



ANÁLISE DA DINÂMICA DO LEITO GRANULAR EM UM PADDLE DRYER DE DUPLO EIXO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

VINÍCIUS P. BARBOSA^{1*}, LEONARDO L. DE CARVALHO¹, THAIS L. C. GOMES¹,
RODOLFO J. BRANDÃO², CLÁUDIO R. DUARTE¹, MARINA S. PEREIRA¹.

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de Alagoas, Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: vinicius.pimenta87@gmail.com

RESUMO - *Paddle dryers* são equipamentos comumente utilizados em processos de secagem, possuindo como vantagens um elevado grau de mistura e um contato íntimo do material no leito com as paredes e casco do equipamento. Todavia, estudos na literatura sobre a dinâmica de partículas no interior deste equipamento ainda se encontram escassos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo estudar a dinâmica de partículas no interior de um *paddle dryer* utilizando o método dos elementos discretos. Para isto, foi avaliada a influência das variáveis velocidade de rotação do eixo de agitação, massa inicial do leito de partículas e inclinação do equipamento sobre as seguintes variáveis resposta: variação da massa no leito, velocidades médias de escoamento das partículas decomposta nos eixos x, y e z, e a velocidade média resultante. Os resultados demonstraram que ao elevar os valores das variáveis independentes houve um aumento na variação da massa no leito e na velocidade de escoamento na direção z. A velocidade de rotação do eixo de agitação e a massa inicial no leito também influenciaram na velocidade de escoamento nos eixos x e y, sendo que o aumento da massa inicial de partículas no leito contribuiu para a diminuição da velocidade média nestas direções.

INTRODUÇÃO

Paddle dryers são secadores com leito agitado geralmente utilizados no processamento de materiais altamente coesivos e de difícil grau de mistura, como no tratamento de lodo residual de esgoto (Deng *et al.* 2009).

As principais vantagens desse equipamento em relação aos secadores comerciais tradicionais são: minimização do tamanho do secador devido à melhor relação a área de transferência de calor por volume; utilização de pás em forma de cunha que possibilitam a intensificação do fenômeno de transferência de calor proveniente do elevado índice de mistura entre os sólidos; controle da distribuição do tempo de residência do material no interior do equipamento; secagem uniforme do material particulado e a versatilidade em

relação à aplicação de materiais de difícil manuseio, como polpas com elevados teores de umidade ou materiais com alta viscosidade, além daqueles sensíveis a temperaturas (Nara Machinery, 2021).

As características do material particulado, como a forma, coesividade, tamanho, assim como aspectos estruturais do equipamento, como o formato das pás, agitação mecânica, afetam o grau de mistura e a escoabilidade do material no leito (Malhotra e Mujumdar, 1990).

Devido à complexidade experimental para o emprego de metodologias no estudo das características da dinâmica e mistura do leito de partículas em *paddle dryers*, grande parte dos dados apresentados na literatura são provenientes de técnicas computacionais, que fornecem observações valiosas para o projeto e operação do equipamento. O uso de

ferramentas numéricas tem sido cada vez mais expandido no auxílio à compreensão da dinâmica de partículas e para minimizar custos e esforços experimentais.

Trabalhos como o de Ebrahimi *et al.* (2021) avaliaram o processo de mistura em um misturador do tipo *paddle* em batelada com dois eixos de pás utilizando o método dos elementos discretos (DEM), no qual foi verificado a influência do nível de preenchimento do leito, da velocidade de rotação e da configuração das pás de agitação no grau de mistura entre as partículas no leito. Já o trabalho de Yuan *et al.* (2021), avaliou o processo de mistura de partículas em modo contínuo utilizando DEM para a análise da influência dos aspectos construtivos de um misturador contínuo por rosca transportadora combinado com pás de agitação.

O trabalho de Carvalho (2021) utilizou o DEM para a avaliar como a velocidade resultante do escoamento do leito de partículas varia em função da velocidade de rotação do eixo de agitação, altura inicial do leito e tamanho das partículas, sendo verificado que

estas três variáveis são significativas ao processo.

De forma a contribuir para as pesquisas associadas ao estudo de secadores do tipo *paddle dryer*, o objetivo deste trabalho foi de estudar numericamente a dinâmica do leito de partículas no interior de um equipamento *paddle dryer*, a partir da utilização do método dos elementos discretos. Para isto, foi avaliada a influência da velocidade de rotação do eixo de agitação, da massa inicial no leito de partículas e da inclinação do equipamento sobre as seguintes variáveis resposta: variação da massa no leito, velocidades médias de escoamento das partículas decomposta nos eixos x, y e z, e a velocidade média resultante.

METODOLOGIA

Unidade experimental

A unidade experimental utilizada para a validação das simulações numéricas foi um *paddle dryer*, mostrado na Figura 1, com dimensões de 2 m de comprimento, 0,25 m de largura, 0,25 m de profundidade e capacidade operacional de 40 a 60 kg de material.



Figura 1: *Paddle Dryer* para (a) vista superior externa e (b) vista da estrutura interna.

Na Figura 1 os números sinalizados correspondem aos seguintes dispositivos:

1. Motor WEG com 7,5 hp de potência;
2. Inversor de Frequência modelo WEG CFW500;
3. Duplo eixo com 26 pás em formato de cunha em cada;
4. Representação da geometria das pás presentes no interior do equipamento.

Na Figura 1 (b), pode-se visualizar a estrutura interna do equipamento, na qual havia eixos de dupla rotação com pás em formato de

cunha — responsáveis por promover a mistura do material — tornando a secagem mais homogênea, além de intensificar a transferência de calor entre os sólidos. O diâmetro de giro das pás foi de 140 mm.

Para redução do custo computacional, a geometria do equipamento considerada para a realização das simulações numéricas teve seu comprimento reduzido para 500 mm conforme apresentado na Figura 2.

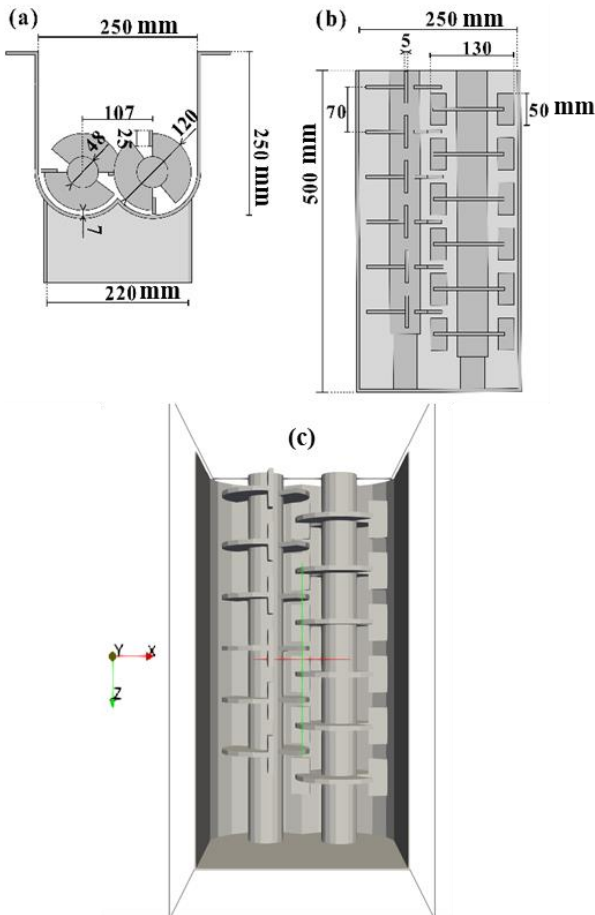


Figura 2: Dimensões *paddle dryer* reduzido: (a) vista frontal, (b) vista superior e (c) geometria *stl*.

Estudo numérico

Os parâmetros avaliados na modelagem DEM para realização do estudo numérico se encontram dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros DEM.

Parâmetro	Valor	Referência
σ_p [-]	0,22	Lima, 2017
G [Pa]	1×10^6	Lima, 2017
e_{pp} [-]	0,81	Lima, 2017
e_{pw} [-]	0,90	Lima, 2017
μ_{spp} [-]	0,659	Carvalho, 2021
μ_{spw} [-]	0,382	Carvalho, 2021
μ_{rpp} [-]	0,040	Carvalho, 2021
μ_{rpw} [-]	0,055	Carvalho, 2021
ρ_p [g.cm ⁻³]	1,175	Carvalho, 2021
d_p [mm]	6,49	Carvalho, 2021

A geometria do equipamento foi criada no *software* livre Gmesh 4.10 e as simulações realizadas com o *software* livre LIGGGHTS 3.8.0, sendo estas avaliadas posteriormente via

programação *Python* e através do *software* de pós-processamento *Paraview* versão 5.10.1.

O modelo de contato utilizado foi o de Hertz-Mindlin. A duração do tempo de simulação foi de 50 s, sendo o *time-step* fixado em 1×10^{-5} s, equivalente a 12% do passo de tempo de Rayleigh, com o intuito de garantir a estabilidade numérica da simulação (Carvalho, 2021).

Planejamento experimental

Um planejamento composto central (PCC) foi realizado, considerando como variáveis independentes:

1. Velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1): em rotações por minuto (rpm);
2. Massa inicial de partículas no leito (X_2): massa em kg das partículas no leito no instante inicial da simulação;
3. Inclinação do leito (X_3): inclinação descendente em graus no sentido do favorecimento das partículas para fora do leito.

Já as variáveis resposta analisadas foram:

1. Variação da massa no leito (ΔM): diferença da massa no leito em kg entre o início e o fim do intervalo de coleta de dados;
2. Velocidade média na direção x (v_x): velocidade média das partículas presentes no leito na direção radial de mistura;
3. Velocidade média na direção y (v_y): velocidade média das partículas na direção vertical;
4. Velocidade média na direção z (v_z): velocidade média das partículas na direção de saída das partículas do volume de controle;
5. Velocidade resultante (v_{res}): magnitude média do vetor velocidade das partículas no leito.

Por possuir 3 fatores, o PCC foi composto por 8 pontos fatoriais, 6 pontos axiais e dois pontos centrais, resultando em 16 simulações, utilizando um alfa de ortogonalidade de 1,287. Os níveis experimentais para as variáveis independentes se encontram apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Níveis das variáveis independentes.

Nível	X_1 (rpm)	X_2 (kg)	X_3 (°)
-1,287	3,6	2	0
-1	5	3	0,33
0	10	6,5	1,5
1	15	10	2,67
1,287	16,4	11	3

Para a análise das variáveis resposta, foi definido um intervalo para o cálculo de seus valores entre 10 e 50 segundos de simulação. Essa escolha se deve ao fato de que o sistema apresenta uma melhor estabilidade nas velocidades analisadas e na taxa de saída das partículas a partir de 10s, eliminando assim o efeito do leito partindo da condição de repouso em que se encontra no instante de 0 segundos da simulação (Carvalho, 2021).

Na Tabela 3 pode ser observada a matriz do planejamento experimental que foi realizada.

Tabela 3:Planejamento experimental.

Experimento	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	$-\alpha$	0	0
10	α	0	0
11	0	$-\alpha$	0
12	0	α	0
13	0	0	$-\alpha$
14	0	0	α
15	0	0	0
16	0	0	0

Para a obtenção dos valores das variáveis resposta das velocidades médias nas direções x, y, z e resultante, foi feita a média aritmética de seus respectivos valores instantâneos obtidos pela simulação entre 10 e 50 segundos.

Devido ao movimento oscilatório das partículas no leito sobre o efeito da rotação do eixo de agitação, os valores das velocidades em x e y variavam entre valores positivos e negativos, sendo assim estes valores foram processados em módulo para o cálculo da velocidade média entre os 10 e 50s de

simulação, sendo os valores obtidos proporcionais à amplitude de oscilação da velocidade em função do tempo.

Modelos de segunda ordem com interações lineares entre duas variáveis foram ajustados para todas as variáveis resposta. A análise estatística foi realizada no *software* STATISTICA 7, adotando-se um nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação da massa com a velocidade

Para a variação de massa no leito entre os instantes inicial e final analisados na simulação, todas as variáveis independentes foram significativas — velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação (X_3).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação 1, cujo coeficiente de correlação foi de $R^2 = 0,999$.

$$\Delta M = 1,84 + 0,38X_1 - 0,085X_1^2 + 0,91X_2 - 0,047X_2^2 + 0,11X_3 + 0,18X_1X_2 \quad (1)$$

A partir do modelo reduzido e da superfície de resposta apresentada na Figura 3 (a), é possível observar que, à medida que a velocidade de rotação do eixo de agitação aumenta (X_1), a variação de massa de partículas no leito também aumenta. Segundo Jadidi *et al.* (2022), maiores velocidades de rotação do eixo proporcionam maiores taxas de distribuição do material entre as células das pás de agitação. Isso faz com que as partículas se desloquem para as regiões com maiores espaços para se acomodarem numa condição energética mais favorável, isto é, na direção do eixo z, no sentido de deslocamento para fora do volume de controle, reduzindo, assim, a massa total de partículas no leito.

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar que quanto maior a massa inicial (X_2) maior é a variação de massa no leito. Este fato ocorre porque maiores massas iniciais no leito aumentam a força motriz de deslocamento das partículas em direção à saída do volume de controle, já que o escoamento do material ocorre em direção ao espaço que oferece menor resistência ao deslocamento e acomodação das partículas no

leito à medida que estas são expostas ao contato com o eixo de agitação.

Na Figura 3 (a) é possível observar a interação entre as variáveis velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial no leito (X_2), sendo que no nível mais alto destas duas variáveis, há um maior efeito no aumento da variação da massa de partículas no leito.

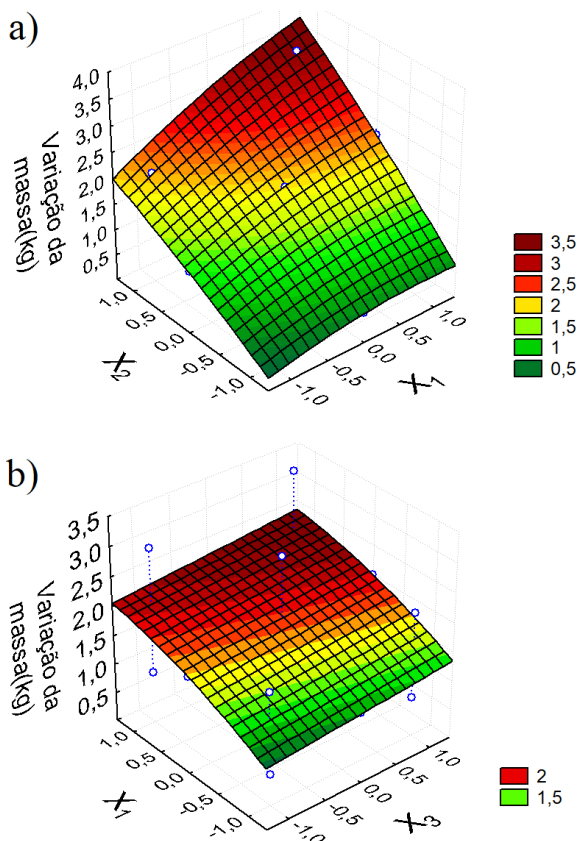


Figura 3: Superfícies de resposta para a variação da massa do leito em função de suas variáveis significativas.

Para a inclinação do equipamento (X_3), Figura 3 (b), é possível observar que quanto maior o seu valor maior é a variação de massa no leito. Isto ocorre devido à força gravitacional, que passa a exercer um papel importante em termos de deslocamento do material no leito.

A quantidade de variação de massa está interrelacionada com a velocidade de transporte das partículas que compõe o leito, ou seja, a taxa com que saem do volume de controle. Desta forma, as próximas variáveis estudadas estão relacionadas justamente aos aspectos dinâmicos envolvidos na movimentação das partículas.

Velocidade resultante

Para a velocidade resultante, as variáveis significativas foram a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e a massa inicial de partículas no leito (X_2).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação 2, cujo coeficiente de correlação foi de $R^2 = 0,997$.

$$v_{mag} = 3,12 + 1,39X_1 + 0,26X_2 + 0,083X_1X_2 \quad (2)$$

O modelo reduzido e a superfície de resposta apresentada na Figura 4 evidenciam que quanto maior a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), maior a velocidade resultante das partículas, já que maiores velocidades de rotação geram uma maior movimentação do leito, o que reflete o aumento da magnitude da velocidade média resultante das partículas.

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar que quanto maior a massa inicial, maior é a velocidade resultante média, uma vez que o aumento no número de partículas aumenta o gradiente favorável ao deslocamento do leito em direção à saída do volume de controle da seção simulada do equipamento, o que se reflete no aumento da velocidade resultante.

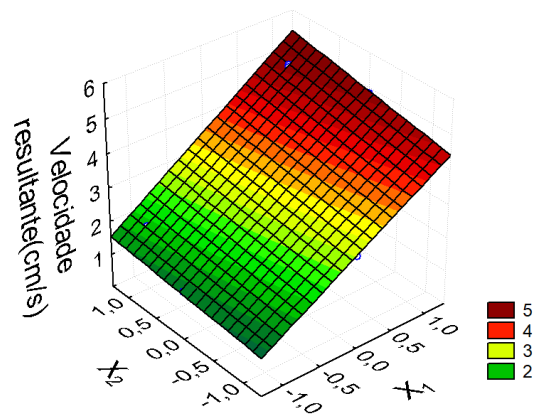


Figura 4: Superfície de resposta para a velocidade resultante das partículas em função de suas variáveis significativas.

A inclinação (X_3) não foi significativa para a faixa analisada de velocidade resultante, porém, essa variável independente se mostrou significativa para a resposta associada à variação da massa de partículas no leito, o que motivou um estudo mais detalhado das

velocidades médias decompostas nas direções x, y e z, que será abordado nas próximas seções.

Velocidade média em x

Para a velocidade de deslocamento em x, as variáveis significativas foram a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e a massa inicial de partículas no leito (X_2).

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação 3, cujo coeficiente de correlação foi de $R^2 = 0,978$.

$$v_x = 0,58 + 0,36X_1 - 0,12X_2 - 0,074X_1X_2 \quad (3)$$

O gráfico da Figura 5 e o modelo reduzido mostram que quanto maior a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), maior a velocidade média das partículas na direção x, uma vez que equipamentos do tipo *paddle dryer* possuem uma grande capacidade de mistura radial (Ebrahimi *et al.*, 2021). No gráfico da Figura 6 (a) é mostrado a velocidade de deslocamento em x referente aos experimentos 9 e 10 para a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) nos níveis mais baixo ($-\alpha$) e mais alto ($+\alpha$) do planejamento experimental, respectivamente, sendo possível observar que a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) influencia na frequência e amplitude com que o sentido e a intensidade da velocidade média na direção do eixo x oscila.

Já para a massa inicial de partículas no leito, é possível observar que, quanto maior a massa inicial (X_2), menor é a velocidade em x, sendo este fato associado ao aumento do número de partículas no leito que causa uma maior dispersão da energia cinética transferida pelas pás de agitação às partículas, resultando num amortecimento da velocidade média de deslocamento na direção x. No gráfico da Figura 6 (b) são apresentados os experimentos 11 e 12 para variação entre os níveis experimentais mais extremos, $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente, em relação à massa inicial de partículas no leito (X_2). É possível observar que o aumento da massa inicial causa um amortecimento na velocidade média em x das partículas no leito, diminuindo a amplitude de variação da velocidade, porém, mantendo a mesma frequência de oscilação, já que o valor

da velocidade de rotação do eixo de agitação nestes dois experimentos é o mesmo.

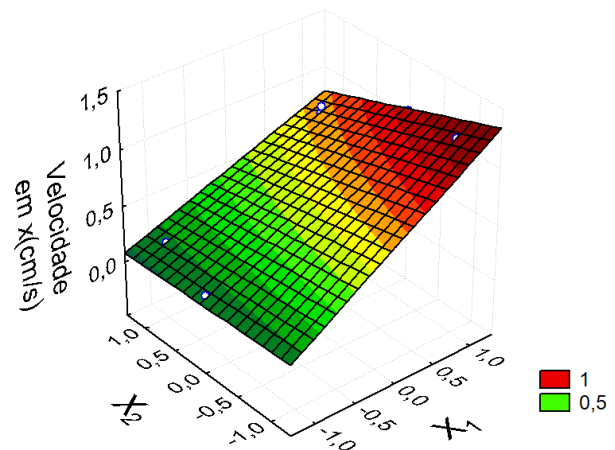


Figura 5: Superfície de resposta para a velocidade média na direção do eixo-x em função de suas variáveis independentes significativas.

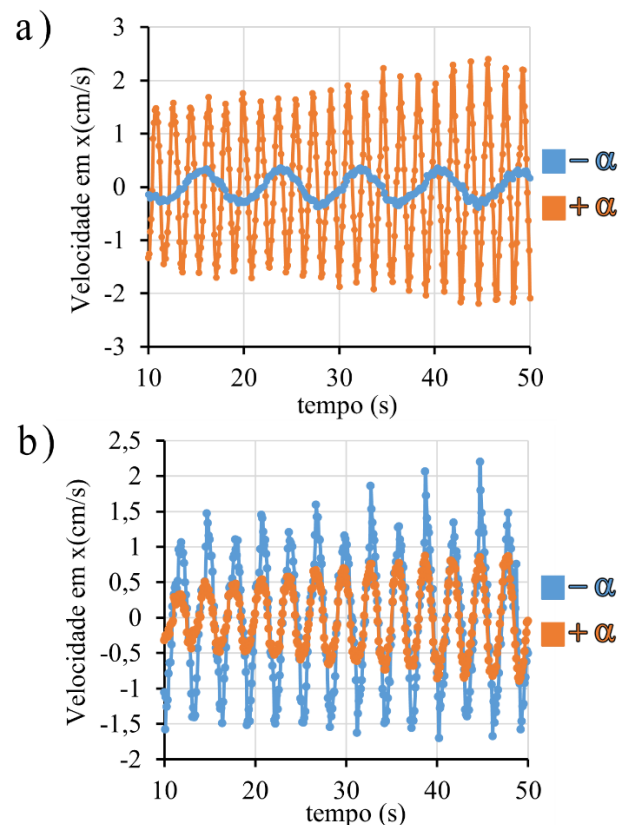


Figura 6: Perfil da velocidade média na direção do eixo-x para os experimentos (a) 9 e 10, (b) 11 e 12.

Uma hipótese para a interação das variáveis velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e massa inicial (X_2) é o fato de que quanto menor a massa de material no leito, menor é o número de partículas, reduzindo o

efeito de amortecimento pelas interações partícula-partícula, o que aumenta a transferência de energia das pás para as partículas, resultando em maiores velocidades médias em x quando a velocidade do eixo de agitação aumenta.

O fato da inclinação (X_3) não influenciar na velocidade média na direção x, se deve ao fato de que o campo gravitacional para o movimento do leito ser perpendicular à esta direção, como indicado pelo eixo de coordenadas na Figura 2(c).

Velocidade média em y

As três variáveis independentes analisadas, velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas (X_2) e inclinação (X_3), foram significativas para a velocidade de deslocamento em y.

O modelo reduzido obtido é apresentado na Equação 4, cujo coeficiente de correlação foi de $R^2 = 0,969$.

$$v_y = 0,20 + 0,070X_1 - 0,021X_1^2 - 0,035X_2 + 0,018X_3 - 0,025X_1X_2 + 0,014X_1X_3 \quad (4)$$

A partir das superfícies de resposta apresentadas na Figura 7 e do modelo reduzido, é possível observar que quanto maior a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), maior é a velocidade média das partículas na direção vertical, eixo-y, devido ao fato de que uma maior quantidade de energia cinética é transferida para as partículas. O gráfico da Figura 8 (a) mostra a velocidade de deslocamento em y nos experimentos 9 e 10, para a variação na velocidade de rotação do eixo de agitação nos dois valores extremos desta variável independente no planejamento experimental, $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente. É possível observar que quanto maior o valor da velocidade de rotação do eixo de agitação, maior será a amplitude de variação da velocidade média na direção vertical, evidenciando a maior energia cinética recebida pelas partículas.

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar que quanto maior seu valor, menor é a velocidade média na direção y, pelo fato de que a energia cinética transferida para o leito pela movimentação das

pás de agitação sofre maior dispersão para uma maior quantidade de partículas. No gráfico da Figura 8 (b) são apresentados os resultados dos experimentos 11 e 12, para a velocidade média em y em relação à variação da massa inicial de partículas no leito nos 2 níveis experimentais mais extremos do planejamento experimental executado, $-\alpha$ e $+\alpha$. É possível observar que um maior valor de massa inicial no leito gera um maior amortecimento na velocidade vertical das partículas, ou seja, quanto maior a massa, menor é a velocidade no sentido vertical.

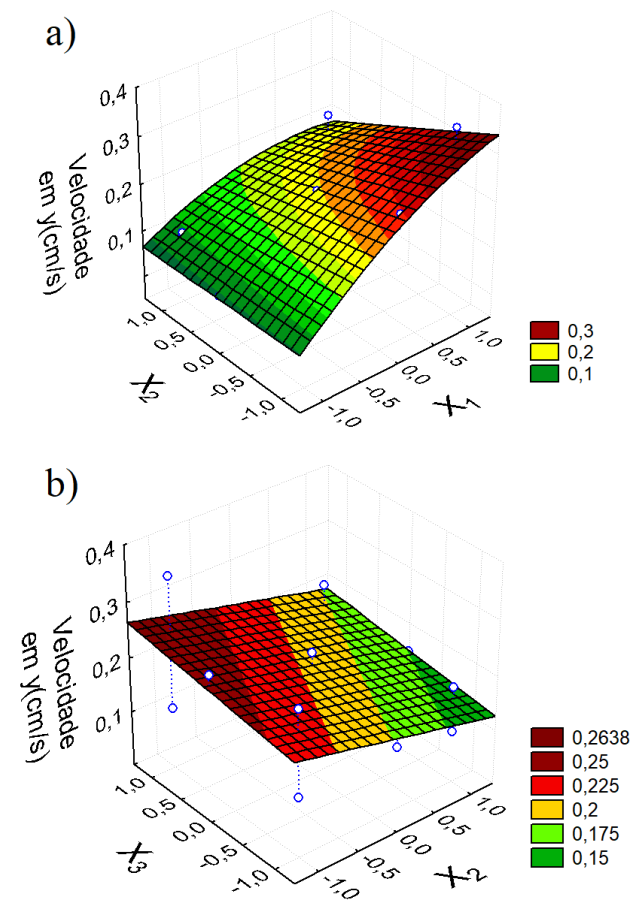


Figura 7: Superfícies de resposta para a velocidade média na direção do eixo-y em função de suas variáveis independentes significativas

Em relação à inclinação (X_3), verifica-se a sua contribuição no aumento da velocidade de deslocamento das partículas na direção y, que pode estar relacionada à maior perda de partículas no leito devido à inclinação e à interação com a variável velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), fazendo com que a velocidade em y aumente gradativamente à medida que o leito perde massa, já que, como dito anteriormente, a simulação ocorreu de

forma transiente, com perda de partículas com o tempo. Desta forma, para os experimentos 13 e 14 para a variação na inclinação do leito, é possível observar pelo gráfico (c) da Figura 8 que a amplitude do movimento para os dois valores mais extremos do ângulo de inclinação, $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente, são mais próximas quando comparadas as outras variáveis independentes significativas para a velocidade média na direção y.

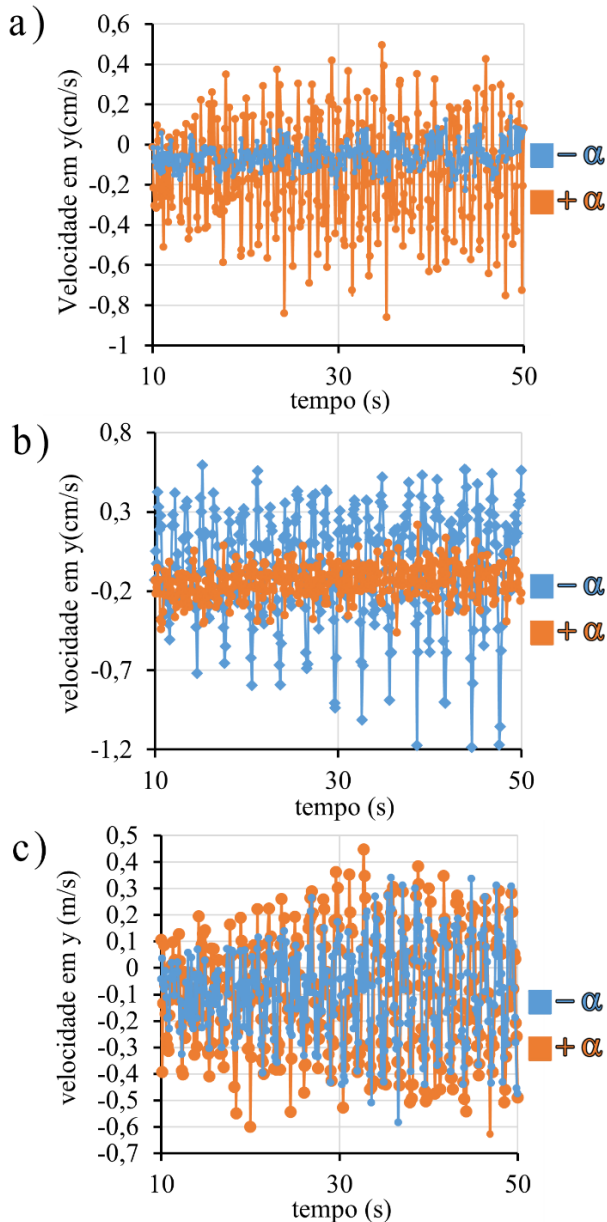


Figura 8: Perfil da velocidade média na direção do eixo-y para os experimentos a) 9 e 10, b) 11 e 12 e c) 13 e 14.

A interação das variáveis velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e Massa (X_2) provavelmente se deve ao fato da redução da massa de partículas no leito reduzir o

amortecimento causado pelas interações partícula-partícula, fazendo com que a velocidade de rotação do eixo de agitação transmita maior energia para o menor número de partículas no leito, aumentando a velocidade na direção do eixo-y, com esse efeito sendo menos significativo quando a massa de partículas diminui.

Também é observado a interação entre a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e a Inclinação (X_3), sendo que nos maiores níveis destas variáveis há um maior efeito no aumento da velocidade na direção do eixo-y.

Velocidade média em z

Para a velocidade de deslocamento em z, todas as variáveis independentes foram significativas: X_1 (velocidade de rotação do eixo de agitação), X_2 (massa inicial de partículas no leito) e X_3 (inclinação).

O gráfico da Figura 9 e o modelo ajustado apresentado pela Equação 5 com $R^2=0,995$, mostram a relação entre a velocidade de deslocamento em z em função de suas variáveis significativas. É possível observar que quanto maior a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) maior é o módulo da velocidade das partículas na direção z, já que maiores velocidades de rotação aumentam a taxa transferência de massa entre as células de mistura do *paddle*. No gráfico (a) da Figura 10 é apresentado a velocidade de deslocamento em z para os experimentos 9 e 10 em função do tempo para a velocidade de rotação do eixo de agitação nos níveis mais baixo ($-\alpha$) e mais alto ($+\alpha$) dos experimentos, respectivamente, sendo a amplitude entorno da velocidade média em z proporcional a velocidade de rotação do eixo de agitação.

$$v_z = 0,38 + 0,17X_1 + 0,027X_2 + 0,067X_3 + 0,034X_1X_3 - 0,017X_2X_3 \quad (5)$$

Já para a massa inicial de partículas no leito (X_2), é possível observar que quanto maior a massa inicial maior é a velocidade em z, sendo o motivo disto o aumento da força motriz relacionada ao maior número de partículas no leito favorecer o deslocamento das partículas para fora do volume de controle, de forma similar ao que ocorre com a variável resposta da variação de massa no leito. No gráfico (b) da

Figura 10 são apresentados os experimentos 11 e 12 para a variação entre os níveis experimentais mais extremos, $-\alpha$ e $+\alpha$, respectivamente, para a massa inicial de partículas no leito, sendo possível observar que o aumento da massa inicial aumenta o ponto médio no entorno onde a velocidade em z oscila, sendo também possível constatar que uma maior massa inicial no leito causa um amortecimento na amplitude da oscilação na variação da velocidade em z, porém acompanhado de um aumento na velocidade neste mesmo sentido.

A influência da variável inclinação (X_3) pode ser explicada pelo fato de a componente gravitacional estar na mesma direção e sentido favorável ao deslocamento das partículas quando a inclinação aumenta.

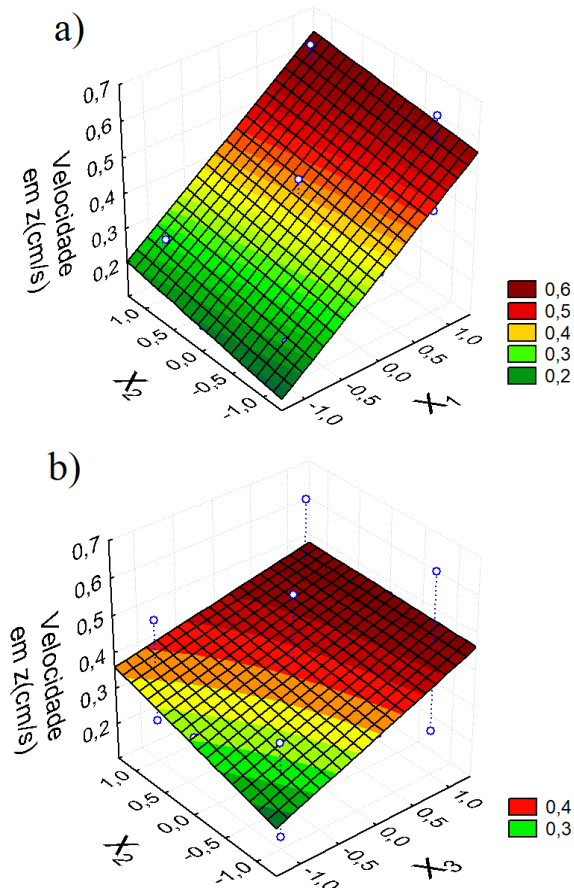


Figura 9: Superfícies de resposta para a velocidade média na direção do eixo-z em função de suas variáveis independentes significativas

A interação entre as variáveis velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1) e Inclinação (X_3) é mais significativa para o maior nível destas duas variáveis no intervalo avaliado,

fazendo com que o efeito da interação seja em aumentar ainda mais a velocidade de deslocamento na direção z, mesmo efeito qualitativo de aumento observado nas duas variáveis individualmente.

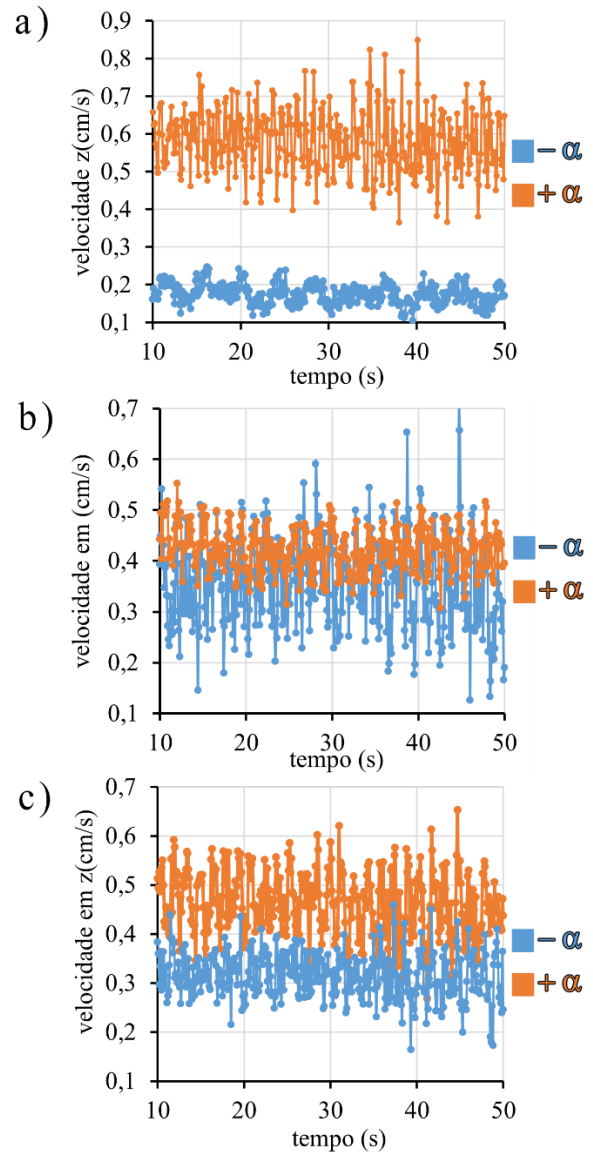


Figura 10: Perfil da velocidade média na direção do eixo-z para os experimentos a) 9 e 10, b) 11 e 12 e c) 13 e 14.

Também há a interação entre as variáveis massa inicial no leito (X_2) e inclinação (X_3), sendo que quanto menor os valores de ambas, menor será a velocidade de deslocamento na direção do eixo-z.

As variáveis resposta velocidade média em z e variação da massa possuem uma relação linear entre si quando esta última é adimensionalizada em relação a massa inicial no leito e transformada no percentual de perda de massa no leito. É possível observar pelo

gráfico da Figura 11 a relação linear entre a velocidade em z e o percentual de perda de massa no leito. Este resultado mostra que, para a faixa experimental analisada, independentemente da massa inicial presente e do valor das outras variáveis independentes, a velocidade axial de deslocamento possui forte relação com a proporção de massa perdida no leito.

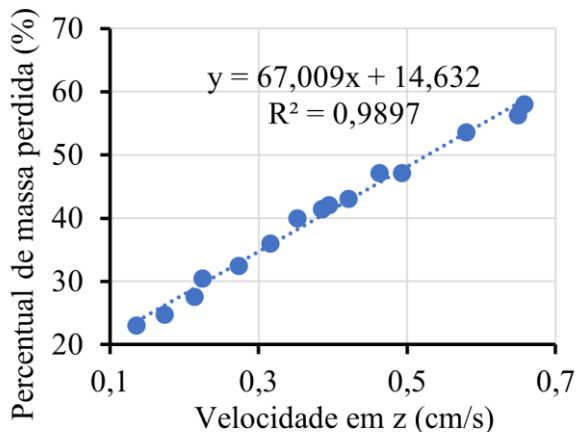


Figura 11: Relação entre a velocidade de deslocamento na direção do eixo-z e o percentual de massa perdido pelo leito.

CONCLUSÃO

A análise individual das velocidades para os eixos x, y e z permitiu o levantamento de importantes características da dinâmica das partículas relacionadas à direção de escoamento, que se alteram a depender da direção analisada devido aos aspectos construtivos do equipamento, que possui escoamento na direção axial, mas mistura na radial com dois eixos em contra rotação. Para as variáveis resposta da variação de massa no leito, velocidade média resultante e as três velocidades nas direções analisadas, eixos x, y e z, as variáveis independentes velocidade de rotação do eixo de rotação (X_1) e massa inicial de partículas (X_2) no leito foram significativas, sendo que a inclinação (X_3) só não foi significativa para a velocidade resultante e a velocidade no eixo-x, esta devido a perpendicularidade do campo gravitacional com a direção do eixo.

Nas análises relacionadas as velocidades nos eixos x, y e z, foi possível constatar que a variável independente massa inicial de partículas (X_2) possui uma influência distinta de

acordo com a direção da velocidade analisada. Desta forma, o aumento na massa inicial do leito contribuiu para a diminuição das velocidades médias nas direções dos eixos x e y, devido ao amortecimento na velocidade média das partículas, enquanto para a velocidade na direção do eixo z, houve um aumento.

Também foi possível verificar para as velocidades nas direções dos eixos x, y e z que a velocidade das partículas no leito foi maior na direção x, com exceção dos experimentos 3 e 4 que apresentaram maior velocidade na direção z, sendo uma observação importante que, nestes dois experimentos que destoaram dos demais, houve a combinação do menor nível de velocidade de rotação do eixo (X_1) com o maior nível de massa (X_2), as variáveis independentes mais significativas para ambas as direções, porém o aumento da massa inicial de partículas (X_1) possui um efeito de diminuir a velocidade em x ao passo que o efeito é de aumentar a velocidade em z, o que explica o resultado obtido nestes dois experimentos. Essa maior velocidade na direção do eixo x para a maior parte dos experimentos se deve ao fato deste tipo de equipamento possuir uma característica construtiva voltada para a mistura radial, já que as pás de agitação atacam o leito perpendicularmente a direção do eixo x, o que se reflete nas maiores velocidades atingidas pelas partículas quando comparada as outras direções analisadas.

Para a variável dependente variação de massa de partículas no leito, foi possível observar que as três variáveis independentes são significativas para o aumento da variação da massa de partículas no leito, ou seja, para o escoamento das partículas para fora do volume de controle simulado, de forma que quanto maiores a velocidade de rotação do eixo de agitação (X_1), massa inicial de partículas no leito (X_2) e inclinação (X_3), maior será a variação da massa de partículas no leito. Um importante resultado deste estudo também foi o fato de ter sido verificado a interdependência diretamente proporcional e linear entre as variáveis resposta velocidade média na direção z e a variação percentual de massa no leito.

NOMENCLATURA

σ_p [-] – Razão de Poisson
 G [Pa] – Módulo de cisalhamento.
 e_{pp} [-] – Coeficiente de restituição partícula-partícula.
 e_{pw} [-] – Coeficiente de restituição partícula-parade.
 μ_{spp} [-] – coeficiente de atrito estático partícula-partícula.
 μ_{spw} [-] – coeficiente de atrito estático partícula-parade.
 μ_{rpp} [-] – coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula
 μ_{rpw} [-] – coeficiente de atrito de rolamento partícula-parade.
 ρ_p [g.cm⁻³] – Densidade das partículas
 d_p [mm] – Diâmetro das partículas
 X_1 – Variável codificada para a velocidade de rotação do eixo de agitação.
 X_2 – Variável codificada para a quantidade de massa no leito.
 X_3 – Variável codificada para a inclinação do leito.
 ΔM – Variação da massa no leito
 v_x – Velocidade média na direção x
 v_y – Velocidade média na direção y
 v_z – Velocidade média na direção z
 v_{res} – Velocidade média resultante

REFERÊNCIAS

Ebrahimi, M., Yaraghi A., Jadidi, B., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A. (2021), Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM, Powder Technol., Vol. 381, p. 129 – 140.
 Asachi, M., Nourafkan, E., Hassanpour, A. (2018), A review of current techniques for the evaluation of powder mixing, Adv. Powder Technol., Vol. 29, p. 1525 – 1549.
 Deng, W. Y., Yan, J. H., Li, X. D., Wang, F., Zhu, X. W., Lu, S. Y., Cen, K. F. (2009), Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process, J. Hazard. Mater., Vol. 162, p. 186 – 192.
 Charlou, C., Sauceau, M., Arlabosse, P. (2013) Characterisation of Residence Time Distribution in a Continuous Paddle

Dryer, J. Residuals Sci. Technol., Vol. 10, p 116 – 125.
 Charlou, C., Milhé, M., Sauceau, M., Arlabosse, P. (2015), A new methodology for measurement of sludge residence time distribution in a paddle dryer using X-ray fluorescence analysis, Water Res., Vol. 69, p. 1 – 8.
 Yuan, Q., Xu, L., Ma, S., Niu, C., Yan, C., Zhao, S. (2021). The effect of paddle configurations on particle mixing in a soil-fertilizer continuous mixing device, Powder Technol., Vol. 391, p. 292 – 300.
 Carvalho, L. L. (2021) Estudo da dinâmica de escoamento da unidade *Microwave Paddle Dryer*. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 81 p. (dissertação de mestrado).
 Lima, R. M. (2017) Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 103 p. (dissertação de mestrado).
 Jadidi, B., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A., (2021), Mixing performance analysis of non-cohesive particles in a double paddle blender using DEM and experiments, Powder Technol., Vol. 397, p. 117 – 122.