



VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM LEITOS DE JORRO CÔNICOS: AVALIAÇÃO DA SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS EM LEITOS COMPOSTOS POR AREIA E RESÍDUOS TETRA PAK

DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI¹, THIAGO PADOVANI XAVIER², MARCELO
SILVEIRA BACELOS^{1*}

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Energia

² Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia e Tecnologia

*e-mail: marcelo.bacelos@ufes.br

RESUMO - A pirólise é uma tecnologia limpa e sustentável que possibilita a obtenção de produtos com alto valor agregado. O leito de jorro cônico composto por misturas binárias pode ser utilizado como um reator para a pirólise de sólidos devido à sua alta taxa de transferência de calor. Entretanto, ainda é necessária uma maior compreensão sobre a segregação de partículas binárias, com o intuito de obter condições operacionais que apresentem baixos índices de segregação. Esta pesquisa propõe a utilização de um método estatístico para investigar a uniformidade da concentração de partículas ao longo do leito cônico. Os resultados revelam que os leitos de jorro cônico apresentam concentração axial uniforme de composto quando se trata de misturas de areia e composto PEBD/Al. A uniformidade axial do composto no leito possibilita a aplicação do reator na reciclagem térmica de resíduos de embalagens cartonadas utilizando uma rota sustentável de resíduos. O planejamento experimental mostra que tanto a concentração de composto PEBD/Al quanto à razão de diâmetro de partículas afetam a segregação de partículas no leito. As equações do modelo têm um bom ajuste aos dados experimentais e estimam os resultados com um erro <10%.

INTRODUÇÃO

A reciclagem de embalagens cartonadas é uma alternativa indicada para diminuir o impacto ambiental decorrente da disposição de seus resíduos. O processamento de embalagens cartonadas pós-consumo via pirólise, permite a separação e recuperação de alumínio de alta qualidade e poliolefinas (Alvarenga *et al.*, 2016; Korkmaz *et al.*, 2009; Haydary *et al.*, 2013; Mantegazini *et al.*, 2021; Rodríguez *et al.*, 2019).

Os leitos de jorro cônicos (CSBs) vêm sendo investigados como promissores reatores para os processos de geração de energia e produção de combustíveis (Melo *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2020). Em leitos de jorro cônicos, o intenso fluxo cíclico de partículas binárias

permite alcançar elevadas taxas de transferência de calor e massa quando comparado aos reatores de leitos fluidizados (Bacelos *et al.*, 2011; Makibar *et al.*, 2011; Saldarriaga *et al.*, 2015). Tais características podem garantir um melhor desempenho dos leitos de jorro cônico no processamento de misturas binárias, resultando em boa mistura de partículas, jorro estável, baixos níveis de segregação de partículas e temperatura uniforme do leito.

Para misturas de densidades iguais, Rovero e Piccini (2011) revisaram estudos de segregação de partículas realizados em leitos de jorro cônico. Os autores mostraram que a estabilidade do jorro e a segregação de partículas estavam fortemente relacionadas. San José *et al.* (1994) relataram que apenas misturas binárias de esferas de vidro com a

mesma composição (50% em peso) alcançaram segregação partículas significativa. Bacelos e Freire (2006) revelaram que a segregação poderia reduzir a permeabilidade do leito devido à má distribuição de partículas de esferas de vidro. Esta segregação provavelmente poderia causar a instabilidade do jorro, afetando a mistura de partículas composta por misturas binárias de igual densidade no leito de jorro cônico. Santos *et al.* (2019) observaram que os níveis de segregação diminuíram com o aumento da concentração de partículas *jetsam* (partículas com maiores densidades) no leito de jorro cônico composto por misturas binárias de diâmetros iguais. Estes resultados sugerem que misturas ricas em areia podem favorecer a reação de pirólise em leitos de jorro cônicos, pois a areia aquecida em contato direto com o sólido pirolisado (por exemplo, biomassa ou poliolefina) pode aumentar as taxas de transferência de calor no leito.

Os desafios ao processo de recuperação de alumínio e valorização de poliolefinas em leitos de jorro cônicos com misturas de partículas de PEBD/Al (composto por polietileno de baixa densidade e alumínio) e areia estão relacionados principalmente à segregação de partículas e ao regime de jorro estável.

Na partida de uma planta de pirolise as partículas tem que estar uniformemente misturadas para que o regime de leito de jorro não se torne jorro instável. A segregação de partículas em misturas binárias pode ser influenciada pela velocidade do ar, pela razão de diâmetro de partículas grosseiras e finas e pela concentração de partículas finas no leito.

Portanto, esta pesquisa tem como novidade avaliar a uniformidade da concentração axial de partículas de PEBD/Al em um leito de jorro cônico. Para este estudo emprega-se um método estatístico de comparação de valores de índices de mistura (I_m) obtidos para 5 regiões axiais da coluna de leito cônica. Os valores de I_m são determinados para misturas selecionadas de partículas de areia e PEBD/Al com concentrações entre 10 e 30% de PEBD/Al, razões de diâmetro de partícula entre 1 e 2,54 e velocidade do ar entre 1,1 e 1,3 V_{mj} . A rota de reciclagem térmica de valorização de resíduos

contribui para a gestão sustentável de resíduos e o atendimento a crescente demanda do mercado por embalagens cartonadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material particulado

Para realizar os experimentos de segregação em leito de jorro cônico são escolhidas partículas de composto PEBD/Al e a areia, como mostra a Figura 1.



Figura 1: (a) Compósito PEBD/Al; (b) areia.

O composto é considerado um valioso subproduto oriundo da reciclagem de embalagens cartonadas pós-consumo da *Tetra Pak Company*, através do processo de hidratação das fibras (“*hydro pulping process*”). Após a retirada do papel pela indústria, os resíduos (polietileno e alumínio) são usados para a produção de pellets por meio de injeção ou extrusão térmica. Já a areia é utilizada no reator de leito de jorro como material inerte fornecendo estabilidade ao processo e facilitando a troca térmica pela condução. As partículas estudadas pertencem ao grupo D de Geldart (1973), ou seja, partículas capazes de obter regime de jorro estável.

Para os testes de segregação, são selecionadas misturas compostas por composto PEBD/Al e areia com as seguintes propriedades: i) partículas de composto PEBD/Al com diâmetros variando de 1,02 a 2,58 mm e densidade aparente de 1077 kg/m³; ii) partículas de areia com 2,58 mm de diâmetro e densidade aparente de 2620 kg/m³.

Unidade experimental

Os testes fluidodinâmicos são realizados em uma unidade de leito de jorro cônico em escala piloto como mostra a Figura 2. A unidade experimental está localizada no

Laboratório de Eficiência Energética do PPGEN (Programa de Pós-Graduação em Energia) no Brasil.

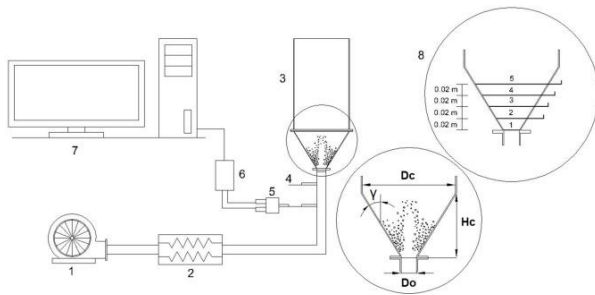


Figura 2: Esquema da unidade experimental: 1- soprador de ar; 2 - aquecedor; 3 - leito de jorro cônico-cilíndrico; 4 - termopar; 5 - transdutor de pressão; 6 - placa de aquisição de dados; 7 – microcomputador; 8 – regiões do leito de jorro cônico-cilíndrico (após a inserção das guilhotinas).

A unidade experimental de leito de jorro cônico é constituída de um soprador de ar IBRAM de 2 CV de potência, sistema de aquecimento de ar com controle automático de temperatura do tipo PID, leito de jorro cônico-cilíndrico, termopar, transdutor de pressão (Dwyer, modelo 616C-4) que está situado à 0,015 m da base cônica do leito na tubulação de entrada de ar. A aquisição de dados é realizada por meio de um computador, ligado a uma placa de aquisição de dados A/D (analogico digital) da *National Instruments*.

O leito é adaptado com um sistema de guilhotinas que permite realizar amostragens de misturas de partículas em diferentes posições axiais no leito (cinco regiões).

Procedimento experimental

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

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

planejamento fatorial está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Planejamento fatorial.

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

Os valores dos fatores são escolhidos com base nos limites operacionais do leito e nas características das partículas. As partículas de areia e compósito PEBD/Al estão classificadas no grupo D de Geldart (1973). São escolhidas partículas de compósito PEBD/Al com diâmetros variando de 0,001 a 0,00258 m. Quanto menor o diâmetro, menor é a resistência à transferência de calor por condução alcançada no leito. Tal escolha permite o aquecimento rápido das partículas requerido pela reação de pirólise no leito.

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

A faixa de velocidade do ar é escolhida para estabelecer a comparação do efeito da força de arrasto e da gravidade sobre as partículas, considerando principalmente os limites operacionais do equipamento. A utilização de uma velocidade do ar variando de 10 a 30% maior que a do jorro mínimo (V_{mj}) permite comparar o efeito da força de arrasto e da gravidade sobre as partículas durante o regime de jorro, ao passo que, uma velocidade do ar acima de 30% maior que a do mínimo jorro pode causar o transbordamento das partículas. Os conjuntos de dados são baseados naqueles exigidos pelo projeto de experimentos (Box *et al.*, 2005).

Condição de mínimo jorro: Para uma determinada mistura, a condição de mínimo

jorro é obtida analisando a queda de pressão do leito em função da velocidade do ar. A velocidade de mínimo jorro (V_{mj}) foi definida como sendo a menor velocidade do ar na qual um regime de jorro possa ser alcançado.

Inicialmente, o leito é mantido por 5 minutos a uma velocidade do ar de 10% acima do mínimo jorro. Em seguida, a velocidade do ar é reduzida até atingir o regime de leito compactado. Os dados de velocidade do ar e da queda de pressão do leito no regime de mínimo jorro para todas as misturas investigadas estão apresentados na Tabela A1 (Apêndice A).

Concentração de partículas de compósito PEBD/Al: Para quantificar a segregação de partículas de compósito PEBD/Al, é utilizado um sistema de guilhotinas. O sistema de guilhotinas possibilita obter misturas de partículas em cinco regiões axiais do leito para uma dada condição operacional estabelecida através do planejamento experimental.

Posteriormente, é quantificada a massa de cada componente, para obter a fração mássica de partículas de compósito PEBD/Al ($X_{C,Ri}$) em cada região, como mostra a Equação 1.

$$X_{C,Ri} = \frac{M_{C,Ri}}{M_{C,Ri} + M_{S,Ri}} \quad (1)$$

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

Variável resposta: Para quantificar a segregação de partículas em leitos de jorro cônicos, Olazar *et al.* (1993) e San José *et al.* (1994) desenvolveram uma variável adimensional chamada de índice de mistura (I_m). Para misturas binárias o índice de mistura (I_m) pode ser calculado por meio da Equação 2:

$$I_m = \frac{X_{C,Ri}}{X_{C0}} \quad (2)$$

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

Com base na equação e na segregação de partículas no leito, pode-se traçar a seguinte explicação para o significado físico dos valores do índice de mistura. Valores do índice de mistura (I_m) próximos a 1 indicam uma condição ideal de mistura. Porém, se $I_m > 1$ existe uma concentração de compósito PEBD/Al na respectiva região do leito, enquanto se $I_m < 1$ existe uma concentração de areia na respectiva região do leito.

Validação do modelo: As equações do modelo foram obtidas a partir de 30 experimentos. Um novo conjunto de dados é obtido para validar as equações do modelo, a partir de 24 novos experimentos. O planejamento fatorial para a validação dos resultados experimentais está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Planejamento fatorial para a validação dos resultados experimentais.

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

Os valores apresentados na Tabela 2 correspondem à média entre os limites dos fatores utilizados no planejamento fatorial 3^3 (Tabela 1).

Teste de Tukey: O teste de Tukey é aplicado com o objetivo de realizar comparações entre os índices médios de mistura (\bar{I}_m). Os índices de mistura obtidos após o planejamento experimental, a Tabela ANOVA e o valor absoluto das diferenças médias do índice de mistura considerando um intervalo de confiança de 95% estão apresentados na Tabela A2, Tabela A3 e Tabela A4, respectivamente (Apêndice A). Os detalhes do teste de Tukey podem ser encontrados em Mantegazini, Xavier e Bacelos (2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste de Tukey

Os resultados obtidos após o teste de Tukey estão apresentados na Tabela 3. Devido à semelhança encontrada no teste de Tukey, as seguintes regiões podem ser agrupadas: R_2 com R_3 e R_4 com R_5 . Embora o índice médio de mistura das regiões R_2 e R_3 sejam

semelhantes, no entanto, as regiões R_2 e R_4 não podem ser agrupadas, pois não atendem ao critério utilizado $(|\bar{I}_{m,R_i} - \bar{I}_{m,R_j}| < DMS \text{ e } \frac{|\bar{I}_{m,R_i} - \bar{I}_{m,R_j}|}{DMS} < 1 \therefore R_i = R_j)$.

Após o agrupamento, as regiões do leito podem ser renomeadas como região R_{23} ($R_2 + R_3$) e região R_{45} ($R_4 + R_5$). Estas regiões R_{23} e R_{45} representam 8 e 91% do volume total

da coluna, respectivamente. Esses resultados confirmam a homogeneidade da concentração axial de partículas em um leito cônico composto de areia e compósito PEBD/Al, o que favorece o regime de jorro estável obtido em tais leitos mesmo quando são utilizadas partículas de PEBD/Al com $D_p < 2$ mm.

Tabela 3: Resultados obtidos após o teste de Tukey.

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

Efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m)

O modelo é significativo devido ao alto valor do coeficiente de determinação apresentado na Tabela 5 ($R^2 > 0,90$). Dentre os fatores analisados, apenas a concentração do compósito PEBD/Al (X_c) e a razão de diâmetro das partículas (D_{ps}/D_{pc}) apresentaram efeito sobre o índice de mistura (I_m). Para cada região do leito (R_1 - fundo; R_{23} - meio; R_{45} - topo), os efeitos dos fatores

D_{ps}/D_{pc} e X_c (%) sobre o índice de mistura (I_m) estão apresentados na Tabela 4, considerando apenas aqueles que tiveram p-valor $< 5\%$.

Considerando o intervalo de confiança de 95%, são obtidos os gráficos de superfície para o índice de mistura (I_m) nas regiões R_1 (fundo), R_{23} (meio) e R_{45} (topo), como mostra a Figura 3.

Tabela 4: Efeitos dos fatores D_{ps}/D_{pc} e X_c sobre o índice de mistura (I_m).

Região	Fator	Efeitos	Desvio Padrão	T	P-valor
R_1	Média	0,2992	0,007613	39,3088	< 0.01
	(1) D_{ps}/D_{pc} (L)	-0,2433	0,01878	-12,9543	< 0.01
	D_{ps}/D_{pc} (Q)	-0,04051	0,01603	-2,5273	< 0.02
	(2) X_c (L)	-0,2329	0,01912	-12,1819	< 0.01
	X_c (Q)	-0,05112	0,01536	-3,32790	< 0.01
	1L by 2L	-0,073039	0,02214	-3,2985	< 0.01
R_{23}	Média	0,8795	0,01597	55,05072	< 0.01
	(1) D_{ps}/D_{pc} (L)	-0,3544	0,03941	-8,9920	< 0.01
	D_{ps}/D_{pc} (Q)	0,07353	0,03364	2,1856	< 0.04
	(2) X_c (L)	-0,2337	0,04013	-5,8236	< 0.01
	X_c (Q)	-0,08662	0,03223	-2,6868	< 0.02
	1L by 2L	-0,4190	0,04646	-9,01759	< 0.01
R_{45}	Média	1,03599	0,001705	607,5222	< 0.01
	(1) D_{ps}/D_{pc} (L)	0,05729	0,004044	14,1665	< 0.01
	(2) X_c (L)	0,04976	0,004300	11,5732	< 0.01
	1L by 2L	0,06003	0,004978	12,05847	< 0.01

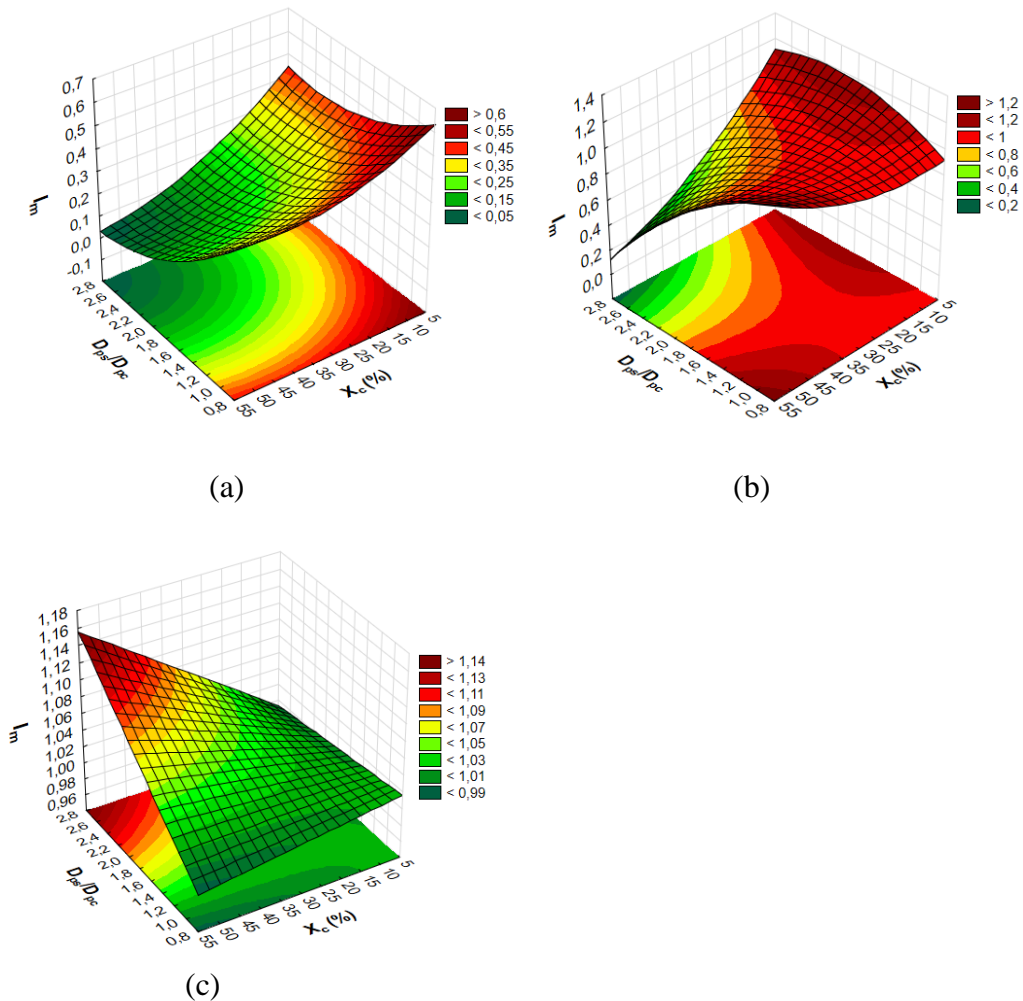


Figura 3: Gráficos de superfície para o índice de mistura (I_m): (a) R_1 ; (b) R_{23} e (c) R_{45} .

Os efeitos dos fatores observados estatisticamente através do planejamento de experimentos 3^3 podem ser explicados com base nas seguintes hipóteses físicas: ação da força gravitacional e inercial sobre as partículas de areia e compósito PEBD/Al na coluna de jorro cônica. O estudo CFD – DEM realizado por Kiani *et al.* (2017) em um leito de jorro cônico corrobora ao notar o efeito da força de arrasto em misturas com diferentes tamanhos e densidades de partículas.

Para o fundo do leito o efeito da razão de diâmetro das partículas de areia e de compósito PEBD/Al sobre o índice de mistura (I_m) ocorre principalmente devido a atuação das componentes da força inercial sobre as partículas. A componente radial exerce um esforço de pressão sobre a parede da interface jorro-ânulo não arrastando partículas para a fonte, ao passo que a componente axial cisalha o leito de partículas arrastando-as para a região

de jorro em direção à fonte do leito como mostra a Figura 4.

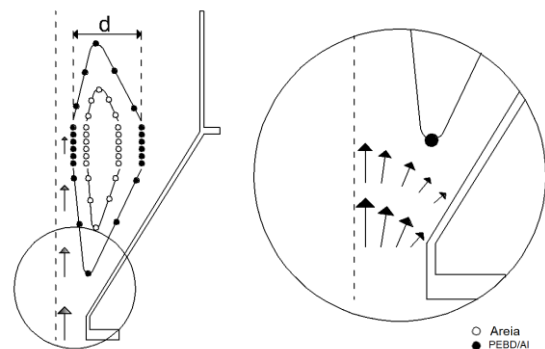


Figura 4: Visão ampliada da base do leito mostrando a representação da força inercial sobre a misturas de partículas binárias de compósito PEBD/Al e areia.

A característica do escoamento do ar nesta região (fundo) gera turbulência sobre as partículas. Como a interface jorro-ânulo é formada por camadas de partículas de areia e

compósito, o efeito da força de arraste do ar nesta região torna-se menos efetivo para as partículas mais densas, fazendo com que estas se concentrem no fundo do leito. Esta situação se torna mais pronunciada quanto maior for a razão de diâmetro entre as partículas de areia e composto. No fundo, para a faixa de X_c investigada (10 a 50%), como o volume ocupado de compósito (40% v/v a 90% v/v) é maior do que o da areia, a resistência à transferência de quantidade de movimento do compósito sobre as partículas de areia é maior. Isso provavelmente explica a concentração de areia no fundo.

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

Para o topo do leito o efeito da razão de diâmetro sobre o índice de mistura (I_m) pode ser explicado devido à ação da força da gravidade sobre as partículas na fonte. Sob a ação da gravidade, partículas de massa específicas diferentes e mesmo diâmetros lançadas na fonte percorrem diferentes distâncias radiais sobre a região anular. Sendo assim, partículas menos densas atingem maiores alturas de fonte e percorrem maiores distâncias radiais sobre a região anular. Tal situação é potencializada à medida que a razão de diâmetro é aumentada de 1 para 2,54. Desta forma, o uso de misturas com razão de diâmetro $D_{ps}/D_{pc} > 1$ promovem a concentração de compósito no topo ($I_m > 1$), não justificando o uso desta condição para o processo de recuperação do alumínio via pirólise. Uma representação esquemática do escoamento das partículas no leito é realizada, como mostra a Figura 5.

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

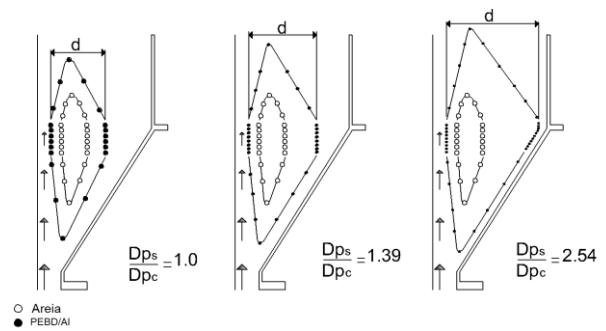


Figura 5: Representação esquemática do escoamento radial de partículas no leito de jorro constituído por misturas binárias com diferentes razões de diâmetro de partícula entre o compósito PEBD/Al e areia.

Modelo

Os modelos para prever o índice de mistura (I_m) nas na R_1 (Fundo), R_{23} (Meio) e R_{45} (Topo) estão apresentados na Tabela 5. Os resultados apresentam um bom ajuste aos dados experimentais que podem ser verificados através do coeficiente de determinação (R^2) que são altamente significativos.

Validação do índice de mistura (I_m)

O índice de mistura experimental e erro relativo percentual estão apresentados na Tabela 6. Para todas as regiões, é possível afirmar que o modelo prevê satisfatoriamente os efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m) com um erro relativo percentual menor do que 10%.

Valores desejáveis para os fatores estudados

A análise de dados mostra uma boa mistura de partículas (desejável $I_m \approx 1$) para os seguintes fatores: razão de diâmetro de 1,39 e 10% (m/m) de compósito PEBD/Al. Neste caso, as partículas de areia representam 60% (v/v) do volume total do leito e podem fornecer calor por convecção e transferi-lo para as partículas de compósito PEBD/Al por condução. Para aplicação prática, os baixos níveis de segregação de partículas contribuem para o processo de pirólise e permitem a produção de olefinas e recuperação de alumínio a partir de resíduos de embalagens cartonadas.

Tabela 5: Modelos para prever o índice de mistura (I_m) nas na R_1 (Fundo), R_{23} (Meio) e R_{45} (Topo).

Região	R^2	Equações
R_1	0,93	$I_m = 0,9496 - 0,4037 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) + 0,08950 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right)^2 - 0,009299 (X) \quad (3)$ $+ 0,0001278 (X)^2 - 0,002368 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) * (X)$
R_{23}	0,90	$I_m = 0,4397 + 0,7530 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) - 0,1624 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right)^2 + 0,005226 (X) \quad (4)$ $+ 0,0002165 (X)^2 - 0,01358 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) * (X)$
R_{45}	0,94	$I_m = 1,03628 - 0,02124 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) - 0,002203 (X) + 0,001946 \left(\frac{D_{ps}}{D_{pc}} \right) * (X) \quad (5)$

Tabela 6: Índice de mistura experimental e erro relativo percentual.

Fator			I_m			* %E		
D_{ps}/D_{pc}	X_c	V/V_{mj}	R_1	R_{23}	R_{45}	R_1	R_{23}	R_{45}
1,18	20	1,15	0,40	1,02	1,01	-0,57	4,45	-0,34
		1,25	0,39	1,05	1,01	-3,15	7,18	-0,34
	40	1,15	0,30	1,09	1,01	-4,28	7,07	-0,60
		1,25	0,34	1,10	1,01	7,99	7,92	-0,60
1,64	20	1,15	0,31	1,14	1,01	-3,89	8,58	-1,04
		1,25	0,34	1,07	1,01	5,27	7,93	-1,04
	40	1,15	0,20	0,84	1,04	-6,84	-8,90	0,12
		1,25	0,22	1,00	1,02	2,88	8,52	-1,84

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

Comparação dos índices de misturas (I_m) com aqueles reportados na literatura

O uso de partículas de densidade desigual nesta pesquisa leva a valores de índice de mistura experimentais menores quando comparado com a utilização de partículas de densidade igual relatados na literatura por San José *et al.* (1994) e Bachelos e Freire (2006).

Diferentemente dos resultados apresentados por esses pesquisadores, às partículas utilizadas nessa pesquisa atingem uma concentração uniforme ao longo da

região axial do leito. Estes resultados podem ser atribuídos ao ângulo do cone ou às partículas não esféricas usadas. Quanto menor o ângulo do cone, maior é ação da gravidade na direção do movimento das partículas. Na fonte, a ação da força de arrasto nas partículas não esféricas permite que elas se espalhem no topo do leito, atingindo uma concentração uniforme ao longo da região axial do leito. A comparação entre o índice de mistura relatado por San Jose *et al.* (1994) e pela presente pesquisa, está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Comparação entre o índice de mistura relatado por San Jose *et al.* (1994) e pela presente pesquisa.

Fatores			I_m	*%E San José <i>et al.</i>	*%E Presente
D_{ps}/D_{pc}	X_c (%)	V/V_{mj}	Experimental	(1994)	pesquisa
1,36	0,1		1,02	0,0200	0,0132
	0,3		1,02	0,0200	0,0131
2,54	0,1	1,1	1,00	0,0001	0,0182
	0,3		1,07	0,0663	0,0877

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

CONCLUSÃO

O método de colapso do leito é adequado para representar a concentração de partículas axiais devido à reprodutibilidade dos dados e ao baixo erro experimental obtido em um leito de jorro cônico. Para tratamento dos dados experimentais, o teste de Tukey revela a uniformidade da concentração do compósito PEBD/Al em leitos de jorro cônicos constituídos de misturas binárias de areia e PEBD/Al. As misturas de leito atingem índices de mistura (I_m) ideais ($\cong 1$) para os seguintes fatores: 10% (m/m) de concentração de compósito e 1,39 de razão de diâmetro entre partículas de compósito PEBD/Al e areia. Com base no planejamento experimental, as equações do modelo estimam o índice de mistura com um erro menor do que 10%. Para a partida de em uma planta de pirólise, tais resultados implicam em um reator de leito de jorro de mistura perfeita e contribuem para a rota de reciclagem térmica de valorização de resíduos da Tetra Pak.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPES, ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, L. M., XAVIER, T. P., BARROZO, M. A. S., BACELOS, M. S., LIRA, T. S. (2016), Determination of activation energy of pyrolysis of carton packaging wastes and its pure components using thermogravimetry, Waste management, Vol 53, p.68-75.
- BACELOS, M. S., CAMARGO, C. F. S., SILVEIRA, A. M., & FREIRE, J. T. (2011), Local heat-transfer coefficient of immersed cylindrical surface in fluidized and vibrated fluidized beds, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol 50, p.1152-1159.
- BACELOS, M. S., FREIRE, J. T. (2006), Stability of spouting regimes in conical spouted beds with inert particle mixtures, Industrial & engineering chemistry research, Vol 45, p.808-817.
- BOX, G. E., HUNTER, J.S., HUNTER, W. G. (2005), Statistics for experimenters, John Wiley Sons New-York.
- GELDART, D. (1973), Types of gas fluidization, Powder technology, Vol 7, p.285-292.
- HAYDARY, J., SUSAN, D., DUDÁŠ, J. (2013), Pyrolysis of aseptic packages (Tetra pak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition, Waste Management, Vol 33, p.1136-1141.
- 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, Vol 32, p.132-140.
- KORKMAZ, A., YANIK, J., BREBU, M., VASILE, C. (2009), Pyrolysis of the Tetra pak, Waste management, Vol 29, p.2836-2841.

- MAKIBAR, J., FERNANDEZ-AKARREGI, A. R., ALAVA, I., CUEVA, F., LOPEZ, G., & OLAZAR, M. (2011), Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol 50, p.790-798.
- MANTEGAZINI, D. Z., NEVES, F. L., XAVIER, T. P., BACELOS, M. S. (2021), Review on advanced technologies for aluminum recovery from carton packages waste using pyrolysis, *Brazilian Journal of Production Engineering*, p.117-129.
- MANTEGAZINI, D. Z., XAVIER, T. P., BACELOS, 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*, Vol 47, p. 101334.
- MELO, J. L. Z., BACELOS, M. S., PEREIRA, F. A. R., LIRA, T. S., GIDASPOW, D. C. F. D. (2016), CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol 108, p. 93-108.
- 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*, Vol 32, p.2826-2834.
- RODRÍGUEZ, E., GUTIÉRREZ, A., PALOS, R., VELA, F. J., ARANDES, J. M., BILBAO, J. (2019), Fuel production by cracking of polyolefins pyrolysis waxes under fluid catalytic cracking (FCC) operating conditions, *Waste Management*, Vol 93, p.162-172.
- ROVERO, G., PICCININI, N. (2011), Particle mixing and segregation, *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*, p.141-160.
- SALDARRIAGA, J. F., GRACE, J., LIM, C. J., WANG, Z., XU, N., ATXUTEGI, A., ... & OLAZAR, M. (2015), Bed-to-surface heat transfer in conical spouted beds of biomass–sand mixtures, *Powder Technology*, Vol 283, p.447-454.
- 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*, Vol 33, p.1838-1844.
- SANTOS, K. G., SANTANA, R. C., SOUZA, D. L., MURATA, V. V., BARROZO, M. A. S. (2019), Spouting behavior of binary particle mixtures of different densities: Fluid dynamics and particle segregation, *Particuology*, Vol 42, p.58-66.
- SOUSA, L. M., FERREIRA, M. C., HOU, Q. F., AIBING, B. Y. (2020), Feeding spent coffee grounds into reactors: TFM simulation of a non-mechanical spouted bed type feeder, *Waste Management*, Vol 109, p.161-170.
- TUKEY, J. W. (1949), Comparing individual means in the analysis of variance, *Biometrics*, p.99-114.

COPYRIGHT

Reprinted from Publication *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47/Article 101334, DIUNAY ZULIANI MANTEGAZINI, THIAGO PADOVANI XAVIE, MARCELO SILVEIRA BACELOS, Conical spouted beds for waste valorization: Assessment of particle segregation in beds composed of sand and Tetra Pak residues, Pages 7., Copyright (2021), with permission from Elsevier.

APÊNDICE A

Tabela A1: Resultados experimentais de velocidade do ar e da queda de pressão do leito no regime de mínimo jorro para todas as misturas investigadas.

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

Tabela A2: Índices de mistura obtidos após o planejamento experimental.

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

Tabela A3 – Tabela ANOVA.

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

Tabela A4: Valor absoluto das diferenças médias do índice de mistura.

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