



SEGREGAÇÃO EM LEITO DE JORRO CÔNICO COM MISTURA DE AREIA E COMPÓSITO DE POLIETILENO/ALUMÍNIO

CONICAL SPOUTED BED SEGREGATION COMPOSED OF SAND AND POLYETHYLENE/ALUMINUM COMPOSITE MIXTURE

SEGREGACIÓN EN LECHO CÓNICO DE CHORRO CON MEZCLA DE ARENA Y COMPUESTO DE POLIETILENO/ALUMINIO

Victor Rocon Covre ^{1a}, Renata Falqueto Louvem ^{2b}, Jardel Leno Zancanella Melo ^{3b}, Daniel da Cunha Ribeiro ^{4b}, & Marcelo Silveira Bacelos ^{5b*}

^a Departamento de Engenharias e Tecnologia (DET), Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). ^b Programa de Pós-Graduação em Energia, Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

¹vcovre@hotmail.com ²renata.louvem@edu.ufes.br ³jardelleno@gmail.com ⁴daniel.ribeiro@ufes.br ⁵marcelo.bacelos@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 30.11.2024

Aprovado: 05.02.2024

Disponibilizado: 16.02.2024

PALAVRAS-CHAVE: Pirólise; mistura binária; Fluidodinâmica computacional; coeficiente de especularidade.

KEYWORDS: Pyrolysis; binary mixture; Computational fluid dynamics; specularity coefficient.

PALABRAS CLAVE: Pirólisis; mezcla binaria; Dinámica de fluidos computacional; coeficiente de especularidad.

*Autor Correspondente: Bacelos, M. S.

RESUMO

Leito de jorro cônico é uma importante alternativa de reator gás-sólido para o processo de pirólise de compósito PEBD/Al, pois proporciona menor queda de pressão e maior turbulência em comparação ao leito fluidizado equivalente. Material inerte é adicionado para promover estabilidade do regime de escoamento e aumentar a taxa de transferência de calor, porém essa prática pode resultar em segregação indesejada. Assim, esta pesquisa aprofunda o conhecimento experimental e computacional acerca da fluidodinâmica ao prever o impacto do coeficiente de especularidade sobre a previsão da concentração de partículas ao longo da coluna cônica do leito de jorro. Análise CFD foi desenvolvida em Software FLUENT 13, aplicando o Modelo Multifásico Granular Euleriano (EGMM), modelo de arraste de Gidaspow e turbulência k-ε disperso. Experimentos apontam baixa segregação, reafirmando o leito de jorro cônico como alternativa para o processo. Inicialmente, o aumento na velocidade do ar tende a aumentar a segregação, contudo níveis ainda mais elevados provocam colisões entre partículas e parede, alterando a trajetória regular e, assim, reduzindo a segregação. Valores de coeficiente de especularidade menores geraram melhores resultados nas simulações CFD, indicando que o sistema apresenta baixo valor de fricção com a parede.

ABSTRACT

The conical spouted bed is an important gas-solid reactor alternative for the pyrolysis process of LDPE/Al composite, as it provides lower pressure drop and higher turbulence compared to the equivalent fluidized bed. Inert material is

added to promote flow regime stability and increase the heat transfer rate. However, this practice can lead to unwanted segregation. Therefore, this research deepens the experimental and computational knowledge of fluid dynamics by predicting the impact of the specularity coefficient on the particle concentration prediction along the spouted bed's conical column. CFD analysis was developed in FLUENT 13 software, applying the Eulerian Granular Multiphase Model (EGMM), Gidaspow drag model, and dispersed k-ε turbulence model. Experiments indicate low segregation, reaffirming the conical spouted bed as an alternative for the process. Initially, an increase in air velocity tends to increase segregation. Even higher levels cause collisions between particles and the wall, altering the regular trajectory and thus reducing segregation. Lower specularity coefficient values yielded better results in CFD simulations, indicating that the system has a low friction value with the wall.

RESUMEN

El lecho cónico de chorro es una alternativa importante de reactor gas-sólido para el proceso de pirólisis del compósito PEBD/Al, ya que proporciona una menor caída de presión y una mayor turbulencia en comparación con el lecho fluidizado equivalente. Se añade material inerte para promover la estabilidad del régimen de flujo y aumentar la tasa de transferencia de calor, pero esta práctica puede resultar en segregación no deseada. Por lo tanto, esta investigación profundiza en el conocimiento experimental y computacional de la fluidodinámica al prever el impacto del coeficiente de especularidad en la predicción de la concentración de partículas a lo largo de la columna cónica del lecho eyector. El análisis CFD se desarrolló en el software FLUENT 13, aplicando el Modelo Multifásico Granular Euleriano (EGMM), el modelo de arrastre de Gidaspow y el modelo de turbulencia k-ε disperso. Los experimentos indican una baja segregación, reafirmando el lecho cónico de chorro como alternativa para el proceso. Inicialmente, el aumento en la velocidad del aire tiende a aumentar la segregación, pero niveles aún más altos provocan colisiones entre partículas y la pared, alterando la trayectoria regular y, así, reduciendo la segregación. Valores más bajos del coeficiente de especularidad.

1. INTRODUÇÃO

O Leito de jorro cônico é considerado um sistema de contato gás-sólido importante, pois pode ser aplicado a situações em que o leito fluidizado apresenta limitações, como em processos envolvendo partículas grossas (com diâmetro de partícula maior que 1mm) ou irregulares e em leito composto por misturas de partículas (Epstein & Grace, 2010; Mathur & Gishler, 1955; Olazar et al., 2003). Leitos de jorro cônico normalmente operam com menor queda de pressão em relação ao equivalente leito fluidizado, e apresentam maior turbulência na região de jorro (Aguado et al., 2005). Menor queda de pressão resulta em uma redução do consumo energético do soprador, e o aumento da turbulência leva a uma maior taxa de transferência de massa e energia no interior do reator.

De acordo com a literatura, os leitos de jorro cônicos têm sido aplicados em vários processos como por exemplo a pirólise de biomassa (Alvarez et al., 2014; Amutio et al., 2011, 2012; Barrozo et al., 2019a; López et al., 2010; Park et al., 2017) e rejeitos plásticos (Arabiourrutia et al., 2017; Niksiar et al., 2015; Niksiar & Sohrabi, 2014), polimerização catalítica (Olazar et al., 1994, 1997), secagem (Altzibar et al., 2008; Bachelos et al., 2005; San José et al., 2018) e entre outros. Em processos de pirólise de poliolefinas, a técnica tem ganhado destaque devido a busca de um desenvolvimento sustentável frente a crescente produção global de resíduos (Arabiourrutia et al., 2012; Mantegazini, Neves, et al., 2021).

Na pirólise em reator de leito de jorro cônico, o inerte sólido é adicionado para promover a estabilidade do regime de jorro e o rápido aquecimento do compósito de polietileno/alumínio (Alvarez et al., 2014; Libardi et al., 2016; López et al., 2010). Apesar dos potenciais benefícios dessa adição para o processo, é importante considerar a ocorrência indesejada de segregação devido a diferenças de tamanho e massa específica entre as partículas de inerte e o resíduo sólido. A segregação pode influenciar a estabilidade do regime de jorro (Bachelos et al., 2008; Bachelos & Freire, 2005; J. San Jose et al., 2002; Kiani et al., 2017; Mantegazini, Xavier, et al., 2021; Olazar et al., 2002) e criar zonas de aglomerados (Barrozo et al., 2019b), inviabilizando a pirólise do compósito de polietileno/alumínio.

Visando estudar a segregação em leito de jorro cônico, Bachelos & Freire (2005) e San Jose et al. (1993 e 1994) conduziram experimentos com misturas de partículas de diferentes propriedades (diâmetro de partícula e massa específica) para compreender melhor este fenômeno físico. Baseado no trabalho desses autores, Rovero & Piccinini (2011) observaram que a segregação acontece principalmente devido a diferença na trajetória das partículas na região de fonte, provocada pela ação das forças de arraste e da gravidade sobre cada partícula.

Cabe mencionar que a compreensão do escoamento gás-sólido em leito de jorro cônico com mistura de partículas é uma tarefa difícil devido à alta complexidade deste sistema de contato gás-sólido. Entretanto, os avanços na tecnologia de hardware computacional e de algoritmos numéricos permitem o desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam os pesquisadores na modelagem do escoamento nestes sistemas (Hosseini et al., 2010; Mahmoodi et al., 2017; Marques et al., 2012; Melo et al., 2016). Apesar disso, foram encontrados poucos trabalhos de modelagem CFD para prever o regime de jorro estável e

segregação de partículas com verificação experimental em leito de jorro cônico com misturas binárias (Santos et al., 2017).

Simulações do escoamento gás-sólido em Leito de Jorro demonstram que o modelo Euler-Euler é sensível aos parâmetros como: gradiente de pressão real (APG), coeficiente de arrasto, coeficiente de restituição interpartículas e especularidade, e tensões de atrito sólido. Portanto, a aplicação bem-sucedida desta abordagem depende principalmente do fechamento das equações de momento. Um desafio importante que se apresenta nos estudos de CFD de leitos de jorro reside na descrição adequada da turbulência inerente tanto para a fase sólida quanto para a fase gasosa, especialmente para a região do jorro (Epstein & Grace, 2010). É importante destacar que o modelo $k-\varepsilon$ disperso apresentou resultados satisfatórios na previsão de parâmetros operacionais do Leito de jorro cônico com misturas binárias como a queda de pressão e altura de fonte das partículas (Marques et al., 2012; Melo et al., 2016).

Para leito de jorro com monopartículas, os autores Ahmadabadi et al. (2020) e Lan et al. (2012) identificaram que o coeficiente de especularidade está associado à interação das partículas com a parede e estudaram o efeito dele sobre a queda de pressão no leito. De acordo com Li & Benyahia (2012) este parâmetro pode ser definido como uma equação onde o coeficiente de especularidade é inversamente proporcional à velocidade da partícula. Além disso, o efeito do coeficiente de especularidade pode favorecer a previsão do índice de mistura conforme relatado por Setarehshenas et al. (2016).

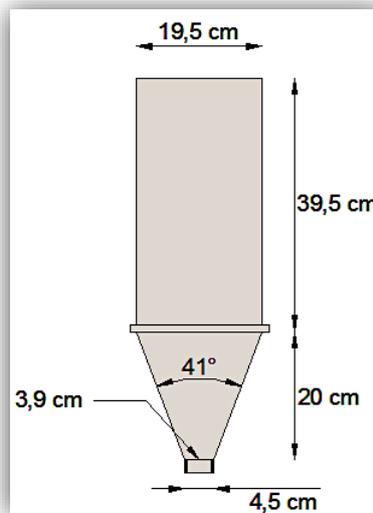
Baseado na Literatura, a novidade desta pesquisa é prever o impacto do coeficiente de especularidade sobre a previsão da concentração de partículas (denotado pelo índice de mistura) ao longo da coluna cônica do leito de jorro. Para alcançar este objetivo, experimentos e simulações computacionais são realizados empregando leitos com misturas (areia e compósito PEBD/Al) de partículas. Em cada região da coluna cônica, a concentração de partículas prevista pelo modelo Euler-Euler $k-\varepsilon$ disperso é comparada com a experimental. Esta pesquisa contribui para a produção de combustível derivados de resíduos de poliolefinas e a recuperação do alumínio das embalagens cartonadas (compósito de polietileno-alumínio) bem como para a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos em Países em desenvolvimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Experimentos foram realizados em planta piloto composta por leito de jorro cônico, soprador centrífugo com controle de vazão de ar e transdutor de pressão. As dimensões do leito de jorro são mostradas na figura 1. O motor do soprador possui 2,0 HP de potência e é capaz de prover 4,5 m³/min de ar. O transdutor de pressão opera na faixa de 0 a 20 inH₂O ($\pm 1\%$) e está localizado na entrada de ar. O sinal de saída gerado pelo transdutor de pressão é processado por software computacional (LabVIEW 7), permitindo melhor análise dos dados de queda de pressão.

Figura 1. Dimensões do leito de jorro cônico.



Fonte: Autores (2023).

O material particulado do leito de jorro foi composto por mistura de partículas de PEBD/Al e areia. As partículas selecionadas pertencem ao grupo D da classificação de Geldart, assim essas partículas devem atingir regime de jorro estável (Geldart, 1973). Um resumo das propriedades de partículas é mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Resumo das propriedades de partículas.

| Propriedades | PEBD/Al | Areia |
|--|---------|-------|
| ρ_p (kg/m ³) | 828 | 2340 |
| d_p (mm) | 2,58 | 2,58 |
| ϵ_0 (m ³ /m ³) | 0,48 | 0,45 |

Fonte: Autores (2023).

O experimento de análise fluidodinâmica foi conduzido para investigar o efeito do coeficiente de especularidade sobre a queda de pressão e o índice de mistura. Assim sendo, o leito foi preenchido com uma mistura de areia e PEBD/Al com fração mássica de 25% de PEBD/Al, até atingir altura de leito estático de 0,15 m. Em seguida, ar foi injetado na entrada do leito até alcançar 30% da velocidade mínimo jorro. Durante o processo de injeção de ar no leito a queda de pressão do leito foi medida com um transdutor. Para o parâmetro de especularidade, foram empregados os valores de 0,01 e 0,05 que implicam em aplicar uma tensão de 1 e 5% em relação à tensão máxima na parede.

Li & Benyahia (2012) descreveram o coeficiente de especularidade efetivo como uma função da velocidade da partícula, propriedades da partícula e transferência de momento tangencial que está representada pela equação 1. Onde $\bar{M}_{t,w}$ representa o momento tangencial médio transferido por colisão, ρ_p a massa específica da partícula, d_p o diâmetro da partícula e u a velocidade da partícula.

$$\varphi = \frac{6\bar{M}_{t,w}}{\rho_p \pi d_p^3 u} \quad (1)$$

Neste experimento, velocidade de mínimo jorro foi considerada como a velocidade mais baixa em que foi possível observar regime de jorro estável. A queda de pressão máxima foi identificada como a maior queda de pressão observada durante a transição do leito fixo para o regime de jorro. E por fim, a queda de pressão durante o regime de jorro estável foi calculada como a média dos valores de queda de pressão experimental enquanto o sistema apresentava regime de jorro estável.

Foi realizado um procedimento experimental para avaliar o efeito da velocidade do ar na entrada sobre a segregação de partículas no leito de jorro cônico. Similar ao procedimento anterior, o leito foi preenchido com material particulado até atingir altura de leito estático igual a 0,15 m. Em seguida, ar foi injetado na entrada, e ajustado para um valor pré-definido. Após 5 minutos de jorro estável, o soprador foi subitamente desligado, cessando o fluxo ascendente de ar. Desta forma, o sistema retornou ao estado de leito estático, então placas de metal foram introduzidas em orifícios laterais do leito, separando o material particulado em zonas internas.

A mistura de partículas usada foi composta por 25% de PEBD/Al e 75% de areia. Esta razão de mistura apresenta estabilidade desejada para o regime de jorro (Melo et al., 2016). Para medir a concentração axial de partículas no leito cônico, cinco guilhotinas são utilizadas em uma determinada condição operacional estabelecida pelo projeto de experimentos. Estas medições permitem capturar partículas em cinco regiões axiais da coluna cônica. Para cada zona interna, as partículas na mistura foram coletadas, separadas por peneiramento e a fração mássica calculada. O índice de mistura (Kutluoglu et al., 1983) foi calculado pela equação 2, onde $X_{b(i)}$ representa a fração mássica de compósito em cada região i e X_b a fração mássica inicial de compósito (25%).

$$I_{m(i)} = \frac{\overline{X_{b(i)}}}{\overline{X_b}} \quad (2)$$

Experimentos foram realizados com três níveis de velocidade do ar na entrada (10, 20 e 30% superior à velocidade de mínimo jorro). Além disso, estes experimentos seguiram os mesmos passos descritos no procedimento experimental para análise fluidodinâmica, assim, dados de velocidade de mínimo jorro e queda de pressão foram registrados. Desta forma, essas informações puderam ser usadas para comparação de parâmetros fluidodinâmicos e de segregação com dados gerados em análises CFD.

2.2 METODOLOGIA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Análise CFD foi desenvolvida no software ANSYS FLUENT 13. Um resumo dos parâmetros operacionais aplicados é mostrado na tabela 2. Geometria axissimétrica 2D foi selecionada para simplificar o modelo, reduzindo assim demanda de recursos computacionais e tempo requerido para o processamento de cada caso.

Como o sistema apresenta altos valores de fração volumétrica (>10%) e ampla distribuição da fase dispersa pelo leito, o Modelo Multifásico Granular Euleriano (EGMM) foi considerado nesta aplicação (Southpointe, 2013). O fechamento do tensor de tensões da fase sólida é obtido a partir da hipótese de equilíbrio entre geração e dissipação de energia granular

(Syamlal et al., 1993). O modelo de arraste de Gidaspow et al. (1991) e o modelo de turbulência k-ε disperso apresentaram resultados adequados de comportamento de jorro em simulações CFD com partículas similares (Melo et al., 2016), por isso esses modelos também foram selecionados nesta pesquisa.

Os casos foram resolvidos usando o método SIMPLE (Patankar, 1980) com fases acopladas de pressão-velocidade. Gradiente baseado no mínimo quadrado das células, com discretização Upwind de primeira ordem, foi aplicado em cada equação de modelo. O passo de tempo no modelo transiente foi ajustado para 1×10^{-4} s para melhorar a convergência da solução.

Encontrar um balanço entre tamanho das células e qualidade da malha é muito importante. Uma malha com elementos grandes pode levar a resultados imprecisos. Por outro lado, malhas mais finas tendem a resultar em cálculos mais precisos, porém elas requerem mais recursos computacionais. Assim, um teste de independência de malha foi realizado, para garantir que a qualidade da malha computacional não afete negativamente os resultados, ao mesmo tempo em que não exija mais recursos do que o necessário.

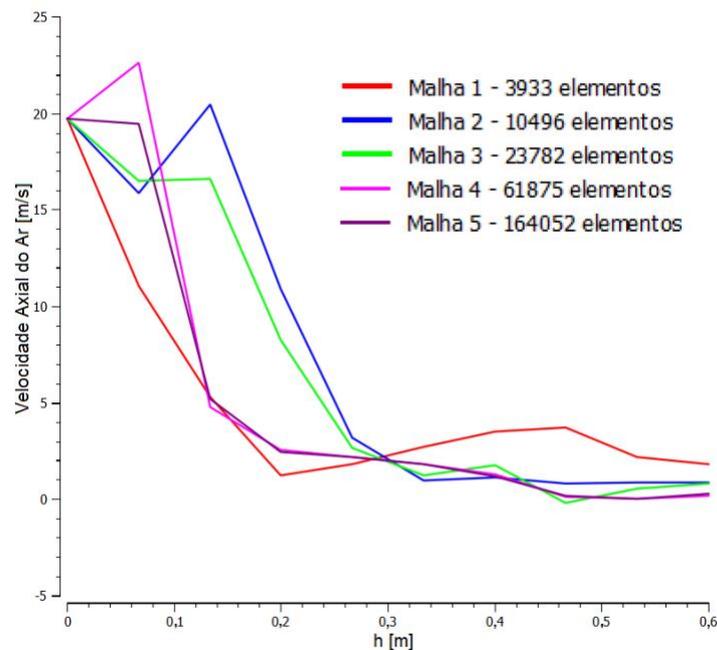
Tabela 2. Resumo de parâmetros operacionais aplicados.

| Parâmetro | Descrição/valor |
|------------------------------|---|
| Solução | |
| Baseado em Pressão | |
| Transiente | |
| Axissimétrico 2D | |
| Modelos | |
| EGMM | 3 fases (Ar, Areia e PEBD/Al) |
| Modelo de Turbulência | k-epsilon disperso |
| Modelo de Arraste | Gidaspow et al. (1991) |
| Materiais | |
| Densidade do Ar | 1,162 kg·m ⁻³ |
| Viscosidade do Ar | 1,862 x 10 ⁻⁵ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ |
| Densidade da Areia | 2340 kg·m ⁻³ |
| Densidade do PEBD/Al | 828 kg·m ⁻³ |
| Fase | |
| Diâmetro de Partícula | 0,00258 m |
| Viscosidade Granular | Syamlal et al. (1993) |
| Viscosidade Granular de Bulk | Lun et al. (1984) |
| Temperatura Granular | Algébrico |
| Pressão de Sólido | Syamlal et al. (1993) |
| Distribuição Radial | Syamlal et al. (1993) |
| Limite de empacotamento | Areia PEBD/Al 0,55 0,52 |
| Condições de Contorno | |
| Entrada | Velocidade Axial do Ar (m/s) 16,6 18,2 19,7 |
| Saída | Saída-Pressão (pressão atmosférica) |
| Parede | Coefficiente de Especificidade 0,00 0,01 0,05 Sem Deslizamento |
| Condições Iniciais | |
| Altura do Leito | 0,15 m |
| Composição do Leito | 25% PEBD/Al (massa) |
| Velocidade do Ar | 0 m/s |

Fonte: Autores (2023).

Primeiro, um caso usando parâmetros descritos na tabela 2 foi resolvido a partir de uma malha inicial com elementos grandes. A velocidade média axial do ar foi registrada no passo de tempo final (10 s). Em seguida, uma malha mais fina, com elementos de aproximadamente 1,5 vezes menores, foi usada para resolver o mesmo caso. Velocidade axial foi igualmente registrada e comparada aos resultados da malha mais grossa. Este procedimento foi repetido até o efeito do tamanho da malha ser considerado suficientemente reduzido. Os resultados de velocidade axial do ar para cada tamanho de malha testado são mostrados na Figura 2.

Figura 2. Resultados de velocidade média axial do ar em função da altura do leito para cada tamanho de malha testado.



Fonte: Autores (2023).

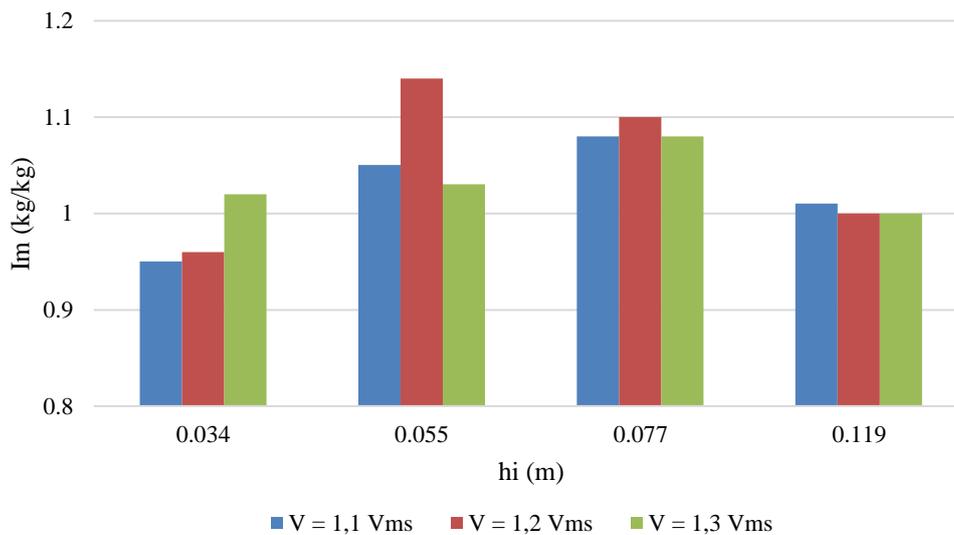
A malha 4 (61875 elementos) e a malha 5 (165052 elementos) apresentaram divergências de aproximadamente 15% em valor, próximo a região de entrada do leito ($h < 0,1$ m), porém não houve nenhuma evidência de divergência significativa em outras regiões do leito. A malha 5 tem aproximadamente 2,6 vezes mais elementos do que a malha 4, por isso adotar a malha 5 implicaria em um excessivo aumento na demanda de recursos computacionais. Considerando o baixo grau de divergência entre essas duas malhas, foi decidido que a malha 4 tem qualidade necessária para ser aplicada nos casos seguintes.

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DE SEGREGAÇÃO

Resultados experimentais da análise de segregação são mostrados na Figura 3. No geral, valores de índice de mistura para os experimentos indicam que a segregação foi mantida em níveis toleráveis (entre 0,8 e 1,2). Este resultado reafirma o leito de jorro cônico como alternativa para processos que demandam baixa segregação de partículas.

Figura 3. Valores experimentais de índice de mistura em função da altura do leito de jorro cônico e velocidade do ar na entrada.



Fonte: Autores (2023).

Embora segregação seja baixa, um pico de valor de índice de mistura foi registrado a $h_i=0,055$ m e $V=1,2 V_{ms}$. Variações na trajetória das partículas na região de fonte são as principais causas de segregação no leito de jorro cônico, assim o aumento da velocidade do ar implica num aumento da altura de fonte e na distância da trajetória parabólica durante a queda da partícula até a região anular (Bachelos et al., 2008). Este aumento na trajetória age diferentemente de acordo com a massa de cada partícula, de forma que o aumento na velocidade do ar aumenta a diferença entre as distâncias radiais percorridas pelas partículas leves e pesadas, contribuindo com o aumento da segregação. Além disso, uma fonte mais alta também causa maior número de colisões entre partículas, o que reduz a dispersão (Kutluoglu et al., 1983).

Por outro lado, uma velocidade ainda maior ($V=1,3 V_{ms}$) apresentou melhores resultados de segregação. Isto pode ser explicado, porque aumentando continuamente a distância radial da trajetória parabólica, as partículas irão colidir com a parede antes de chegar à região anular, alterando o padrão de trajetória da partícula. Esta interferência da parede aumenta a dispersão de partículas na fonte, reduzindo assim a segregação.

3.2 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A tabela 3 mostra os resultados de queda de pressão para diferentes configurações de interação com a parede e para cada velocidade do ar simulada. Pode-se observar que os valores do coeficiente de especularidade apresentam papel importante na estimativa de queda de pressão. Este efeito acontece devido ao comportamento típico de jorro, em que partículas próximas da parede estão sempre em movimento descendente. Tal movimento faz com que a fricção com a parede resulte em um vetor de força global de sentido ascendente agindo sobre a fase particulada. Embora exista fluxo interno de partículas, a fase de partículas de forma global está estacionária, portanto, a soma das forças global que agem sobre esta fase deve ser nula.

Tabela 3. Dados de queda de pressão no leito e o erro relativo em relação ao experimental, para cada valor de velocidade do ar e coeficiente de especularidade empregado.

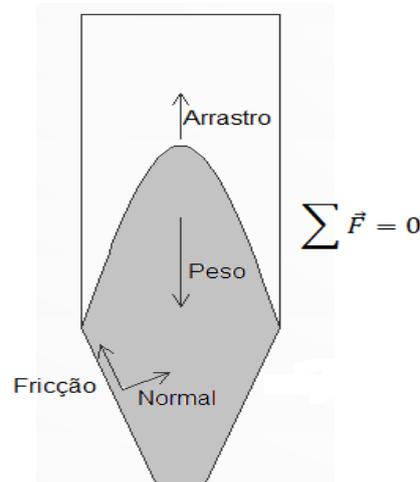
| Condição | Queda de Pressão (Pa) | Erro Relativo* (%) |
|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| Experimental | 1200,70 | |
| V = 1,1 V _{ms} | | |
| φ = 0,00 | 1316,24 | 9,62 |
| φ = 0,01 | 1224,96 | 2,02 |
| φ = 0,05 | 1061,43 | 11,60 |
| Sem Deslizamento | 973,04 | 18,96 |
| V = 1,2 V _{ms} | | |
| φ = 0,00 | 1318,05 | 9,77 |
| φ = 0,01 | 1204,17 | 0,29 |
| φ = 0,05 | 1061,89 | 11,56 |
| Sem Deslizamento | 945,28 | 21,27 |
| V = 1,3 V _{ms} | | |
| φ = 0,00 | 1212,66 | 0,99 |
| φ = 0,01 | 1088,84 | 9,32 |
| φ = 0,05 | 975,80 | 18,73 |
| Sem Deslizamento | 935,14 | 22,12 |

$$\text{*Erro Relativo (ER)} = \frac{|\Delta P_{exp} - \Delta P_{sim}|}{\Delta P_{exp}} * 100$$

Fonte: Autores (2023).

À medida que a velocidade do ar aumenta na entrada do jorro, o leito na região cônica tende a ficar mais diluído, e nessa condição, o coeficiente de especularidade exerce menor efeito. A queda de pressão simulada e experimental ficam mais próximas à medida que a velocidade do ar aumenta.

O diagrama de forças agindo sobre a fase particulada é mostrado na figura 4. Adicionando um vetor de força ascendente, a força de arraste necessária no balanço de força é reduzida. Como a queda de pressão acontece devido ao arraste de partículas, uma redução no valor global da força de arraste provoca uma redução na queda de pressão. Um coeficiente de especularidade de valor menor significa menor efeito da força de fricção, então a queda de pressão tende a ser maior nestes casos, entretanto na condição de não deslizamento (efeito de fricção máximo), a queda de pressão diminui.

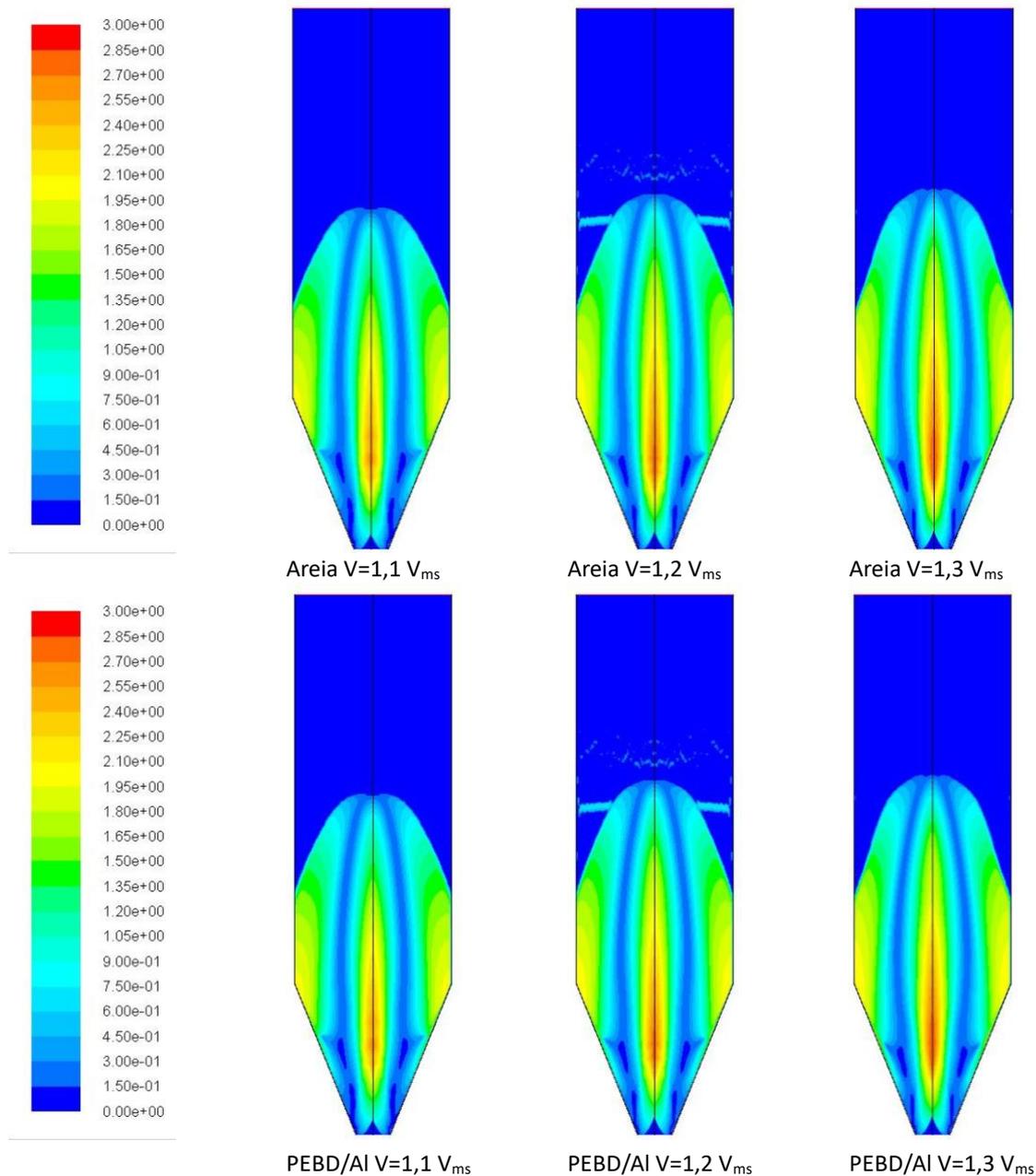
Figura 4. Diagrama de forças agindo sobre a fase particulada.

Fonte: Autores (2023).

Verificando o erro relativo na tabela 3, observa-se que melhores resultados foram alcançados a baixos valores de coeficiente de especularidade, indicando que o sistema apresenta baixo valor de fricção com a parede. A condição $\phi=0,01$ representa melhor os dados em velocidades do ar mais baixas, contudo, em velocidades mais altas ($V = 1,3 V_{ms}$), a condição de $\phi=0,00$ é mais adequada. Este resultado está em concordância com outros estudos (Cloete et al., 2016; Li & Benyahia, 2013).

O coeficiente de especularidade efetivo é inversamente proporcional à velocidade da partícula. Na figura 5, são mostrados valores de velocidades de partículas para areia e PEBD/Al obtidos em simulação CFD a mesmo coeficiente de especularidade ($\phi=0,01$) mas a diferentes velocidades do ar. Velocidade de partículas próximas à parede tende a aumentar suavemente com o aumento da velocidade do ar, reduzindo assim o coeficiente de especularidade efetivo.

Figura 5. Valores de velocidade de partícula obtidos em simulação CFD ($\phi = 0.01$).



Fonte: Autores (2023).

Medidas de segregação experimental durante o regime de pleno jorro são tarefas difíceis devido à necessidade de aplicar técnicas avançadas de rastreamento de partículas. Assim, resultados de CFD podem ajudar a estimar a segregação durante o regime de jorro. As figuras 6 e 7 mostram a fração volumétrica de areia e PEBD/Al em simulação CFD, respectivamente. Resultados revelam que o índice de mistura se manteve entre 0,99 e 1,01 em todas as zonas do leito de jorro cônico, indicando que não existem evidências de segregação significativa. Embora a segregação não tenha sido detectada, é notável que a concentração de partículas na base do leito é maior a menores velocidades do ar. Concentração desequilibrada de partículas pode criar problemas em alguns processos e, portanto, deve ser evitada (I.D. Burdett et al., 2001).

Figura 6. Fração volumétrica de areia em simulação CFD ($\phi=0,01$).

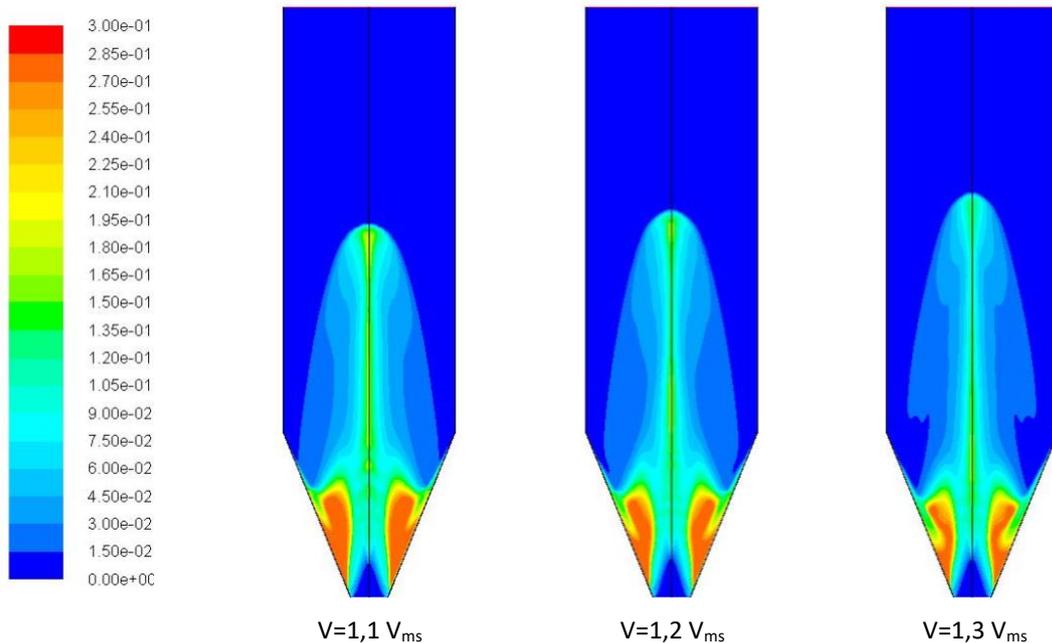
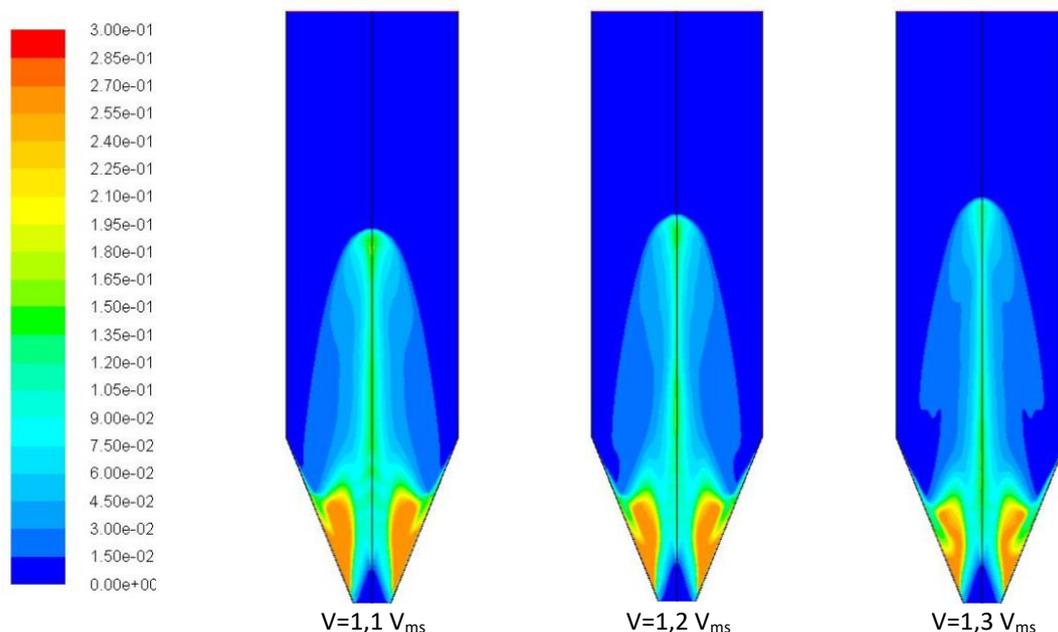


Figura 7. Fração volumétrica de composto PEBD/Al em simulação CFD ($\phi=0,01$).



Fonte: Autores (2023).

O procedimento experimental previamente descrito para a análise de segregação foi adaptado para casos computacionais. Na tabela 4, é mostrada comparação entre dados experimentais e simulados de índice de mistura para cada região do leito. Simulações CFD foram conduzidas em duas condições de coeficiente de especularidade ($\phi=0,00$ e $\phi=0,01$). Esses valores foram escolhidos não apenas porque geraram melhores resultados para queda de pressão, mas também porque coeficientes de especularidade mais altos causam problemas na convergência da solução, sendo difícil de obter resultados adequados.

Verificando os valores de erro relativo na tabela 4, pode-se dizer que, entre as duas condições simuladas, $\phi=0,01$ tende a gerar resultados de índice de mistura com maior exatidão para todas as velocidades do ar testadas, até mesmo para $V=1,3 V_{ms}$, em que $\phi=0,00$ apresentou melhores resultados de queda de pressão. Quando a entrada do leito é bloqueada, a velocidade do ar é reduzida, provocando uma queda global no valor de velocidade de partícula. Assim, de acordo com a equação 2, é natural observar um aumento no valor do coeficiente de especularidade efetivo, uma vez que houve redução na velocidade de partícula. Desta forma, é possível que coeficientes de especularidade mais altos ($\phi>0,01$) nos parâmetros de simulação posam atingir melhores resultados.

Tabela 4. Comparação entre dados experimentais e simulados de índice de mistura para cada região do leito.

| Altura do Leito (m) | Experimental | $\phi = 0,00$ | Erro relativo (%) | $\phi = 0,01$ | Erro relativo (%) |
|---------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| $V = 1,1 V_{ms}$ | | | | | |
| h=0,034 | 0,95 | 0,94 | 1,05 | 0,93 | 2,11 |
| h=0,055 | 1,05 | 0,95 | 9,52 | 0,97 | 7,62 |
| h=0,077 | 1,08 | 0,97 | 10,19 | 0,99 | 8,33 |
| h=0,119 | 1,01 | 1,01 | 0 | 1,02 | 0,99 |
| $V = 1,2 V_{ms}$ | | | | | |
| h=0,034 | 0,96 | 1,00 | 4,17 | 0,98 | 2,08 |
| h=0,055 | 1,14 | 1,00 | 12,28 | 0,99 | 13,16 |
| h=0,077 | 1,10 | 0,99 | 10,00 | 0,99 | 10,00 |
| h=0,119 | 1,00 | 1,01 | 1,00 | 1,01 | 1,00 |
| $V = 1,3 V_{ms}$ | | | | | |
| h=0,034 | 1,02 | 0,96 | 5,88 | 0,97 | 4,90 |
| h=0,055 | 1,03 | 0,98 | 4,85 | 0,99 | 3,88 |
| h=0,077 | 1,08 | 1,00 | 7,41 | 1,00 | 7,41 |
| h=0,119 | 1,00 | 1,02 | 2,00 | 1,01 | 1,00 |

$$*\text{Erro Relativo (ER)} = \frac{|h_{exp} - h_{sim}|}{h_{exp}} * 100$$

Fonte: Autores (2023).

4. CONCLUSÃO

De acordo com os dados analisados na presente pesquisa, pode-se concluir que:

- entre as condições simuladas, $\phi=0,01$ tende a gerar resultados de índice de mistura com maior exatidão para todas as velocidades do ar testadas;
- menores valores de coeficiente de especularidade geraram melhores resultados nas simulações CFD, indicando que o sistema apresenta baixo valor de fricção com a parede;
- aumento na velocidade do ar tende a ampliar a diferença de distância radial percorrida entre partículas mais leves e partículas pesadas, contudo, níveis ainda mais altos de velocidade do ar provocam um número maior de colisões com a parede, que alteram a trajetória de queda da partícula e aumentam a aleatoriedade do sistema, reduzindo a segregação;

- segregação de partícula experimental no leito foi baixa para as misturas estudadas, reafirmando o leito de jorro cônico como alternativa para processos de pirólise de compósito PEBD/Al.

Assim sendo, este trabalho pode ser útil na partida de reatores de pirólise que produzem combustíveis derivados de resíduos, minimizando a segregação e melhorando a transferência de calor para as partículas. Além disso, contribuirá com a rota de reciclagem sustentável e a valorização de resíduos sólidos.

AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro. Autora Renata Falqueto Louvem agradece à FAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Nomeclatura

| | | |
|-----------|---|----------|
| d_p | Diâmetro de partícula | [m] |
| h | Altura do leito | [m] |
| h_i | Posição axial para uma dada região no leito | [m] |
| I_m | Índice de mistura | [kg/kg] |
| $M_{t,w}$ | Momento tangencial | [kg·m/s] |
| u | Velocidade da partícula | [m/s] |
| V | Velocidade do ar na entrada | [m/s] |
| X_b | Fração mássica de compósito | [kg/kg] |

Símbolos Gregos

| | | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| ε_0 | Porosidade | [m ³ /m ³] |
| ρ_p | Massa específica da partícula | [kg/m ³] |
| ϕ | Coefficiente de especularidade | [-] |

Subscritos

| | |
|-----|--------------|
| exp | Experimental |
| ms | Mínimo jorro |
| sim | Simulação |

Siglas

| | |
|---------|---------------------------------------|
| PEBD/Al | Compósito de polietileno/alumínio |
| CFD | Fluidodinâmica computacional |
| EGMM | Modelo Multifásico Granular Euleriano |

5. REFERÊNCIAS

- Aguado, R., Alvarez, S., San José, M. J., Olazar, M., & Bilbao, J. (2005). Gas flow distribution modelling in conical spouted beds. *Computer Aided Chemical Engineering*, 20(C), 613-618. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(05\)80224-X](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(05)80224-X)
- Ahmadabadi, E. F., Haghshenasfard, M., & Eshahany, M. N. (2020). CFD simulation and experimental validation of nanoparticles fluidization in a conical spouted bed. *Chemical Engineering Research and Design*, 160, 476-485. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2020.06.018>
- Altzibar, H., Lopez, G., Alvarez, S., San José, M. J., Barona, A., & Olazar, M. (2008). A Draft-Tube Conical Spouted Bed for Drying Fine Particles. *Drying Technology*, 26(3), 308-314. <https://doi.org/10.1080/07373930801898018>
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162-169. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.02.074>
- Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2011). Effect of Vacuum on Lignocellulosic Biomass Flash Pyrolysis in a Conical Spouted Bed Reactor. *Energy and Fuels*, 25(9), 3950-3960. <https://doi.org/10.1021/EF200712H>

- Amutio, M., Lopez, G., Artetxe, M., Elordi, G., Olazar, M., & Bilbao, J. (2012). Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Resources, Conservation and Recycling*, 59, 23-31. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.04.002>
- Arabiourrutia, M., Elordi, G., Lopez, G., Borsella, E., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 230-237. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2011.12.012>
- Arabiourrutia, M., Elordi, G., Olazar, M., & Bilbao, J. (2017). Pyrolysis of Polyolefins in a Conical Spouted Bed Reactor: A Way to Obtain Valuable Products. *Em Pyrolysis*. InTech. <https://doi.org/10.5772/67706>
- Bachelos, M. S., & Freire, J. T. (2005). Stability of Spouting Regimes in Conical Spouted Beds with Inert Particle Mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(2), 808-817. <https://doi.org/10.1021/IE050633S>
- Bachelos, M. S., Passos, M. L., & Freire, J. T. (2008). Characteristics of flow in wet conical spouted beds of unequal-sized spherical Particles. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(1), 27-38. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000100005>
- Bachelos, M. S., Spitzner Neto, P. I., Silveira, A. M., & Freire, J. T. (2005). Analysis of Fluid Dynamics Behavior of Conical Spouted Bed in Presence of Pastes. *Drying Technology*, 23(3), 427-453. <https://doi.org/10.1081/DRT-200054116>
- Barrozo, M. A. S., Borel, L. D. M. S., Lira, T. S., & Ataíde, C. H. (2019a). Fluid dynamics analysis and pyrolysis of brewer's spent grain in a spouted bed reactor. *Particuology*, 42, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.001>
- Barrozo, M. A. S., Borel, L. D. M. S., Lira, T. S., & Ataíde, C. H. (2019b). Fluid dynamics analysis and pyrolysis of brewer's spent grain in a spouted bed reactor. *Particuology*, 42, 199-207. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2018.06.001>
- Cloete, J. H., Cloete, S., Radl, S., & Amini, S. (2016). Evaluation of wall friction models for riser flow. *Powder Technology*, 303, 156-167. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2016.07.009>
- Epstein, N., & Grace, J. R. (2010). Spouted and spout-fluid beds: Fundamentals and applications. *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*, 9780521517973, 1-340. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511777936>
- Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder Technology*, 7(5), 285-292. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)
- Gidaspow, D., Bezburuah, R., & Ding, J. (1991). *Hydrodynamics of circulating fluidized beds: Kinetic theory approach*. <https://www.osti.gov/biblio/5896246>
- Hosseini, S. H., Ahmadi, G., Saeedi Razavi, B., & Zhong, W. (2010). Computational fluid dynamic simulation of hydrodynamic behavior in a two-dimensional conical spouted bed. *Energy and Fuels*, 24(11), 6086-6098. <https://doi.org/10.1021/EF100612R>
- I.D. Burdett, R.S. Eisinger, P. Cai, & K.H. Lee. (2001). Gas-phase fluidization technology for production of polyolefins, in: Fluid. X. *United Engineering Foundation*, 39-52.
- J. San Jose, M., Olazar, M., J. Penas, F., & Bilbao, J. (2002). Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical Particles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33(7), 1838-1844. <https://doi.org/10.1021/ie00031a025>
- Kiani, M., Rahimi, M. R., Hosseini, S. H., & Ahmadi, G. (2017). Mixing and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density. *Particuology*, 32, 132-140. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2016.06.006>
- Kutluoglu, E., Grace, J. R., Murchie, K. W., & Cavanagh, P. H. (1983). Particle segregation in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3), 308-316. <https://doi.org/10.1002/CJCE.5450610309>
- Lan, X., Xu, C., Gao, J., & Al-Dahhan, M. (2012). Influence of solid-phase wall boundary condition on CFD simulation of spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 69(1), 419-430. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2011.10.064>
- Li, T., & Benyahia, S. (2012). Revisiting Johnson and Jackson boundary conditions for granular flows. *AIChE Journal*, 58(7), 2058-2068. <https://doi.org/10.1002/AIC.12728>
- Li, T., & Benyahia, S. (2013). Evaluation of wall boundary condition parameters for gas-solids fluidized bed simulations. *AIChE Journal*, 59(10), 3624-3632. <https://doi.org/10.1002/AIC.14132>
- Libardi, B. P., Xavier, T. P., Lira, T. S., & Barrozo, M. A. S. (2016). Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. *Powder Technology*, 299, 210-216. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2016.05.034>
- López, G., Olazar, M., Aguado, R., & Bilbao, J. (2010). Continuous pyrolysis of waste tyres in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 89(8), 1946-1952. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.03.029>
- Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., & Chepurini, N. (1984). Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield. *Journal of Fluid Mechanics*, 140, 223. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000586>
- Mahmoodi, B., Hosseini, S. H., Olazar, M., & Altzibar, H. (2017). CFD-DEM simulation of a conical spouted bed with open-sided draft tube containing fine particles. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 81, 275-287. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2017.09.051>
- Mantegazini, D. Z., Neves, F. L., Xavier, T. P., & Bachelos, M. S. (2021). Review on advanced technologies for aluminum recovery from carton packageswaste using

- pyrolysis. *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, ISSN-e 2447-5580, (Ejemplar dedicado a: Número Regular (Janeiro - Março)), 7(1), 117-129. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8698457&info=resumen&idioma=ENG>
- Mantegazini, D. Z., Xavier, T. P., & Bachelos, M. S. (2021). Conical spouted beds for waste valorization: Assessment of particle segregation in beds composed of sand and Tetra Pak residues. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101334. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101334>
- Marques, I. I. D. R., Rocha, S. M. S., Lira, T. S., & Bachelos, M. S. (2012). Air-Carton Packaging Waste Flow Dynamics in a Conical Spouted Bed. *Procedia Engineering*, 42, 70-79. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2012.07.396>
- Mathur, K. B., & Gishler, P. E. (1955). A technique for contacting gases with coarse solid particles. *Aiche Journal*, 1(2), 157-164. <https://doi.org/10.1002/AIC.690010205>
- Melo, J. L. Z., Bachelos, M. S., Pereira, F. A. R., Lira, T. S., & Gidaspow, D. (2016). CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 108, 93-108. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2016.07.011>
- Niksiar, A., Faramarzi, A. H., & Sohrabi, M. (2015). Kinetic study of polyethylene terephthalate (PET) pyrolysis in a spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 419-425. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2015.03.002>
- Niksiar, A. & Sohrabi, M. (2014). Mathematical modeling of waste plastic pyrolysis in conical spouted beds: Heat, mass, and momentum transport. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 66-78. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2014.08.005>
- Olazar, M., Alvarez, S., Aguado, R., & San José, M. J. (2003). Spouted Bed Reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 26(8), 845-852. <https://doi.org/10.1002/CEAT.200300006>
- Olazar, M., Arandes, J. M., Zabala, G., Aguayo, A. T., & Bilbao, J. (1997). Design and Operation of a Catalytic Polymerization Reactor in a Dilute Spouted Bed Regime. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(5), 1637-1643. <https://doi.org/10.1021/ie960616q>
- Olazar, M., J. San Jose, M., J. Penas, F., T. Aguayo, A., & Bilbao, J. (2002). Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32(11), 2826-2834. <https://doi.org/10.1021/ie00023a053>
- Olazar, M., San Jose, M. J., Penas, F. J., Aguayo, A. T., & Bilbao, J. (1993). Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32(11), 2826-2834. <https://doi.org/10.1021/ie00023a053>
- Olazar, M., San José, M. J., Zabala, G., & Bilbao, J. (1994). New reactor in jet spouted bed regime for catalytic polymerizations. *Chemical Engineering Science*, 49(24), 4579-4588. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(05\)80042-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(05)80042-9)
- Park, H. C., Lee, B. K., Yoo, H. S., & Choi, H. S. (2017). [TC2015] fast pyrolysis characteristics of biomass in a conical spouted bed reactor. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 36(3), 685-689. <https://doi.org/10.1002/EP.12476>
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. <https://doi.org/10.13182/nse81-a20112>
- Rovero, G., & Piccinini, N. (2011). Particle mixing and segregation. Em N. Epstein & J. Grace (Orgs.), *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications* (1st ed, p. 141-160). Cambridge University Press. <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9780511777936.009>
- San José, M. J., Alvarez, S., & López, R. (2018). Drying of industrial sludge waste in a conical spouted bed dryer. Effect of air temperature and air velocity. *Drying Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1441155>
- San Jose, M. J., Olazar, M., Penas, F. J., & Bilbao, J. (1994). Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical Particles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33(7), 1838-1844. <https://doi.org/10.1021/ie00031a025>
- Santos, K. G., Ferreira, L. V., Santana, R. C., & Barrozo, M. A. S. (2017). CFD Simulation of Spouted Bed Working with a Size Distribution of Sand Particles: Segregation Aspects. *Materials Science Forum*, 899, 95-100. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.899.95>
- Setarehshenas, N., Hosseini, S. H., Esfahany, M. N., & Ahmadi, G. (2016). Impacts of solid-phase wall boundary condition on CFD simulation of conical spouted beds containing heavy zirconia particles. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 64, 146-156. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2016.04.005>
- Southpointe, A. (2013). ANSYS Fluent User's Guide 15.0. ANSYS, Inc., Canonsberg, PA.
- Syamlal, M., Rogers, W., & O'Brien, T. J. (1993). MFIX documentation: Theory guide. *National Energy Technology Laboratory, Department of Energy, Technical Note DOE/METC-95/1013 and NTIS/DE95000031*.