

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

ANTÔNIO CARLOS OLIVEIRA SANTOS

**SEGREGAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS DE AREIA E COMPÓSITO
PEBD/AI EM LEITO FLUIDIZADO PARA PIRÓLISE RÁPIDA DE
RESÍDUOS CARTONADOS**

SÃO MATEUS - ES

2020

ANTÔNIO CARLOS OLIVEIRA SANTOS

**SEGREGAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS DE AREIA E COMPÓSITO
PEBD/AI EM LEITO FLUIDIZADO PARA PIRÓLISE RÁPIDA DE
RESÍDUOS CARTONADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário 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 Interdisciplinar em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos.

Coorientador: Prof. Dr. Yuri Nascimento Nariyoshi

SÃO MATEUS - ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

O48s Oliveira Santos, Antônio Carlos, 1990-
Segregação de misturas binárias de areia e compósito
PEBD/Al em leito fluidizado para pirólise rápida de resíduos
cartonados / Antônio Carlos Oliveira Santos. - 2020.
70 f. : il.

Orientador: Marcelo Silveira Bachelos.

Coorientador: Yuri Nascimento Nariyoshi.

Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Reciclagem do alumínio. 2. Misturas binárias. 3. Reator de
partículas. 4. Modelagem estocástica. 5. Eficiência energética.
I. Silveira Bachelos, Marcelo. II. Nascimento Nariyoshi, Yuri. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário
Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

ANTÔNIO CARLOS OLIVEIRA SANTOS

**SEGREGAÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS DE AREIA E COMPÓSITO
PEBD/AI EM LEITO FLUIDIZADO PARA PIRÓLISE RÁPIDA DE
RESÍDUOS CARTONADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 23 de março 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Yuri Nascimento Nariyoshi
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
Universidade Federal da Integração
Latino-Americana



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 13:47

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/13473?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 YURI NASCIMENTO NARIYOSHI - SIAPE 2339586 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 30/03/2020 às 14:04

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/13477?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 PAULO SERGIO DA SILVA PORTO - SIAPE 1545509 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 21/05/2020 às 12:22

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/24728?tipoArquivo=O>

Dedico este trabalho à minha esposa Sheila pelo apoio incondicional em todos os momentos mais difíceis da minha vida. Você é e sempre será minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

Aos meus pais José Carlos Borges dos Santos e Vera Lúcia Oliveira Santos pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

Aos meus irmãos Jaqueline Oliveira Santos e Lucas Oliveira Santos pela amizade e atenção dedicadas quando sempre precisei.

À minha querida esposa Sheila Dalfior Pereira pelo seu amor incondicional e por compreender minha dedicação ao projeto de pesquisa.

Ao meu professor orientador Dr. Marcelo Silveira Bacelos pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo de escrita da dissertação e artigo, além da bondade e paciência nas reuniões e ao coorientador Dr. Yuri Nascimento Naryoshi, pela colaboração intelectual para a qualidade dessa pesquisa.

Sou grato aos meus colegas de trabalho pelas muitas trocas de horários que permitiram minha presença em sala de aula.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e a Tetra Pak pelo apoio à pesquisa.

Também quero agradecer à Universidade Federal do Espírito Santo e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino. Especialmente à professora Dra. Taisa Shimosakai de Lira, pelo empenho e sugestões para alcançar os resultados desejados, ao Dr. Paulo Sergio da Silva Porto pela dedicação e atenção cedida no decorrer do programa e o Dr. Leonardo da Silva Arrieche que sempre me incentivou, para que continuasse no programa de pós graduação.

RESUMO

Com o crescimento populacional acelerado vivenciado atualmente, a geração de resíduos sólidos vem aumentando. Visando um melhor aproveitamento energético, buscam-se rotas termoquímicas para o tratamento de resíduos. No setor de resíduos de embalagens cartonadas, a pirólise é a única rota que permite a recuperação do alumínio em escala industrial - devido a devolatização do polietileno. O reator de leito fluidizado é uma alternativa para pirólise rápida do compósito de polietileno e alumínio (PEBD/Al). Porém, o uso do leito composto por mistura binária de areia e compósito de polietileno e alumínio, pode gerar segregação de partículas. A segregação de partículas pode causar a defluidização do leito e reduzir a taxa de transferência de calor e comprometer a recuperação de alumínio via pirólise do PEBD/Al. Para avaliar a segregação de misturas binárias de areia e PEBD/Al, experimentos foram conduzidos em uma coluna cilíndrica de 10 cm de diâmetro e 17 cm de altura. O leito foi composto por misturas de partículas de areia com 0,45 mm de diâmetro e PEBD/AL com uma faixa de 0,3 a 2,85 mm. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar um planejamento de experimentos fatorial 3^3 , com três pontos centrais, para avaliar o efeito dos fatores fração mássica da mistura ($X_C\%$ p/p), velocidade do ar (V/V_{mf}) e razão do diâmetro das partículas de areia e PEBD/AL (d_C/d_A) sobre o índice de mistura (I_M). As proporções de compósito na mistura foram de 10 a 30% p/p. Nas condições investigadas, foram empregadas velocidade de ar em uma faixa de 10 a 40% acima da mínima fluidização. O uso do planejamento de experimentos possibilitou o ajuste de um modelo estatístico para prever o índice de mistura. A análise estatística dos dados revelou que apenas os fatores d_C/d_A e V/V_{mf} apresentaram efeito sobre o I_M . As condições operacionais ótimas (com $I_M \approx 1$) foram alcançadas com valores de 0,667 de razão de diâmetro de compósito e areia, 10% da velocidade do ar e 15% p/p de fração mássica de compósito. O modelo estatístico obtido foi adequado para prever os valores do índice de mistura com um erro menor do que 15%. Com os baixos níveis de segregação alcançados pelo leito nas condições operacionais ótimas, pode-se indicar este sistema de contato para a pirólise do PEBD/Al, permitindo assim, a recuperação do alumínio.

Palavras-chave: Reciclagem do alumínio. Misturas binárias. Reator de partículas. Modelagem estocástica. Eficiência energética.

ABSTRACT

With the accelerated population growth experienced today, solid waste generation is increasing. Aiming at a better energy use, thermo-chemical routes for waste treatment are being sought. In the carton packaging waste sector, pyrolysis is the only route that allows the recovery of aluminum on an industrial scale - due to the devolatilization of polyethylene. The fluidized bed reactor is an alternative for rapid pyrolysis of the polyethylene and aluminum composite (LDPE/Al). However, the use of a bed composed of binary mixture of sand and composite polyethylene and aluminum, can generate segregation of particles. Particulate segregation can cause defluidization of the bed and reduce the heat transfer rate and compromise the recovery of aluminum via LDPE/Al pyrolysis. To evaluate the segregation of binary mixtures of sand and LDPE/Al, experiments were conducted in a cylindrical column of 10 cm in diameter and 17 cm in height. The bed was composed of mixtures of sand particles with a diameter of 0.45 mm and LDPE/AL with a range of 0.3 to 2.85 mm. Thus, the objective of this study was to perform a planning of factor 3^3 experiments, with three central points, to evaluate the effect of the mixing mass fraction factors (X_c % w/w), air velocity (V/V_{mf}) and sand particle diameter ratio and LDPE/AL (d_c/d_s) on the mixing index (I_M). The composite ratios in the mixture were 10 to 30% w/w. Under the investigated conditions, air velocity in a range of 10 to 40% above the minimum fluidization was employed. The use of the planning of experiments made it possible to adjust a statistical model to predict the mixing index. The statistical analysis of the data revealed that only the factors d_c/d_s and V/V_{mf} had an effect on I_M . The optimal operational conditions (with $I_M \approx 1$) were achieved with values of 0.667 of composite and sand diameter ratio, 10% of air velocity and 15% w/w of composite mass fraction. The statistical model obtained was adequate to predict the values of the mixture index with an error lower than 15%. With the low levels of segregation achieved by the bed in the optimal operational conditions, this contact system can be indicated for the pyrolysis of LDPE/Al, thus allowing the recovery of aluminum.

Keywords: Aluminum recycling. Binary mixtures. Particle reactor. Stochastic modeling. Energy efficiency.

LISTA DE SÍMBOLOS

d_A	Diâmetro da areia	[mm]
d_c	Diâmetro do compósito	[mm]
I_M	Índice de mistura	[-]
m	massa da amostra	[kg]
v	Volume	[m ³]
V	Velocidade do ar	[m/s]
V_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
v_{pic}	Volume do picnômetro	[ml]
v_f	Volume de fluido adicionado	[ml]
X_c	fração mássica de compósito do leito	[% p/p]
ΔP_{max}	Queda de pressão máxima para vazões decrescentes de ar	[Pa]
h	Altura do leito	[m]
g	Gravidade	[m/s ²]

Símbolos Gregos

ε_{mf}	Porosidade de mínima fluidização	[-]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

Abreviaturas

AL	Alumínio
CFD	Fluidodinâmica Computacional
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
p/p	Peso/Peso

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura de uma embalagem cartonada.....	23
Figura 2.2 - Fluxograma da reciclagem de resíduos cartonados.....	25
Figura 2.3 - Sistema de leito de jorro cônico.....	28
Figura 2.4 - Sistema de leito fluidizado.....	29
Figura 2.5 - Sistema de Plasma térmico.....	30
Figura 2.6 - Regimes de escoamento.....	33
Figura 2.7 - Classificação de partículas segundo Geldart.....	35
Figura 2.8 - Diagrama de corpo livre das partículas.....	36
Figura 2.9 - Curva característica de fluidização.....	37
Figura 3.1 - Materiais utilizados: diâmetros de PEBD/AL – (a) 2,85 mm, (b) 1,57 mm, (c) 0,3 mm e diâmetro da Areia – (d) 0,45 mm.....	42
Figura 3.2 - Unidade experimental: 1 – coluna cilíndrica de vidro, 2 – soprador, 3 – aquecedor, 4 – termopar, 5 – transdutor de pressão, 6 – painel de acionamento 7 – placa de aquisição de dados, 8 – computador, 9 – cone, 10 – anemômetro, 11– fixador.....	45
Figura 3.3 - Diagrama de guilhotinas axiais.....	46
Figura 4.1 - Gráficos de superfície para a variável resposta I_M : topo (a,b) e fundo (c,d).....	54
Figura 4.2 - Probabilidade normal x Resíduos: a) Topo (I_{M1}), b) Fundo (I_{M3}).	54
Figura 4.3 - Valores preditos x Resíduos: a) Topo (I_{M1}), b) Fundo (I_{M3}).	55

Figura 4.4 - Efeito de d_C/d_A sobre o I_M no Topo e Fundo do leito fluidizado.....58

Figura 4.5 - Índice de Mistura como uma função dos fatores analisados: a) índice de mistura (I_M) como uma função da razão de diâmetro (d_C/d_A), parametrizado em uma dada fração de compósito (X_C) e razão de velocidade do ar (V/V_{mf}); b) Índice de mistura (I_M) com uma função da fração de compósito (X_C) parametrizado em uma dada razão de diâmetro (d_C/d_A) e de velocidade do ar (V/V_{mf}); c) Índice de mistura (I_M) com uma função da razão de velocidade do ar (V/V_{mf}) parametrizado em uma dada razão de diâmetro (d_C/d_A) e fração de compósito (X_C)61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela comparativa do consumo de energia entre os métodos convencional e pirólise	24
Tabela 2.2 - Estudos sobre à Segregação de Partículas em Leito Fluidizado	38
Tabela 3.1 - Fatores de entrada	46
Tabela 3.2 - Matriz de planejamento	47
Tabela 3.3 - Fatores de entrada para verificação da previsão do índice de mistura pelo modelo.....	48
Tabela 3.4 - Matriz de planejamento para validação	49
Tabela 4.1 - Efeitos estimados dos fatores sobre o I_M no topo do leito.	52
Tabela 4.2 - Efeitos estimados dos fatores sobre o I_M no fundo do leito.	52
Tabela 4.3 - Modelos matemáticos utilizando variáveis codificadas: Topo (R1) e fundo (R3)	55
Tabela 4.4 - Valores da velocidade mínima de fluidização para as partículas independentes (sem mistura).....	55
Tabela 4.5 - Valores da velocidade mínima de fluidização para as partículas misturadas.....	56
Tabela 4.6 - Previsão do índice de segregação para o topo e fundo do leito fluidizado.....	59
Tabela A.1 - Propriedades físicas dos materiais utilizados	68
Tabela B.1 - Propriedades das misturas utilizadas	69
Tabela C.1 - Índices de mistura obtidos após o planejamento experimental	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. A IMPORTÂNCIA DA PIRÓLISE DE EMBALAGENS CARTONADAS.....	23
2.1.1.Aspectos Gerais	23
2.1.2.Rotas para a recuperação de resíduos de embalagens cartonadas.....	25
2.1.3.Principais pesquisas sobre pirólise de resíduos de embalagens cartonadas.....	27
2.2. LEITOS FLUIDIZADOS	32
2.2.1.Aspectos gerais.....	32
2.2.2.O fenômeno da fluidização.....	32
2.2.3.Fluidodinâmica de leitos fluidizados	36
2.2.4.Segregação de partículas com misturas binarias	37
3. METODOLOGIA.....	42
3.1. PARTÍCULAS E MISTURAS UTILIZADAS.....	42
3.1.1.Massa específica	43
3.1.2.Diâmetro médio	43
3.1.3.Porosidade.....	44
3.2. UNIDADE EXPERIMENTAL	44
3.3. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	46

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
3.5. VARIÁVEL RESPOSTA.....	50
4. RESULTADOS	52
4.1. O EFEITO DOS FATORES SOBRE O ÍNDICE DE MISTURA	52
4.2. AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DO MODELO ESTATÍSTICO.....	59
4.3. CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO	60
5. CONCLUSÃO.....	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	64
APÊNDICE A	68
APÊNDICE B	69
APÊNDICE C	70

1. INTRODUÇÃO

Existem diversas rotas tecnológicas para reciclagem de embalagens cartonadas, entretanto, a pirólise é a rota termoquímica que permite a recuperação do alumínio com menor custo (ABAL, 2019). Portanto, a comparação com o processo convencional de extração a partir da rocha bauxita torna-se interessante, em relação aos custos energéticos do processo, em que o consumo de energia aproxima-se ser 20 vezes mais alto em relação a pirólise.

A Pirólise é o processo termoquímico ao qual ocorre a decomposição da estrutura molecular, em um ambiente ausente de oxigênio e com temperaturas entre 400–800 °C (Kunni levenspiel 1991). O reator de leito fluidizado com misturas binárias de partículas de PEBD/AL e areia é considerado adequado para pirólise. As partículas de areia são excelentes condutores térmicos e promovem o regime de fluidização borbulhante no reator. Neste ocorre a devolatização do polietileno, separando-o do alumínio. Como produtos são obtidos as olefinas e o alumínio com alto grau de pureza.

A recuperação do alumínio a partir da reciclagem de embalagens cartonadas gera grande impacto socioambiental. Relacionado, principalmente, aos empregos gerados por coleta seletiva e a redução de resíduos descartados em aterros.

Em escala industrial, o reator de leito fluidizado é considerado adequado para a pirólise rápida do compósito polietileno e alumínio (PEBD/Al). De acordo com pesquisas na área, a recuperação do alumínio de embalagens cartonadas é um tema de grande relevância, porém insuficientemente explorado.

Conforme na literatura, pesquisas têm sido realizadas com foco na análise da cinética de pirólise de PEBD/Al, bem como na investigação do leito fluidizado como reator de pirólise desse compósito.

Vale mencionar o trabalho de Alvarenga et al. (2016), em que os autores investigaram a cinética da reação de pirólise das camadas de resíduos cartonados usando a análise termogravimétrica (TGA) em diferentes temperaturas e taxas de aquecimento. Para estimar a energia de ativação, foram utilizados dois modelos cinéticos, reações isoconversionais e paralelas independentes. Para embalagens cartonadas e papelão,

os valores de energias de ativação estimados foram semelhantes. Segundo os autores, a pirólise é constituída por três estágios de desvolatilização. O primeiro refere-se à perda de umidade, o segundo e o terceiro a desvolatilização do papelão e polietileno respectivamente.

Outro trabalho foi o realizado por Freitas et al. (2017), em que a fluidodinâmica de leito fluidizado composto por misturas de areia e PEBD/Al foi investigada. Os autores reportam que o modelo Euler-Euler Granular e a equação parametrizada de Syamlal-O'Brien descrevem o regime de fluidização e a segregação de partículas pode ser evitada com velocidade do ar 50% acima da mínima de fluidização.

Destaca-se também a pesquisa realizada por Olazar et al. 2017, em que estudaram as principais rotas termoquímicas para valorização de resíduos plásticos (poliolefinas). Observou-se que por meio da pirólise das poliolefinas em reatores fluidizados, obteve-se os seguintes subprodutos, a cera (com temperaturas de 440-510 °C), olefinas leves (650-850 °C) e BTX (benzeno, tolueno e xileno entre 650-750 °C), conforme o tempo permanência no reator. O reator de leito fluidizado apresenta diversas vantagens como alta taxa de transferência de calor, operação contínua, bom controle das condições operacionais, bom contato sólido com gás, boa homogeneidade entre as partículas e contato eficiente com catalisador.

Com base no trabalho de Freitas et al. (2017), observa-se que a pirólise do PEBD/AL pode ser conduzida em leito fluidizado composto por mistura de areia e compósito. Assim, o uso de misturas binárias pode ocasionar a segregação de partículas. Dessa forma, vários trabalhos foram realizados ao longo dos anos nesse campo, sendo que as pesquisas se iniciaram a partir dos anos 70, ganhando destaque a partir dos anos 90, devido à preocupação com a alta eficiência energética desses equipamentos.

Nesse sentido, vale mencionar o trabalho de Hidaka et al. (1995), em que os autores investigaram a mistura binária de partículas de vidro com diâmetros diferentes em duas colunas. Os autores reportaram uma segregação invertida em uma das colunas. Os padrões de segregação axial com e sem a segregação invertida foram analisados visualmente por sedimentação unidimensional.

Outra contribuição importante foi a de Girimonte et al. (2001), em que os pesquisadores conduziram um estudo experimental do comportamento de fluidização de mistura composta dois sólidos, com diferentes de tamanhos e composições. Para este propósito, a equação de Carman-Kozeny foi reescrita de uma forma diferencial adequada para as características peculiares dos sistemas de dois componentes. Os autores interpretaram que o comportamento de oxidação do tamanho das partículas, foi devido à diferença dos diâmetros.

Na mesma linha, Daleffe e Freire (2004) investigaram os fatores que afetam a segregação em leitos fluidizados com esferas de vidro com diferentes diâmetros. Para observar a segregação, realizaram-se experimentos com o método da curva característica de fluidização do ar. As curvas foram típicas de um leito fluidizado.

Da mesma forma, Saidi et al. (2014) analisaram o efeito do leito fluidizado pulsado sobre a segregação de partículas com misturas binárias em diferentes configurações de entrada de ar. Os autores utilizaram partículas de sílica com diferentes diâmetros. O fenômeno de segregação iniciou-se próximo à velocidade de mínima fluidização.

Por fim, Du e Wang (2019) investigaram o efeito dos fatores da velocidade do ar, taxa de circulação sólida, fração mássica inicial das partículas maiores, o ar na fração de partículas maiores e queda de pressão axial sobre o índice de segregação. Foram utilizadas partículas de misturas binárias com diâmetros distintos e observaram que a preparação do ar impede a separação de uma mistura binária no fundo do leito. Portanto, houve um aumento óbvio da fração de partículas maiores na seção inferior quando se aumentou a fração inicial de partículas maiores.

Os trabalhos citados durante o texto reportaram que a eficiência da segregação é maior com o aumento gradativo da velocidade de entrada do ar até um ponto de máximo e diminui depois devido à mistura.

Assim, nota-se que a segregação deve ser evitada, devido afetar a taxa da reação e transferência de calor no leito fluidizado. De acordo com os trabalhos mencionados, as condições operacionais, propriedades físicas e a geometria do leito são os fatores que afetam a segregação de partícula em misturas binária. Ou seja, evidencia-se a necessidade de investigar os efeitos da fração mássica, velocidade do ar e razão entre

os diâmetros do compósito de alumínio e da areia sobre a segregação de partículas a fim de melhorar a eficiência de pirólise PEBD/AL.

Dessa forma, como objetivo propõe-se avaliar os efeitos supracitados sobre o índice de segregação de partículas axial em um leito composto de misturas binárias de areia e PEBD/Al, por meio de um planejamento de experimentos fatorial 3^3 , com três pontos centrais. Possibilitando, assim, o ajuste de um modelo estatístico para prever esse índice.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

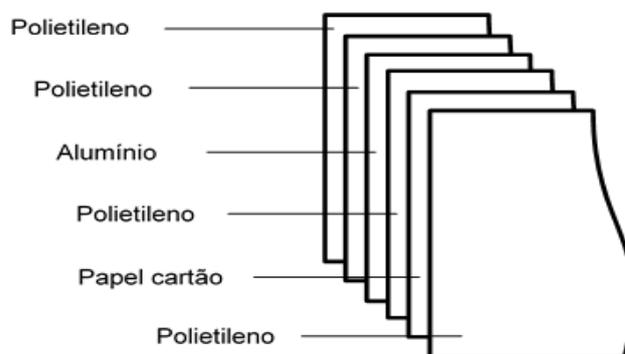
Neste capítulo serão abordados os aspectos fundamentais necessários para a compreensão desta pesquisa, tais como: os aspectos gerais das embalagens cartonadas, principais rotas para a recuperação destes resíduos, principais trabalhos sobre pirólise de embalagens cartonadas, o fenômeno da fluidização, fluidodinâmica e o fenômeno da segregação em leitos fluidizados contendo misturas binárias.

2.1. A IMPORTÂNCIA DA PIRÓLISE DE EMBALAGENS CARTONADAS

2.1.1. Aspectos Gerais

De acordo com Neves (2004) a embalagem cartonada é constituída por seis camadas, composta por 5% de alumínio, 20% de polietileno e 75% de papel duplex, conforme demonstra a Figura 2.1.

Figura 2.1 - Estrutura de uma embalagem cartonada.



Fonte: Autor 2020

A finalidade do papel é oferecer estrutura mecânica para embalagem cartonada. O polietileno atua como um impermeabilizante que impede a passagem da umidade dos ambientes, proteger a ação de fungos e bactérias, evitar o contato do alumínio com os alimentos e serve como elemento de adesão para todos os componentes da embalagem. Por fim, o alumínio é responsável por proteger o produto da ação de luz e do oxigênio. Este tipo de embalagem tem a aplicabilidade de conservar os alimentos por meses, sem a necessidade de adição de conservantes e refrigeração (ZORTEA, 2001).

Segundo a ABAL (2019) a reciclagem do alumínio apresenta diversas vantagens. Dentre essas, podem ser destacadas a economia de energia elétrica (ver Tabela 2.1) e de bauxita (minério que origina o alumínio), e a geração de renda que são criadas para as famílias locais. Assim, observa-se que a indústria do alumínio possui aspecto sustentável.

Segundo dados da ABAL (2019) a rota termoquímica pirólise libera somente 5% das emissões de gás de efeito estufa e o consumo de energia elétrica e de 5% quando comparado com a produção de alumínio primário. Portanto, o processo pirolise reduz o volume de resíduos que teria como destino os aterros sanitários. Adicionalmente, estimula na preservação ecológica, motivando na reciclagem de resíduos, seja devido ao seu elevado valor residual ou mesmo por meio de programas de educação ambiental. A Tabela 2.1 demonstra a comparação do consumo de energia pelo método convencional em relação ao método de pirólise.

Tabela 2.1 - Tabela comparativa do consumo de energia entre os métodos convencional e pirólise

Produção de Alumínio (Ton)	Consumo de energia pelo método convencional (MW/h)	Consumo de energia pelo método pirólise (MW/h)
01	14,9	0,745

Fonte: ABAL 2019

De acordo com Cempre (2019) atualmente no Brasil, existe um aumento na reciclagem dessas embalagens, devido ao crescimento das iniciativas de coleta seletiva com organização de municípios, cooperativas e comunidade e ao desenvolvimento de novos processos tecnológicos. No ano de 2015, a reciclagem de embalagens do tipo longa-vida, da Tetra Pak, no Brasil foi mais de 59 mil toneladas uma taxa de 21%. São gerados aproximadamente, 680 quilos de papel para cada tonelada de embalagem cartonada reciclada.

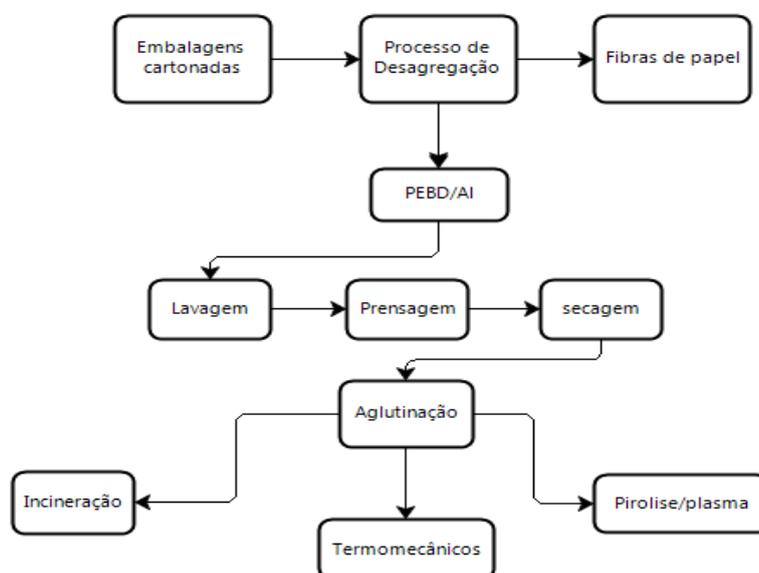
Por se tratar de um produto descartável de complexa reciclagem, as embalagens cartonadas possuem componentes que podem contaminar o meio ambiente. Assim, atualmente, tornou-se uma fonte expressiva de resíduos. Portanto, é de suma importância a análise e a pesquisa das rotas de recuperação destes, visando o beneficiamento econômico e ambiental da sociedade.

2.1.2. Rotas para a recuperação de resíduos de embalagens cartonadas.

Conforme Neves (2004) para que a reciclagem dos resíduos cartonados aconteça, necessita-se da divisão das camadas que compõe a embalagem. O primeiro estágio e a remoção do papel das embalagens por meio de um processo mecânico com a mistura de água em um equipamento chamado “hidrapulper”. O processo de desagregação ocorre com o desprendimento das fibras de papel das embalagens que ficam suspensas. É necessário um tempo de retenção de 30 a 40 minutos, e por bombeamento, são retiradas e passam por peneiras para evitar a passagem do compósito. Estes são retirados por força centrífuga, sendo então prensados e secos ao ar, enquanto as fibras retornam para o processo.

Como mencionado, a reciclagem de embalagem cartonada inicia-se na desagregação das fibras, sequenciado pela reciclagem do PEBD/Al. É possível observar no fluxograma da Figura 2.2 diversas rotas para reaproveitar a embalagem cartonada.

Figura 2.2 - Fluxograma da reciclagem de resíduos cartonados.



Fonte: Autor 2020

Segundo Neves (2004) a reciclagem do compósito PEBD/Al são conduzidas de várias formas. A incineração em caldeiras de biomassa é uma alternativa que visa utilizar a energia liberada na queima do resíduo, promovendo, assim, economia de óleo combustível. Os processos termomecânicos, como a termoprensagem, em que o PEBD/Al é prensado à altas temperaturas, são comumente aplicados para produção

de telhas. Outro processo termomecânico de destaque é a extrusão para produção de “*pellets*” - grãos são utilizados como matéria-prima para produção de peças por rotomoldagem, injeção ou sopro.

Segundo Freitas (2015) recentemente vem sendo empregada a reciclagem por plasma térmico ou pirólise, uma tecnologia inovadora que permite a completa separação das camadas de alumínio e polietileno. O alumínio é totalmente recuperado em forma de lingotes ou pó de alta pureza que podem ser transformados em folhas usadas na produção de novas embalagens. O polietileno é convertido em parafina que pode ser industrializado em petroquímicas. Como visto, o propósito da pirólise não é apenas a conversão de energia, mas uma importante aplicação se dá na produção de novos materiais.

Conforme Marques (2013) no Brasil, no interior de São Paulo implantou-se a primeira planta de pirólise do mundo para reciclagem de embalagens cartonadas. A mesma, que surgiu com uma parceria entre as empresas Alcoa S.A., Klabin S.A., Tetra Pak Ltda., e TSL ambiental, aplica a tecnologia a plasma para a reciclagem do plástico e do alumínio que sobram após a remoção do papel das embalagens. A planta tem a possibilidade de processar 8 mil toneladas por ano de alumínio e plástico, equivalente à reciclagem de 32 mil toneladas de embalagens cartonadas. Os poluentes gerados na recuperação dos materiais de embalagens longa vida é próxima de zero, com eficiência energética próxima de 90% e feita com 21% na ausência de oxigênio, sem queimas.

De acordo com Marques (2013) em Barcelona, na Espanha a empresa Store Enzo realiza a pirólise de lâminas de polietileno e alumínio (resíduos de embalagens cartonadas) em um tambor rotativo para recuperar o alumínio presente no resíduo cartonado. O aquecimento dos resíduos a uma temperatura de até 500°C com ausência de oxigênio promove a conversão do polietileno em uma mistura de hidrocarbonetos. Os gases formados são utilizados para fornecer energia para a planta de papel e celulose (20% do total consumido pela planta) que está integrada a planta de pirólise.

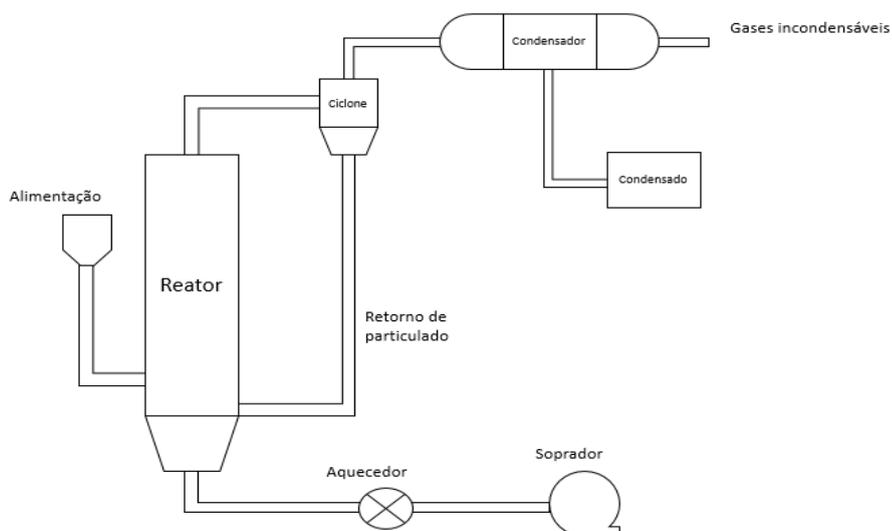
2.1.3. Principais pesquisas sobre pirólise de resíduos de embalagens cartonadas

Segundo Basu (2010) a pirólise é uma rota termoquímica para quebra de hidrocarbonetos na ausência de agentes oxidantes. A pirólise de resíduos cartonados possui três estágios de desvolatilização. O primeiro estágio refere-se à perda de umidade. O segundo está correlacionado à desvolatilização do papelão. Por fim, o terceiro trata-se da desvolatilização do polietileno.

Os reatores de contato gás-sólido tecnicamente viáveis para implementação na pirólise de resíduos cartonados, são os de leito de jorro (Figura 2.3), leito fluidizado (Figura 2.4) e o plasma térmico (Figura 2.5).

O primeiro estágio é o pré tratamento do material (detalhamento no item 2.1.2), visando condicioná-lo aos parâmetros operacionais necessários para que ocorra a pirólise no reator. Em seguida, esse material é alimentado no reator gradativamente, obtendo tempo de reação. A partir desse momento, inicia-se o processo de transferência de calor e massa entre o material inerte e as partículas, em que ambas as partículas são fluidizadas com injeção de ar quente, promovendo troca térmica e de massa. Devido a essa reação, há um desprendimento de gases e arraste de particulados. Deste modo, verifica-se a importância de equipamentos de separação, como ciclones (separação por densidade entre gases e particulados) e condensadores (separação por diferença de temperatura).

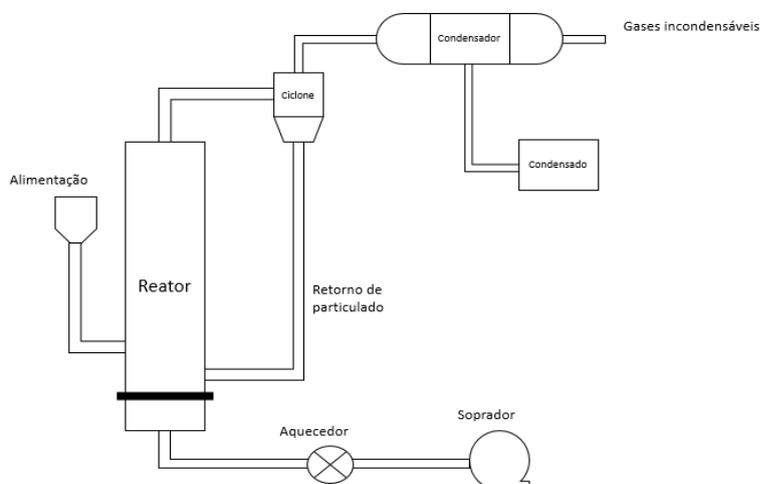
Figura 2.3 - Sistema de leito de jorro cônico.



Fonte: Autor 2020

Marques e Bacelos (2013) investigaram o comportamento de misturas de partículas cartonadas e polietileno para pirólise em leito de jorro, de forma a contribuir para a aplicação deste reator no referido processo. Assim, os autores reportaram que o regime de jorro só é alcançado com misturas de 50% discos cartonados no leito. O aumento das embalagens em misturas leva à diminuição da fluidez da areia no leito. Em geral, para misturas de polietileno e areia, o modelo CFD desenvolvido para o leito subestima a velocidade mínima de jorro (V_{mj}) e a perda de carga do leito (ΔP_m). Deste modo, o modelo de arrasto Syamlal-O'Brien é mais adequado do que o Gidaspow.

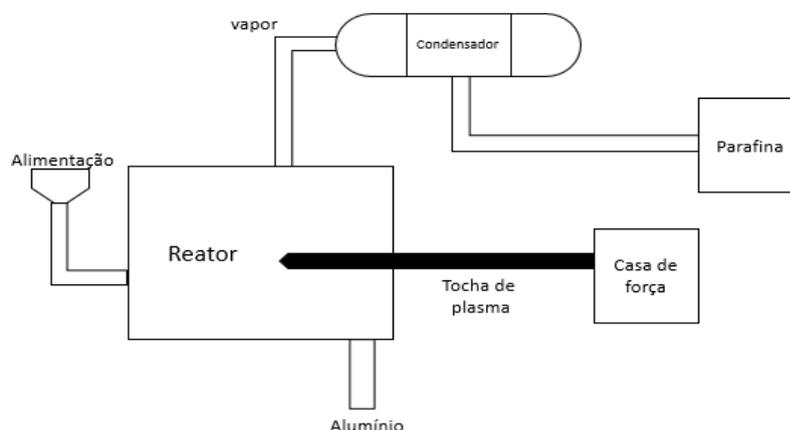
Figura 2.4 - Sistema de leito fluidizado.



Fonte: Autor 2020

Freitas et al. (2017) estudaram a dinâmica de fluido em um leito fluidizado composto por misturas do compósito de PEBD/Al ($\rho_s = 1039 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 550 \text{ }\mu\text{m}$) e de areia ($\rho_s = 2567 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 550 \text{ }\mu\text{m}$). O modelo Euler-Euler Granular e a equação parametrizada de Syamlal-O'Brien (transferência de momento entre as fases) descrevem bem o regime de fluidização de leitos composto por misturas de areia e compósito PEBD/Al. As misturas compostas por 95, 90, 80 e 70% p/p de areia respectivamente, apresentaram segregação quando submetidas às respectivas velocidades de escoamento do ar de 0,32; 0,31; 0,29 e 0,23 m/s. A segregação das partículas do leito pode ser evitada utilizando razão de velocidade de 1,5 acima da mínima de fluidização.

Figura 2.5 - Sistema de Plasma térmico.



Fonte: Autor 2020

Neves (2004) descreve que ao alimentar o polietileno e alumínio ao reator de plasma, a fundição do alumínio ocorre com temperatura de 650 - 700°C. O polietileno sofre o processo de pirólise em que a degradação do mesmo se forma uma cadeia de hidrocarbonetos gasosos trocando calor com um condensador dando origem à parafina. A partir da obtenção da parafina a mesma é utilizada para diversos fins, por exemplo, de cosméticos, lubrificantes ou ainda pode ser usada como combustível devido ao alto poder calorífico. O alumínio chega a obter uma pureza de 98 % ao final do processo.

Korkmaz et al. (2009), Haydary e Susa (2013), Alvarenga et al. (2016) e Vidal (2017) investigaram sobre pirólise de resíduos cartonados em atmosfera inerte, em que ao final do processo obtém-se diversos produtos (parafina, carvão e alumínio). Mas, sabe-se que o compósito PEBD/Al é facilmente pirolisado, devido suas características e a facilidade de encontrá-lo já pré processado.

Segundo Korkmaz et al. (2009) o polietileno e papel dos resíduos cartonados possuem diferentes temperaturas para que ocorra o processo de degradação térmica. A decomposição do papel é abaixo dos 400°C, temperatura a qual maximiza o processo, enquanto, para o polietileno, a temperatura aproximada é de 500°C. A pirólise dos resíduos produziu diversos produtos como a parafina e o alumínio.

Haydary e Susa (2013) analisaram a cinética da degradação térmica de embalagens assépticas e a pirólise destes resíduos em um reator de fluxo de laboratório. Realizaram uma análise termogravimétrica (TGA) em uma temperatura de 650°C para dois experimentos, em que as condições experimentais foram atendidas nas taxas de aquecimento linear de 5°C/min no fluxo de nitrogênio de 60 ml, para o primeiro. O segundo tipo de experimento incluiu pirólise de embalagens assépticas em mini briquetes com um equivalente diâmetro de 7 mm em uma unidade de pirólise de laboratório equipado com um reator de fluxo sob condições isotérmicas. A energia de ativação encontrada para o papelão no primeiro experimento foi de 156 kJ/mol e para o segundo experimento foi de 148 kJ/mol, e para o polietileno foi de 179,3 kJ/mol para ambos experimentos, sendo assim todos os resultados foram satisfatórios.

Alvarenga et al. (2016) estudaram a cinética da reação de pirólise usando a técnica de termogravimétrica (TGA) em uma faixa de temperatura de 450-780 K e aquecimento de 5-50 k/min. Para estimar a energia de ativação foram utilizados dois modelos cinéticos: reações isoconversionais e paralelas independentes. Para embalagens cartonadas e papelão, os valores de energias de ativação estimados foram semelhantes, isto é 170 kJ/mol em média. Para o polietileno, o valor médio encontrado foi de 213,72 kJ/mol.

Vidal (2017) investigou o processo de pirólise do PEBD/Al. Os experimentos ocorreram nas temperaturas 813-893 K e taxas de aquecimento de 10-50 k/min. Através dos modelos cinéticos isoconversionais e dos dados de termogravimetria, a energia de ativação global da reação de pirólise de PEBD/Al foi estimada: 169,61 kJ/mol (Ozawa), 170,79 kJ/mol (K-A-S), 181,33 kJ/mol (Starink) e 205,87 kJ/mol (Kissinger), sendo estes valores similares aos encontrados na literatura para o polietileno puro.

Para que ocorra reação de pirólise rápida em um reator de leito fluidizado, se faz necessário o uso de um material inerte, em que na maioria das vezes utiliza-se areia, para garantir que ocorra uma ótima troca térmica, dessa forma maximizando o seu rendimento. Para isso, é necessário que o nível de segregação de partículas seja o mínimo possível em um reator de leito fluidizado composto por PEBD/Al e areia. As seções seguintes apresentam os princípios necessários para tal estudo.

2.2. LEITOS FLUIDIZADOS

2.2.1. Aspectos gerais

Em 1926, a primeira planta de leito fluidizado de gaseificação de carvão em escala industrial entrou em operação obtendo combustíveis para motores. De acordo com Freitas (2015) a gaseificação atualmente representa 20% do mercado, devido ao interesse industrial na conversão de biomassa em combustíveis e derivados.

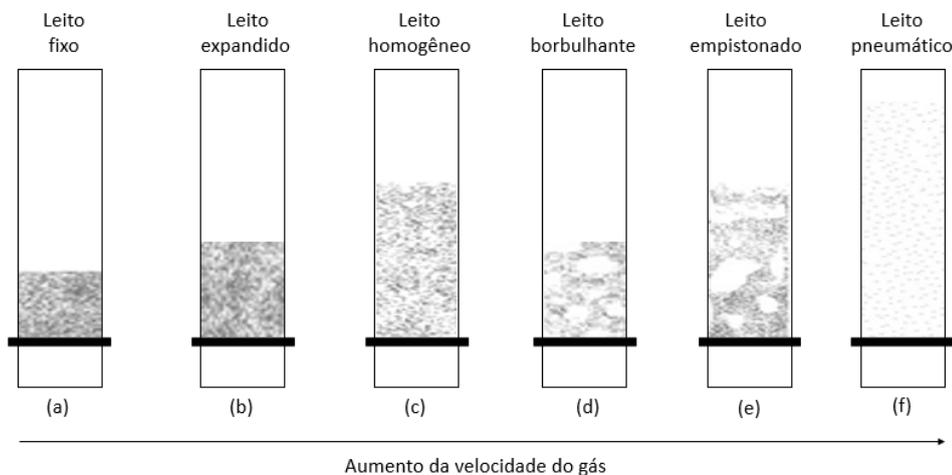
O leito fluidizado possui grande aplicação nos processos industriais como, secagem, pirólise, revestimento, congelamento, aquecimento e resfriamento de partículas. O uso do leito fluidizado em unidades industriais, e devido as vantagens em que fluidização pode promover como, elevados coeficientes de transferência de calor e massa, boa mistura dos sólidos e a área superficial das partículas sólidas fica completamente disponível para a transferência.

2.2.2. O fenômeno da fluidização

A fluidização ocorre quando um fluxo de fluido (gás ou líquido) ascendente através de um leito de partículas adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las junto com o fluido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Se um fluido escoar através de um leito de partículas finas, a velocidade do gás aumenta, assim provoca o surgimento de diferentes regimes de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991), conforme demonstrado na Figura 2.6;

Figura 2.6 - Regimes de escoamento.



Fonte: adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

Leito fixo: Como apresentado na Figura 2.6 (a), ocorre uma taxa de fluxo baixa, em que o fluido percorre os espaços vazios entre partículas estacionárias. Esta é uma camada fixa.

Leito expandido: Com um aumento na taxa de fluxo, as partículas afastam-se e algumas vibram e movem-se em regiões restritas. Isto é a camada expandida. Em uma velocidade ainda mais alta, um ponto é alcançado onde todas as partículas são apenas suspensas pelo gás ou líquido ascendente. Neste ponto a força de atrito entre partícula e fluido apenas contrabalança o peso das partículas, o componente vertical da força de compressão entre partículas adjacentes desaparece, e a queda de pressão através de qualquer seção da camada é igual a peso do fluido e partículas nessa seção. A camada é considerada apenas fluidizada e é referido como uma camada fluidizada incipiente ou uma camada na mínima fluidização, como observado na Figura 2.6 (b).

Leito homogêneo: Observa-se na Figura 2.6 (c), um aumento na vazão acima da mínima fluidização, em que geralmente resulta em uma expansão suave e progressiva da camada. Um fluxo bruto de instabilidades é amortecida e permanece pequeno, heterogeneidade ou grande escala de vazios de líquido, não são observados em condições normais.

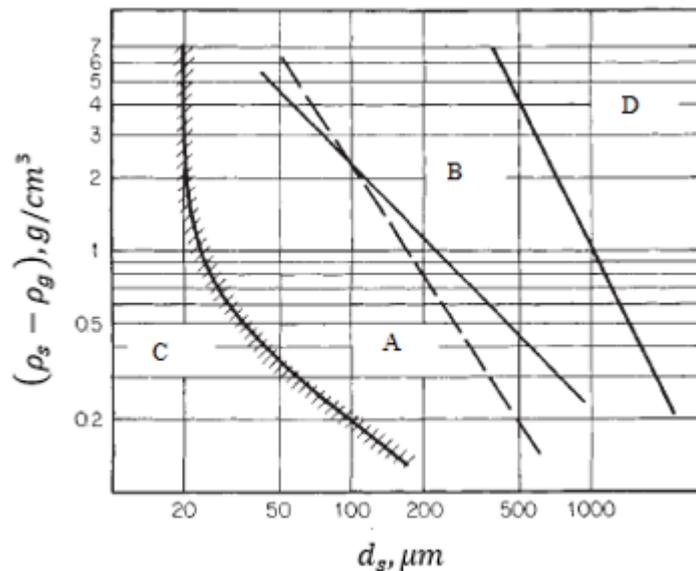
Leito fluidizado borbulhante: Com o aumento de vazão além da fluidização mínima, grandes instabilidades com borbulhamento e a canalização do gás é observada. Em vazões mais altas, a agitação se torna mais violenta e o movimento de sólidos se torna mais vigoroso. Além disso, a camada não se expande muito além de seu volume com mínima fluidização como visto na Figura 2.6 (d).

Leito empistonado: Esse fenômeno acontece quando a altura do leito é superior ao dobro do diâmetro da coluna e a velocidade do gás é superior à velocidade de mínimo slugging. É caracterizado por bolhas que ocupam mais da metade da seção transversal da coluna. Esse comportamento conduz à formação de bolhas grandes que ascendem no leito com o movimento semelhante ao de um pistão (ORDOÑEZ, 2014), Figura 2.6 (e).

Leito com transporte pneumático: Com o aumento na velocidade do gás, os sólidos são levados para fora do leito com o gás. O arraste de partículas torna-se acentuado exigindo a recirculação do material saindo pelo topo para evitar o esvaziamento do leito, como visto na Figura 2.6 (f).

As propriedades do material são de suma importância para que o fenômeno de fluidização aconteça. Geldart (1973), por meio de um estudo do comportamento das partículas, com diferença entre os diâmetros e a massa específica, fluidizadas com o ar, desenvolveu uma ordem classificatória, conforme diagrama proposto por Geldart (1973) é apresentado Figura 2.7.

Figura 2.7 - Classificação de partículas segundo Geldart



Fonte: PERRY et al.(1999)

As partículas grupo A de Geldart, são sólidos de tamanho e massa específica pequenos com média entre, entre 20 e 100 μm , e por serem pequenas as mesmas se fluidizam com facilidade, devido isso, o leito se expande antes do aparecimento de bolhas. Em velocidades elevadas do gás, as bolhas de gás movimentam-se rápido atravessando a emulsão gás-sólido.

As partículas do grupo B de Geldart, apresentam diâmetro médio na faixa de 40 a 500 μm , em que possui fácil fluidização, no entanto, o aparecimento de bolhas é imediato, após a velocidade de mínima fluidização. As bolhas aumentam com a velocidade do gás, mas comparado com o grupo A, a expansão é lenta. Esse grupo possui uma diversidade de materiais, sendo a areia um dos principais.

O grupo C de Geldart são partículas finas, com difícil fluidização. A média dessas partículas é menor que 20 μm , devido a essas características, as forças interpartículas possui maior força sobre elas. Partículas com essas características, possuem baixa fluidização, por exemplo partículas que possuem essas características, como a farinha de trigo, pó de café e cimento.

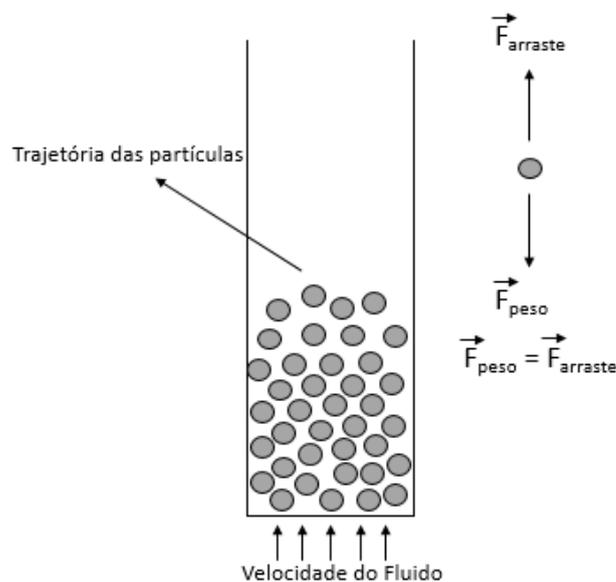
O grupo D de Geldart são considerados partículas grandes, com média de diâmetro superior a 1 mm. As forças coesivas interpartículas são menores que a força de

arraste exercida pelo gás, por isso, a velocidade do gás na fase densa é alta e a mistura de sólidos é relativamente fraca. São formadas bolhas horizontais, próximo ao distribuidor, as quais cruzam o leito como pistões. Devido as suas características, em leitos profundos, a fluidização dessas partículas torna-se difícil, com uma mistura ruim, exemplo desses materiais, são o milho, café e soja.

2.2.3. Fluidodinâmica de leitos fluidizados

A relação da queda de pressão em função da velocidade do fluido por meio de um leito fixo de partículas, ganha destaque, por determinar a velocidade de mínima fluidização das partículas, isso ocorre devido a força de arraste e força peso das partículas se igualarem, tornando a queda de pressão constante (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). Conforme apresentado na Figura 2.8.

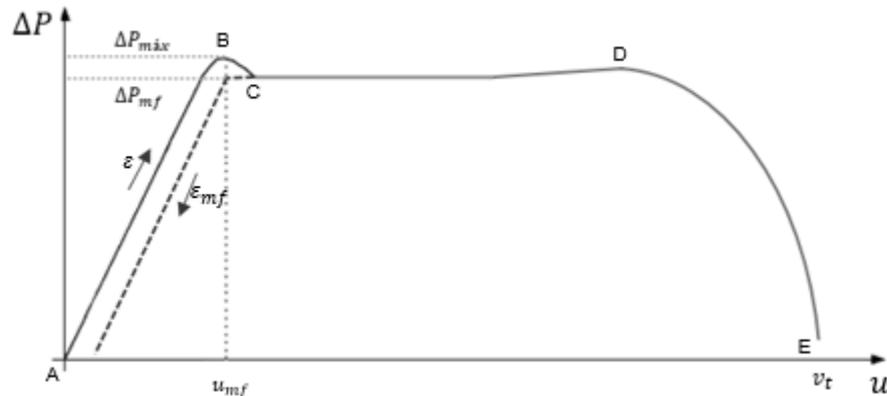
Figura 2.8 - Diagrama de corpo livre das partículas.



Fonte: Autor 2020

A curva característica de fluidização (Figura 2.9) é um parâmetro muito importante no projeto de leitos fluidizados, além de indicar a qualidade da fluidização. Esta curva apresenta a queda de pressão no leito em função da velocidade do fluido.

Figura 2.9 - Curva característica de fluidização.



Fonte: Freitas et al. 2017.

A região AB, onde as partículas concentram-se no fundo, é denominado o leito fixo, à medida que a queda de pressão aumenta, a velocidade do fluido aumenta-se proporcionalmente.

A fluidização inicia-se no ponto B, nesse ponto onde as partículas irão se agitar lentamente. A velocidade do fluido é aumentada, em seguida ocorre a estabilidade da queda de pressão, permanecendo-se constante, mas com variação na altura do leito, assim provocando o fenômeno da expansão.

No ponto CDE, observa-se uma nova curva, devido a redução da velocidade do fluido no ponto C. Com essa diferença entre as curvas, pode-se perceber uma variação na porosidade das partículas. Assim, as condições mínimas para fluidização do leito, são determinadas na diminuição da velocidade do ponto D, ou seja, pode-se determinar a mínima fluidização no retorno da velocidade inicial do fluido.

2.2.4. Segregação de partículas com misturas binárias

Os leito fluidizados têm sido amplamente utilizados em diversos setores da engenharia química, energia e ambiental (ZHANG et al. 2017). Nestas aplicações práticas, os tamanhos das partículas são normalmente polidispersos em vez de monodispersos e a segregação pode ocorrer nos reatores.

O fenômeno da segregação de partículas em leito fluidizado composto por misturas binárias tem despertado interesse, pois este afeta diretamente a taxa de transferência de calor e conseqüentemente a taxa de reação.

Dependendo das características físicas das misturas de partículas binárias e das condições operacionais utilizadas no leito, partículas maiores podem se depositar no fundo enquanto partículas menores podem se concentrar no topo da coluna.

Alguns resultados experimentais das últimas décadas descobriram que, a caracterização das partículas, as condições operacionais e a geometria do reator, influenciam diretamente no fenômeno da segregação, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Estudos sobre à Segregação de Partículas em Leito Fluidizado

Título do artigo	Autores	Ano
Investigation of the segregation of a binary particle mixture in a square circulating fluidized bed with air staging	Du and Wang	2019
Modelling of particle segregation in fluidized beds	Pareek <i>et al.</i>	2019
Continuous segregation of binary heterogeneous solids in fluidized Beds	Krishnaiah <i>et al.</i>	2017
Inhomogeneous Segregation of Binary Mixtures in Fluidized Beds	Puttinger <i>et al.</i>	2015
Pulsating flow effect on the segregation of binary particles in a gas-solid fluidized bed	Saidi <i>et al.</i>	2014
Effect of fines on segregation of binary mixtures in gas–solid fluidized beds	Sotudeh-Gharebagh <i>et al.</i>	2012
Mixing–segregation phenomena of binary system in a fluidized bed	Cha <i>et al.</i>	2010
Segregation in polydisperse fluidized beds: Validation of a multi-fluid model	Fan and Fox	2008

Tabela 2.2 - Estudos sobre à Segregação de Partículas em Leito Fluidizado

		(Continuação)
Investigating the dynamics of segregation of high jetsam binary batch fluidised bed systems	Leaper <i>et al.</i>	2004
Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol	Daleffe and Freire	2004
A fundamental approach to the phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids	Girimonte <i>et al.</i>	2001
Inverted segregation of binary particles in gas-liquid-solid fluidized bed	Hidaka <i>et al.</i>	1995

Pareek et al. (2019) estudaram a mistura e segregação da celulose (diâmetro de 250-900 μm) e areia (diâmetro 440 μm) em leito fluidizado. Para a investigação dos efeitos dos fatores, utilizou-se um modelo multifásico baseado na teoria cinética do fluxo granular, e depois validado com experimentos baseados na literatura. Os autores identificaram que o aumento na velocidade do gás (1 m/s para 3 m/s), promoveu a mistura entre partículas de celulose e areia, assim foi perceptível, a diminuição da segregação das partículas.

Krishnaiah et al. (2017) analisaram a segregação contínua de uma mistura binária de resina ($d_p= 780 \mu\text{m}$, $\rho= 1135 \text{ kg/m}^3$) e areia ($d_p= 780 \mu\text{m}$, $\rho= 2650 \text{ kg/m}^3$) em um leito fluidizado. Correlações, foram propostas usando modelo logístico para as composições, e posteriormente comparadas com os dados experimentais. Os autores identificaram que a redução na segregação das partículas, ocorre à medida que a velocidade do gás, a descarga de fundo, a composição de alimentação do “flotsam” e a velocidade mínima de fluidização aumentam.

Puttinger et al. (2015) investigaram a segregação de misturas binárias em um leito fluidizado, com partículas de esferas de vidro com diâmetro médio de 0,5 mm; 1,15 mm e 2,6 mm. Desenvolveu-se um modelo híbrido Euler-Euler via CFD, para mostrar um comportamento similar, para distúrbios iniciais em mistura de partículas binárias. Observa-se que a segregações de partículas é maior quando a velocidade

superficial é maior que a velocidade de mínima fluidização da fração menor, mas bem abaixo da velocidade mínima de fluidização da fração de partículas maior.

Sotudeh-gharebagh et al. (2012) investigaram a segregação de misturas binárias de esferas de vidro, com diâmetros diferentes de 2500 e 1500 μm , na presença de finos em leito fluidizado borbulhante. Utilizou-se o modelo da teoria contínua e o método de elementos discretos via CFD, na presença de partículas finas nas misturas binárias. Os autores identificaram que a segregação aumenta com o aumento de finos em até 5% em peso e a segregação aumenta à medida que o tamanho dos finos diminui de 900 para 500 μm .

Cha et al. (2010) estudaram a segregação de misturas de partículas de polimetilmetacrilato ($d_p = 0,505; 0,715$ e $1,545$ mm e $\rho = 1190$ kg/m^3) e areia ($d_a = 0,715$ mm e $\rho = 1190$ kg/m^3) em leito fluidizado. A segregação é analisada pelo método de distribuição do tempo de residência e do grau de mistura. Verificou-se que para a razão de velocidade V/V_{mf} em 2,5 m/s, a concentração axial de partículas binárias permaneceu uniformemente (50% polimetil-metacrilato e 50% de areia) distribuída pelo leito, com mistura de 30% de areia.

Fan e Fox et al. (2008) investigaram misturas binárias de esferas de vidros com diâmetros de 1500 e 2500 μm e mesma densidade, em um leito fluidizado. Um modelo multi-fluido baseado na abordagem de Euler-Euler e o método de quadratura direta de momentos (DQMOM) é usado para descrever a segregação de partículas, e as previsões do modelo são validadas com dados experimentais e de simulação disponíveis. Observou-se que com o aumento da velocidade do gás acima da velocidade de mínima fluidização ($V_{mf} = 1,25$ m/s), alcançou melhores resultados, em que a taxa de segregação reduziu, com razão abaixo de 0,1.

Leaper et al. (2004) analisaram a segregação de uma mistura binária composta por ballotini de vidro ($d_p = 124$ μm e $\rho = 2500$ kg/m^3) e areia ($d_p = 179$ μm e $\rho = 4500$ kg/m^3), com um sistema de leito fluidizado em concentrações de areia em 0,5 e 0,75. A segregação foi examinada medindo a concentração dentro do leito e a posição da interface entre as duas camadas ao longo do tempo e aproximada utilizando o modelo de equação de primeira ordem. Os resultados mostram que, quando uma mudança de etapa é feita pela velocidade de fluidização ($V_{mf} = 0,011$ m/s)

do leito homogêneo (50% areia e 50% de vidro) a concentração de areia no topo do leito pode ser modelada usando um sistema de ordens com uma constante de taxa e um valor de equilíbrio. Assim velocidades de fluidização mais baixas produzem maior taxa de segregação à medida que suas condições de equilíbrio se desviam de uma camada totalmente misturada, portanto, fornecem condições mais propícias à segregação.

O cenário de recuperação de resíduos de embalagens cartonadas demonstra um grande potencial econômico e social, devido ao valor agregado dos seus produtos. A recuperação do alumínio, via rota de pirólise do compósito de polietileno-alumínio em um reator de leito fluidizado, é de suma importância para o setor acadêmico e industrial. No entanto, o fenômeno de segregação é algo indesejado neste processo. Portanto, a análise de fatores que consideram tanto as características físicas de partículas quanto as condições operacionais sobre o índice de segregação em leito fluidizado é ainda um desafio, devido à escassez de pesquisas sobre o assunto.

Portanto, com base no referencial teórico visto, nas seções seguintes, serão abordados técnicas experimentais e estatísticas, afim de avaliar o efeito dos fatores X_C , V/V_{mf} e d_C/d_A sobre o índice de mistura de partículas em um leito composto de misturas de areia e PEBD/Al.

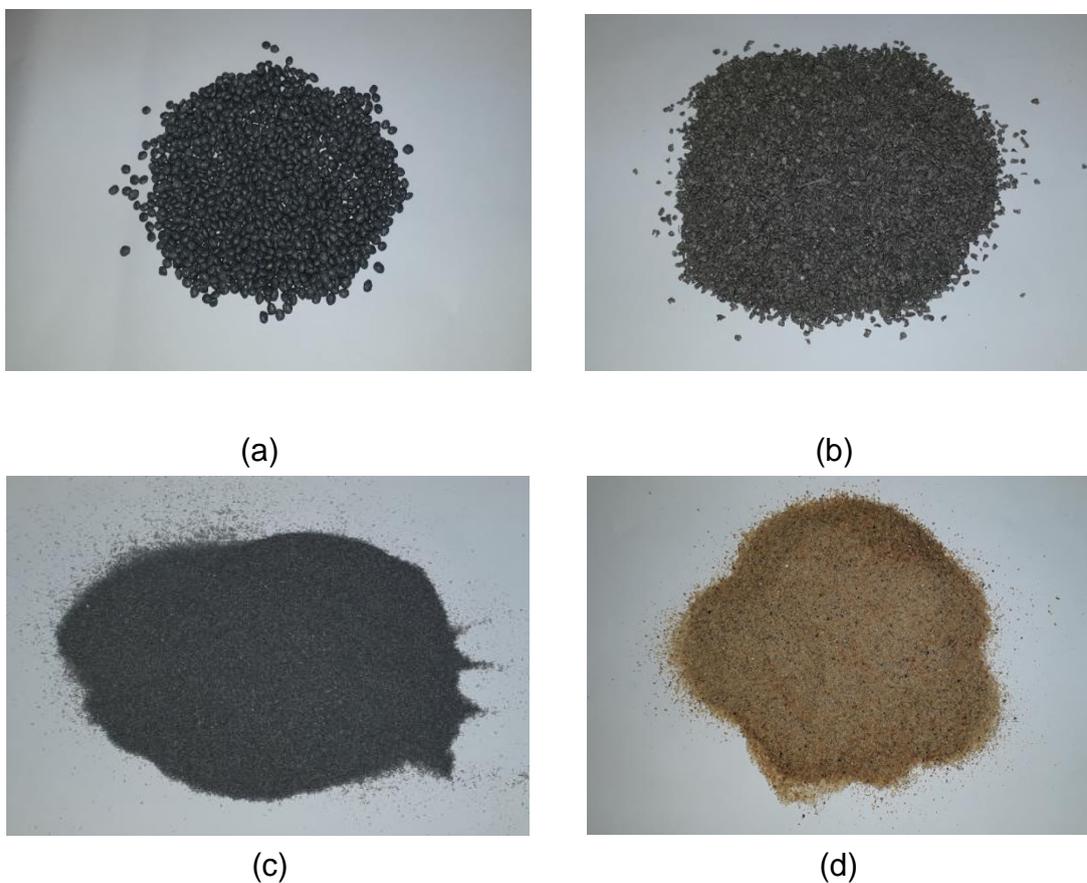
3. METODOLOGIA

Para a análise da segregação das misturas de PEBD/Al e areia em leito fluidizado, a metodologia é dividida nas seguintes etapas. A primeira consiste na caracterização física dos materiais utilizados (massa específica, diâmetro e porosidade das partículas), onde os resultados encontrados são observados nos apêndices A e B. Em seguida, é detalhado os equipamentos que compõem a unidade experimental e os procedimentos para realização das análises.

3.1. PARTÍCULAS E MISTURAS UTILIZADAS

O leito é composto por misturas nas seguintes proporções e diâmetros: PEBD/AL com $X_c = 10, 20$ e 30% p/p e $d_c = 0,3; 1,57$ e $2,85$ mm e areia e $d_A = 0,45$ mm. Na Figura 3.1 são demonstrados os materiais utilizados para estudo.

Figura 3.1 - Materiais utilizados: diâmetros de PEBD/AL – (a) 2,85 mm, (b) 1,57 mm, (c) 0,3 mm e diâmetro da Areia – (d) 0,45 mm.



3.1.1. Massa específica

De acordo com Freitas (2015) o método de picnômetro é utilizado para estimar a massa específica. O picnômetro é calibrado com água destilada, preenchido com a amostra, a qual deseja-se analisar, até um quarto de seu volume e tem sua massa mensurada utilizando-se uma balança analítica. Em seguida, o volume do picnômetro é preenchido com um fluido – água para areia e querosene para o compósito e sua massa também é registrada. As bolhas de ar são retiradas com o uso do banho ultrassônico. A seguir a equação para o cálculo da massa específica (Perry et. al, 1999):

$$\rho = \frac{m}{v_{pic} - v_f} \quad (3.1)$$

em que:

ρ é a massa específica

m é a massa da amostra;

v_{pic} é o volume do picnômetro;

v_f é o volume de fluido adicionado.

3.1.2. Diâmetro médio

De acordo com Kunii e Levenspiel (1991) o diâmetro da partícula é obtido pela média aritmética entre as aberturas das peneiras e por meio da técnica de peneiramento é obtido o diâmetro médio das partículas de compósito PEBD/AL ($d_c = 2,85; 1,57$ e $0,3$ mm) e areia ($d_A = 0,45$ mm). Peneiras do modelo Tyler Bertel com aberturas específicas em μm e mesh respectivamente, são utilizadas para classificação das partículas. Peneira-se a amostra por um tempo até a classificação total das partículas, que se obtenha peso constante em cada peneira.

3.1.3. Porosidade

Utiliza-se a equação do balanço de forças para estimar a porosidade. A técnica consiste em obter os dados por meio dos experimentos realizados no item 3.5, para determinar a velocidade de mínima fluidização, de acordo com Kunii e Levenspiel (1991) a porosidade então é obtida pela equação 3.2:

$$\Delta P = g(\rho_A - \rho_C)(1 - \varepsilon_{mf})h \quad (3.2)$$

em que:

ε_{mf} representa a porosidade de mínima fluidização do leito;

ΔP é a queda de pressão no leito;

g é a gravidade;

ρ_A é a massa específica da areia;

ρ_C é a massa específica do compósito;

h é a altura que o leito atinge para cada V_{mf} .

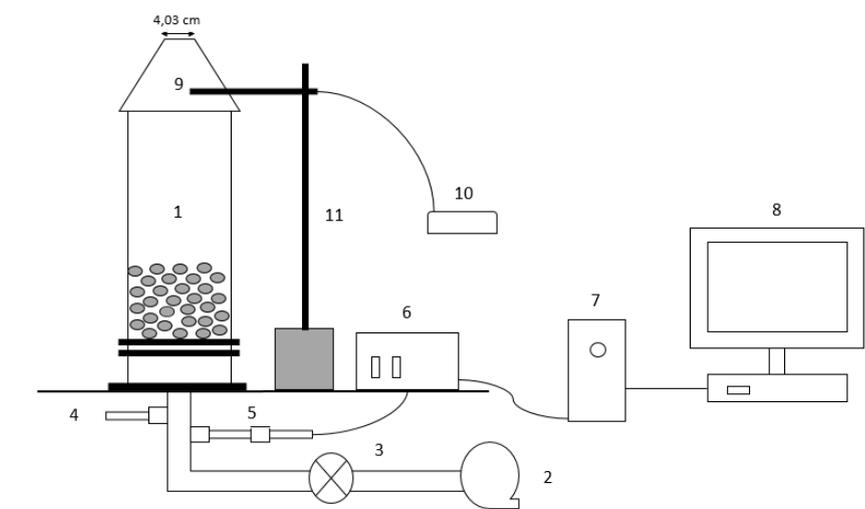
3.2. UNIDADE EXPERIMENTAL

Utilizou-se para os ensaios fluidodinâmicos os mesmos utilizados por Freitas (2015), um leito fluidizado com uma coluna cilíndrica de vidro, termopar, transdutor de pressão, aquecedor, soprador, condicionador de sinais, placa de aquisição de dados e microcomputador. A velocidade do ar foi medida no topo da coluna com um anemômetro (Kimo Instruments AMI 300).

Segundo Freitas (2015) o transdutor de pressão diferencial capta o sinal analógico do leito, os mesmos são endereçados a uma placa de aquisição de dados A/D CDAQ-

9174 da National. Os equipamentos citados, estão localizados no Laboratório de Eficiência Energética 1, no programa de pós-graduação em energia do CEUNES (Centro Universitário do Espírito Santo), situada na cidade de São Mateus-ES, no Brasil. A seguir uma representação esquemática conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Unidade experimental: 1 – coluna cilíndrica de vidro, 2 – soprador, 3 – aquecedor, 4 – termopar, 5 – transdutor de pressão, 6 – painel de acionamento 7 – placa de aquisição de dados, 8 – computador, 9 – cone, 10 – anemômetro, 11 – fixador



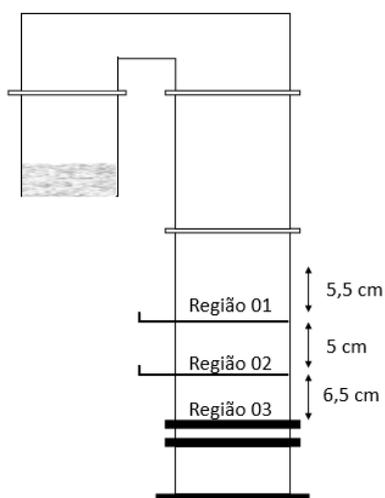
Fonte: Autor 2020

O leito é equipado com um sistema de aquecimento de ar com controle de temperatura também se encontra disponível próximo à saída do soprador. Um soprador centrífugo IBRAM de 2 CV de potência e vazão máxima de ar de 4,5 m³/min. Para o monitoramento da pressão, um transdutor de pressão Dwyer 616C-4 (faixa de operação de 0 a 4981 Pa, com precisão de 1%) está localizado na tubulação de entrada de ar, ou seja, pouco abaixo da câmara cilíndrica (FREITAS, 2015).

Para que a aquisição de dados seja efetuada, um computador (Core i3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM) foi acoplado a uma placa de aquisição de dados A/D (analógico/digital) da *National Instruments* que está interligada ao leito fluidizado.

Adaptou-se um sistema com seções de guilhotinas axiais, para retirada de amostras em diferentes regiões do leito fluidizado, e devido ao arraste de particulado, foi adaptado uma caixa de poeira, para minimizar as perdas dos materiais, conforme representado na Figura 3.3 a seguir.

Figura 3.3 - Diagrama de guilhotinas axiais



Fonte: Autor 2020

3.3. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Para este estudo, as condições para realização dos experimentos são vistas na tabela 3.1. Optou-se pela execução de experimentos definidos por um planejamento fatorial completo 3^3 com três pontos centrais, um total de 30 experimentos (Tabela 3.2). O objetivo foi analisar os efeitos das variáveis de entrada como, porcentagem do compósito na mistura (X_c % p/p), razão entre os diâmetros do PEBD/AL e areia (d_c/d_A) e a velocidade do ar (V/V_{mf}), sobre o índice de mistura (I_M).

Tabela 3.1 - Fatores de entrada

d_c/d_A	X_c (% p/p)	V/V_{mf}
0,67	10	1,1
3,49	20	1,25
6,33	30	1,4

Tabela 3.2 - Matriz de planejamento

Experimentos	d_C/d_A	X_C (% p/p)	V/V_{mf}
1	0,67	10	1,1
2	0,67	10	1,25
3	0,67	10	1,4
4	0,67	20	1,1
5	0,67	20	1,25
6	0,67	20	1,4
7	0,67	30	1,1
8	0,67	30	1,25
9	0,67	30	1,4
10	3,49	10	1,1
11	3,49	10	1,25
12	3,49	10	1,4
13	3,49	20	1,1
14	3,49	20	1,25
15	3,49	20	1,25
16	3,49	20	1,25
17	3,49	20	1,25
18	3,49	20	1,4
19	3,49	30	1,1
20	3,49	30	1,25
21	3,49	30	1,4
22	6,33	10	1,1
23	6,33	10	1,25
24	6,33	10	1,4
25	6,33	20	1,1
26	6,33	20	1,25
27	6,33	20	1,4
28	6,33	30	1,1
29	6,33	30	1,25
30	6,33	30	1,4

Para a elaboração das planilhas eletrônicas de procedimento analítico e da matriz de planejamento foi utilizado o programa Microsoft Excel (no apêndice C são observados os valores de I_M por região). Para a elaboração da matriz que efetua a combinação de todas as variáveis de interesse em todos os níveis foi utilizado um programa estatístico – que apresenta de maneira gráfica/tabular os dados experimentais alimentados e permite ajustar um modelo que representa a variável resposta em função dos fatores investigados (d_C/d_A ; V/V_{mf} e X_C p/p).

A escolha dos valores desses fatores se deve as seguintes situações. Para (d_C/d_A), existem várias pesquisas na literatura, em que analisam o efeito da diferença de diâmetro sobre a segregação, devido os espaços vazios entre as misturas. Puttinger et al. (2015) investigaram a segregação de misturas binárias em um leito fluidizado, com partículas de esferas de vidro com diâmetro médio de 0,5; 1,15 ou 2,6 mm em leito fluidizado, em que a segregação é menor com velocidades acima da mínima fluidização. Por isso, as partículas de composto PEBD/AL de 0,3; 1,57 e 2,85 mm foram escolhidas.

A proporção das misturas ($X_C= 10, 20$ e 30% p/p de PEBD/AL) de areia ($d_A= 0,45$) e PEBD/AL ($d_C/d_A= 0,3; 1,57$ e $2,85$ mm) são escolhidas. Devido a areia ser utilizada como inerte, tem suma importância na pesquisa, já que é considerado um ótimo condutor térmico. Assim aumenta-se o desempenho em relação a transferência de calor, promovendo estabilidade no processo.

Já para (V/V_{mf}), a força de arrasto e a força peso atuam sobre as partículas no leito fluidizado e está relacionado a velocidade do ar. Em pesquisas realizadas no laboratório observou-se que para partículas abaixo de 0,4 mm com V/V_{mf} acima 1,4 ocasionam arraste das partículas de PEBD/AL para fora do leito.

Para validação dos experimentos, serão confrontados dados de I_M previstos pelo modelo com dados novos dados de I_M experimentais, afim de encontrar o erro relativo de acordo com a equação 3.3 . Esses valores experimentais foram os pontos centrais dos fatores de entrada de d_C/d_A , V/V_{mf} e X_C p/p conforme observado na Tabela 3.5 e 3.6;

$$\text{Erro relativo (\%)} = \frac{I_{M,experimental} - I_{M,simulado}}{I_{M,experimental}} \times 100 \quad (3.3)$$

Tabela 3.3 - Fatores de entrada para verificação da previsão do índice de mistura pelo modelo

d_C/d_A	X_C (% p/p)	V/V_{mf}
2,22	15	1,17
4,89	25	1,32

Tabela 3.4 - Matriz de planejamento para validação

Experimentos	d_c/d_A	X_c (% p/p)	V/V_{mf}
31	2,22	15	1,17
32	2,22	15	1,32
33	2,22	25	1,17
34	2,22	25	1,32
35	4,89	15	1,17
36	4,89	15	1,32
37	4,89	25	1,17
38	4,89	25	1,32

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para encontrar a curva da velocidade de mínima fluidização do leito fluidizado, foi desenvolvido o seguinte procedimento. O leito foi preenchido com partículas de areia e PEBD/AL até atingir a medida de 17 cm de altura (realizou-se o preenchimento, de acordo com as proporções definidas no item 3.1). Com o acionamento do soprador, foi ajustado a velocidade do ar pelo inversor de frequência, aquecido em média de 35°C, na parte inferior na coluna. Os dados de queda de pressão foram medidos pelos transdutores de pressão e endereçados para um sistema de aquisição de dados da *National Instruments* e armazenados em um computador. Neste procedimento, para cada velocidade analisada, foi registrado 1024 dados de queda de pressão. Com a média dos dados de queda de pressão no leito as curvas foram obtidas.

Posteriormente, realizou-se a coleta de dados de forma inversa, reduzindo a velocidade até chegar à condição de leito fixo. Realizado as coletas dos dados de queda de pressão pelo programa Labview e a coleta das velocidades pelo anemômetro (Kimo Instruments AMI 300), montou-se um gráfico no programa, Microsoft Excel. O ponto correspondente na curva de volta do gráfico, foi considerado o valor de velocidade de mínima fluidização. Utilizou-se o cone, devido à dificuldade de leitura do medidor de vazão para baixas velocidades, por isso, para conversão de valores, foi mediante um balanço de massa entre o ponto de medida (1) e a base do cone (mesma área da coluna) em regime permanente, sabe-se que:

$$M_1 = M_2, \text{ regime permanente;}$$

$$\rho_1.V_1.A_1 = \rho_2.V_2.A_2;$$

Se V_1 medida e A_1 é menor, logo;

$$V_2 = \rho_1.V_1.A_1 / \rho_2.A_2.$$

A massa específica do ar muda com a temperatura, se a temperatura do ar é a mesma entre os pontos 1 e 2, logo a massa específica é constante e é simplificada.

Para realizar as análises de segregação das partículas, foi preenchido o leito com partículas de areia e PEBD/AL até atingir a medida de 17 cm de altura. Realizou-se o preenchimento, de acordo com as proporções propostas descritas no item 3.1. Com o acionamento do soprador, foi ajustado a velocidade do ar pelo inversor de frequência, injetando ar aquecido em média de 35°C, na parte inferior na coluna.

A velocidade do ar foi injetada de acordo com as proporções propostas de 1,1; 1,25 e 1,4, acima da velocidade de mínima fluidização para cada experimento e permaneceu nessas condições por 5 min, posteriormente reduziu-se o ar até a sua extinção. As coletas das amostras foram realizadas com as guilhotinas, começando na parte da secção 01, 02 e 03, respectivamente. Em seguida, foi realizada a separação das misturas binárias, por meio do método de peneiramento, após a separação das amostras, foi realizado a pesagem dos mesmos, assim obteve-se a fração mássica (conforme equações 3.5 e 3.6) e índice de mistura (de acordo equação 3.4).

A altura do leito para cada experimento também foi registrada, utilizou-se papel milimetrado para medição da mesma, fixado na coluna cilíndrica. Observou-se a altura máxima que o leito de partículas atinge para cada velocidade de mínima fluidização.

3.5. VARIÁVEL RESPOSTA

O índice de mistura foi definido pela seguinte equação:

$$I_M = \frac{X_i}{X_0} \quad (3.4)$$

Em que, X_i é a fração mássica do compósito na região i do leito, e X_0 é a fração mássica do compósito inicial no leito. As frações mássicas podem ser calculadas com as seguintes equações:

$$X_i = \frac{m_{ci}}{m_t} \quad (3.5)$$

$$X_0 = \frac{m_{c0}}{m_{t0}} \quad (3.6)$$

Em que, $m_{c,i}$ é a massa do compósito na região i do leito, e m_t é a massa total compósito no leito, e $m_{c,0}$ é a massa do compósito inicial do leito, e $m_{t,0}$ é a massa inicial total no leito.

Dessa maneira, para cada região de leito analisada, os valores iguais a um indicam condições ideais de mistura. Valores de $I_M > 1$ indicam que há maior concentração de compósito, ao passo que $I_M < 1$ indicam maior concentração de partículas de areia.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados a análise dos efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_M), ajuste do modelo estatístico aos dados experimentais, bem como a sua validação.

4.1. O EFEITO DOS FATORES SOBRE O ÍNDICE DE MISTURA

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os efeitos estimados dos fatores (termos linear e quadráticos) sobre o índice de mistura (I_M) para as regiões de topo (Tabela 4.1) e de fundo (Tabela 4.2) do leito fluidizado, considerando somente os efeitos com p-valor < 5 %. Assim, nota-se que o d_C/d_A , V/V_{mf} e a interação entre (d_C/d_A) e (X_C) apresentaram efeitos significativos para o I_M (valores de efeito diferentes de zero), tanto no topo quanto no fundo do leito. Ainda, o maior efeito foi o de d_C/d_A em ambas as regiões, (0,5177 no topo e -0,40699 no fundo). Já para o X_C isolado, esse não apresenta efeito sobre o I_M em ambas as regiões (valores nulos).

Tabela 4.1 - Efeitos estimados dos fatores sobre o I_M no topo do leito.

Fatores	Efeito	Desvio padrão	t	p-valor
Média	1,2335	0,01334	92,4451	0
d_C/d_A (-)	0,5177	0,03372	15,3541	0
V/V_{mf} (-)	-0,06766	0,03372	-2,0065704	0,05
X_C (% p/p)	-	-	-	-
$(V/V_{mf})^2$	0,055107	0,02737	2,01289	0,05
$(d_C/d_A) \times (X_C)$	-0,1343	0,041301	-3,2526	0,003

Tabela 4.2 - Efeitos estimados dos fatores sobre o I_M no fundo do leito.

Fatores	Efeito	Desvio padrão	t	p-valor
Média	0,8123	0,010331	78,633007	0
d_C/d_A (-)	-0,40699	0,02622	-15,5182	0
V/V_{mf} (-)	0,05822	0,02622	2,2199	0,03572
X_C (% p/p)	-	-	-	-
$(d_C/d_A) \times (X_C)$	0,1232	0,03212	3,8368	0,0007524

Considerando o intervalo de confiança de 95%, a Figura 4.1 ilustra as superfícies de resposta ajustadas aos dados experimentais, tanto para a região do topo do leito (a, b) quanto para o fundo (c, d). É possível verificar a sensibilidade do I_M a variações nos fatores que foram identificados efeitos significativos.

Já na Figura 4.2, o gráfico de probabilidade normal como uma função dos resíduos é apresentado. Nesse, é possível verificar que os resíduos estão normalmente distribuídos ao longo da reta contínua normal esperada, pois estão aleatoriamente dispersos.

Na sequência, os resíduos como uma função dos valores preditos são apresentados na Figura 4.3. Com base nesses gráficos (a e b), nota-se que os resíduos não possuem nenhuma tendência na sua distribuição, ou seja, estão aleatoriamente distribuídos em torno de zero.

A partir da análise de resíduos realizada nas Figuras 4.2 e 4.3, verifica-se que as equações ajustadas (modelos) para as regiões R1 e R3 (topo e fundo, respectivamente) são satisfatórias para prever os valores de I_M (ver Tabela 4.3), pois apresentam valores de R^2 próximos de 1,00.

Em relação à velocidade mínima de fluidização para as partículas independentes, verifica-se na Tabela 4.4 à medida que se aumenta o diâmetro das partículas a mesma eleva-se proporcionalmente.

No que tange a mistura de partículas, observa-se na Tabela 4.5 que a velocidade de mínima fluidização aumenta-se proporcionalmente com a razão de diâmetro e mistura entre as partículas, até o ponto que começa a decrescer.

Figura 4.1 - Gráficos de superfície para a variável resposta I_M : topo (a,b) e fundo (c,d)

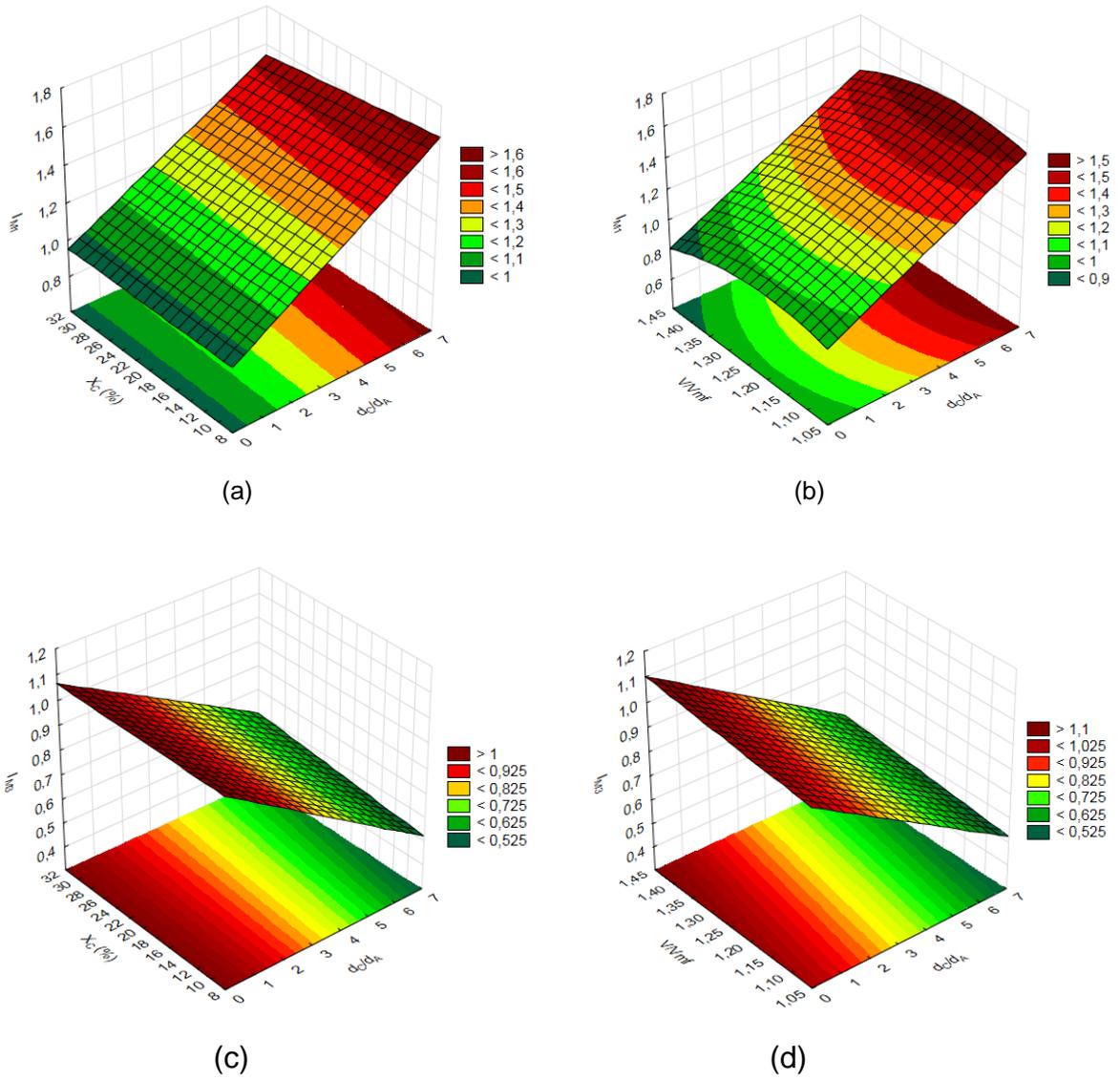


Figura 4.2 - Probabilidade normal x Resíduos: a) Topo (I_{M1}), b) Fundo (I_{M3}).

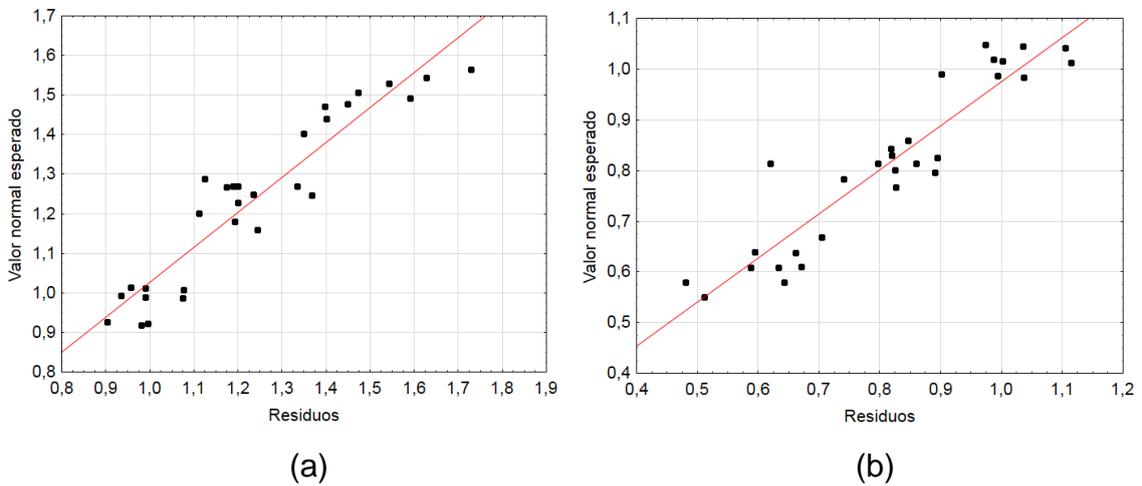


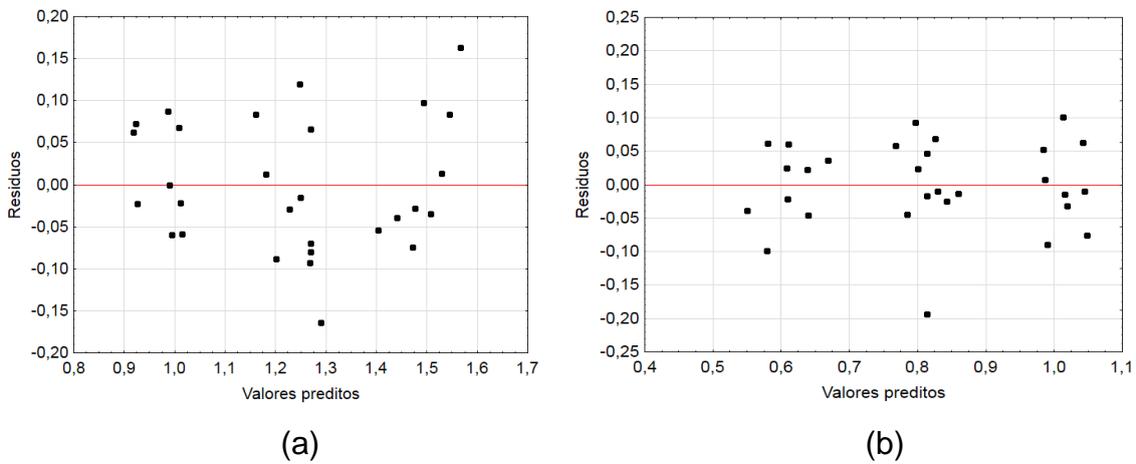
Figura 4.3 - Valores preditos x Resíduos: a) Topo (I_{M1}), b) Fundo (I_{M3}).

Tabela 4.3 - Modelos matemáticos utilizando variáveis codificadas: Topo (R1) e fundo (R3)

Região	Limite dos fatores	R ²	Equações
R1 (topo)	$0,667 < d_C/d_A < 6,33$	0,91	$I_m = -2,5945 + 0,10289 \frac{d_C}{d_A} + 5,8975 \frac{V}{V_{mf}}$
	$1,1 < V/V_{mf} < 1,4$		$-2,4492 \left(\frac{V}{V_{mf}} \right)^2$
	$10 < X_C < 30$		$-0,00058 \left(\frac{d_C}{d_A} \right) (X_C) + 2,1999$
R3 (fundo)	$0,667 < d_C/d_A < 6,33$	0,91	$I_m = 0,8123 - 0,40699 \frac{d_C}{d_A} + 0,05822 \frac{V}{V_{mf}}$
	$1,1 < V/V_{mf} < 1,4$		$+ 0,1232 \left(\frac{d_C}{d_A} \right) (X_C) + 0,010331$
	$10 < X_C < 30$		

Tabela 4.4 - Valores da velocidade mínima de fluidização para as partículas independentes (sem mistura)

d (mm)	V _{mf} (m/s)
d _C = 0,30	0,07
d _C = 1,57	0,45
d _C = 2,85	0,53
d _A = 0,45	0,18

Tabela 4.5 - Valores da velocidade mínima de fluidização para as partículas misturadas

d_c/d_A	X_c (% p/p)	V_{mf} (m/s)
0,67	10	0,19
0,67	20	0,20
0,67	30	0,22
3,49	10	0,21
3,49	20	0,22
3,49	30	0,27
6,33	10	0,18
6,33	20	0,17
6,33	30	0,16

As observações estatísticas realizadas dos efeitos dos fatores no I_M são complementadas com uma análise física na sequência.

Assim, nas condições operacionais investigadas, tem-se que a força de arraste é maior que a força peso nas partículas do leito (situação de fluidização). Dessa forma, ressalta-se que o efeito da razão de diâmetro de compósito e areia (d_c/d_A) é resultante dessa diferença entre as forças peso e arraste. Logo, por se tratarem de partículas com massa específica e diâmetro diferentes, nota-se que para partículas com mesmo peso, as que possuem diâmetros maiores estão associadas a maiores forças de arraste (maior área projetada) e tendem a se concentrar no topo. Partindo da premissa que as partículas de areia possuem diâmetro que pode ser considerado fixo, quanto maior o diâmetro das partículas de compósito, maior a tendência desse se concentrar no topo do leito, conforme constatado estatisticamente - Figura 4.1 (a). Da mesma forma, o mesmo efeito é verificado no fundo do leito - Figura 4.1 (c) -, onde a concentração de partículas de compósito com diâmetro menores é maior, em concordância com a hipótese levantada.

Para a faixa operacional de velocidade do ar, que está entre 10-40% acima da mínima de fluidização, esta não possui elevado efeito sobre o I_M no topo do leito. Esse fato deve estar possivelmente associado à faixa de fração volumétrica de compósito na mistura em valores elevados (10-30% p/p), que deve estar aumentando a resistência ao transporte de movimento no leito. Essa variação na resistência é afetada pelo caminho livre existente para as partículas percorrerem. Esse caminho livre é reduzido para diâmetros menores de compósito e aumentado para maiores, conforme corroborado na Figura 4.1 (b). Assim, a hipótese do aumento de resistência no leito

para partículas de compósito com diâmetros menores é, de fato, reforçada com os resultados reportados nas Tabelas 4.4 e 4.5. De acordo com as tabelas supracitadas, nota-se que a presença de compósito eleva inicialmente a resistência ao transporte de movimento no leito, visto que a velocidade mínima de fluidização da areia (Tabela 4.4) é incrementada com a adição progressiva de compósito em diferentes diâmetros até um ponto em que ocorre a sua diminuição (Tabela 4.5). Essa diminuição da velocidade mínima de fluidização deve estar associada com o aumento de porosidade do leito a partir do maior diâmetro de compósito investigado ($d_C = 2,85$ mm e $d_C/d_A = 6,33$). Esse mesmo efeito é observado no fundo do leito - Figura 4.1 (d), onde a concentração de partículas de compósito com diâmetros menores é maior, reforçando a hipótese levantada.

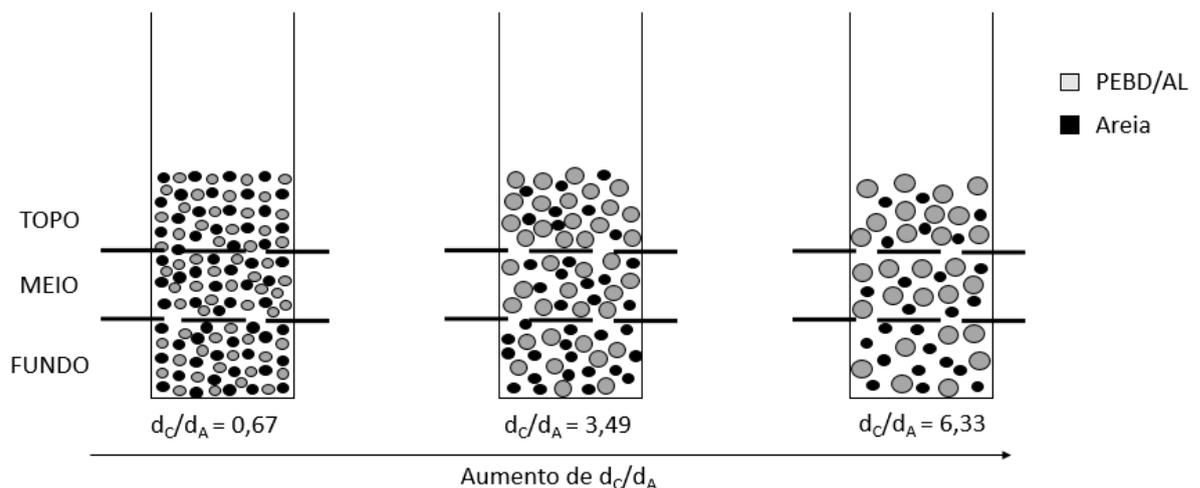
A X_C isolada (não mostrada nas Tabelas 4.1 e 4.2) não afeta o I_M tanto no topo quanto no fundo do leito. Entretanto, conforme previamente apresentado, as interações entre a d_C/d_A e X_C afetam o I_M .

Com base nos dados experimentais e características de leito fluidizado com misturas binárias de areia e PEBD/Al pode-se inferir que a segregação de partículas pode afetar diretamente a eficiência do reator de leito fluidizado. Regiões com diferentes índices de mistura (I_M) podem gerar distribuição não uniforme de temperatura, podendo produzir subprodutos indesejados. A concentração de compósito pode causar a defluidização do leito devido a redução do contato entre as partículas provocada pelo derretimento e aglomeração de partículas de compósito.

A mistura de partículas promove um bom controle de temperatura no leito produzindo produtos com características uniformes. Conforme evidenciado pelos dados experimentais, para reatores de leito fluidizado com misturas binárias de areia e PEBD/Al a redução da razão de diâmetro promove a mistura de partículas mesmo considerando a diferença de massa específica. Deste modo, para reações muito rápidas em que as resistências a condução de calor podem influenciar a taxa de reação de devolatização do polietileno presente no compósito, o leito fluidizado com partículas menores de PEBD/Al ($d_C/d_A = 0,67$, $d_A = 0,45$ mm), e vigoroso contato gás-sólido se torna uma alternativa promissora para pirólise de PEBD/Al.

Para diferentes razões de diâmetro de compósito e areia empregadas, a Figura 4.4 mostra uma representação esquemática da coluna de leito fluidizado com mistura de partículas de areia e PEBD/Al. O leito é dividido em três regiões fundo, meio e topo. Nestas regiões é possível visualmente evidenciar a concentração de partículas de PEBD/Al nas diferentes regiões de leito. Quanto maior o diâmetro das partículas de PEBD/Al, maior a concentração de compósito no topo, devido a ação da força de arrasto conforme já mencionado. No topo do leito, a concentração do PEBD/Al com maior diâmetro afeta diretamente o processo de pirólise, pois reduzem o contato entre as partículas de areia e PEBD/Al e, conseqüentemente a taxa de transferência de calor por condução. Por outro lado, leitos com misturas areia e PEBD/Al com menor diâmetro quando comparado ao da areia ($d_C/d_A = 0,67$ $d_A = 0,45$ mm) promovem a mistura (reduzem a segregação de partículas). Além disso, partículas menores podem ser rapidamente aquecidas (menor resistência a transferência de calor por condução) atingindo facilmente a temperatura desejada para o processo de pirólise do polietileno.

Figura 4.4 - Efeito de d_C/d_A sobre o I_M no Topo e Fundo do leito fluidizado



Fonte: Autor 2020

4.2. AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DO MODELO ESTATÍSTICO

Considerando o planejamento experimental 3³, os fatores utilizados (Tabela 3.5), nos experimentos de 31 a 38 representam os pontos médios entre os limites: a) inferior e médio, e b) médio e superior de cada um dos fatores. Para o topo e fundo do leite, conforme observado na Tabela 4.6, nota-se que o modelo apresenta uma previsão de I_M satisfatória, pois os erros calculados (conforme eq. 3.3 apresentada no item 3.4) entre os valores simulados e experimentais de I_M estão abaixo de 15%.

Tabela 4.6 - Previsão do índice de segregação para o topo e fundo do leite fluidizado

Experime ntos	Região 1 (topo) Simulado	Região 3 (fundo) Simulado	Região 01 (experime ntal)	Região 03 (experime ntal)	Região 1 (topo) Erro %	Região 3 (fundo) Erro %
31	1,162	0,884	1,164	0,855	0,16	-3,37
32	1,132	0,913	1,175	0,847	3,63	-7,76
33	1,149	0,894	1,205	0,848	4,67	-5,38
34	1,119	0,923	1,188	0,846	5,79	-9,16
35	1,414	0,685	1,412	0,715	-0,13	4,16
36	1,384	0,715	1,219	0,780	-13,53	8,36
37	1,386	0,709	1,493	0,707	7,14	-0,35
38	1,355	0,738	1,414	0,700	4,19	-5,43

4.3. CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO

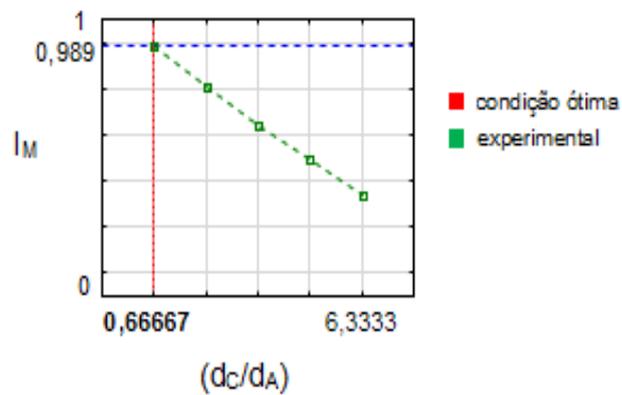
Com base nas condições operacionais (considerando todas as regiões do leito) investigadas nesta pesquisa para o processo de segregação em um reator de leito fluidizado com misturas binárias, a Figura 4.5 exibi a condição operacional ótima para obtenção de um índice de mistura (I_M) próximo ou igual a 1.

Com relação a razão de diâmetro (Figura 4.5 a) os resultados dessa pesquisa estão de acordo com as análises realizadas. Considerando o intervalo de d_C/d_A (0,667 à 6,33), nota-se que com a razão de 0,667, atingi-se valores de I_M próximo de 1, devido aos pequenos espaços vazios entre eles e a área de superfície das partículas. Assim obtendo distribuição uniforme de temperatura no leito e ótima taxa de transferência de calor entre as partículas, promovendo a máxima eficiência do reator.

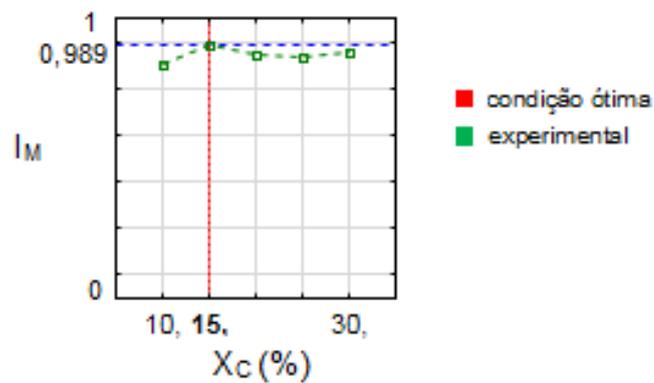
Em relação a razão de velocidade (Figura 4.5 b), para faixa de 10-40% acima da mínima fluidização, nota-se que não existe uma diferença significativa do I_M , logo tem-se que a razão 1,1 é ideal, pois atingi-se os valores de $I_M \approx 1$ sem elevado consumo de energia. Já para composição (Figura 4.5 c) estimou-se de 15% p/p, devido que X_c não afeta a variável resposta.

Como observado anteriormente quanto maior a homogeneidade das partículas maior a eficiência do reator de pirólise, distribuindo uniformemente a temperatura entre as regiões, assim evitando subprodutos indesejados. Visto que foi realizado um planejamento com 95% de confiança, assegura-se que o valor é aceito por estar com 2,5% abaixo e acima do intervalo de confiança.

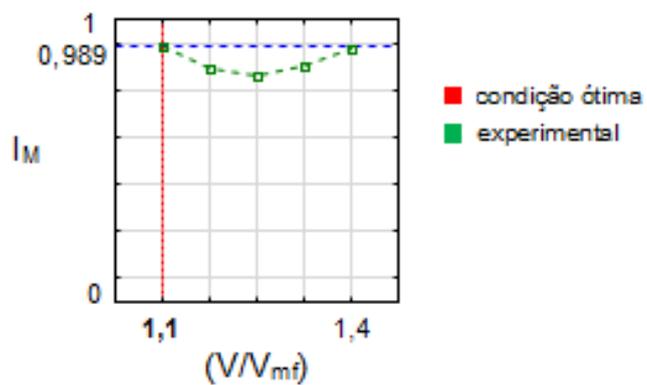
Figura 4.5 - Índice de Mistura como uma função dos fatores analisados: a) índice de mistura (I_M) como uma função da razão de diâmetro (d_C/d_A), parametrizado em uma dada fração de compósito (X_C) e razão de velocidade do ar (V/V_{mf}); b) Índice de mistura (I_M) com uma função da fração de compósito (X_C) parametrizado em uma dada razão de diâmetro (d_C/d_A) e de velocidade do ar (V/V_{mf}); c) Índice de mistura (I_M) com uma função da razão de velocidade do ar (V/V_{mf}) parametrizado em uma dada razão de diâmetro (d_C/d_A) e fração de compósito (X_C)



(a)



(b)



(c)

5. CONCLUSÃO

Com base no conjunto de condições operacionais e análises estatísticas, as seguintes conclusões podem ser apontadas:

- tanto para o topo quanto o fundo do leito, apenas a razão de diâmetro (d_c/d_A) e a velocidade do ar (V/V_{mf}) apresentam efeito sobre índice de mistura (I_M);
- para todas misturas estudadas, quanto menor a razão de diâmetro d_c/d_A maior a homogeneidade da mistura, atingindo assim valores de I_M iguais ou próximos 1;
- a área superficial das partículas de compósito influencia diretamente no índice de mistura, visto que quanto maior a superfície de contato maior a força de arraste;
- A homogeneidade das partículas no leito, afeta diretamente na reação de pirólise.
- o modelo estatístico utilizado é adequado para prever as tendências do índice de mistura com um erro menor do que 15%;
- as condições ótimas de operação para o índice de mistura podem ser alcançadas com razão de diâmetro (d_c/d_A) igual à 0,667, composição de PEBD/AL (X_c) igual à 15% p/p e razão de velocidade do ar (V/V_{mf}) de 1,1.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que diferentes proporções da razão de diâmetro e velocidade do ar das partículas de PEBD/AL e areia, apresentaram efeito sobre a variável resposta I_M . A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, a fim de prosseguir com esta pesquisa.

- investigar o efeito de outros fatores (altura de leito, geometria da coluna, forma da partícula) sobre índice de mistura.
- estudar modelos de escoamento que possibilitem prever os dados de índice de mistura apresentado nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **Associação Brasileira de Alumínio - ABAL**. Disponível em: <<http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/por-que-reciclar/>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

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.

BASU PRABIR. **Biomass Gasification and Pyrolysis**. Practical Design and Theory. Elsevier, 2010.

CEMPRE. **Embalagens Longa Vida, CEMPRE – Compromisso empresarial para a reciclagem**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/9/embalagens-longa-vida>>. Acesso em: 3 mar. 2019.

CHA, W. S.; JANG, H. T.; PARK, T. S. Mixing-segregation phenomena of binary system in a fluidized bed. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, n. 3, p. 390–394, 2010.

DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 1, p. 35–46, 2004.

DU, M.; WANG, S. Investigation of the segregation of a binary particle mixture in a square circulating fluidized bed with air staging. **Particuology**, v. 47, p. 70–76, 2019.

FAN, R.; FOX, R. O. **Segregation in polydisperse fluidized beds: Validation of a multi-fluid model** *Chemical Engineering Science*, 2008.

GIRIMONTE, R.; FORMISANI, B.; CRISTOFARO, G. DE. A fundamental approach to the phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 109–119, 2001.

FREITAS, T. M. **Análise experimental e numérica do escoamento ar-areia-compósito PEBD/AL em leito fluidizado**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em

Energia) – Programa de pós-graduação em energia, Centro Universitário Norte Do Espírito Santo, 2015.

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, 1973.

HAYDARY, J.; SUSA, D. Kinetics of thermal decomposition of aseptic packages. **Chemical Papers**, v. 67, n. 12, 2013.

HIDAKA, N. et al. Inverted segregation of binary particles in gas-liquid-solid fluidized bed. **Powder Technology**, v. 84, p. 157–163, 1995.

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

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Butterworth—Heinemann Series in Chemical Engineering**. New York: John Wiley & Sons, Butterworth-Heinemann, 2nd Ed, 1991.

KRISHNAIAH, K.; BABU, M. P.; SAI, P. S. T. Particuology Continuous segregation of binary heterogeneous solids in fluidized beds. **Particuology**, v. 35, p. 93–100, 2017.

LEAPER, M. C. et al. Investigating the dynamics of segregation of high jetsam binary batch fluidised bed systems. **Chemical Engineering and processing**, v. 43, p. 187–192, 2004.

MARQUES, I. I. D. R. **Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirólise de partículas cartonadas**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de pós-graduação em energia, Centro Universitário Norte Do Espírito Santo, 2013.

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

NEVES, F. L. Novos Desenvolvimentos Para Reciclagem De Embalagens Longa Vida. **37° Congresso Internacional de Celulose e Papel**, p. 1–11, 2004.

OLAZAR, M. et al. Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals . A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, n. January, p. 346–368, 2017.

ORDOÑEZ, D. A. R. **Estudo experimental de segregação de partículas em misturas binárias usando análise de flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido**. 2014. 379 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual De Campinas, 2014.

PAREEK, V.; HAMEED, S.; SHARMA, A. Modelling of particle segregation in fluidized beds. **Powder Technology**, v. 353, p. 202–218, 2019.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Chemical Engineers ' Handbook Seventh**. 7 ed. McGraw-Hill, 1999.

PUTTINGER, S. et al. Inhomogeneous segregation of binary mixtures in fluidized beds. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 1752–1757, 2015.

SAIDI, M. et al. Pulsating flow effect on the segregation of binary particles in a gas-solid fluidized bed. **Powder Technology**, v. 264, p. 570–576, 2014.

SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; NOROUZI, H. R.; MOSTOUFI, N. Effect of fines on segregation of binary mixtures in gas-solid fluidized beds. **Powder Technology**, v. 225, p. 7–20, 2012.

VIDAL, D. B. **Estudo da influência das condições de pirólise de composto de PEBD/Al na produção de hidrocarbonetos**. 2017. 61 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de pós-graduação em energia, Centro Universitário Norte Do Espírito Santo, 2017.

ZHANG, Y. et al. Assessment of polydisperse drag models for the size segregation in a bubbling fluidized bed using discrete particle method. **Chemical Engineering Science**, v. 160, n. November 2016, p. 106–112, 2017.

ZORTEA, R. B. **Viabilidade econômica e tecnológica para a reciclagem das embalagens cartonadas longa vida pós consumo de porto alegre.** 2001. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de pós-graduação em Administração, UFRS, Porto Alegre. Universidade Federal do Rio grande do sul, 2001.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Propriedades físicas dos materiais utilizados

	Massa Específica (ρ) Kg/m³	Porosidade (ϵ_{mf})	Diâmetro das partículas ($D_{C/A}$) mm
PEBD/AL	942,683	0,62	0,3
		0,64	1,57
		0,40	2,85
Areia	2515,317	0,59	0,45

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Propriedades das misturas utilizadas

Mistura	(d_C/d_A)	Massa da Amostra (kg)	Fração Mássica (% p/p)		Porosidade (ϵ_{mf})
			Areia	PEBD/AL	
1	0,67	1,35	90	10	0,33
2	0,67	1,16	80	20	0,43
3	0,67	1,135	70	30	0,47
4	3,48	1,3	90	10	0,40
5	3,48	1,15	80	20	0,41
6	3,48	0,935	70	30	0,51
7	6,33	1,445	90	10	0,22
8	6,33	1,25	80	20	0,32
9	6,33	1,2	70	30	0,32

APÊNDICE C

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

d_c/d_A	X_c	V/V_{mf}	I_{M1}	I_{M2}	I_{M3}
0,67	10	1,10	0,93	1,01	1,03
0,67	10	1,25	0,95	0,91	1,11
0,67	10	1,40	0,90	0,97	1,10
0,67	20	1,10	0,99	1,02	0,99
0,67	20	1,25	0,99	1,00	1,00
0,67	20	1,40	0,99	0,96	1,03
0,67	30	1,10	1,07	1,02	0,90
0,67	30	1,25	1,07	0,91	0,98
0,67	30	1,40	0,98	1,06	0,97
3,49	10	1,10	1,17	1,03	0,82
3,49	10	1,25	1,12	1,00	0,89
3,49	10	1,40	1,11	1,00	0,89
3,49	20	1,10	1,36	0,99	0,74
3,49	20	1,25	1,33	1,00	0,86
3,49	20	1,25	1,18	1,06	0,79
3,49	20	1,25	1,20	0,97	0,62
3,49	20	1,40	1,19	1,04	0,81
3,49	30	1,10	1,19	1,11	0,82
3,49	30	1,25	1,23	1,08	0,82
3,49	30	1,40	1,24	0,99	0,84
6,33	10	1,10	1,62	0,92	0,51
6,33	10	1,25	1,72	0,86	0,48
6,33	10	1,40	1,44	0,96	0,63
6,33	20	1,10	1,47	1,05	0,64
6,33	20	1,25	1,54	1,06	0,58
6,33	20	1,40	1,40	1,08	0,66
6,33	30	1,10	1,39	1,04	0,67
6,33	30	1,25	1,59	0,98	0,59
6,33	30	1,40	1,35	1,05	0,70