



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

DERIKSON ELIAS DOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO À ROTA DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO: SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DO REATOR COM MISTURAS DE AREIA E RESÍDUO DE
EMBALAGEM CARTONADA**

**SÃO MATEUS
2025**

DERIKSON ELIAS DOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO À ROTA DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO: SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DO REATOR COM MISTURAS DE AREIA E RESÍDUO DE
EMBALAGEM CARTONADA**

Dissertação apresentado 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 título de Mestre em Energia, na área de concentração Interdisciplinar Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro.

**SÃO MATEUS
2025**

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

S237c Santos, Derikson Elias dos, 1980-
Contribuição à rota de Produção de Combustível em Leito Fluidizado a partir de resíduos sólido : Simulação numérica do reator com misturas de areia e resíduo de embalagem cartonada / Derikson Elias dos Santos. - 2025.
61 f. : il.

Orientador: Marcelo Silveira Bacelos.

Coorientador: Daniel da Cunha Ribeiro.

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

1. Resíduos Sólidos. 2. Segregação. 3. Energia. 4. Combustível. 5. Escoamento multifásico. 6. Fluidodinâmica Computacional. I. Bacelos, Marcelo Silveira. II. Ribeiro, Daniel da Cunha. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

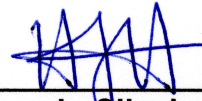
DERIKSON ELIAS DOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO À ROTA DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO: SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DO REATOR COM MISTURAS DE AREIA E RESÍDUO DE
EMBALAGEM CARTONADA**

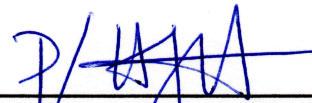
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 24 de março de 2025.

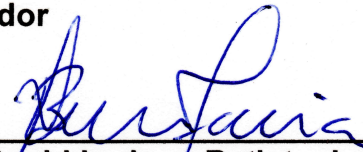
COMISSÃO EXAMINADORA



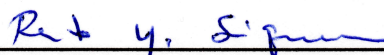
Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



Prof. Dr. Rochkhudson Batista de Faria
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Renato Nascimento Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, sem ele nada seria possível.

À minha família, principalmente a minha esposa, meus filhos por todo o apoio e incentivo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos e ao meu Coorientador Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro por todos os ensinamentos e disponibilidade em me ajudar.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Energia.

Aos Técnicos e Servidores do CEUNES/UFES, em especial ao Técnico Pedro Couto.

Aos meus amigos e colegas de mestrado.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa que tanto me ensinaram e me ajudaram, principalmente Renata, Aleson, Talles e Felipe.

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

RESUMO

A pirólise do compósito de polietileno/alumínio (PEBD/Al) em leito fluidizado produz combustíveis derivados de resíduos Tetra Pak e recupera o alumínio com alta pureza, reduzindo os impactos ambientais da indústria extrativista. Entretanto, misturas binárias de areia e compósito de polietileno/alumínio podem segregar, reduzir a taxa de transferência de calor e ocasionar a defluidização do leito. A previsão do índice de mistura, pelo modelo 2D-laminar com equação de arrasto de Syamlal, visa determinar condições operacionais com baixos níveis de segregação especialmente na partida do reator. A previsão do índice de mistura pelo modelo associado ao delineamento de experimentos ainda não foi explorada na literatura. Por esta razão, mediante um delineamento experimental 2^4 , este trabalho tem como objetivo avaliar a previsão do modelo, considerando os efeitos do coeficiente de restituição e especularidade sobre o índice de mistura em leito fluidizado. O modelo validado prevê o efeito dos fatores razão de Velocidade (V/V_{mf}), razão de velocidade (D_c/D_s) e Coeficiente de Especularidade (CE) sobre o índice de mistura do leito, considerando um nível de significância de 10%. Para o topo, os resultados revelam que quanto menor valor de CE e maior a razão D_c/D_s esta região alcança a mistura de partículas. A simulação CFD ainda destaca o impacto do coeficiente de especularidade na mudança de regime de escoamento de borbulhante para *slugging*. Esta pesquisa contribui para o projeto e a operação adequada do reator de leito fluidizado, fortalecendo a rota de valorização de resíduos poliolefínicos para a produção de combustíveis e recuperação de alumínio de embalagens Tetra Pak.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura Binária, Resíduos Sólidos, Segregação, Energia, Combustível

ABSTRACT

The pyrolysis of polyethylene/aluminum composite (LDPE/Al) in a fluidized bed produces fuels derived from Tetra Pak waste and recovers aluminum with high purity, thereby reducing the environmental impacts of the extractive industry. However, binary mixtures of sand and polyethylene/aluminum composite can segregate, decreasing the heat transfer rate and leading to bed defluidization. Predicting the mixing index using a 2D-laminar model with the Syamlal drag equation aims to determine operating conditions with low segregation levels, especially during reactor startup. The prediction of the mixing index through a model associated with experimental design has not yet been explored in the literature. For this reason, using a 2^4 experimental design, this work aims to evaluate the model's predictive capability, considering the effects of the restitution and specularly coefficients on the mixing index in a fluidized bed. The validated model predicts the effects of the velocity ratio (V/V_{mf}), diameter ratio (D_C/D_S), and specularly coefficient (SC) on the bed mixing index, considering a significance level of 10%. For the top region, the results show that lower SC values and higher DC/DS ratios promote particle mixing. The CFD simulation also highlights the impact of the specularly coefficient on the flow regime transition from bubbling to slugging. This research contributes to the design and proper operation of the fluidized bed reactor, strengthening the route for polyolefinic waste valorization toward fuel production and aluminum recovery from Tetra Pak packaging.

KEYWORDS: Binary Mixing, Solid Waste, Segregation, Energy, Fuel.

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{g}	Aceleração gravitacional	[m s ⁻²]
C_D	Coefficiente de arraste	[-]
CE	Coefficiente de especularidade	[-]
K	Coefficiente de troca de movimento	[kg m ⁻² s ¹]
e_{ss}	Coefficiente de restituição entre sólidos	[-]
d	Diâmetro	[mm]
W	Fração mássica	[-]
W_0	Fração mássica total presente no leito	[-]
W_i	Fração mássica inicial do compósito de PEBD/Al encontrada em cada região	[-]
X	Fração volumétrica	[-]
$g_{0,ss}$	Função de distribuição radial	[-]
I_M	Índice de Mistura	[-]
$I_{M,L}$	Índice de Mistura do leito	[-]
$I_{M,Ri}$	Índice de Mistura por região	[-]
m	Massa	[kg]
$V/2_{sup}$	Metade do volume superior do leito	[m ³]
p	Pressão	[Pa]
ΔP	Queda de pressão	[Pa]
\bar{I}	Tensor unitário	[-]
\vec{v}	Velocidade	[m s ⁻¹]
V	Volume	[m ³]

Símbolos gregos

β	Coefficiente de troca de momento entre fases	[kg m ⁻³ s ⁻¹]
γ_{θ_s}	Energia de dissipação colisional	[kg m ⁻¹ s ⁻³]
Φ	Esfericidade	[-]
α	Fração volumétrica	[-]
ρ	Massa específica	[kg m ⁻³]
ϵ_0	Porosidade	[-]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensão de sólidos	[N m ⁻²]
Θ	Temperatura granular	[m ² s ⁻²]
Φ_{gs}	Troca de energia entre fases	[kg m ⁻¹ s ⁻³]
λ	Viscosidade bulk de sólidos	[Pa s]
μ	Viscosidade cisalhante de sólidos	[Pa s]

Subscritos

<i>s</i>	Areia
<i>c</i>	Compósito
<i>g</i>	Fase fluida - gás
<i>s</i>	Fase granular - sólido
<i>max</i>	Máximo
<i>V/2, sup</i>	Metade do volume superior do leito
<i>Ri</i>	Região i do leito (topo, meio e fundo)

Abreviaturas

CFD - Fluidodinâmica Computacional

KTFG - Teoria Cinética Do Fluxo Granular

PEBD/Al - Polietileno de Baixa Densidade/Alumínio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esboço 2D do leito com as condições de contorno e iniciais utilizadas. Condições de contorno: (a) entrada; (b) saída; (c) parede e d) leito. Condições iniciais: $v_{x,g} = 0$ m/s, $v_{g,y} = 0$ m/s e $\varepsilon = \varepsilon_0$ (especificadas na Tabela 7).	25
Figura 2: Regiões do Leito para o regime de colapso	26
Figura 3: Previsão do Índice de mistura, parametrizado na velocidade do composto central de 25% acima da V_{mf} , para as regiões: (a), (b), (c) e (d) do topo, (e), (f) e (g) meio do leito.	39
Figura 4: Fração Mássica de Compósito ao longo da posição axial do leito no colapso, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,4 \times V_{mf}$	42
Figura 5: Fração Mássica de Compósito ao longo da posição axial do leito no colapso, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,25 \times V_{mf}$, e c) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,4 \times V_{mf}$	43
Figura 6: Previsão do Índice de mistura do leito, parametrizado na velocidade do ar 25% acima a V_{mf} , $CE=0$ e $0,005$, $CR=0,1$ e $0,95$	45
Figura 7: Fração Mássica de Compósito em 50% do leito, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,4 \times V_{mf}$	46
Figura 8: Fração Mássica de Compósito em 50% do leito, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,4 \times V_{mf}$	47
Figura 9: Índice de Mistura do leito para dada razão V/V_{mf} e CR , parametrizado em: a) $X_C = 20\%$ e $D_C/D_S = 0,67$, b) $X_C = 10\%$ e $D_C/D_S = 6,33$	48
Figura 10a: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 10% acima da V_{mf} , $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $CR = 0,95$ e $CE = 0$	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações do modelo Granular Euler-Euler.....	18
Tabela 2: Relações constitutivas	21
Tabela 3: Dados experimentais selecionados	27
Tabela 4: Malha Computacional	28
Tabela 5: Parâmetros a serem empregados na simulação.....	29
Tabela 6: Matriz de Planejamento.	31
Tabela 7: Fatores com seus níveis correspondentes.....	32
Tabela 8: Efeito dos fatores sobre o I_M com significância de 10% para o leito em colapso na região do topo.....	36
Tabela 9: Efeito dos fatores sobre o I_M com significância de 10% para o leito em colapso na região do meio.....	36
Tabela 10: Índice de mistura da região do topo do leito em colapso para diferentes concentrações de compósito, razões de velocidades e diâmetros.....	40
Tabela 11: Índice de mistura da região do meio do leito em colapso para diferentes concentrações de compósito, razões de velocidades e diâmetros.....	40
Tabela 12: Efeito dos fatores sobre o índice de mistura do leito com significância de 10%.....	44
Tabela 13: Índice de mistura do leito para diferentes razões de velocidades e diâmetros, CR= 0,95.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3. MODELAGEM.....	18
3.1 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS.....	21
3.2 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO UTILIZADA	24
4. METODOLOGIA	26
4.1 CONJUNTO DE DADOS EXPERIMENTAIS ESTUDADOS	26
4.2 MALHA COMPUTACIONAL 2D.....	28
4.3 MÉTODO DE SOLUÇÃO DO MODELO.....	29
4.4 PARÂMETROS E MODELOS DE SIMULAÇÃO	29
4.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	31
4.6 VARIÁVEL RESPOSTA - ÍNDICE DE MISTURA.....	33
4.7 PÓS PROCESSAMENTO.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 LEITO EM COLAPSO	36
5.2 LEITO FLUIDIZADO.....	44
5.3 EFEITO DO COEFICIENTE DE ESPECULARIDADE SOBRE O REGIME DE FLUIDIZAÇÃO.....	50
6. CONCLUSÕES.....	54
7. TRABALHOS FUTUROS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
APÊNDICE A.....	60

1. INTRODUÇÃO

A pirólise do compósito de polietileno de baixa densidade e alumínio (PEBD/Al) possibilita a recuperação do alumínio e produção de combustíveis derivados de resíduos poliolefínicos. Tal processo contribui com a rota de valorização de resíduos e com a gestão de resíduos sólidos minimizando o impacto ambiental desses resíduos.

A reciclagem do alumínio das embalagens Tetra Pak pós-consumo contribui para conservar os recursos naturais, economizar energia, reduzir resíduos e mitigar os impactos ambientais da Indústria Extrativista da Bauxita. A Pirólise do PEBD/Al, subproduto da reciclagem das embalagens Tetra Pak, permite a produção de combustíveis derivados do resíduo sólido e a recuperação do alumínio.

O reator de leito fluidizado pode ser empregado para a pirólise de PEBD/Al. A areia é comumente usada como inerte. Esta permite manter a fluidização e o rápido aquecimento das partículas de PEBD/AL. Entretanto, leitos com baixos índices de mistura podem comprometer a conversão térmica do resíduo em combustível, pois podem dificultar o rápido aquecimento do PEBD/AL no reator.

Estudos experimentais e de previsão são cruciais para identificar as condições operacionais que afetam a partida de reatores de leito fluidizado, podendo garantir assim, a mistura de partículas e a uniformidade de temperatura no leito. Empregando a metodologia de colapso do leito, Santos et al. (2023) identificaram que apenas a velocidade do ar e a razão de diâmetro entre o PEBD/Al e a areia afetam o índice de mistura em leitos fluidizados. Pode-se constatar, também, que leitos com 15% (m/m) de compósito PEBD/Al, razão de diâmetro de 0,67 e velocidade do ar 10% acima da mínima fluidização alcançam misturas de partículas uniformes ao longo da coluna. Por outro lado, Freitas et al. (2017) realizaram a simulação usando partículas com a mesma razão de diâmetro. Os autores observaram que velocidades do ar superiores a 50% da velocidade de mínima fluidização não apresentaram segregação significativa de PEBD/Al.

Com respeito aos desafios relacionados à segregação de partículas no leito, na última década, pesquisas relacionadas aos reatores em leito fluidizado têm se intensificado.

Os autores Xie et al. (2021) analisaram partículas binárias de mesmo diâmetro, mas diferentes densidades em leito fluidizado borbulhante, enquanto Chang et al. (2019) investigaram um sistema monoparticulado de esferas, considerando regimes de leito fluidizado borbulhante e turbulento. Ambos aplicaram o modelo Euler-Euler para prever o escoamento do leito. A pesquisa teve como finalidade de prever mudanças de regimes de fluidização associadas a alteração do coeficiente de especularidade e as implicações do coeficiente de restituição sobre a segregação de partículas ao longo da coluna.

O modelo Euler-Euler desempenha um papel indispensável no projeto e na operação de reatores em leito fluidizado (XIE; ZHU; JIANG, 2021; ZHUANG et al., 2022). No entanto, é importante destacar que esse modelo é sensível a alterações no coeficiente de restituição e o coeficiente de especularidade, ambos impactando o índice de mistura (I_M). Além da interação entre as fases e aspectos como força de arrasto sólido-sólido e propriedades da fase sólida. Portanto, para obter resultados confiáveis, torna-se fundamental validar o modelo por meio de dados experimentais.

Baseado nos estudos experimentais e de simulação reportados por Santos et al. (2023) e Freitas et al. (2017), o aspecto inovador deste trabalho consiste em validar modelo 2D-laminar com equação de arrasto de Syamlal na previsão do índice de mistura leito em colapso. Tal procedimento, mediante delineamento de experimentos 2^4 com 3 compostos centrais, permite estimar o efeito do coeficiente de especularidade e restituição sobre o índice de mistura do leito em regime de colapso e de fluidização.

Desta forma, para contribuir com a rota de valorização de resíduos, o principal objetivo desta pesquisa é avaliar o Euler-Euler laminar na previsão da concentração de partículas de compósito ao longo da coluna de leito fluidizado, considerando diferentes condições operacionais e propriedades físicas das misturas de PEBD/Al e areia. A pirólise do PEBD/Al possibilita a recuperação do alumínio e produção de combustíveis derivados de resíduos poliolefinicos, fortalecendo o gerenciamento de resíduos sólidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados os principais avanços na pesquisa sobre a hidrodinâmica de misturas binárias em leitos fluidizados.

Considerando a rota de valorização de resíduos de PEBD/Al, Santos et al. (2023) realizaram um estudo sobre segregação de partículas em leito fluidizado composto por PEBD/Al e areia, empregando a metodologia de colapso do leito. Por meio do planejamento de experimentos os autores validaram o modelo estocástico de previsão de índice de mistura com dados experimentais para as condições operacionais e propriedades físicas das misturas estudadas.

Freitas et al. (2017) empregaram o modelo Euler-Euler para previsão quantitativa da queda de pressão e qualitativa da segregação de partículas (previsão da concentração de partículas ao longo da coluna).

Santos et al. (2023) observaram que a velocidade do ar e a razão do diâmetro das partículas afetam o I_M (Índice de Mistura). A condição operacional com I_M mais próximo de 1 foi alcançada para leito fluidizado com misturas 15% em peso de PEBD/Al, 10% velocidade mínima de fluidização e 0,67 de razão de diâmetro. Considerando um nível de significância de 5%, o modelo estocástico obtido estimou o I_M no leito com um erro inferior a 15%. Além disso, destacou-se a capacidade da coluna do leito em alcançar uma mistura homogênea de partículas nestas condições. Os parâmetros (velocidade do ar e a razão do diâmetro das partículas) investigados podem exercer influência significativa na partida de reatores em leito fluidizado, em especial no pirólise do PEBD/Al, tornando possível a recuperação de alumínio e a produção de combustível derivado de resíduos provenientes das embalagens cartonadas.

Em contrapartida, estudos de simulação realizados por Freitas et al. (2017) evidenciaram que a segregação de partículas no leito pode ser evitada ajustando a velocidade do ar 50% acima da velocidade mínima de fluidização. Adicionalmente, os resultados indicaram que leitos contendo 20% de PEBD/Al são mais adequados para o processo de pirólise. Utilizando o modelo Euler-Euler Laminar e o modelo de coeficiente de arrasto de Syamlal O'Brien, os autores previram a queda de pressão

do leito com um erro inferior a 18%. Esse destaque é particularmente relevante na seleção das condições operacionais ideais, visando evitar segregação de partículas.

Com respeito aos avanços na simulação de misturas binárias em Leito Fluidizado Xie et al. (2021) investigaram quatro cenários de coeficiente de restituição para misturas de partículas com diâmetros de $1600\mu\text{m}$ e $320\mu\text{m}$ e mesma massa específica (910 kg/m^3). O coeficiente de restituição (CR) está associado a elasticidade colisional das partículas. Considera-se 0 colisões inelásticas e 1, elásticas. Os autores simularam diferentes valores de CR, variando de 0,1, a 0,95, com o intuito de analisar as características hidrodinâmicas do sistema. À medida que o CR aumentou de 0,1 para 0,95, os autores observaram um aumento na quantidade de partículas maiores depositadas no fundo do leito, mediante a análise dos dados da fração de sólidos ao longo da coordenada axial da coluna. Esse fenômeno ocorreu devido às colisões não ideais entre partículas pequenas e grandes que influenciaram na mistura, a qual envolvia diferentes tamanhos. Além disso, a variação no CR (0,1 para 0,95) teve impacto no de índice de mistura (I_M), que o I_M máximo foi obtido em $t = 1$ segundo. O CR não influencia apenas a força de arrasto sólido-sólido, mas também as propriedades da fase sólida, como pressão sólida, viscosidade de cisalhamento sólido e viscosidade sólida granular. Portanto, fica evidente que o CR desempenha um papel perceptível sobre o I_M .

O coeficiente de especularidade (CE) refere-se à condição de deslizamento das partículas na parede, evidenciando a natureza da colisão entre as partículas e a parede da coluna de leito fluidizado e varia teoricamente de 0 a 1. Quando o CE igual a zero, as velocidades tangenciais relativas das partículas permanecem inalteradas durante as colisões com a parede. Por outro lado, a medida que CE aumenta, ocorre a redução na razão das velocidades tangenciais relativas das partículas durante as colisões, evidenciando maior interação entre as partículas e a parede.

Zhuang et al. (2022) observaram que o coeficiente de especularidade tem um impacto monotônico, porém não linear, no leito fluidizado pseudo-2D. Quando CE excede 0,5, seu impacto diminui rapidamente, resultando na transição do comportamento de borbulhamento livre para pulsante. Em geral, o aumento do coeficiente de especularidade resulta em uma maior queda de pressão do gás e em uma expansão do leito mais fraca, embora mais frequente.

O modelo multifásico desenvolvido por Chang et al. (2019) para monopartículas em leito fluidizado analisou partículas do grupo "B" de Geldart, com diâmetro de $440\mu\text{m}$ e massa específica de 2.480 kg/m^3 . Os autores compararam a modelagem hidrodinâmica 2D e 3D em um leito fluidizado borbulhante e turbulento, focando na sensibilidade do coeficiente de restituição e o coeficiente de especularidade. Os resultados demonstram que as simulações em 3D são mais sensíveis ao coeficiente de restituição e de coeficiente de especularidade em relação às simulações em 2D. O início do processo de fluidização foi alcançado em 25 segundos para a simulação 2D e aproximadamente de 40 segundos para a 3D. Conforme a fluidização era alcançada, o modelo 2D revelou maiores concentrações de sólidos nas regiões do topo da coluna. Identificaram que o processo de fluidização na simulação 2D se desenvolve cerca de 15 segundos mais rápido do que na simulação 3D. No entanto, ambos os modelos 2D e 3D conseguiram simular de forma satisfatória o comportamento do escoamento global na região do fundo do leito fluidizado turbulento.

Bai et al. (2020) analisaram experimentalmente o impacto do tamanho das partículas em leito fluidizado borbulhante, utilizando misturas binárias de madeira (densidade de 540 kg/m^3) e areia (2600 kg/m^3). O estudo revelou que o aumento da fração de biomassa na mistura reduziu o I_M , comprometendo a homogeneidade do leito. Além disso, partículas menores ($\varnothing < 0,3\text{ mm}$) resultaram em maior resistência ao escoamento, enquanto partículas maiores ($\varnothing > 0,6\text{ mm}$) favoreceram a segregação da biomassa. Esses resultados demonstram que o rendimento do processo de pirólise depende fortemente da seleção adequada das condições operacionais e das propriedades físicas das partículas.

Na literatura Xiaoxue et al. (2021), Banaei et al. (2018) encontraram o efeito do coeficiente de restituição sobre o I_M , enquanto Parvathaneni et al. (2021), Niyogi et al. (2017) analisaram o impacto CE sobre I_M . Entretanto, na maioria desses estudos não considerou o valor do coeficiente de especularidade em duas condições distintas: mistura e segregação.

Baseado na pesquisa bibliográfica, nota-se estudos de segregação de partículas em leitos fluidizados com misturas binárias desempenham um papel importante para aplicações em reatores voltados à produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos sólidos, em especial, os resíduos de Tetra Pak. Desta forma, a análise

estatística de dados experimentais e modelos estocásticos são cruciais para compreender o efeito dos fatores associados à operação e as propriedades das misturas sobre o I_M das partículas. Tal procedimento pode evidenciar leitões com mistura de partículas e a ocorrência da indesejável segregação, bem como a previsão dos I_M por meio de um modelo estocástico. Também se observa que com os avanços na simulação em CFD, o modelo Euler-Euler pode ser empregado para prever o escoamento gás-sólido em leito fluidizado composto por partículas binárias.

Embora o modelo estocástico seja capaz de estimar bem os dados experimentais, a sua previsão está restrita ao domínio de condições utilizadas experimentalmente, o que já não ocorre como o modelo determinístico Euler-Euler.

Desta forma, para contribuir com a aplicação do Leito fluidizado para produção de combustível derivado de resíduos sólidos de Tetra Pak é ainda necessário validar com os dados experimentais de Santos et al. (2023) usando o modelo Euler-Euler na previsão do índice de mistura ao longo da coluna.

3. MODELAGEM

A Tabela 1 mostra as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para descrever o escoamento gás-sólido em leito fluidizado composto por misturas binárias (trifásico, gás-sólido-sólido). Considerando o regime de fluidização as seguintes forças externas, podem ser negligenciadas, quando comparadas ao conjunto das demais forças que atuam no escoamento gás-sólido. A saber: \vec{F}_g (força do corpo externo), $\vec{F}_{lift,g}$ (força de sustentação), $\vec{F}_{wl,g}$ (força de lubrificação das paredes), $\vec{F}_{vm,g}$ (força de massa virtual), $\vec{F}_{td,g}$ (força de dispersão turbulenta - apenas no caso de fluxos turbulentos).

Além destas, a equação de conservação da energia cinética flutuante dos sólidos é inserida por causa das interações entre as fases envolvidas no escoamento e está fundamentada na Teoria Cinética Granular de Chapman e Cowling (1990) que posteriormente foi adaptada para leitos fluidizados por Gidaspow e Ding (1992). Baseado na Teoria Cinética Granular pode-se expressar as equações de tensão de sólido que surgem das flutuações do campo de velocidade das partículas sólidas, resultando em viscosidade e pressão aparentes.

Tabela 1: Equações do modelo Granular Euler-Euler.

Equações governamentais	
1. Conservação da Massa:	
(a) Fase fluida (primária – g)	
$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (1)$	
Taxa de aumento da massa da fase gasosa por unidade de volume	Taxa líquida de adição de massa em fase gasosa por unidade de volume por convecção
(b) Fase sólida $i = 1, 2$ (secundária – s)	
$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{si} \rho_{si}) + \nabla \cdot (\alpha_{si} \rho_{si} \vec{v}_{si}) = 0 \quad (2)$	
Taxa de aumento de i-massa de fase sólida por unidade de volume	Taxa líquida de adição de massa de fase i-sólida por unidade de volume por convecção

(c) Restrição da Fração do Volume

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3)$$

Onde ρ_g e \vec{v}_g são a densidade e velocidade da fase g respectivamente e α representa a fração volumétrica.

2. Conservação do Movimento:

(a) Fase fluida (primária – g)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \sum_{p=1}^n (K_{g si} (\vec{v}_{si} - \vec{v}_g) + (\dot{m}_{g si} \vec{v}_{g si} - \dot{m}_{si g} \vec{v}_{si g})) \quad (4)$$

Taxa de aumento do momento por unidade de volume

Taxa de adição de momento por convecção por unidade de volume

Taxa de adição de momento via transporte molecular por unidade de volume

Força externa sobre o fluido por unidade de volume

Taxa de troca de momento entre as fases Gasosa e l-Sólida por unidade de volume

$$+(\vec{F}_g + \vec{F}_{lift,g} + \vec{F}_{wl,g} + \vec{F}_{vm,g} + \vec{F}_{td,g})$$

Força externa sobre o fluido por unidade de volume

(b) Fase sólida $i=1,2$ (secundária – s)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{si} \rho_{si} \vec{v}_{si}) + \nabla \cdot (\alpha_{si} \rho_{si} \vec{v}_{si} \vec{v}_{si}) = -\alpha_{si} \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_{si} + \alpha_{si} \rho_{si} \vec{g} + \sum_{p=1}^n (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + (\dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl})) \quad (5)$$

Taxa de aumento de Momento de fase i-sólido por unidade de volume

Taxa de fase i-sólida adição de impulso por unidade de volume por convecção

Taxa de fase i-sólida adição de impulso por transporte molecular por unidade de volume

Força gravitacional na fase sólida por unidade de volume

Taxa de troca de momento entre as fases Gasosa e l-Sólida por unidade de volume

$$+(\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{wl,s} + \vec{F}_{vm,s} + \vec{F}_{td,s})$$

Força externa sobre o fluido por unidade de volume

Onde que $K_{g si}$ representa o coeficiente de troca de momento interfase, K_{ls} é coeficiente de troca de momento entre a fase fluida ou sólida l e a fase sólida S , si é a pressão, \vec{g} é a aceleração gravitacional, N é o número de fases total, $\dot{m}_{g si}$ é a transferência de massa da fase si para a fase g , $\dot{m}_{si g}$ é a transferência de massa da fase g para a fase p $\vec{v}_{g si}$ é a velocidade interfase, definida como:

Quando $\dot{m}_{si g} > 0$ a massa de fase si está sendo transferida para a fase g , $\vec{v}_{si g} = \vec{v}_{si}$; Se $\dot{m}_{si g} < 0$ a massa de fase si está sendo transferida para a fase g , $\vec{v}_{g si} = \vec{v}_g$;

Da mesma forma, se $\dot{m}_{si g} > 0$ então $\vec{v}_{g si} = \vec{v}_g$, se $\dot{m}_{g si} < 0$ então $\vec{v}_{g si} = \vec{v}_{si}$.

3. Temperatura Granular (secundária – s; i=1,2)

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{si} \rho_{si} \theta_{si}) + \nabla \cdot (\alpha_{si} \rho_{si} \vec{v}_{si} \theta_{si}) \right] = (-p_{si} \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_{si} + \nabla \cdot (k_{\theta_{si}} \nabla \theta_{si})$$

Taxa de aumento de Energia granular de fase i-sólida por unidade de volume	Taxa de adição de energia granular de fase i-sólida por unidade de volume por convecção	Taxa de adição de energia granular em fase i-sólida por cisalhamento por unidade de volume	Taxa de dissipação de energia granular em fase i-sólida por cinética por unidade de volume
		$-\gamma_{\theta_{si}}$	$+\varphi_{gsi}$
		Taxa de dissipação de energia granular em fase i-sólida por calor devido às colisões sólidas-sólidas inelásticas por unidade de volume	Taxa de troca de energia granular em fase i-sólida entre fases gasosa e sólida por unidade de volume

(6)

A solução das equações em sistemas granulares ou leitos fluidizados proporcionam a obtenção de informações sobre os campos de velocidade, concentração, pressão e temperatura granular. O campo de velocidade descreve a distribuição das velocidades das partículas, enquanto o campo de concentração indica a distribuição da concentração de partículas no espaço. O campo de pressão fornece dados sobre as forças que atuam nas partículas, e o campo de temperatura granular revela a distribuição de temperaturas no sistema. Esses dados são essenciais para compreender e otimizar o desempenho de sistemas em diversas aplicações. A equação (1) representa a conservação da massa da fase gás, e a fração volumétrica da fase gasosa é determinada mediante uso da equação (3).

3.1 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

As relações constitutivas são equações que descrevem como as propriedades de um material ou sistema se modificam em resposta a diferentes condições. Essas relações são fundamentais para compreender e prever o comportamento dos fluidos em sistemas. Elas estão detalhadas na Tabela 2, sendo derivadas de dados empíricos ou mediante a aplicação da teoria Cinética Granular.

Tabela 2: Relações constitutivas

Relações constitutivas

1. Coeficiente de troca de momento

Função de arrasto de Syamlal-O'Brien (1993): $K_{gsi} = \frac{\alpha_{si}\rho_{si}f}{t_{si}}$

onde:

$$t_{si} = \frac{\rho_{si}d_{si}^2}{18\mu_g}$$

$$f = \frac{C_D Re_s \alpha_g}{24v_{r,s}^2}$$

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re_s}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (7)$$

$$Re_s = \frac{\rho_g d_{si} |\vec{v}_g - \vec{v}_{si}|}{\mu_g}$$

$$v_{r,s} = 0,5 \left(A - 0,06Re_{s,i} + \sqrt{(0,06Re_{s,i})^2 + 0,12Re_{s,i}(2B - A) + A^2} \right), \text{ definido por}$$

Garside e Al-Dibouni (1977)

$$\text{onde: } A = \alpha_g^{4,14}$$

$$B = 0,8\alpha_g^{1,28}, \alpha_g \leq 0,85$$

$$B = \alpha_g^{2,65}, \alpha_g > 0,85$$

2. Tensor da Tensão da fase sólida

(a) Fase contínua (primária – g)

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) + \alpha_g \left(\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (8)$$

(b) Fase sólida i=1,2 (secundária – s)

$$\bar{\tau}_{si} = \alpha_{si} \mu_{si} (\nabla \vec{v}_{si} + \nabla \vec{v}_{si}^T) + \alpha_{si} \left(\lambda_{si} - \frac{2}{3} \mu_{si} \right) \nabla \cdot \vec{v}_{si} \bar{I} \quad (9)$$

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 2

3. Viscosidade granular

Syamlal et al. (1993): $\mu_{si} = \mu_{si,col} + \mu_{si,kin}$ (10)

$$\mu_{si,col} = \frac{4}{5} \alpha_{si} \rho_{si} d_{si} g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \alpha_{si} \quad (11)$$

$$\mu_{si,kin} = \frac{\alpha_{si} d_{si} \rho_{si} \sqrt{\theta_{si} \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{4}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_{si} g_{0,ss} \right] \quad (12)$$

4. Viscosidade granular extensional

Lun et al. (1984): $\lambda_{si} = \frac{4}{3} \alpha_{si}^2 \rho_{si} d_{si} g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}}$ (11)

5. Função da distribuição Radial

Ogawa et al. (1980): $g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1}$ (12)

Syamlal et al (1993): $g_{0,kl} = \frac{1}{1 - \alpha_s} + \frac{3 \left(\sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k}{d_k} \right)}{(1 - \alpha_s)^2 (d_l + d_k)} d_l d_k$ (13)

6. Pressão sólida Syamlal et al. (1993):

$$p_{si} = 2 \rho_{si} (1 + e_{ss}) \alpha_{si}^2 g_{0,ss} \theta_{si} \quad (14)$$

7. Coeficiente de difusão da temperatura granular Syamlal et al (1993):

$$k_{\theta_{si}} = \frac{15 d_{si} \rho_{si} \alpha_{si} \sqrt{\theta_{si} \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \alpha_{si} g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \alpha_{si} g_{0,ss} \right] \quad (15)$$

Onde, $\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss})$

8. Dissipação de Energia por colisão Lun et al. (1984):

$$\gamma_{\theta_{si}} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_{si} \sqrt{\pi}} \rho_{si} \alpha_{si}^2 \theta_{si}^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

9. Transferência de Energia Cinética Gidaspow et al. (1992)

$$\varphi_{gsi} = -3K_{gsi} \theta_{si} \quad (17)$$

Para leito fluidizado com mistura, Freitas et al. (2017) empregaram as equações constitutivas considerando partículas de mesmo tamanho, estabelecendo um ponto de partida para investigar partículas com diferentes diâmetros. De acordo com estes autores em escoamentos granulares, a transferência de quantidade de movimento entre fases é estimada por meio de coeficientes de troca fluido-sólido e sólido-sólido, os quais são determinados empiricamente. A correlação de Syamlal e O'Brien é adequada para descrever a transferência de quantidade de movimento em leito fluidizado diluído e denso, baseando-se em medidas de velocidades terminais de partículas. No entanto, devido às limitações na inclusão de informações precisas sobre a distribuição e forma do tamanho das partículas, essa correlação não consegue prever com exatidão a força arrasto em um sistema específico. Para contornar essa questão, a correlação de Syamlal-O'Brien (1989) foi ajustada para mistura utilizando dados experimentais de mínima velocidade de fluidização e porosidade, ampliando assim sua aplicabilidade para diversos leitos fluidizados. No caso de escoamentos gás-sólido compostos por duas fases granulares, é necessário considerar um arrasto adicional devido às alterações na quantidade de movimento provocadas pelo modelo de colisões de partículas. Syamlal (1987) propôs um modelo de coeficiente de arrasto levando em conta as interações entre as fases granulares (Equação 07), sendo ajustado aos dados experimentais de fluidização mínima, obtidos pelos autores em leito fluidizado composto por misturas de PEBD/AL e areia.

O coeficiente de especularidade (CE), conforme descrito por Li et al. (2012) é um parâmetro utilizado nas condições de contorno de Johnson e Jackson para quantificar a fração média de momento tangencial transferido em colisões partícula-parede em fluxos granulares. Esse coeficiente pode ser expresso por:

$$\bar{M}_{t,w} = CE \frac{\rho_p \pi d_s^3 v}{6} \quad (18)$$

Onde $\bar{M}_{t,w}$ representa o momento tangencial, ρ_p a densidade da partícula, d_s o diâmetro da partícula e v a velocidade.

3.2 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO UTILIZADA

Para aplicar o conjunto de equações ao Leito fluidizado com misturas binárias, de modo a viabilizar sua resolução conforme o procedimento no item 4, é necessário definir adequadamente as condições iniciais e as de contorno do sistema. Essas condições asseguram a coerência física e numérica da simulação, representando o comportamento do escoamento gás-sólido.

Condições iniciais:

- a) As partículas no leito possuem altura e fração volumétrica de sólidos (ϵ_s) determinadas com base nos dados experimentais específicos para cada mistura de partículas utilizada;
- b) o leito encontra-se em repouso, ou seja, a velocidade das partículas é nula;
- c) O ar presente no leito possui uma fração volumétrica determinada pela equação de restrição ($1 - \epsilon_s$);
- d) a velocidade do ar no interior do leito é zero.

Condições de contorno:

- a) Na entrada do leito, a corrente de ar flui exclusivamente na direção axial (eixo y), sendo, portanto, uma determinada velocidade axial do ar definida para cada condição operacional utilizada. Nesse ponto, a velocidade das partículas é nula.
- b) Na saída do leito, a pressão é estabelecida como atmosférica.
- c) Na parede do reator, para a fase primária (ar), é aplicada a condição de não escorregamento; enquanto, para a fase secundária (sólida), opta-se pela condição de deslizamento livre e aqueles prevista no planejamento experimental (vide seção 4.5).

A Figura 1 mostra um esquema da coluna cilíndrica de leito fluidizado composto por misturas de compósito de PEBD/Al e areia.

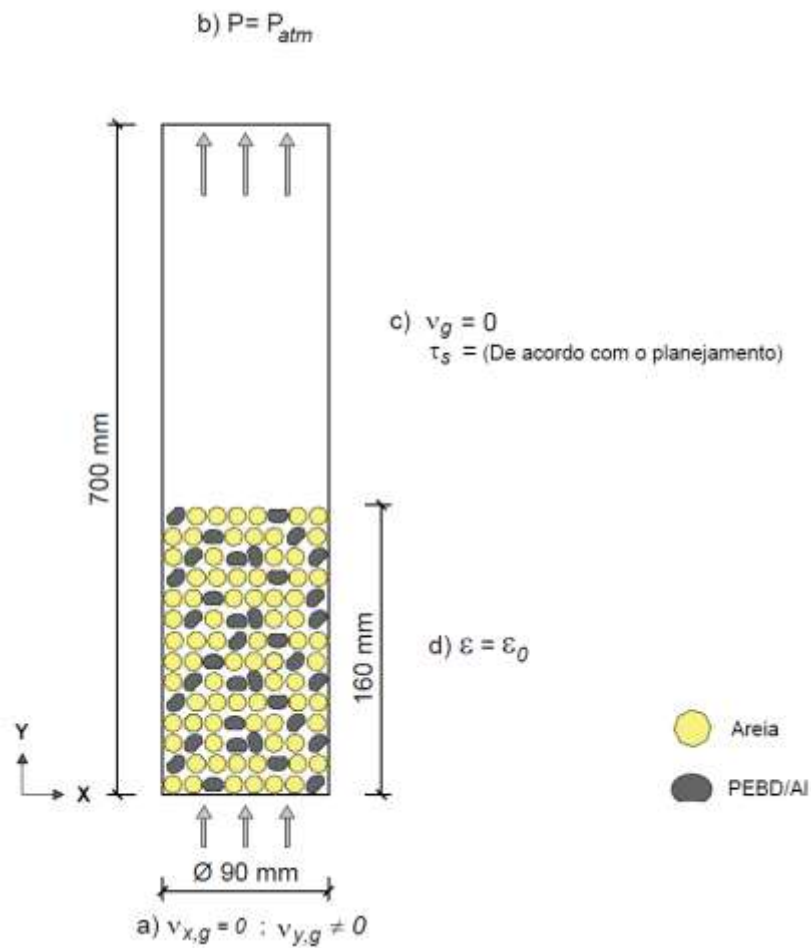


Figura 1: Esboço 2D do leito com as condições de contorno e iniciais utilizadas. Condições de contorno: (a) entrada; (b) saída; (c) parede e d) leito. Condições iniciais: $v_{x,g} = 0$ m/s, $v_{g,y} = 0$ m/s e $\varepsilon = \varepsilon_0$ (especificadas na Tabela 7).

4. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado o conjunto de dados experimentais selecionados, a metodologia de solução das equações do modelo e o planejamento de experimentos a fim de prever o índice de mistura em um leito fluidizado usando o modelo Euler-Euler laminar.

4.1 CONJUNTO DE DADOS EXPERIMENTAIS ESTUDADOS

A Figura 2 representa o esboço do leito, detalhando suas dimensões e divisões das regiões de mistura, composta por composto e areia, classificadas como topo, meio e fundo para o regime de colapso.

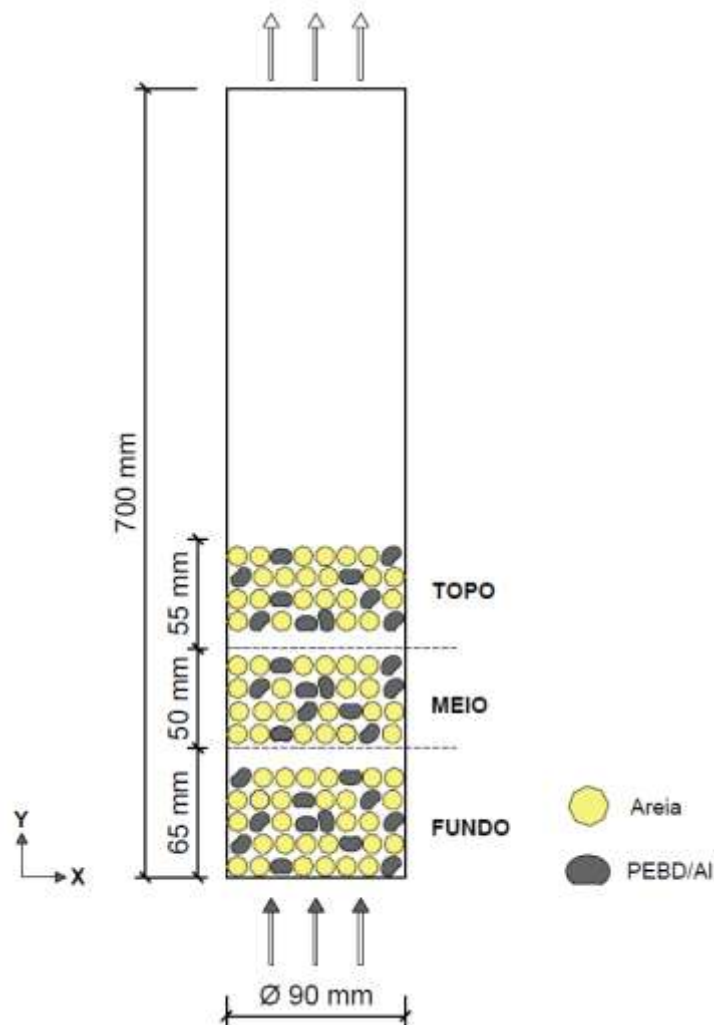


Figura 2: Regiões do Leito para o regime de colapso.

Com base nos dados fornecidos por Santos et al. (2023), disponíveis no apêndice A (Tabela A3), foram selecionados dois conjuntos de dados experimentais - um referente à mistura e outro à segregação - em leitos fluidizados com PEBD/Al. Os dados apresentam um erro médio experimental de aproximadamente 5%. Baseado em um intervalo de confiança de 5%, considera-se mistura de partículas quando o I_M alcança os valores $0,95 < I_M < 1,05$ e segregação quando $I_M < 0,95$ ou $I_M > 1,05$.

Tabela 3: Dados experimentais selecionados

Caso	X_c (%)	X_s (%)	D_c (mm)	D_s (mm)	D_c/D_s	V_{mf} (m/s)	Razão de Velocidade (V/V_{mf})	I_M (Topo)	I_M (Meio)
Mistura	20	80	0,30	0,45	0,67	0,20	1,1	0,99	1,02
							1,25	0,99	1,01
							1,4	1,00	0,97
Segregação	10	90	2,85	0,45	6,33	0,20	1,1	1,63	0,93
							1,25	1,73	0,87
							1,4	1,45	0,96

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2023).

Onde, X_c e X_s referem-se, respectivamente, à fração de compósito e à fração de areia em relação à massa total do leito; V_{mf} é a velocidade mínima de fluidização da mistura, I_M é o índice de mistura, definido como a razão de fração mássica do compósito de PEBD/Al encontrada em uma dada região em relação àquela inicialmente presente no leito.

Cabe mencionar que as regiões analisadas, valores de I_M em torno de 1,0 indicam mistura de partículas de compósito e areia. Valores de I_M acima de 1,0 indicam maior concentração de compósito PEBD/Al, enquanto os de I_M abaixo de 1,0 resultam em uma maior concentração de partículas de areia.

4.2 MALHA COMPUTACIONAL 2D

A malha computacional desempenha um papel crucial na simulação CFD. Ela divide o domínio em elementos discretos, permitindo a aproximação e cálculo das propriedades fluidodinâmicas, além de adaptar-se à geometria específica do problema. A qualidade da malha influencia a precisão e a eficiência da simulação, sendo essencial para a validação e verificação dos resultados em relação a dados teóricos ou experimentais.

Uma malha apropriada e bem projetada é essencial para obter resultados confiáveis e significativos em aplicações de simulação fluidodinâmica computacional.

Através do software ANSYS ICEM CFD 15.0, aplicou-se a malha bidimensional quadrada proposta por Freitas et al. (2017) e a Tabela 4 apresenta a malha a ser utilizada, juntamente com seus parâmetros.

Tabela 4: Malha Computacional

Número de elementos	Nós	Dimensão dos elementos (m)	Ortogonalidade	Simetria
1116	1222	$7,5 \times 10^{-3}$	~1	~0

O processo de geração das malhas computacionais para simulações em leito fluidizado, requer considerações específicas. A fase sólida é tratada como meio contínuo, adotando a abordagem Euler-Euler. Nesse contexto, é crucial que as dimensões dos elementos avaliados para as propriedades das partículas não sejam menores que a maior dimensão de uma partícula da fase, e devem permitir a representação efetiva de uma quantidade significativa de partículas.

Para a seleção da malha, Freitas et al. (2017) aplicaram a metodologia proposta por Van Wachem (2000), priorizando aquela com menor número de elementos sempre que a diferença nas propriedades entre duas malhas testadas fosse inferior a 4%, visando reduzir o tempo de simulação.

4.3 MÉTODO DE SOLUÇÃO DO MODELO

Para resolver as equações do modelo, foi utilizado o software ANSYS FLUENT 15.0, que emprega o método dos volumes finitos e o algoritmo *Phase Coupled SIMPLE* para o acoplamento entre pressão e velocidade. O esquema de discretização é o *upwind* de primeira ordem.

As simulações foram realizadas em regime transiente, progredindo em etapas de tempo específicas. Para ambos os casos de I_M : colapso e do leito fluidizado (conforme secção 4.4) as simulações abrangeram um período de 5,0 segundos de leito fluidizado e mais 3,0 segundos com o leito em colapso, considerado suficiente para processar cinco vezes o volume do leito. Os critérios de convergência foram definidos na ordem de 1×10^{-3} e passo de tempo de 1×10^{-4} s.

4.4 PARÂMETROS E MODELOS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros e modelos utilizados para as simulações deste estudo foram baseados no trabalho de Freitas et al. (2017). As simulações foram planejadas de acordo com as especificidades do leito fluidizado e as características das partículas selecionadas. A Tabela 5 detalha os parâmetros e modelos utilizados nas simulações do teste de malha.

Tabela 5: Parâmetros a serem empregados na simulação.

Parâmetro/modelo	Descrição/valor
Equações do modelo	
Modelo de arraste gás-sólido	Syamlal-O'Brien parametrizado
Modelo de arraste sólido-sólido	Syamlal et al. (1987)
Viscosidade cisalhante	Syamlal et al. (1987)
Viscosidade bulk	Lun et al. (1984)
Pressão de sólidos	Syamlal-O'Brien (1993)

Coeficiente de restituição para colisões	0,95 (HULME et al., 2005; TAGHIPOUR, ELLIS e WONG, 2005) e 0,1 (XIE, ZHU e JIANG, 2021)
Coeficiente de distribuição radial	Syamlal et al. (1993)
Temperatura granular	Equação diferencial (Tabela 1)

Geometria

Altura do Leito fluidizado	700 mm
Diâmetro do Leito Fluidizado	90 mm

Materiais:

Areia	Diâmetro	450 μm
	Massa específica	2515 kg/m^3
PEBD/AI	Diâmetro	300 μm e 2850 μm
	Massa específica	942 kg/m^3
Ar	Massa específica	1,187 kg/m^3
	Viscosidade	1,84x10 ⁻⁵ kg/ms

Condições de Contorno

Entrada	Razões de velocidade (V/V_{mf}) entre 1,1 e 1,4
Saída	Pressão Atmosférica
Parede	CR entre 0,1 e 0,95 – CE entre 0 e 0,005
Limite de empacotamento máximo	(1 - ϵ)

Condição inicial:

Areia	$\alpha_s = 0,52$
PEBD/AL	$\alpha_s = 0,45$
Mistura 1	$\alpha_{s,areia}$ e $\alpha_{s,PEBD/AI}$ = (De acordo com a Matriz de planejamento - Tabela 6)
Mistura 2	$\alpha_{s,areia}$ e $\alpha_{s,PEBD/AI}$ = (De acordo com a Matriz de planejamento - Tabela 6)
Altura do Leito	170 mm

Considerando as duas metodologias experimentais de obtenção do I_M , por colapso e dinâmico, foram selecionados dois estudos de caso com misturas de partículas binárias. O primeiro caso (caso 1) corresponde à condição de mistura, enquanto o segundo (caso 2) refere-se à condição de segregação. Tanto para a condição de colapso do leito quanto para o do leito fluidizado, foram analisadas as situações de mistura e segregação.

4.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Para ambos as condições, Leito Fluidizado e Leito em colapso, foi proposto um planejamento de experimento ²⁴ para analisar o efeito a razão de velocidade do ar, razão de diâmetros, coeficiente de restituição sobre o índice de mistura. A Tabela 6 apresenta a ordem de execução do delineamento, incluindo os três pontos centrais.

Tabela 6: Matriz de Planejamento.

Planejamento	V/V_{mf}	D_c / D_s	COEFICIENTE DE ESPECULARIDADE (CE)	COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO (CR)
1	1,1	0,67	0	0,1
2	1,1	0,67	0,005	0,95
3	1,1	6,33	0	0,1
4	1,1	6,33	0,005	0,95
5	1,25	3,33	0,0025	0,525
6	1,25	3,33	0,0025	0,525
7	1,25	3,33	0,0025	0,525
8	1,4	6,33	0	0,1
9	1,4	6,33	0,005	0,95
10	1,4	6,33	0	0,1
11	1,4	6,33	0,005	0,95

A Tabela 7 mostra os fatores e níveis selecionados com base na literatura. Os fatores D_c/D_s e V/V_{mf} foram escolhidos baseados no trabalho de Santos et al. (2023), que analisou o efeito desses fatores na segregação de partículas, levando em conta a influência relativa do empuxo e da força de arrasto em misturas de partículas.

Tabela 7: Fatores com seus níveis correspondentes.

V/V_{mf}	D_c / D_s	COEFICIENTE DE ESPECULARIDADE (CE)	COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO (CR)
1,1	0,67	0	0,1
1,25	3,33	0,0025	0,525
1,4	6,33	0,005	0,95

Além disso, diferentes coeficientes de restituição foram selecionados a partir de referências da literatura. Xie et al. (2021) investigaram a segregação de partículas de mistura binárias e adotaram a faixa de 0,1 a 0,95 para o coeficiente de restituição, considerando seu efeito sobre o I_M . Zhuang et al. (2022) identificaram o efeito do coeficiente de especularidade (faixa de 0 a 0,005) sobre índice de mistura de leite fluidizado com misturas binárias de mesma massa específica e razão de diâmetro igual 5.

A análise do efeito destes fatores sobre a previsão do modelo fluidodinâmico desempenha um papel fundamental na produção de combustíveis a partir dos resíduos da Tetra Pak em leite fluidizado, especialmente na partida de reatores em leite fluidizado, onde a garantia da mistura desempenha um papel crucial, evitando assim, a desfluidização do leite. A validação do modelo mediante o impacto dos fatores contribui como ponto de partida ao projeto e operação adequada do reator.

4.6 VARIÁVEL RESPOSTA - ÍNDICE DE MISTURA

Com base no trabalho de Santos et al. (2023) para o leito em colapso foi definido o índice de mistura por região (I_M) que pode ser calculado como:

$$I_M = \frac{W_i}{W_0} \quad (16)$$

onde, W_i representa a fração mássica da partícula de polietileno-alumínio (PEBD/Al) encontrada em cada região i do leito e W_0 representa a fração mássica de PEBD/Al de acordo com a mistura selecionada.

$$W_i = \frac{w_{c,i}}{w_{t,i}} \quad (17)$$

Onde $w_{c,i}$ e $w_{t,i}$ correspondem a massa de compósito na região do leito i e a massa de compósito na região i .

$$W_0 = \frac{w_{c,0}}{w_{t,0}} \quad (18)$$

Onde $w_{c,0}$ e $w_{t,0}$ correspondem a massa de compósito adicionada no leito e a massa de partículas adicionada ao leito.

Baseado no trabalho de Rowe (1972), Nienow et al. (1987), e Bacelos e Freire (2012) para o leito em regime de fluidização foi definido o índice de mistura do leito ($I_{M, L}$) que pode ser expresso como:

$$I_{M, L} = \frac{W_{i, V/2, sup}}{W_0} \quad (19)$$

Em que $W_{i, V/2, sup}$ representa a fração mássica da partícula na metade do volume superior do leito e W_0 representa a fração mássica inicial da partícula no leito.

Os valores de I_M próximos de 1 indicam mistura de partículas. Valores de $I_M > 1$ indicam maior concentração de compósito PEBD/Al, enquanto valores de $I_M < 1$ indicam maior concentração de areia.

4.7 PÓS PROCESSAMENTO

Os dados das simulações foram extraídos utilizando o software Post em duas situações distintas: primeiro, com o leito em regime de fluidização; segundo, com o leito em colapso. Para induzir ao colapso das partículas, a condição de contorno de entrada foi ajustada para zero, resultando em uma velocidade de entrada do gás nula e, conseqüentemente, no colapso do leito.

A variável resposta, o índice de mistura, foi determinado utilizando uma malha 2D segmentada para cada região. O software empregado permitiu a extração dos dados de fração volumétrica das partículas (X). Para utilizá-los na equação do I_M da região, foi necessário convertê-los para fração mássica (W). Essa conversão foi realizada aplicando-se as seguintes equações:

$$m_{C,Ri} = X_{C,i} \cdot V_{Ri} \cdot \rho_C \quad (20)$$

$$m_{S,Ri} = X_{S,i} \cdot V_{Ri} \cdot \rho_S$$

$$I_M = \frac{m_{C,Ri}}{m_{C,Ri} + m_{S,Ri}} \quad (21)$$

Onde I_M é o índice de mistura em cada região, $X_{C,i}$ é a fração volumétrica de compósito e $X_{S,i}$ a fração volumétrica de areia, V_{Ri} é o volume da região i , ρ_C e ρ_S são respectivamente a densidade do compósito e da areia, $m_{C,Ri}$ e $m_{S,Ri}$ são a massa de compósito e a massa de areia na região i .

Essa conversão é essencial para a aplicação precisa da equação do índice de mistura, que requer a fração mássica para avaliar a homogeneidade da mistura no leito fluidizado.

Para calcular o índice de mistura do leito ($I_{M,L}$), o leito foi dividido em duas regiões, utilizando a metodologia proposta por San Jose et al. (2002) descrita da seguinte forma:

$$I_{M,L} = \frac{W_{i, V/2, sup}}{W_0} \quad (22)$$

Em que $W_{i, V/2, sup}$ representa a fração mássica compósito metade do volume superior do leito e W_0 representa a fração mássica inicial de compósito presente no leito. Para

o cálculo de $W_{i, V/2, sup}$ foram utilizados os seguintes equacionamentos:

$$m_{C, V/2, sup} = X_{C, V/2, sup} \cdot V/2_{sup} \cdot \rho_C \quad (23)$$

$$m_{S, V/2, sup} = X_{S, V/2, sup} \cdot V/2_{sup} \cdot \rho_S \quad (24)$$

$$W_{i, V/2, sup} = \frac{m_{C, V/2, sup}}{m_{C, V/2, sup} + m_{S, V/2, sup}} \quad (25)$$

Considerando $m_{C, V/2, sup}$ e $m_{S, V/2, sup}$ representam as massas do compósito e da areia, respectivamente, na metade do volume do leito ($V/2_{sup}$), $X_{C, V/2, sup}$ e $X_{S, V/2, sup}$ indicam as frações volumétricas dessas partículas na mesma região e ρ_C e ρ_S são as densidades do compósito e da areia respectivamente.

Para determinar os dados de expansão do leito, foi criada uma isosuperfície na fronteira entre o leito e a região com ar. Em seguida, foram extraídas as informações de altura máxima do leito e calculado sua expansão média.

No contexto do índice de mistura (I_M) que quantifica a proporção de diferentes tipos de partículas em uma região específica do leito, o coeficiente de restituição pode afetar a mistura. Colisões mais elásticas (valores de CR próximos a 1) podem resultar em uma mistura homogênea, pois as partículas se dispersam durante as colisões. Por outro lado, colisões mais inelásticas (valores de CR próximos a 0) podem levar a segregação, dificultando a obtenção de uma mistura uniforme.

Essas variáveis são fundamentais para a análise da distribuição e concentração das partículas no leito, permitindo uma compreensão detalhada da composição e das propriedades do material presente na região do leito e do efeito do coeficiente de restituição sobre o índice de mistura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, é apresentada a análise do leito em colapso para misturas binárias de partículas de PEBD/Al e areia, sobre o Índice de Mistura (I_M) em função dos fatores: razão de velocidade (V/V_{mf}), razão de diâmetros (D_C/D_S), coeficiente de restituição (CR) e coeficiente de especularidade (CE). Discutindo os efeitos desses parâmetros nas regiões do topo e meio do leito, bem como a comparação entre os resultados simulados e experimentais. Além disso, o comportamento do leito observado durante o colapso quanto em condição de fluidização

5.1 LEITO EM COLAPSO

As Tabelas 8 e 9 apresentam os efeitos estimados dos fatores sobre o Índice de Mistura (I_M) nas regiões do topo e meio do leito, considerando apenas os efeitos com p-valor inferior a 10%. Para a região do topo o I_M é influenciado pela razão de diâmetros entre compósito e areia (D_C/D_S), coeficiente de especularidade (CE), pelas interações entre os pares ($D_C/D_S \times CE$) e ($V/V_{mf} \times CE$). Na região do meio, apenas a (D_C/D_S) afeta o I_M , conforme indicado pelo p-valor inferior a 10%.

Tabela 8: Efeito dos fatores sobre o I_M com significância de 10% para o leito em colapso na região do topo.

Fatores	Efeito	Erro Puro	t (2)	p-valor
Média	1,0388	0,0101	102,81	0,0000
D_C/D_S	- 0,1900	0,0202	- 9,40	0,0111
CE	0,1275	0,0202	6,31	0,0242
$V/V_{mf} \times D_C/D_S$	0,0975	0,0202	- 4,82	0,0403
$V/V_{mf} \times CE$	- 0,0650	0,0202	- 3,22	0,0846
CE X CR	0,0575	0,0202	2,85	0,1045

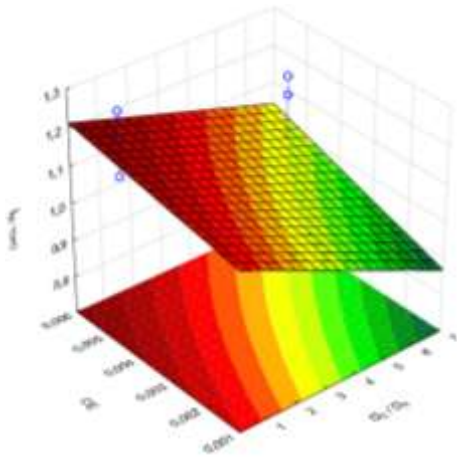
Tabela 9: Efeito dos fatores sobre o I_M com significância de 10% para o leito em colapso na região do meio.

Fatores	Efeito	Erro Puro	t (2)	p-valor
Média	0,8700	0,0052	167,17	0,0000
V/V_{mf}	- 0,0925	0,0104	- 8,89	0,0124
D_C/D_S	0,1050	0,0104	10,09	0,0097

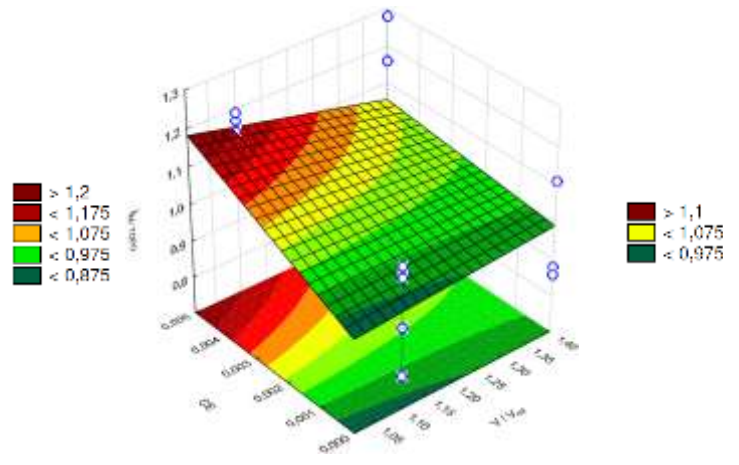
Considerando um intervalo de confiança de 90%, observa-se que na região do topo, o I_M apresenta maior sensibilidade à razão de diâmetro D_C/D_S e ao coeficiente de especularidade (CE). Com a expansão do leito fluidizado as partículas interagem fortemente com a parede, retardando o seu movimento descende na coluna. Após o colapso, a região de topo sofre maior contração quando comparada a região do meio. Esta situação explica o efeito do CE apenas para o topo.

As superfícies da Figura 3 mostram o I_M nas diferentes regiões leito em colapso: topo (3a, 3b, 3c e 3d), meio (3e, 3f e 3g) de acordo com os fatores e suas interações. Os dados foram parametrizados em uma velocidade do ar 25% acima da V_{mf} (ponto central) em função da razão de diâmetro (D_C/D_S), razão de velocidade (V/V_{mf}), coeficiente de especularidade (CE) e coeficiente de restituição (CR). Nas regiões do topo e do meio, observa-se que, quanto menor a razão de diâmetro (D_C/D_S), as regiões alcançam a mistura. Além disso, na região do topo, baixos coeficiente de especularidade (CE) e razão de velocidade (V/V_{mf}) favorecem a mistura, caso contrário, as partículas de areia concentram-se na região do leito ($I_M < 1$).

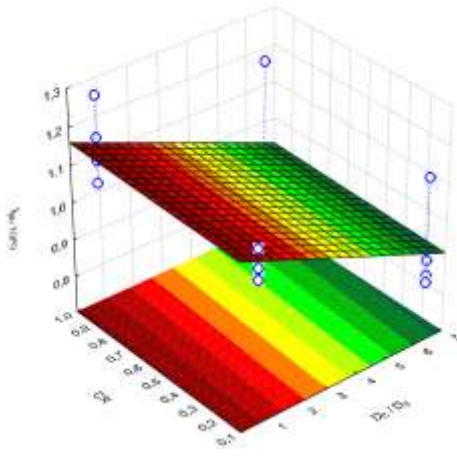
Os efeitos reportados na Figura 3 estão relacionados à ação das forças gravitacionais e de arraste sobre as partículas binárias. A mistura de partículas é alcançada a medida em que a porosidade do leito diminui (quanto menor a razão D_C/D_S menor a porosidade do leito), favorecendo o regime borbulhante. O movimento das bolhas de ar promove o transporte convectivo das partículas ao longo da coluna do leito. Para velocidades superiores à de mínima fluidização, a força de arrasto se sobrepõe a força da gravidade e, conseqüentemente, quanto maior o diâmetro do PEBD/AI (maior a área projetada) maior a força de arrasto na direção axial do leito, promovendo assim uma distribuição uniforme de partículas de compósito ao longo da coluna.



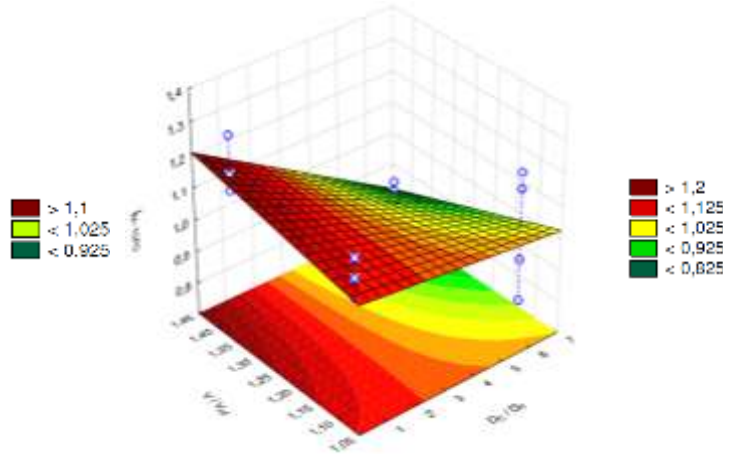
(a)



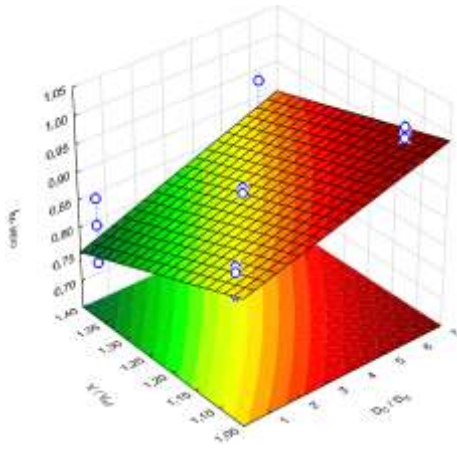
(b)



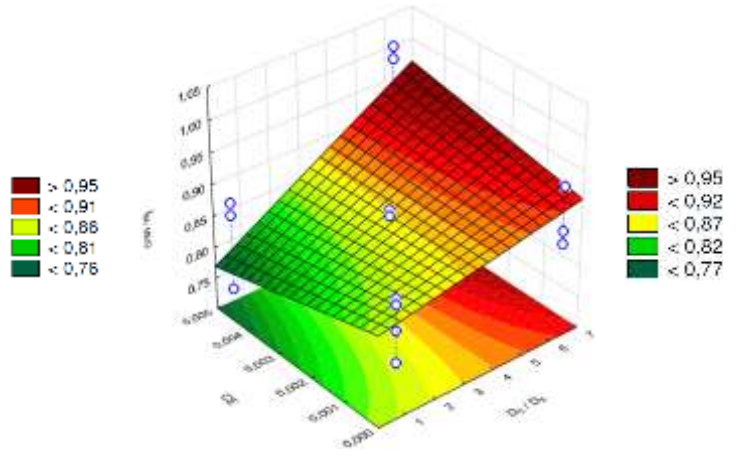
(c)



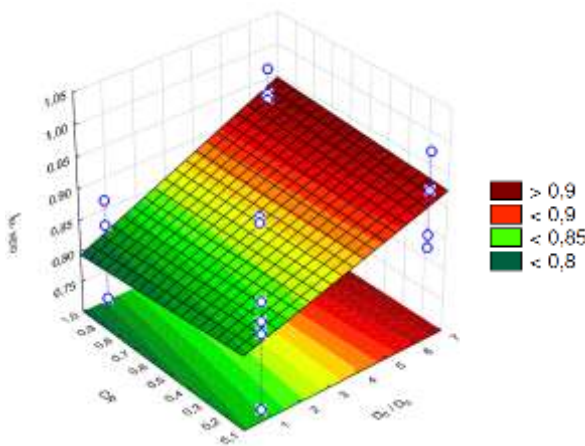
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 3: Previsão do Índice de mistura, parametrizado na velocidade do composto central de 25% acima da V_{mf} , para as regiões: (a), (b), (c) e (d) do topo, (e), (f) e (g) meio do leito.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados simulados do I_M para a região do topo e meio do leito, juntamente com os dados experimentais obtidos por Santos *et al* (2023), e o erro relativo (%E). Ao comparar os dados experimentais com os resultados simulados da região do topo do leito, observa-se que a concordância é mais evidente para partículas de PEBD/Al com menores razões D_C/D_S (0,67) e em baixas razões de velocidade ($V/V_{mf} < 1,4$). Para uma velocidade do ar 40% acima da V_{mf} , o modelo prevê o I_M com um erro inferior a 19%. Na região do meio do leito o modelo é válido com o leito em colapso, sendo capaz de prever o regime de fluidização quanto o índice de mistura. Apenas para a razão de velocidade $V/V_{mf} = 1,4$ e $X_C = 20\%$, o erro relativo é de no máximo 15%, indicando que o comportamento do escoamento dinâmico reproduz os dados experimentais.

Esses resultados sugerem que o modelo é adequado para prever o I_M para leitos com menor razão de diâmetro, cujas partículas se enquadram na classificação tipo B de Geldart (1973) e apresentam fluidização borbulhante ($D_C/D_S = 0,67$; $D_C = 0,30$ mm e $D_S = 0,45$ mm). Isso demonstra o potencial do modelo fluidodinâmico para prever o grau de mistura de leito fluidizado com misturas de partículas de composto e areia. Cabe salientar que o grau de mistura de partículas interfere nos mecanismos de transferência de calor por condução e convecção. A condução de calor limita a taxa de aquecimento da partícula, desta forma, quanto menor o tamanho da partícula menor a resistência a transferência de calor por condução, promovendo assim altas taxas de aquecimento. O grau de mistura associado a altas taxas de transferência de

calor, pode promover a decomposição uniforme das poliolefinas e favorecer a produção de olefinas leves e ceras a partir conversão termoquímica do compósito em leito fluidizado em regime borbulhante.

Tabela 10: Índice de mistura da região do topo do leito em colapso para diferentes concentrações de compósito, razões de velocidades e diâmetros.

V/V_{mf}	X_c (%)	D_c/D_s	Simulado I_M TOPO	Experimental I_M TOPO	Erro Relativo $E_{\Delta IM}$ (%)
1,1	20	0,67	$1,05 \pm 0,002$	0,99	6,1
	10	6,33	$0,79 \pm 0,003$	1,63	51,5
1,25	20	0,67	$1,03 \pm 0,004$	0,99	4,0
	10	6,33	$0,90 \pm 0,006$	1,73	92,2
1,4	20	0,67	$1,11 \pm 0,014$	0,90	-18,9
	10	6,33	$0,86 \pm 0,005$	1,45	68,6

Tabela 11: Índice de mistura da região do meio do leito em colapso para diferentes concentrações de compósito, razões de velocidades e diâmetros.

V/V_{mf}	X_c (%)	D_c/D_s	Simulado I_M MEIO	Experimental I_M MEIO	Erro Relativo $E_{\Delta IM}$ (%)
1,1	20	0,67	$1,04 \pm 0,008$	1,02	1,9
	10	6,33	$0,85 \pm 0,015$	0,93	-9,4
1,25	20	0,67	$0,98 \pm 0,010$	1,00	-2,0
	10	6,33	$0,91 \pm 0,005$	0,87	4,4
1,4	20	0,67	$1,12 \pm 0,016$	0,96	14,3
	10	6,33	$0,90 \pm 0,005$	0,96	-6,7

Para leitos mais densos (90% de areia e 10% de compósito) com razão de diâmetro $D_c/D_s = 6,33$ a previsão de I_M na região do topo não está de acordo com os dados experimentais. Isso pode ser explicado pelas seguintes razões: durante o colapso as partículas sedimentam-se gradualmente na coluna enquanto o ar é expulso do leito, promovendo assim a suspensão daquelas de menor diâmetro (areia) que se acumulam no topo. Esta situação pôde ser evidenciada apenas para leito mais densos e com maior razão de diâmetro. Quanto maior a concentração de areia no leito maior o efeito da força da gravidade sobre compressão do ar entre os interstícios das partículas facilitando assim a suspensão daquelas de menor diâmetro. Associado a este efeito quanto maior o diâmetro de partículas de compósito maior o volume de interstícios entre as partículas promovendo a suspensão das partículas de areia. Para condição de experimental no colapso do leito, o fluxo de ar diminui gradativamente

abaixo da velocidade mínima de fluidização, as partículas perdem sua sustentação, se sedimentam formando uma estrutura compacta na região.

As Figuras 4 e 5 ilustram as frações mássicas de PEBD/Al ao longo da coluna, parametrizadas em um dado coeficiente de restituição, razão de velocidade V/V_{mf} (10, 25 e 40%), fração de compósito X_C (10 e 20%) e razão de diâmetro D_C/D_S (0,67 e 6,33). Esses resultados são comparados com os valores I_M das regiões (topo, meio e fundo) estudadas por Santos et al. (2023).

Com base na Figura 4, observa-se que, para $D_C/D_S = 0,67$, quanto menor a razão de velocidade do ar menor o efeito do coeficiente de restituição sobre o grau de mistura de partículas (previsão da concentração de compósito) no fundo do leito. Por outro lado, à medida que a razão de velocidade aumenta, o impacto do coeficiente de restituição na previsão da concentração de compósito ao longo da coluna torna-se mais evidente. Isso provavelmente ocorre devido ao impacto do coeficiente de restituição que determina não apenas a força de arrasto sólido-sólido, mas também as propriedades da fase sólida, como pressão sólida, viscosidade de cisalhamento sólido e seio da fase sólida.

Ao passo que, para $D_C/D_S = 6,33$ e $CR = 0,1$ o aumento da razão de velocidade do ar não tem efeito sobre o grau uniformidade de partículas no leito. Para coeficiente de restituição 0,95, maior razão de velocidade até para 1,25 promove a homogeneidade do leito independente do CR empregado conforme pode ser evidenciado na Figura 5.

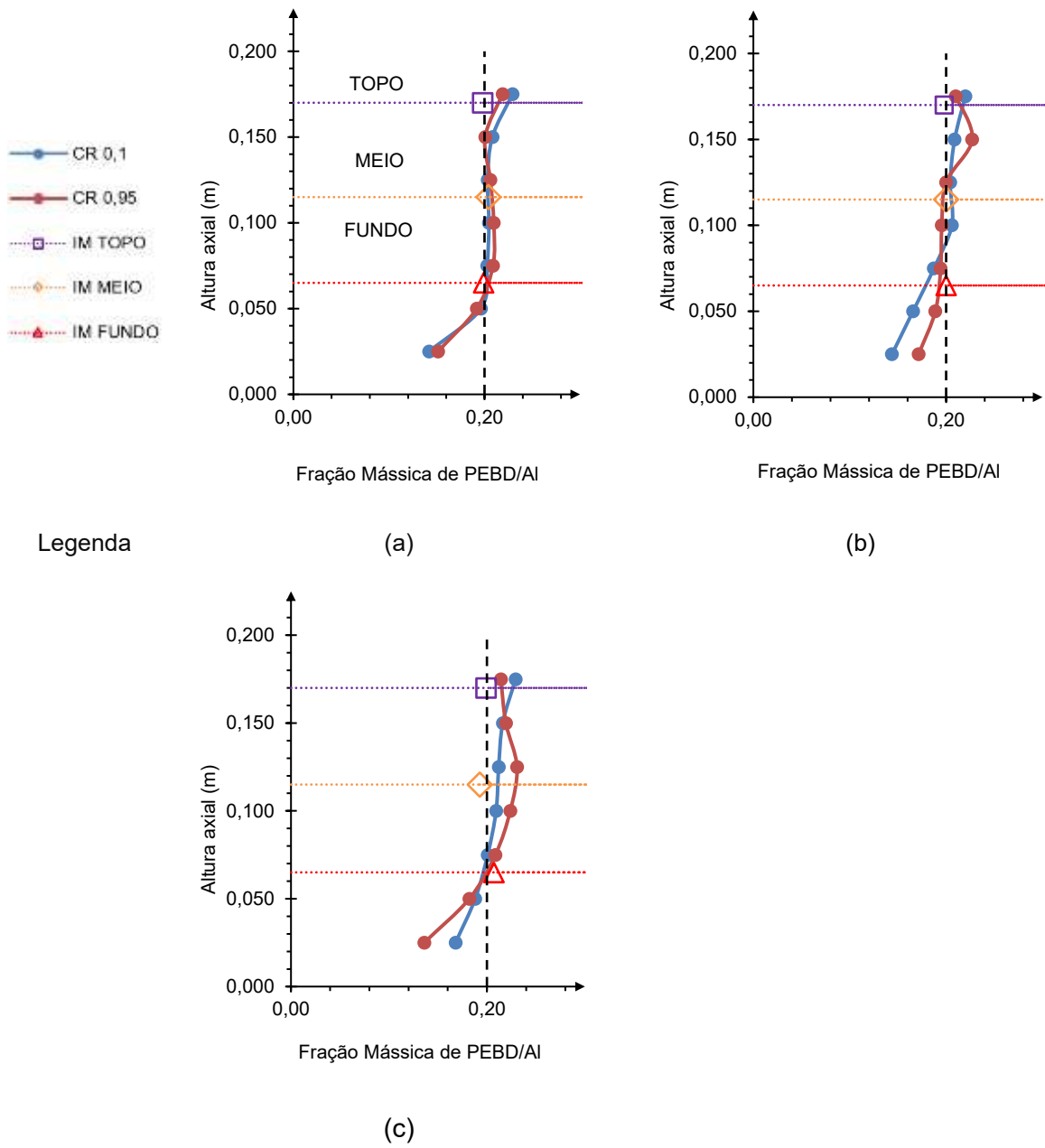


Figura 4: Fração Mássica de Compósito ao longo da posição axial do leito no colapso, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_c=20\%$, $D_c/D_s=0,67$ e $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_c=20\%$, $D_c/D_s=0,67$ e $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_c=20\%$, $D_c/D_s=0,67$ e $1,4 \times V_{mf}$.

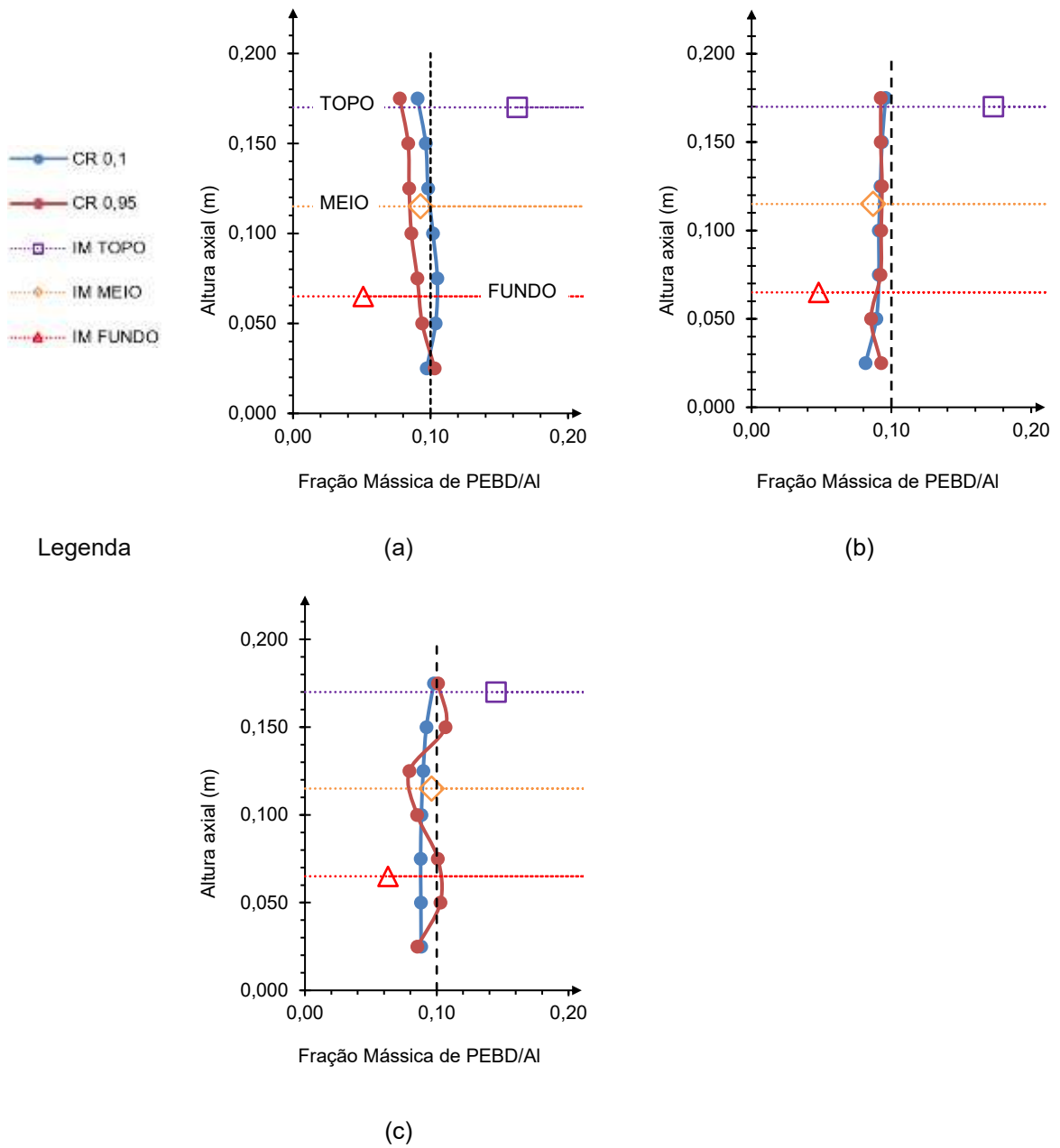


Figura 5: Fração Mássica de Compósito ao longo da posição axial do leito no colapso, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$ e $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$ e $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 10\%$, $D_C/D_S = 6,33$ e $1,4 \times V_{mf}$.

5.2 LEITO FLUIDIZADO

A Tabela 12 apresenta os efeitos estimados dos fatores sobre o índice de mistura do leito ($I_{M,L}$) considerando apenas os efeitos com p-valor inferior a 10%. Todos os fatores analisados afetam o $I_{M,L}$, assim como suas interações em pares (V/V_{mf} x D_C/D_S , V/V_{mf} x CE e D_C/D_S x CR). Considerando um intervalo de confiança de 90%, observa-se que a razão D_C/D_S apresenta maior efeito para o leito. Além disso, é possível verificar a sensibilidade do $I_{M,L}$ às alterações dos fatores com efeito significativo, uma vez que pequenas variações nesses fatores resultam em mudanças no índice de mistura.

Tabela 12: Efeito dos fatores sobre o índice de mistura do leito fluidizado com significância de 10%.

Fatores	Efeito	Erro Puro	t (2)	p-valor
Média	1,5625	0,0113	138,60	0,0000
V/V_{mf}	- 0,2925	0,0225	- 12,97	0,0059
D_C/D_S	- 0,5675	0,0225	- 25,17	0,0016
CE	0,0800	0,0225	3,55	0,0710
CR	- 0,1725	0,0225	- 7,65	0,0166
V/V_{mf} x D_C/D_S	- 0,1400	0,0225	- 6,21	0,0250
V/V_{mf} x CE	- 0,0875	0,0225	- 3,88	0,0604
D_C/D_S x CE	0,0625	0,0225	2,77	0,1092
D_C/D_S x CR	0,2850	0,0225	12,64	0,0062

A Figura 6 exibe o $I_{M,L}$ do leito fluidizado como uma função da razão de velocidade (V/V_{mf}), razão de diâmetro (D_C/D_S), coeficiente de especularidade (CE) e coeficiente de restituição (CR), parametrizados em uma velocidade do ar de 25% acima da V_{mf} (ponto central). As simulações revelam que quanto menor o coeficiente de especularidade (CE) e a relação D_C/D_S , maior a segregação de partículas de compósito no leito. Por outro lado, nas condições (X_C 10%, D_C/D_S 6,33 e 1,4 V/V_{mf}), o leito alcança a mistura ($I_{M,L}$ próximos de 1). Esta condição favorece a reciclagem térmica permitindo a degradação uniforme do compósito no leito, contribuindo com a rota de valorização das poliolefinas por meio da pirólise destes resíduos em leito fluidizado. Esses resultados corroboram com os obtidos por Kim et al. (2024), que investigaram a produção de olefinas a partir de poliolefinas, demonstrando que o grau de mistura influenciou diretamente a composição da cera e o rendimento de olefinas leves.

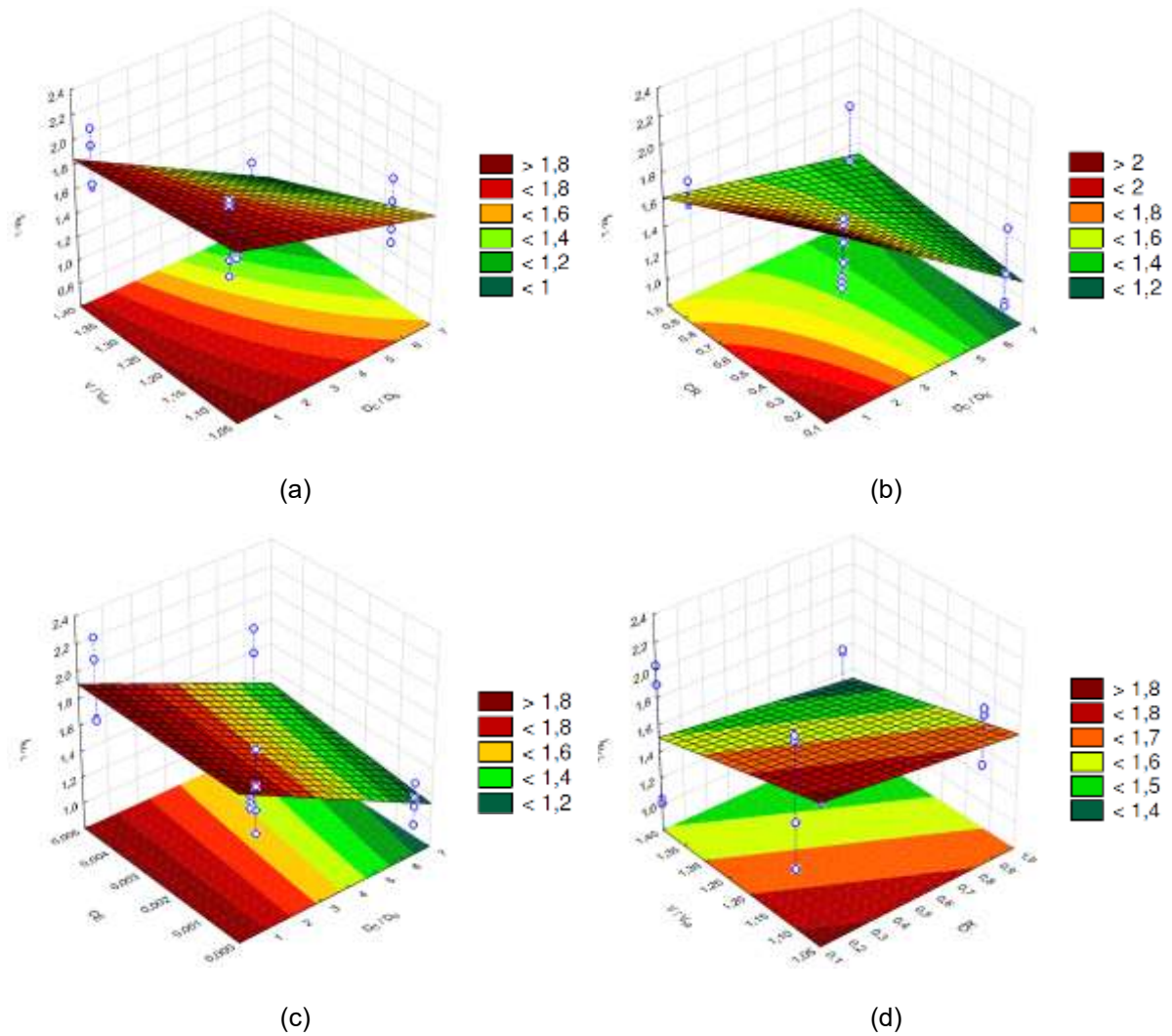


Figura 6: Previsão do Índice de mistura do leito, parametrizado na velocidade do ar 25% acima a V_{mf} , $CE=0$ e $0,005$, $CR=0,1$ e $0,95$.

As Figuras 7 e 8 ilustram as frações mássicas de PEBD/Al do leito ao longo da coluna, parametrizadas em um dado coeficiente de restituição, razão de velocidade V/V_{mf} (10, 25 e 40%), fração de composto X_C (10 e 20%) e razão de diâmetro D_C/D_S (0,67 e 6,33). Esses resultados são comparados com os valores I_M nas regiões (topo, meio) reportados por Santos et al. (2023). Para D_C/D_S 0,67, observa-se na Figura 7 que quanto menor a razão de velocidade, maior o efeito do CR sobre a previsão da concentração de composto no topo. Ao passo que, para D_C/D_S 6,33, verifica-se na Figura 8 que o CR não apresenta efeito sobre a estimativa da concentração de composto no topo, sendo este efeito apenas evidenciado para velocidade do ar inferior a 40% da mínima fluidização.

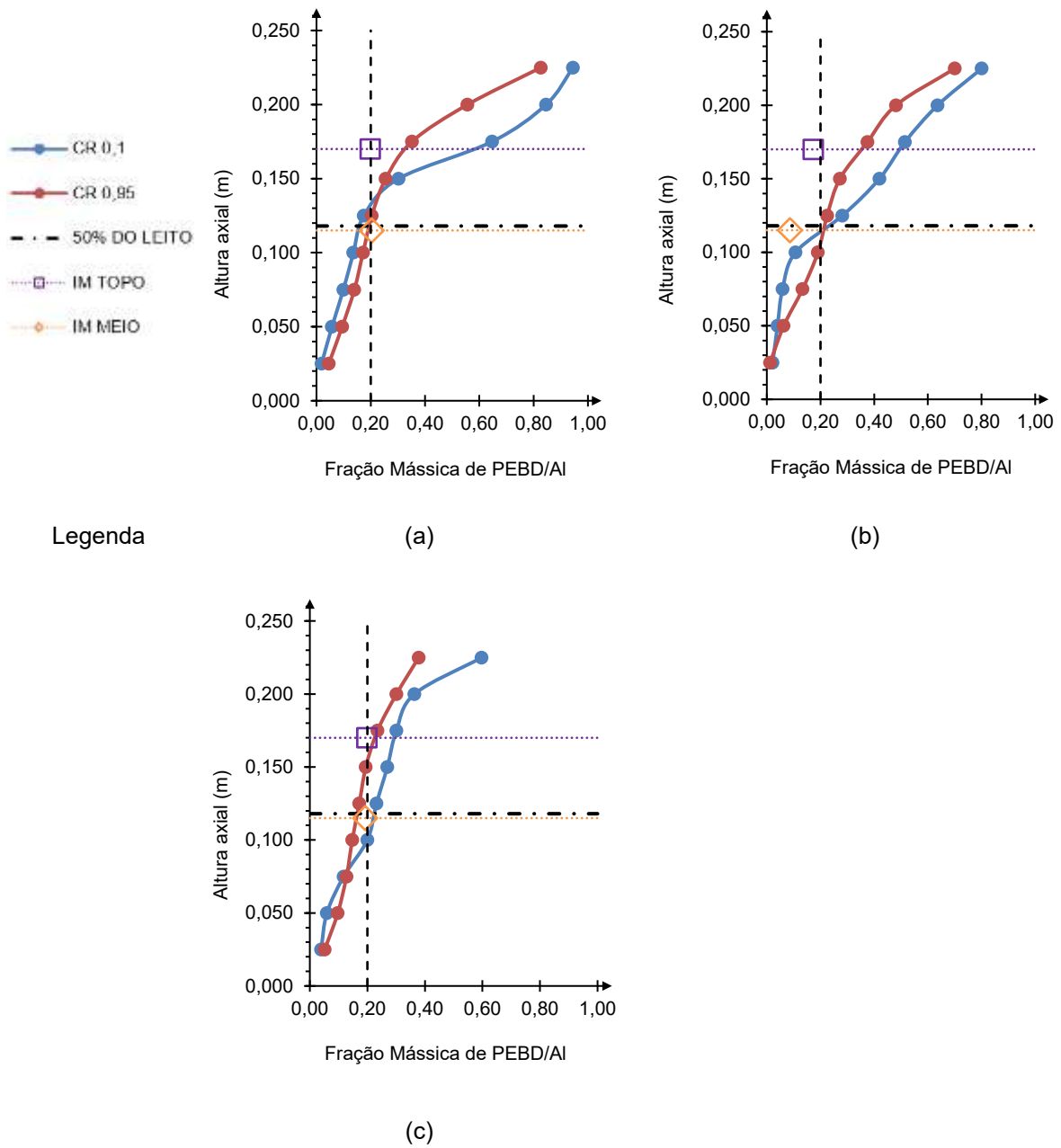


Figura 7: Fração Mássica de Compósito em 50% do leito, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $1,4 \times V_{mf}$.

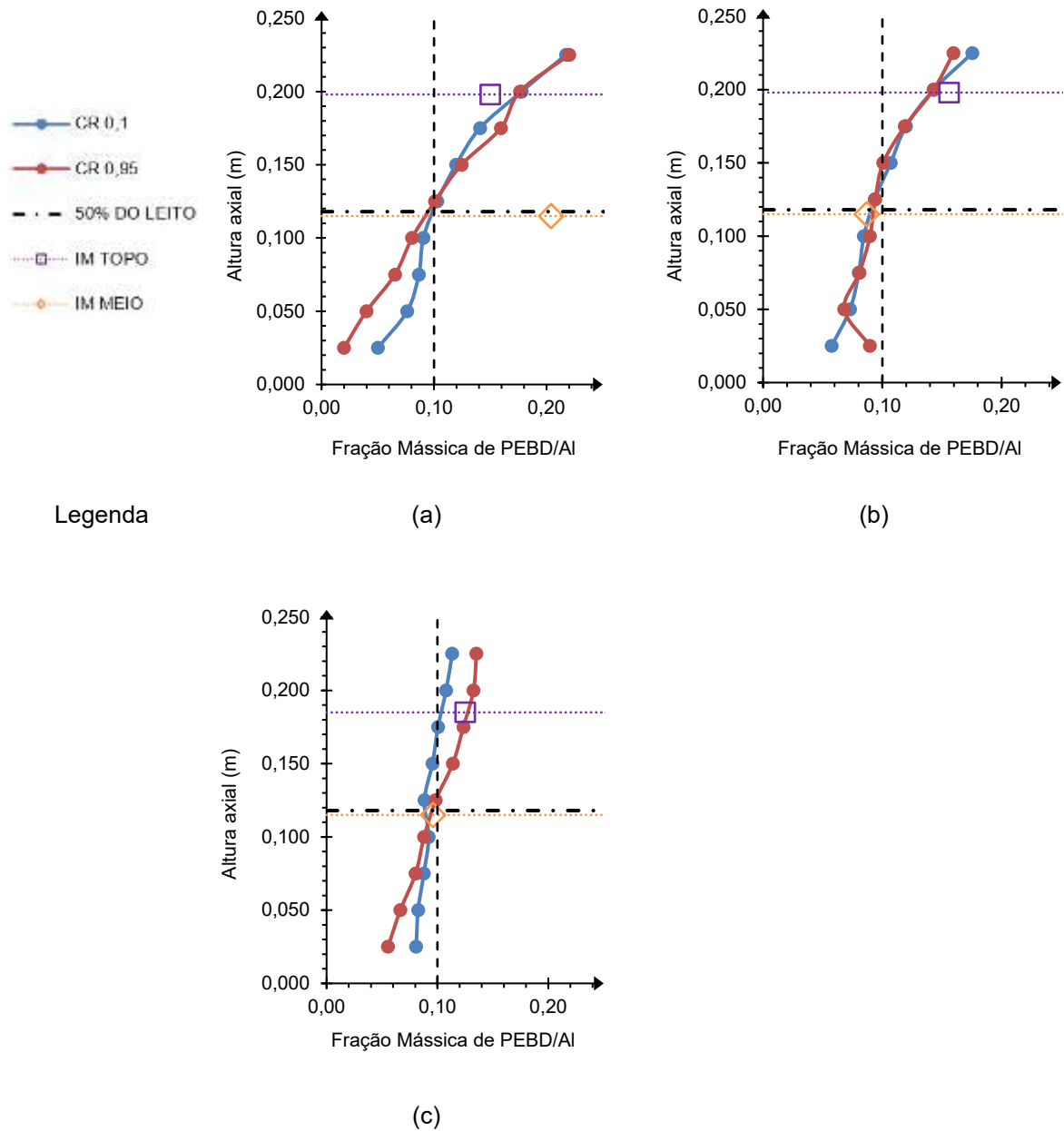


Figura 8: Fração Mássica de Compósito em 50% do leito, parametrizado em um dado coeficiente de restituição para: a) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$; $1,1 \times V_{mf}$, b) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,25 \times V_{mf}$, c) $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 6,33$, $1,4 \times V_{mf}$.

A Figura 9 exibe o I_M dinâmico para uma dada razão V/V_{mf} e CR, parametrizado em X_C e razão D_C/D_S . Para leitos com $D_C/D_S = 0,67$, nota-se que maiores CR atenuam a segregação na coluna, conforme pode ser evidenciada pelos valores de $I_{M,L}$ ($I_{M,L} \sim 1,05$). Já para leitos com $D_C/D_S = 6,33$ observa-se que maiores CR favorecem a segregação, sendo este efeito mais evidente para velocidades de 1,1 e 1,4 (Figura 9b).

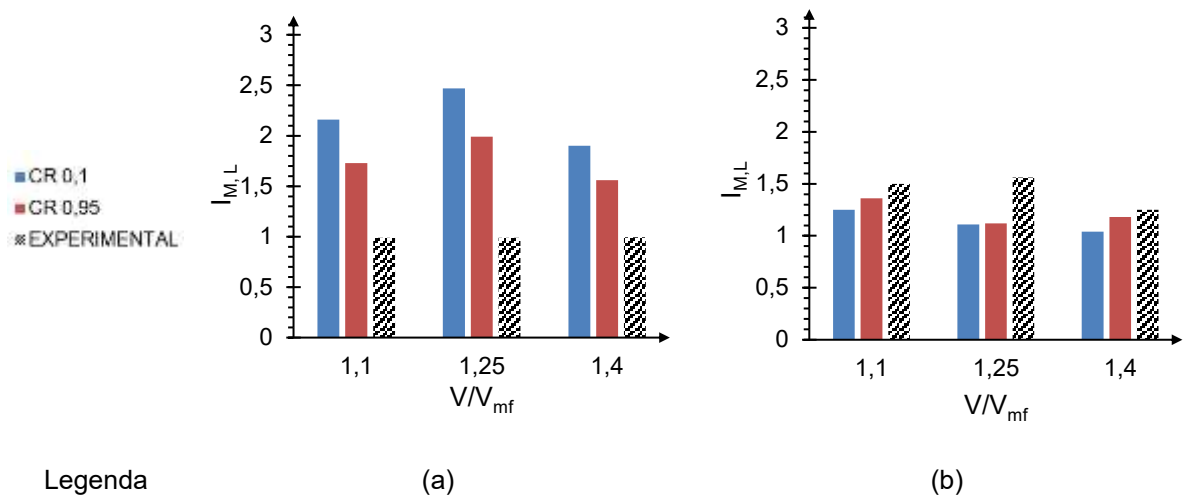


Figura 9: Índice de Mistura do leite para dada razão V/V_{mf} e CR, parametrizado em: a) $X_C = 20\%$ e $D_C/D_S = 0,67$, b) $X_C = 10\%$ e $D_C/D_S = 6,33$.

Conforme esperado, para leitos com $D_C/D_S = 6,33$, as partículas de compósito se concentram mais no topo do leite quando comparadas a de menor razão de diâmetro, pois apresentam maior área projetada e conseqüentemente, sofrem maior efeito da força de arrasto. Entretanto, o tamanho das bolhas não favorece o movimento isolado ascendente de partículas com maior área projetada. Essas bolhas afetam um conjunto de partículas, alterando assim suas trajetórias ao longo da coluna. Desta forma, bolhas maiores do que o diâmetro de partículas de PEBD/Al e areia interferem no arrasto do conjunto destas partículas, propiciando maior suspensão das partículas de menor diâmetro. Isso explica a tendência dos dados de $I_{M,L}$ previstos pelo modelo.

Ao considerar colisões elásticas, partículas de compósito com maior diâmetro (maior área projetada) conservam mais a energia cinética de colisão quando comparadas as de menor diâmetro, favorecendo uma melhor distribuição no leite e melhora na mistura, o que corrobora com os resultados da Figura 8. Isso ocorre porque partículas maiores possuem maior massa, menor dissipação relativa de energia devido a menor deformação elástica e menor efeito do fluido e maior inércia, reduzindo a perda de velocidade após a colisão com a parede do reator.

Comparado ao experimental (leite em colapso), o modelo subestima índice de mistura para $D_C/D_S = 0,67$ e para $D_C/D_S = 6,33$ superestima. Na unidade experimental de Leite Fluidizado para $D_C/D_S = 0,67$, tal situação pode ocorrer provavelmente devido a diluição do composto nos interstícios das partículas de areia (maior diâmetro) no leite em colapso; entretanto, para $D_C/D_S = 6,33$, o mesmo não ocorre, pois o compósito

concentrado no topo permanece sobre o topo do leito. Comparando com o estudo de Xie et al. (2021), esses resultados são coerentes, pois demonstram que partículas com razão de diâmetro igual à 5,0 e mesma densidade, um aumento no coeficiente de restituição de 0,1 para 0,9 leva à concentração de partículas de maior diâmetro no fundo do leito. Semelhante aos resultados destes autores, neste estudo, observa-se que o aumento do coeficiente de restituição leva a concentração de partículas de areia no fundo (partículas mais pesadas). Considerando uma mistura binária, pode-se destacar que quando o I_M aumenta as partículas de compósito se concentram no topo e areia no fundo do leito.

A Tabela 13 apresenta os resultados simulados do $I_{M,L}$ para o leito, juntamente com os dados experimentais obtidos por Santos et al. (2023), e o erro relativo (%E). Ao comparar os dados experimentais com os simulados, verifica-se que a previsão do modelo não está de acordo com os dados experimentais, indicando que o comportamento do escoamento dinâmico difere do leito fluidizado em colapso.

Tabela 13: Índice de mistura do leito para diferentes razões de velocidades e diâmetros, CR=0,95.

V/V_{mf}	D_c/D_s	Simulado $I_{M,L}$	Experimental I_M MÉDIO	Erro Relativo $E_{\Delta IM}$ (%)
1,1	0,67	$1,73 \pm 0,021$	1,00	42,2
	6,33	$1,36 \pm 0,005$	1,50	- 10,3
1,25	0,67	$1,99 \pm 0,023$	0,99	- 100
	6,33	$1,12 \pm 0,005$	1,56	39,3
1,4	0,67	$1,56 \pm 0,021$	0,91	41,7
	6,33	$1,18 \pm 0,008$	1,25	- 5,9

5.3 EFEITO DO COEFICIENTE DE ESPECULARIDADE SOBRE O REGIME DE FLUIDIZAÇÃO

Para uma dada velocidade do ar e coeficiente de especularidade (CE), a Figura 10 apresentam a fração volumétrica de compósito instantânea, parametrizados em 20% de PEBD/Al, $D_C/D_S=0,67$ e $CR= 0,95$. Para ambos CE estudados, no intervalo de 2s de simulação, observa-se na Figura 10 que há o surgimento de bolhas de ar, cujo escoamento do ar suspende as partículas e expande o leito. Após este intervalo, considera-se que a força de arrasto é balanceada pela força peso das partículas no leito e o regime de fluidização borbulhante é estabelecido. Nota-se ainda que as bolhas de ar se expandem ao longo da coluna devido a redução da pressão. A interação entre as bolhas de ar promove a coalescência e a formação de bolhas de ar com tamanhos diversos. Desta forma, o arrasto de partículas de compósito pelas bolhas de ar pode promover a mistura do leito ao longo da coluna ou a segregação, dependendo das condições operacionais e das propriedades da mistura (V/V_{mf} , D_C/D_S , X_C , CE e CR).

Para razão de velocidade $V/V_{mf}= 1,4$, nota-se na Figura 10 a mudança de regime de escoamento de borbulhante para *slugging* a medida em que se aumenta o CE de 0 para 0,005. No regime *slugging*, as bolhas de ar coalescem, promovendo a concentração das partículas sobre a parede da coluna, causando a segregação. Estes resultados corroboram com aqueles reportados por Zhuang et al. (2022). Com o aumento CE (0 a 0,95), estes autores observaram a mudança do regime, acompanhado pela sedimentação de partículas no fundo do leito. Também, observaram a mudança de regime borbulhante para *slugging* apenas para $\phi > 0,5$. Esta alteração pode ser explicada devido à formação de barreira de partículas no fundo do leito. Diferentemente dos resultados de Zhuang et al. (2022), nesta pesquisa houve apenas a ocorrência da sedimentação de partículas de compósito nas paredes da coluna quando empregado CE igual a 0,005 (valor 100 vezes menor ao empregado pelos autores) (Figura 10d).

Baseado em observações experimentais, pode-se inferir que a hipótese de deslizamento livre das partículas na parede (CE ~ 0) é satisfatória para representar o regime de fluidização borbulhante em um leito fluidizado (LF) com misturas de

compósito e areia. Em experimentos realizados em uma coluna de vidro transparente, Santos et al. (2023) observou visualmente o regime borbulhante em leito fluidizado com misturas de compósito e areia.

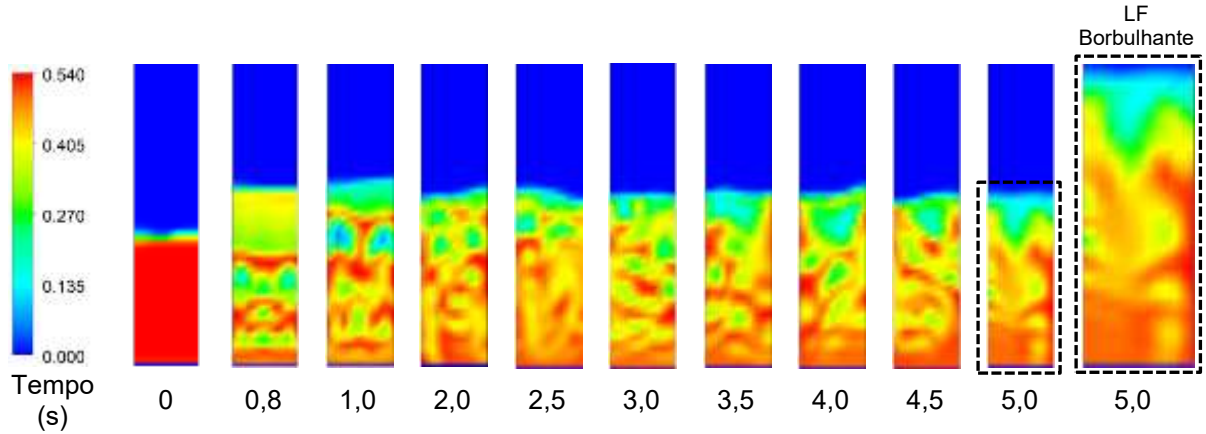


Figura 10a: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 10% acima da V_{mf} , $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$, $CR = 0,95$ e $CE = 0$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

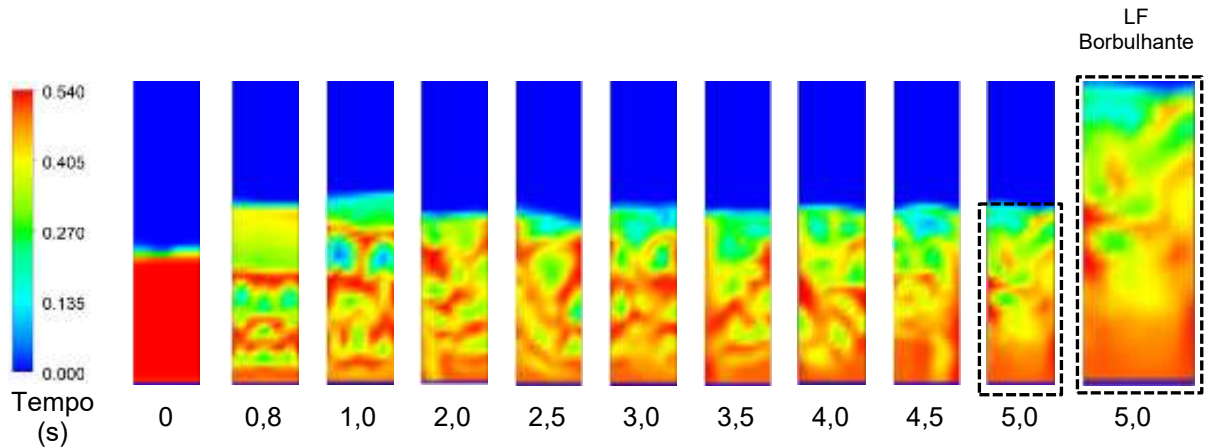


Figura 10b: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 10% acima da V_{mf} , $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0.67$, $CR = 0.95$ e $CE = 0,005$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

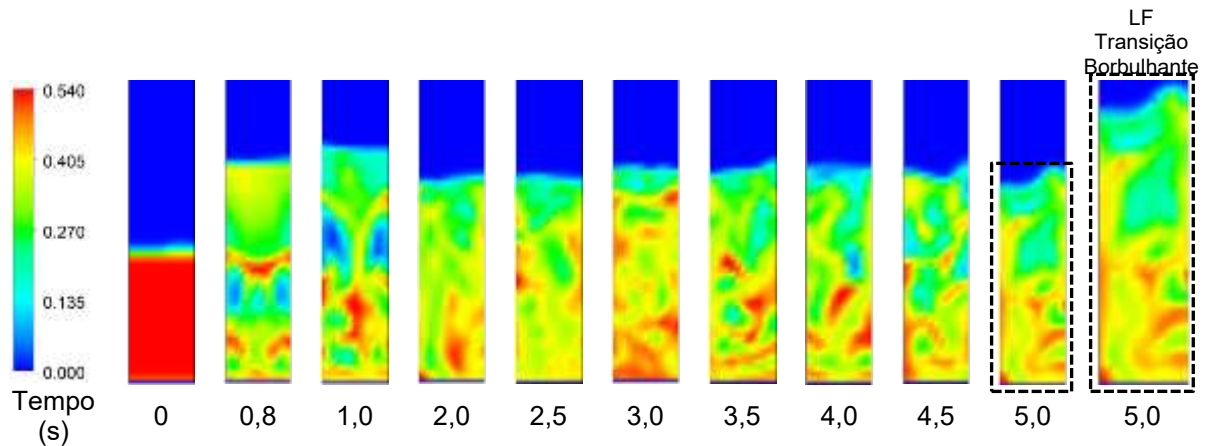


Figura 10c: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 40% acima da V_{mf} , $X_C = 20\%$, $D_C/D_S = 0.67$, $CR = 0.95$ e $CE = 0$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

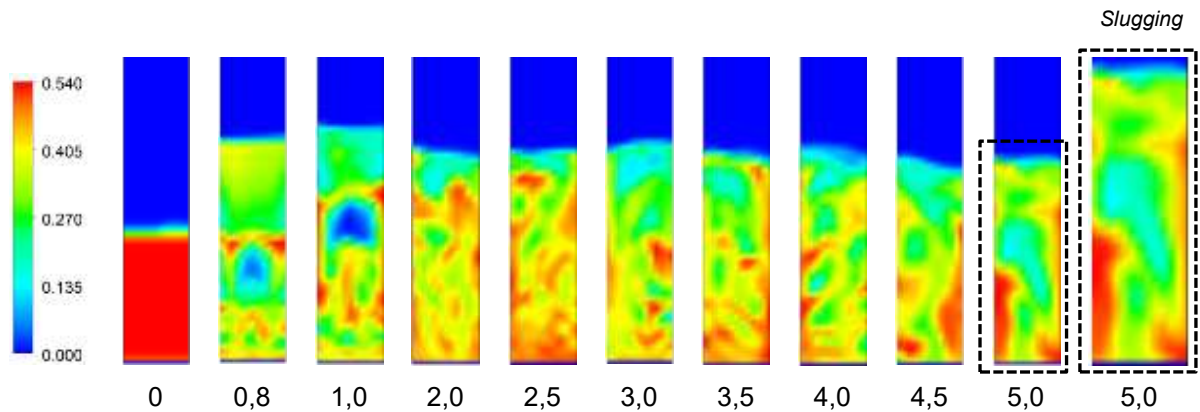


Figura 10d: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 40% acima da V_{mf} , $X_C= 20\%$, $D_C/D_S = 0,67$ CR 0,95 e $CE= 0,005$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

Comparando os resultados das Figuras 10 e 11 identifica-se que não houve efeito do CE para leitos com $D_C/D_S= 6.67$, $X_C= 10\%$ considerando a faixa operacional de 1.1 e 1.4 x V_{mf} . Isso provavelmente ocorre, pois, maiores valores de D_C/D_S geram menor área de efetivo contato das partículas com a parede, as quais deslizam livremente não promovendo a alterações de regime de fluidização.

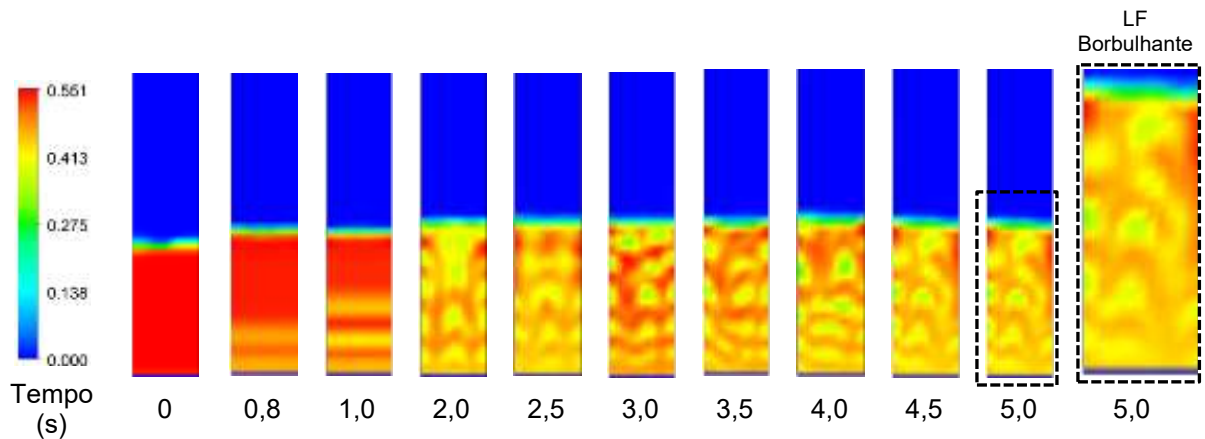


Figura 11a: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 10% acima da V_{mf} , $X_C= 10\%$, $D_C/D_S = 6.67$, CR 0,95 e $CE= 0$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

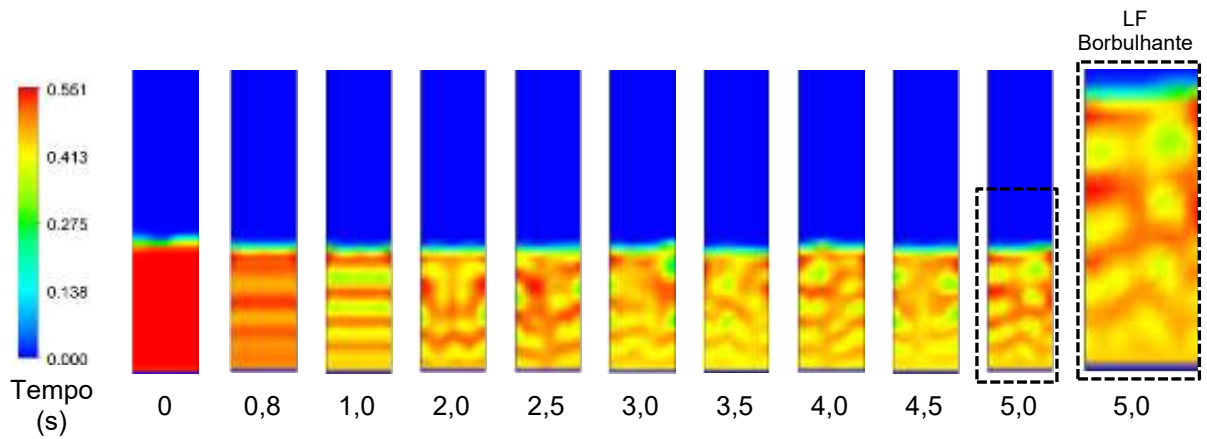


Figura 11b: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 10% acima da V_{mf} , $X_c = 10\%$, $D_c/D_s = 6,67$, $CR = 0,95$ e $CE = 0,005$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

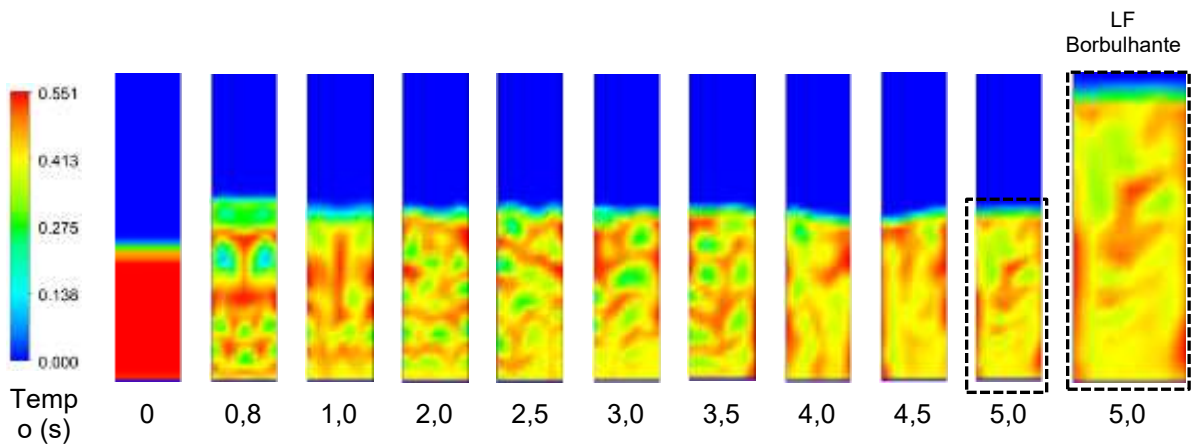


Figura 11c: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 40% acima da V_{mf} , $X_c = 10\%$, $D_c/D_s = 6,67$, $CR = 0,95$ e $CE = 0$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

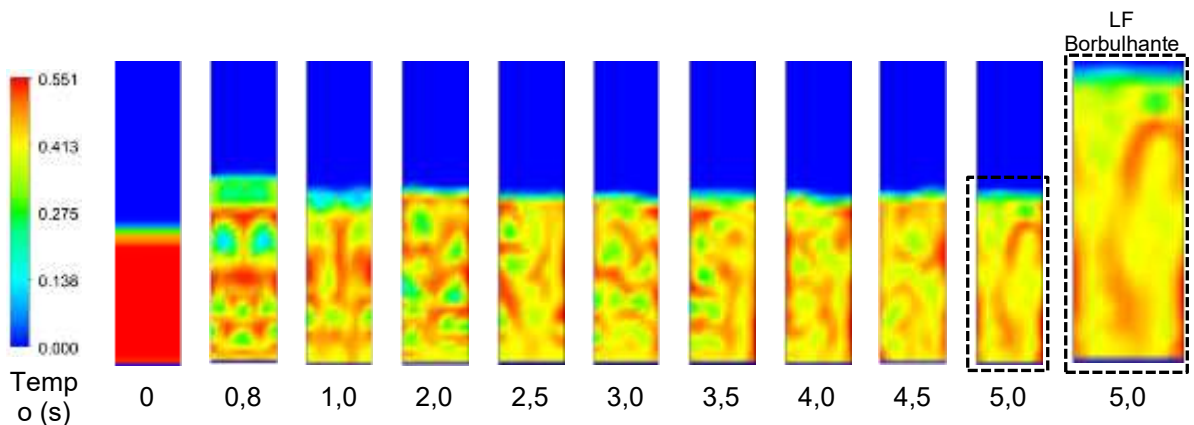


Figura 11d: Fração de Compósito ao longo do tempo parametrizado para velocidade do ar 40% acima da V_{mf} , $X_c = 10\%$, $D_c/D_s = 6,67$, $CR = 0,95$ e $CE = 0,005$. LF borbulhante- vista ampliada para 5s de simulação.

6. CONCLUSÕES

Baseado na análise dos resultados preliminares empregando o modelo Euler-Euler pode-se concluir que:

- a um nível de significância de 10%, o modelo consegue prever o efeito dos fatores sobre o I_M para ambos os leitos em colapso e em regime de fluidização;
- os fatores V/V_{mf} , D_C/D_S , CE e CR apresentam efeito sobre o I_M para o Leito Fluidizado; ao passo que para o leito em colapso, apenas o CR não apresentou influência sobre o I_M ;
- para o leito em colapso, menores CE e maiores D_C/D_S promovem a mistura de partículas no topo; enquanto para o meio apenas a razão de diâmetro e velocidade apresentaram efeito positivo sobre o I_M ;
- para menores razão de diâmetro ($D_C/D_S= 0,67$) e fração de compósito ($X_C= 20\%$), a previsão do índice de mistura do leito em colapso está de acordo com os dados experimentais reportados por Santos et al. (2023), apresentado um erro inferior a 5%, considerando velocidade do ar entre 10 e 25% da mínima fluidização;
- o modelo validado com o leito em colapso é capaz de prever o regime de fluidização borbulhante, considerando todos os efeitos dos fatores sobre o índice de mistura;
- a variação do coeficiente de especularidade (CE) teve efeito sobre o regime de fluidização, resultando na mudança de regime de escoamento de borbulhante para *slugging* - evidente para simulações com fração de compósito ($X_C= 20\%$), razão de diâmetro ($D_C/D_S= 0,67$) e coeficiente de restituição ($CR= 0,95$);
- para o leito fluidizado, o aumento da velocidade do ar e do coeficiente de especularidade alteram o regime de escoamento de borbulhante para *slugging*- não observado experimentalmente;
- comparada aos dados experimentais, a previsão do modelo indica que a hipótese de deslizamento livre das partículas na parede representam bem o escoamento de Leito fluidizado borbulhante.

7. TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de novas pesquisas na área recomenda-se:

- Desenvolver simulações CFD-DEM para avaliar o comportamento detalhado das partículas em leito fluidizado;
- Realizar simulações CFD em 3D para comparação dos valores obtidos em 2D;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antonio Santos, Yuri Nariyoshi, Leonardo Arrieche, Marcelo Bacelos, Waste valorization in fluidized bed reactor: Statistical assessment of particle segregation in binary mixtures of sand and Tetra Pak residues, *Fuel*. v. 352, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129073>. Acesso em: 11 mar. 2023.

ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide: Multiphase Flows*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2013. Disponível em: <https://www.ansys.com/>. Acesso em: 08 nov. 2023.

BIRD, R.B., Stewart,W.E, e Lightfoot, E.N, (2004), Fenômenos de Transporte, 2ª edição, **Editora LTC**.

Chang, J., Wu, Z., Wang, X., and Liu, W. Two-and three-dimensional, hydrodynamic modeling of a pseudo-2D turbulent fluidized bed with Geldart B particle. *Powder Technology*. v. 351, pg. 159–168, 2019. Disponível em: <https://doi:10.1016/j.powtec.2019.04.028>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Chapman, S.; Cowling, T. G. *The mathematical theory of non-uniform gases*. 3rd. ed. [S.I.] Cambridge University Press., 1970.

Ganguli Arijit, Bhatt Viraj, CFD simulations to study bed characteristics in gas–Solid fluidized beds with binary mixtures of Geldart-B particles: A qualitative analysis, *Frontiers in Energy Research*. v 11, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1059503>. Acesso em: 08 mar. 2023.

Geldart, D. Types of gas fluidization. *Powder Technology*. v. 7 (5), pg. 285-292, 1973. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3). Acesso em: 08 mar. 2023.

GIDASPOW, D. *Multiphase Flow and Fluidization. Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. San Diego: Academic Press Inc., 1994.

Gidaspow, D., Bezburuah, R. and Ding J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In: Potter, O.E. and Nicklin, D.J., Eds., *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, Engineering Foundation*, New York, pg. 75-82, 1992.

HULME, I.; CLAVELLE, E.; LEE, L. V. D.; KANTZAS, A. CFD Modeling and Validation of Bubble Properties for a Bubbling Fluidized Bed. *Ind. Eng. Chem.* v.44, pg. 4254-4266, 2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie049837j>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Jianchong Zhuang, Yunhua Zhao, Minghan Zhou, Chengjing Wang, Bing Lu, Comparative study of the single and double specular coefficients on two-fluid modeling of a pseudo-2D gas–solid fluidized bed, *Advanced Powder Technology*. v 33, pg. 9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103721>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Jiang Xiaoxue, Wang Shuyan, Zhang Qinghong, Shao Baoli, Lu Huilin, Granular restitution coefficient-based kinetic theory computations of bubbling fluidized beds, *Powder Technology*. v. 394, pg. 825-837, 2021: Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.018>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Jae-Kyung Kim, Ki-Bum Park, Do Kyoung Kim, Seung-Ho Song, Joo-Sik Kim, Direct production of olefins from waste plastic using a pyrolysis and fluid catalytic cracking integrated process: Part 1. study on the production and analysis of waxy oil obtained using a new type of a fluidized bed reactor, *Energy*. v. 306, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132420>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Le Xie, Jundong Zhu, Chongwen Jiang, Quantitative study of mixing/segregation behaviors of binary-mixture particles in pilot-scale fluidized bed reactor, *Powder Technology*. v. 377, 2021, pg. 103-114, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.069>. Acesso em: 11 mar. 2023.

LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *J. Fluid Mech.* v.140, pg. 223-256, 1984. Disponível em: <https://10.1017/S0022112084000586>. Acesso em: 11 mar. 2023.

Li, Tingwen and Benyahia, Sofiane. "Revisiting Johnson and Jackson boundary conditions for granular flows." *AIChE Journal*. v. 58, pg. 7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aic.12728>. Acesso em: 15 mar. 2023.

M. Banaei, J. Jegers, M. van Sint Annaland, J.A.M. Kuipers, N.G. Deen, Tracking of particles using TFM in gas-solid fluidized beds, *Advanced Powder Technology*. v. 29, pg. 2538-2547, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.07.007>. Acesso em: 15 mar. 2023.

OGAWA, S.; UMEMURA, A.; OSHIMA, N. On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials. *J. Appl. Math. Phys.* v.31, 1980.

SYAMLAL, M.; O'BRIEN, T. J. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. *AIChE Symp. Series*. v. 85, p.22-32, 1989.

SYAMLAL, M.; ROGERS, W.; O'BRIEN, T. J. MFIX Documentation: Volume1, Theory Guide. *National Technical Information Service*, Springfield, 1993.

SYAMLAL, M. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization. *National Technical Information Service*, Springfield, 1987.

K. Niyogi, Maria M. Torregrosa, Maria N. Pantzali, Geraldine J. Heynderickx, Guy B. Marin, Experimentally validated numerical study of gas-solid vortex unit hydrodynamics, *Powder Technology*. v. 305, pg. 794-808, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.049>. Acesso em: 15 mar. 2023.

Sirisha Parvathaneni, Vivek V. Buwa, Eulerian multifluid simulations of segregation and mixing of binary gas-solids flow of particles with different densities, *Chemical Engineering Science*. v. 245, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116901>. Acesso em: 15 mar. 2023.

TAGHIPOUR, F.; ELLIS, N.; WONG, C. Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, v.60, pg. 6857 – 6867, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.044>. Acesso em: 15 mar. 2023.

T.M. Freitas, L.S. Arrieche, D.C. Ribeiro, D. Gidaspow, M.S. Bacelos, CFD analysis of fluidized beds using wastes from post-consumer carton packaging, *Chemical Engineering and Processing: **Process Intensification***, v. 111, pg. 89-100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.12.002>. Acesso em: 15 mar. 2023.

Y. Song, J. Zhu, C. Zhang, Z.N. Sun, X.F. Lu, Comparison of liquid-solid flow characteristics in upward and downward circulating fluidized beds by CFD approach, *Chem. Eng. Sci.* 196 (2019) 501–513. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.11.022>. Acesso em: 15 mar. 2023.

ZIMMERMANN, S.; TAGHIPOUR, F. CFD Modeling of the Hydrodynamics and Reaction Kinetics of FCC Fluidized-Bed Reactors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, n.44, p.9818-9827, 2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie050490%2B#>. Acesso em: 15 mar. 2023.

APÊNDICE A

A combinação realizada do compósito PEBD/AL com as partículas de areia resultou nas misturas de leito apresentadas na Tabela A1.

Tabela A1: Razão de diâmetro e fração de massa que foram analisadas em leito contendo misturas de areia e compósito LDPE/Al.

Mistura	(D _c /D _s)	Fração de Massa (% w/w)	
		areia	PEDB/Al
1	0,67	90	10
2	0,67	80	20
3	0,67	70	30
4	3,48	90	10
5	3,48	80	20
6	3,48	70	30
7	6,33	90	10
8	6,33	80	20
9	6,33	70	30

Fonte: Santos *et al.* 2023.

A Tabela A2 exibe as características físicas analisadas por Santos *et al.* (2023). A densidade e o diâmetro das partículas foram avaliados através de picnometria líquida e peneiramento, respectivamente. Ao considerar as dimensões da peneira conforme as normas ASTM, o diâmetro das partículas foi determinado utilizando as médias das aberturas das malhas entre duas peneiras consecutivas. A esfericidade foi estabelecida por meio de um equilíbrio de momento no leito.

Tabela A2: Propriedades Físicas das partículas utilizadas

Material	Densidade de partículas (kg/m ³)	Peneira ASTM Tamanho (mm)	Partícula diâmetro (mm)	Esfericidade (-)
PEDB/Al	943	0,355	0,30	0,81
		0,250		
		1,70	1,57	
		1,40		
		3,35	2,85	
areia	2515	2,36		
		0,500	0,45	0,87
		0,425		

Fonte: Santos *et al.* 2023.

A tabela A3 apresenta o planejamento de experimentos proposto por Santos *et al.* (2023) para analisar o efeito da fração de massa do compósito LDPE/Al, da razão do diâmetro das partículas e velocidade do ar no índice de mistura.

Tabela A3: Matriz de Planejamento

Planejamento de Experimento	D_c	D_c / D_s	X_c (% p/p)	V_{mf} (m/s)	V/V_{mf}	$I_{M, TOPO}$	$I_{M, MEIO}$
1	0,3	0,67	10	0,19	1,1	0,934	1,014
2	0,3	0,67	10	0,19	1,25	0,957	0,915
3	0,3	0,67	10	0,19	1,4	0,904	0,971
4	0,3	0,67	20	0,20	1,1	0,99	1,02
5	0,3	0,67	20	0,20	1,25	0,99	1,007
6	0,3	0,67	20	0,20	1,4	0,995	0,963
7	0,3	0,67	30	0,22	1,1	1,074	1,027
8	0,3	0,67	30	0,22	1,25	1,076	0,913
9	0,3	0,67	30	0,22	1,4	0,981	1,062
10	1,57	3,49	10	0,21	1,1	1,175	1,035
11	1,57	3,49	10	0,21	1,25	1,125	1,009
12	1,57	3,49	10	0,21	1,4	1,112	1,009
13	1,57	3,49	20	0,22	1,1	1,405	0,958
14	1,57	3,49	20	0,22	1,25	1,335	1,007
15	1,57	3,49	20	0,22	1,4	1,386	0,984
16	1,57	3,49	30	0,27	1,1	1,824	0,943
17	1,57	3,49	30	0,27	1,25	1,159	1,048
18	1,57	3,49	30	0,27	1,4	1,244	0,994
19	2,85	6,33	10	0,18	1,1	1,628	0,927
20	2,85	6,33	10	0,18	1,25	1,729	0,868
21	2,85	6,33	10	0,18	1,4	1,449	0,962
22	2,85	6,33	20	0,17	1,1	1,473	1,051
23	2,85	6,33	20	0,17	1,25	1,543	1,066
24	2,85	6,33	20	0,17	1,4	1,401	1,081
25	2,85	6,33	30	0,16	1,1	1,397	1,044
26	2,85	6,33	30	0,16	1,25	1,590	0,989
27	2,85	6,33	30	0,16	1,4	1,350	1,051

Fonte: Santos *et al.* 2023.