fundo do leito. Esta situação se torna mais pronunciada quanto maior for à razão de diâmetro entre as partículas de areia e composto.

Figura 4.4 - Representação do efeito da força de arraste do ar.



No fundo, para a faixa de X_c investigada (10 a 50%), como o volume ocupado de composto (40%v.v a 90% v.v) é maior do que o da areia, a resistência à transferência de quantidade de movimento do composto sobre as partículas de areia é maior. Isso provavelmente explica a concentração de areia no fundo.

Para a região do fundo, observa-se que o índice de mistura obtido é menor do que 0,6. A região de fundo representa apenas 2% do volume do leito. Portanto, para a região de fundo, o efeito da segregação de partículas sobre a taxa de reação de pirólise pode ser desprezado.

Para o topo do leito o efeito da razão de diâmetro sobre o índice de mistura (I_m) pode ser explicado devido à ação da força da gravidade sobre as partículas na fonte. Sob a ação da gravidade, partículas de massa específicas diferentes e mesmo diâmetro lançadas na fonte percorrem diferentes distâncias radiais sobre a região anular. Sendo assim, partículas menos densas atingem maiores alturas de fonte e percorrem maiores distâncias radiais sobre a região anular. Tal situação é potencializada a medida em que a razão de diâmetro é aumentada de 1 para 2,54. Desta forma, o uso de misturas com razão de diâmetro $d_{ps}/d_{pc} > 1$ promovem a concentração de compósito no topo ($I_m > 1$), não justificando o uso desta condição para o processo de recuperação do alumio via pirolise. Pode-se observar pela Figura 4.5 uma representação esquemática do escoamento das partículas no leito juntamente com as fotografias correspondentes a cada situação ilustrada na Figura 4.6.

Figura 4.5 - Esquema do leito de jorro constituído por misturas com diferentes razões de diâmetro.

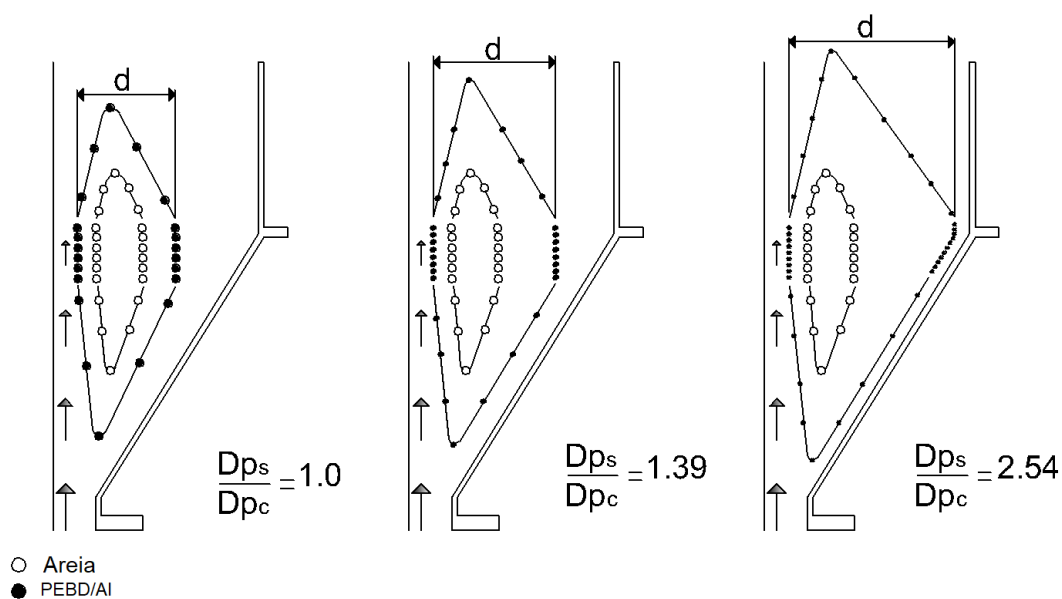
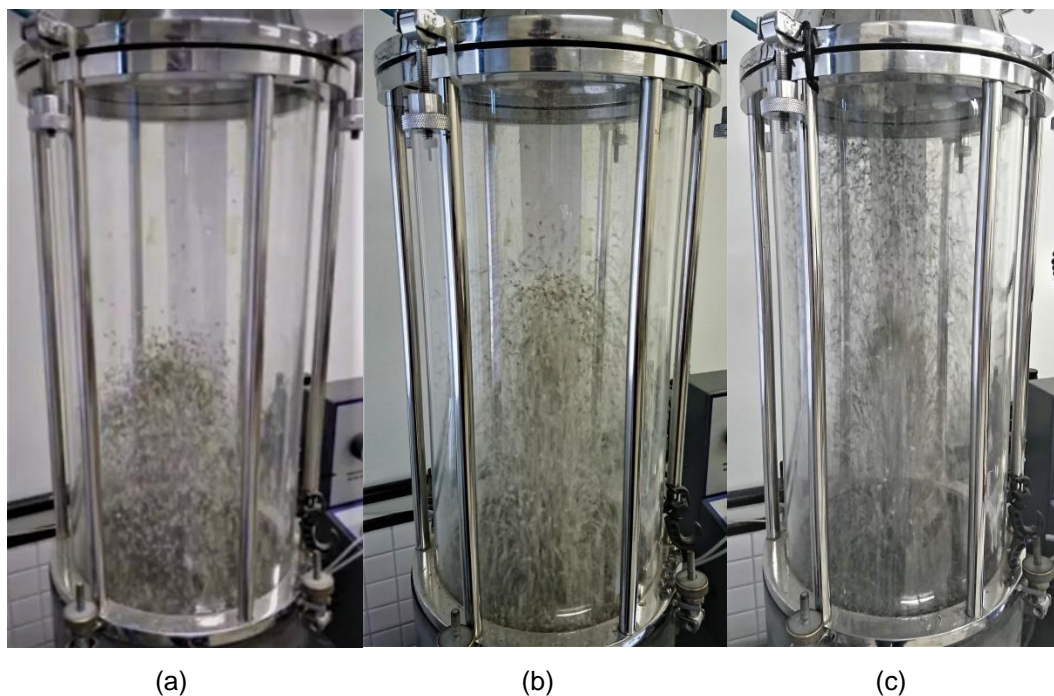


Figura 4.6 - Imagens do leito de jorro constituído por: (a) $D_{ps}/D_{pc}=1$, $X_c=10\%$ e $V/V_{mj}=1,1$; (b) $D_{ps}/D_{pc}=1,39$, $X_c=10\%$ e $V/V_{mj}=1,1$; (c) $D_{ps}/D_{pc}=2,54$, $X_c=10\%$ e $V/V_{mj}=1,1$.



Para a região do topo, a concentração do composto PEBD/Al (X_c) investigada de 10 a 50% mostrou ter efeito significativo sobre os índices de mistura (I_m) obtidos. A utilização de maiores frações mássicas (X_c) quando se está utilizando misturas com partículas de composto com diâmetros menores ($D_{ps}/D_{pc}=2,54$), acarreta um aumento no índice de mistura.

4.2 Validações do índice de mistura (I_m)

Para cada fator investigado, a Tabela 4.3 exibe o índice de mistura experimental e o erro relativo percentual. Para todas as regiões, é possível afirmar que o modelo prevê satisfatoriamente os efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m) com um erro relativo percentual menor do que 8%.

Tabela 4.3 - Índice de mistura experimental e erro relativo percentual.

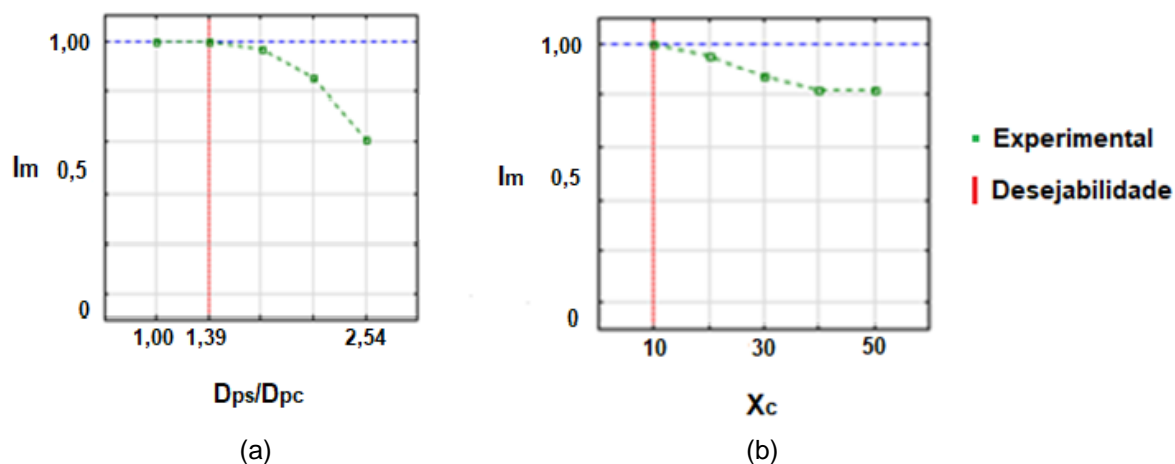
Fator			I_m			* %E		
D_{ps}/D_{pc}	X_c	V/V_{mj}	R1 (Fundo)	R2 (Meio)	R3 (Topo)	R1 (Fundo)	R2 (Meio)	R3 (Topo)
1,18	20	1,15	0,40	1,02	1,01	-0,57	4,45	-0,34
		1,25	0,39	1,05	1,01	-3,15	7,18	-0,34
	40	1,15	0,30	1,09	1,01	-4,28	7,07	-0,60
		1,25	0,34	1,10	1,01	7,99	7,92	-0,60
1,64	20	1,15	0,31	1,14	1,01	-3,89	8,58	-1,04
		1,25	0,34	1,07	1,01	5,27	7,93	-1,04
	40	1,15	0,20	0,84	1,04	-6,84	-8,90	0,12
		1,25	0,22	1,00	1,02	2,88	8,52	-1,84

$$* \%E = \frac{I_{mExp} - I_{mModelo}}{I_{mExp}}$$

4.3 Função desejabilidade

A Figura 4.7 exhibe o índice de mistura em função dos fatores: razão de diâmetro (D_{ps}/D_{pc}) e fração de compósito (X_c), bem como o valor do índice de mistura (I_m) desejável.

Figura 4.7 - Índice de Mistura: a) índice de mistura (I_m) como uma função da razão de diâmetro (D_{ps}/D_{pc}), parametrizado em uma dada fração de compósito (X_c); b) Índice de mistura (I_m) com uma função da fração de compósito parametrizado em uma dada razão de diâmetro (D_{ps}/D_{pc}).



Analisando os dados na Figura 4.7, observa-se que o valor desejável do índice de mistura ($I_m \approx 1$) é atendido para os fatores $D_{ps}/D_{pc} = 1,39$ e $X_c = 10\%$.

4.4 Potencial econômico

Dois fatores apontam a pirólise de resíduos cartonados como uma técnica promissora: a agregação de valor dos materiais reciclados e a economia em energia. Com relação à agregação de valor, um balanço de massa juntamente com uma simples análise de custos entre as saídas (produtos) e entradas (embalagens cartonadas) pode ser realizado para indicar a geração de valor econômico deste processo.

Para o processo de pirólise de composto PEBD/Al são apresentados os custos das matérias-primas e produtos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Custos de Matérias-Primas e Produtos.

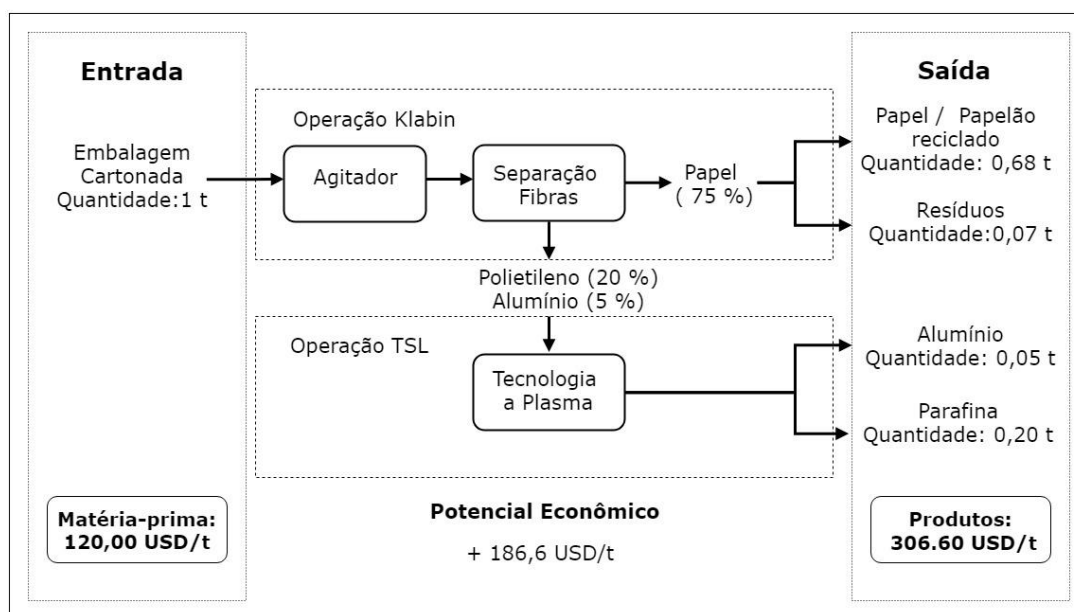
Insumo	Descrição	Valor (USD/t)
Matéria-prima	Embalagens cartonadas	120,00
Produto	Papel reciclado	120,00
	Resíduos	0
	Alumínio	2500,00
	Parafina	500,00

Fonte: Adaptado de Pedroso e Zwicker (2007).

A Figura 4.8 mostra a estrutura de entrada e saída dos processos de reciclagem do papel e recuperação do alumínio por pirólise. O processo de reciclagem de papel tem uma eficiência de reciclagem de 90,66% (a cada 750 kg de fibra de papel, são recuperados um total de 680 kg de papel). No processo de recuperação de alumínio, é considerada uma eficiência de 100%.

Com base em uma análise econômica da estrutura de entrada e saída do processo de reciclagem do papel e recuperação do alumínio, pode-se evidenciar que este possui um potencial econômico positivo, agregando 186,6USD/t de produto.

Figura 4.8 - Análise econômica para a reciclagem de embalagens cartonadas.



Fonte: Adaptado de Pedroso e Zwicker (2007).

De acordo com ABAL (2012) o consumo de energia para a produção de alumínio primário e reciclado é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Consumo de energia na produção do alumínio em 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).

Para o processo de pirólise, assume-se que o consumo de energia para a recuperação do alumínio seja igual àquele obtido pelo processo de reciclagem. No processo de recuperação de 1 tonelada de embalagens cartonadas, é obtida cerca de 0,05 tonelada de alumínio. Logo, o consumo específico de energia para a produção de 0,05 tonelada de alumínio pelo processo tradicional equivale a 0,78 MWh, enquanto para a produção dessa mesma quantidade através da recuperação pela pirólise é consumida apenas 0,035 MWh. Considerado a energia gasta pelos dois processos, pode-se constatar que o uso da pirólise pode recuperar 0,745 MWh/tonelada de embalagem cartonada.

No Brasil, em 2011, de acordo com o Cempre (2018), a taxa de reciclagem de embalagens cartonadas foi de 59 mil toneladas/ano. Se todas essas embalagens fossem reaproveitadas pelo processo de pirólise, a energia recuperada seria de aproximadamente 44 GWh e a quantidade de alumínio reciclada igual a 2.950 toneladas. Isso totalizaria o dobro da quantidade de alumínio primária obtido pelo país.

Sob o ponto de vista ambiental, a produção de 1 tonelada de alumínio consome aproximadamente 5 toneladas do minério bauxita (ABAL, 2012). Dessa forma, a pirólise de 59 mil toneladas de embalagens cartonadas representa a economia de 14.750 toneladas de bauxita, reduzindo o impacto ambiental com a extração do minério de bauxita.

Com respeito à emissão de CO_2 , no processo de produção do alumínio primário são geradas 2 toneladas de CO_2 à cada 1 toneladas de alumínio. Atualmente, a produção mundial de alumínio responde a 1% das emissões antrópicas de gases de efeito estufa (ABAL, 2012).

5. CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com a realização desta pesquisa. A análise experimental da segregação de partículas em leito de jorro composto por misturas de compósito PEBD/Al e areia permite verificar que:

- dentre os fatores analisados, apenas a concentração do compósito PEBD/AL (X_c) e a razão de diâmetro das partículas (D_{ps}/D_{pc}) apresentaram efeito sobre o índice de mistura (I_m).
- com base no teste de adequação dos modelos, é possível afirmar que os modelos estatísticos conseguem prever todas as tendências apresentadas pelos dados experimentais, considerando o intervalo de confiança de 95%.
- para todas as regiões do leito, é possível afirmar que o modelo de validação prevê os efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m) com um erro relativo percentual menor do que 10%.
- o intervalo desejável do índice de mistura (I_m) é atendido para os fatores $D_{ps}/D_{pc} = 1,39$ e $X_c = 10\%$.
- considerando a energia gasta pelo processo tradicional e pela pirólise, pode-se constatar que o uso da pirólise pode recuperar 0,745 MWh/ tonelada de embalagem cartonada.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisadores interessados em dar continuidade ao tema deste trabalho, apresentam-se as seguintes sugestões:

- estudo da pirólise em leito de jorro composto por misturas de partículas de areia e compósito do polietileno e alumínio;
- analisar modelos que representem o escoamento de compósito PEBD/Al e areia em leito jorro de maneira a verificar aos dados experimentais de segregação de partículas apresentados nesta presente pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio - ABAL**. Disponível em: <<http://abal.org.br/>>. Acesso em: 13 dez. 2018.
- AGUADO, R. et al. Defluidization modelling of pyrolysis of plastics in a conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 231–235, fev. 2005.
- ALVARENGA, L. M. et al. Determination of activation energy of pyrolysis of carton packaging wastes and its pure components using thermogravimetry. **Waste Management**, v. 53, p. 68–75, jul. 2016.
- ARTETXE, M. et al. Operating Conditions for the Pyrolysis of Poly-(ethylene terephthalate) in a Conical Spouted-Bed Reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 5, p. 2064–2069, 3 mar. 2010.
- BACELOS, M. S. et al. Local heat-transfer coefficient of immersed cylindrical surface in fluidized and vibrated fluidized beds. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 11–12, p. 1152–1159, nov. 2011.
- BACELOS, M. S.; FREIRE, J. T. Stability of Spouting Regimes in Conical Spouted Beds with Inert Particle Mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 2, p. 808–817, jan. 2006.
- CEMPRE. **Embalagens Longa Vida**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/9/embalagens-longa-vida>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- DU, W. et al. Numerical investigation of particle mixing and segregation in spouted beds with binary mixtures of particles. **Powder Technology**, v. 301, p. 1159–1171, nov. 2016.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds : fundamentals and applications**. [s.l.] Cambridge University Press, 2011.
- FREITAS, T. M. et al. CFD analysis of fluidized beds using wastes from post-consumer carton packaging. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 111, p. 89–100, jan. 2017.
- GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, n. 5, p. 285–292, 1 maio 1973.
- HAYDARY, J.; SUSA, D.; DUDÁŠ, J. Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1136–1141, maio 2013.
- JENKINS, T. E. Evaluating and Comparing Aeration Blower Power Requirements. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2007, n. 8, p. 8781–8791, 9

out. 2012.

KIANI, M. et al. Mixing and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density. **Particuology**, v. 32, p. 132–140, jun. 2017.

KORKMAZ, A. et al. Pyrolysis of the tetra pak. **Waste Management**, v. 29, n. 11, p. 2836–2841, nov. 2009.

MAKIBAR, J. et al. Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 8, p. 790–798, ago. 2011.

MARQUES, I. I. D. R. et al. Air-Carton Packaging Waste Flow Dynamics in a Conical Spouted Bed. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 70–79, 1 jan. 2012.

MARQUES, I. I. D. R.; BACELOS, M. S. Analysis of conical spouted bed fluid dynamics using carton mixtures. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 70, p. 37–47, 1 ago. 2013.

MASTELLONE, M. L. et al. Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 76, n. 3, p. 479–487, 1 jun. 2002.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. Dynamics of Spouted Beds. **Advances in Chemical Engineering**, v. 9, n. C, p. 111–191, 1 jan. 1974.

MELO, J. L. Z. et al. CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 108, p. 93–108, out. 2016.

NASCIMENTO, R. M. D. M. et al. Embalagem Cartonada Longa Vida: Lixo ou Luxo? **Química Nova na Escola**, v. 25, p. 3–7, 2007.

NEVES, F. L. Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak. **O Papel (Brazil)**, v. 60, n. 2, p. 38–45, fev. 1999.

OLAZAR, M. et al. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 31, n. 7, p. 1784–1792, jul. 1992.

OLAZAR, M. et al. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 32, n. 11, p. 2826–2834, nov. 1993.

OLAZAR, M. et al. New reactor in jet spouted bed regime for catalytic polymerizations. **Chemical Engineering Science**, v. 49, n. 24 PART A, p. 4579–4588, 1 jan. 1994.

OLAZAR, M. et al. Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor with a HZSM-5 catalyst. **AIChE Journal**, v. 46, n. 5, p. 1025–1033, maio 2000.

PEDROSO, M. C.; ZWICKER, R. Sustentabilidade na cadeia reversa de suprimentos: um estudo de caso do Projeto Plasma. **Revista de Administração**, v. 42, n. 4, p. 414–430, 2007.

REN, B. et al. Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method. **Powder Technology**, v. 222, p. 85–94, maio 2012.

S.HANSON;J.W.PATRICK;A.WALKER. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification. **Fuel**, v. 81, n. 5, p. 531–537, 2002.

SALDARRIAGA, J. F. et al. Bed-to-surface heat transfer in conical spouted beds of biomass-sand mixtures. **Powder Technology**, v. 283, p. 447–454, out. 2015.

SAN JOSE, M. J. et al. Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical Particles. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 33, n. 7, p. 1838–1844, jul. 1994.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Solid cross-flow into the spout and particle trajectories in conical spouted beds consisting of solids of different density and shape. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 84, n. 6 A, p. 487–494, 2006.

SANTOS, K. G. et al. Fluid Dynamics of a Sand-Biomass Mixture in a Spouted-Bed Reactor for Fast Pyrolysis. **Chemical Engineering & Technology**, v. 36, n. 12, p. 2148–2154, dez. 2013.

SANTOS, K. G. et al. Spouting behavior of binary particle mixtures of different densities: Fluid dynamics and particle segregation. **Particuology**, v. 42, p. 58–66, 1 fev. 2019.

SILVA-MORIS, V. A.; ROCHA, S. C. S. Vibrofluidized Bed Drying of Adipic Acid. **Drying Technology**, v. 24, n. 3, p. 303–313, 6 abr. 2006.

TUKEY, J. W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, v. 5, n. 2, p. 99, jun. 1949.

WILLIAMS, J. C. The mixing of dry powders. **Powder Technology**, v. 2, n. 1, p. 13–20, 1 set. 1968.

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

XAVIER, T. P. et al. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. **Powder Technology**, v. 299, p. 210–216, out. 2016.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Propriedades físicas das partículas.

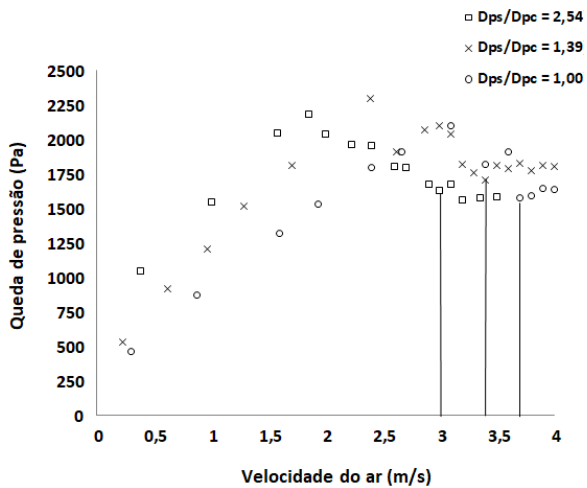
	Massa Específica (ρ) Kg/m³	Porosidade (ε_0)	Diâmetro de Partícula (D_p) mm
Compósito		0,57	1,02
PEBD/Al	1077,42	0,49	1,86
		0,50	2,58
Areia	2620,59	0,39	2,58

APÊNDICE B

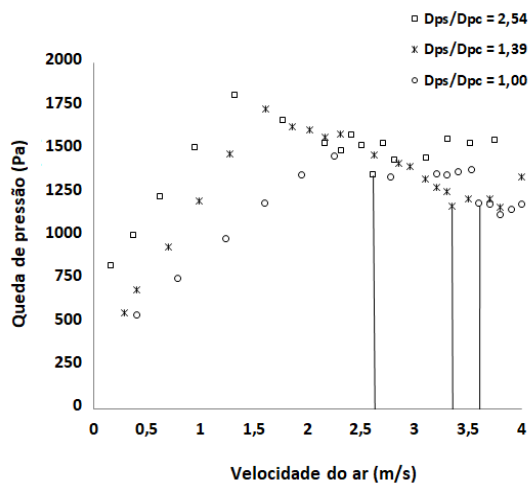
Tabela B.1 - Resultados dos experimentos de fluidodinâmica em leito de jorro.

Mistura	Razão Diâmetro (Dps/Dpc)	Massa da Amostra (kg)	Fração Mássica (%)		u_{mj} (m/s)	$-\Delta P_{mj}$ (Pa)	Porosidade (ϵ_0)
			Areia	Compósito PEBD/Al			
1	2,54	2680,75	90	10	3,0	1631,32	0,43
2	2,54	1747,64	70	30	2,6	1362,24	0,53
3	2,54	1362,24	50	50	2,0	1219,76	0,57
4	1,39	2667,88	90	10	3,4	1754,47	0,43
5	1,39	1869,19	70	30	3,4	1177,04	0,50
6	1,39	1482,81	50	50	3,1	938,80	0,53
7	1,0	2579,58	90	10	3,7	1575,60	0,45
8	1,0	1921,45	70	30	3,6	1189,23	0,49
9	1,0	1515,97	50	50	3,2	828,62	0,51

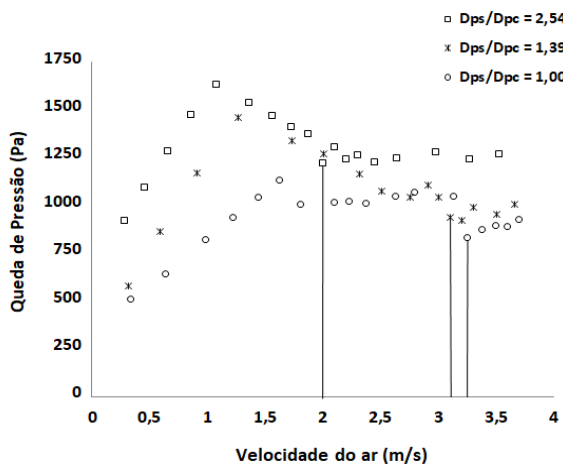
Figura B.1 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade de entrada do ar: (a) $X_c=10\%$, (b) $X_c=30\%$ e (c) $X_c=50\%$.



(a)



(b)



(c)

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Índices de mistura obtidos após o planejamento experimental.

D_{ps}/D_{pc}	X_c	V/V_{mj}	R1	R2	R3	R4	R5
2,54	10	1,1	0,37	1,07	1,16	1,17	0,99
2,54	10	1,2	0,39	1,07	0,95	1,10	1,01
2,54	10	1,3	0,33	1,20	1,13	1,09	1,00
2,54	30	1,1	0,15	0,50	0,60	0,70	1,11
2,54	30	1,2	0,13	0,49	0,52	0,73	1,11
2,54	30	1,3	0,13	0,49	0,56	0,81	1,10
2,54	50	1,1	0,09	0,32	0,39	0,50	1,21
2,54	50	1,2	0,06	0,34	0,42	0,57	1,19
2,54	50	1,3	0,07	0,41	0,51	0,65	1,16
1,39	10	1,1	0,51	0,76	0,91	1,40	0,99
1,39	10	1,2	0,49	0,75	1,10	1,57	0,97
1,39	10	1,3	0,43	0,82	1,25	1,70	0,96
1,39	30	1,1	0,30	0,90	1,08	1,09	1,01
1,39	30	1,2	0,27	0,78	0,98	1,17	1,02
1,39	30	1,2	0,28	0,86	1,18	1,13	1,01
1,39	30	1,2	0,27	0,94	1,09	1,14	1,01
1,39	30	1,2	0,28	0,82	1,06	1,14	1,01
1,39	30	1,3	0,38	0,86	1,02	1,15	1,01
1,39	50	1,1	0,22	1,02	1,11	1,07	1,02
1,39	50	1,2	0,22	1,02	1,10	1,10	1,01
1,39	50	1,3	0,21	0,91	1,18	1,10	1,01
1,00	10	1,1	0,49	0,87	1,03	1,09	1,01
1,00	10	1,2	0,53	0,99	1,05	1,09	1,00
1,00	10	1,3	0,48	0,84	1,10	1,11	1,00
1,00	30	1,1	0,44	0,91	1,02	1,06	1,01
1,00	30	1,2	0,45	1,00	1,05	1,08	1,01
1,00	30	1,3	0,36	0,97	1,05	1,13	1,01
1,00	50	1,1	0,43	1,07	1,05	1,11	1,00
1,00	50	1,2	0,37	1,10	1,13	1,03	1,01
1,00	50	1,3	0,36	1,11	1,06	1,10	1,00

APÊNDICE D

Com base nos índices de mistura das regiões do leite (Tabela C.1, apêndice C), são apresentados na Tabela D.1 a soma dos quadrados (SQ), grau de liberdade (gl), quadrado médio (MQ), F estatística, valor P e F crítico, respectivamente. Estes dados são utilizados para obter gl dentro dos grupos (isto é, N-k) na Tabela Tukey (Tabela 3.3 na secção 3.5).

Tabela D.1 - Tabela Anova.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	11,253	4	2,8133	68,243	2,24057E-32	2,4341
Dentro dos grupos (N-K)	5,978	145	0,0412			
Total	17,231	149				

Para a determinação de q (k, N-k) na Tabela Tukey (Tabela 3.3 na secção 3.5) são utilizados: a) o número de regiões (k), que representa o número de colunas do planejamento; b) o N (k x NE), que é o produto do número de regiões (k) pelo número de experimentos (NE); c) o grau de liberdade dentro dos grupos (N - k) disponível na Tabela D.1 (Tabela Anova). Considerando o planejamento 3³ com 3 pontos centrais, isso resulta em um número de 30 experimentos (NE=30).

Para o conjunto de dados (k = 5, N-k = 145), o valor de q (k=5, N-k=145) obtido na Tabela Tukey é 3,86. Substituindo o valor de q (k=5, N-k=145) = 3,86; MQ=0,0412 (Tabela D.1) e NE= 30 na Equação 3.5 (secção 3.5) o valor obtido de DMS é de 0,1430.

Com base no \bar{I}_m determinado para cada região, a Tabela D.2 mostra o valor absoluto das diferenças médias do índice de mistura $[\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}]$, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Tabela D.2 - Valor absoluto das diferenças médias do índice de mistura (intervalo de confiança de 95%).

	$\bar{I}_{m,R1}$ (0,3163)	$\bar{I}_{m,R2}$ (0,8413)	$\bar{I}_{m,R3}$ (0,9597)	$\bar{I}_{m,R4}$ (1,0630)	$\bar{I}_{m,R5}$ (1,0320)
$[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,Rj}]$		0,5250	0,6433	0,7467	0,7157
$[\bar{I}_{m,R2} - \bar{I}_{m,Rj}]$	0,525		0,1183	0,2217	0,1907
$[\bar{I}_{m,R3} - \bar{I}_{m,Rj}]$	0,643	0,1183		0,1033	0,0723
$[\bar{I}_{m,R4} - \bar{I}_{m,Rj}]$	0,7467	0,2217	0,1033		0,0310
$[\bar{I}_{m,R5} - \bar{I}_{m,Rj}]$	0,7157	0,1907	0,0723	0,0310	

A Tabela D.3 exhibe os resultados obtidos após realizar as comparações de acordo com os critérios utilizados (secção 3.5).

Tabela D.3 - Resultados obtidos após o teste de Tukey.

Diferença de \bar{I}_m	Valor	DMS	$\frac{[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,R2}]}{DMS}$	Conclusão
$[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,R2}]$	0,5250	0,1430	3,7	$R_1 \neq R_2$
$[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,R3}]$	0,6433	0,1430	4,5	$R_1 \neq R_3$
$[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,R4}]$	0,7467	0,1430	5,2	$R_1 \neq R_4$
$[\bar{I}_{m,R1} - \bar{I}_{m,R5}]$	0,7157	0,1430	5,0	$R_1 \neq R_5$
$[\bar{I}_{m,R2} - \bar{I}_{m,R3}]$	0,1183	0,1430	0,8	$R_2 = R_3$
$[\bar{I}_{m,R2} - \bar{I}_{m,R4}]$	0,2217	0,1430	1,6	$R_2 \neq R_4$
$[\bar{I}_{m,R2} - \bar{I}_{m,R5}]$	0,1907	0,1430	1,3	$R_2 \neq R_5$
$[\bar{I}_{m,R3} - \bar{I}_{m,R4}]$	0,1033	0,1430	0,7	$R_3 = R_4$
$[\bar{I}_{m,R3} - \bar{I}_{m,R5}]$	0,0723	0,1430	0,5	$R_3 = R_5$
$[\bar{I}_{m,R4} - \bar{I}_{m,R5}]$	0,0310	0,1430	0,2	$R_4 = R_5$

Devido à semelhança encontrada entre as regiões no teste de Tukey, as regiões 2 e 3, e 4 e 5 podem ser agrupadas. Embora exista uma ligeira semelhança entre as regiões: $R_2 = R_3$, é demonstrado que R_2 é diferente de R_4 e R_5 , portanto, conclui-se que R_2 , R_3 , R_4 e R_5 não podem ser agrupadas considerando o critério utilizado

$$([\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}] < DMS \text{ e } \frac{[\bar{I}_{m,Ri} - \bar{I}_{m,Rj}]}{DMS} < 1 \therefore R_i = R_j; \text{ vide secção 3.5).}$$