



## **ESTUDO DA DINÂMICA DE ESCOAMENTO DE PARTÍCULAS NO LEITO DE UM SECADOR DO TIPO *PADDLE DRYER* OPERANDO SEM SECAGEM E EM MODO CONTÍNUO**

VINÍCIUS P. BARBOSA<sup>1\*</sup>, LEONARDO L. DE CARVALHO<sup>1</sup>, CLÁUDIO R. DUARTE<sup>1</sup>,  
MARINA S. PEREIRA<sup>1</sup>, CARLOS HENRIQUE ATAÍDE<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Faculdade de Engenharia Química  
\*e-mail: [vinicius.pimenta87@gmail.com](mailto:vinicius.pimenta87@gmail.com)

**RESUMO** - Este trabalho traz uma contribuição em relação ao estudo da dinâmica de escoamento utilizando areia em um equipamento do tipo *Paddle Dryer* com dois eixos de agitação em contra rotação, operando em modo contínuo com o auxílio de análise computacional de imagens. Foram avaliadas as variáveis independentes: velocidade de rotação do eixo de agitação, altura do vertedouro e inclinação. As variáveis resposta foram: a massa retida no leito, o tamanho da zona de estagnação, essa definida como a região do leito acima das pás de agitação sob menor influência do processo de mistura, e a velocidade de deslocamento das partículas de areia no leito. Todas as análises foram para o equipamento operando no estado estacionário. Os resultados demonstraram que a velocidade de rotação do eixo de agitação pode ser utilizada para garantir uma boa distribuição do material ao longo do leito, evitando a formação da zona de estagnação. Já a altura de vertedouro e a inclinação influenciam fortemente na massa retida no leito e, conseqüentemente, na velocidade de deslocamento dos sólidos, propriedades importantes para a regulação do tempo de residência, exposição superficial e contato homogêneo do material no leito com as paredes e pás do equipamento.

### **INTRODUÇÃO**

Este trabalho teve como objetivo o estudo da dinâmica do leito de material particulado no interior de um secador do tipo *paddle dryer*. Utilizou-se areia como material particulado, sendo que os ensaios experimentais foram feitos com o equipamento aberto e seu leito sendo filmado. Uma das motivações do estudo foi a carência de trabalhos sobre a análise de escoamento neste tipo de equipamento, já que a maior parte dos estudos sobre *paddle dryers* abordam principalmente a análise do tempo de residência sem aprofundar em aspectos relacionados à dinâmica de transporte do material no leito.

Tazaki *et al.* (2011) realizou um estudo sobre o comportamento do lodo residual de esgoto em um *paddle dryer* com 4 eixos de

agitação onde foi medido o tempo de residência através dos traçadores cloreto de níquel e cloreto de magnésio, sendo verificado que o *backmixing*, fenômeno em que parte do material no leito sofre influência de direcionamento na direção oposta ao deslocamento axial, devido ao processo de mistura radial das pás de agitação, possui forte influência na distribuição e tempo de residência dos sólidos.

Já no trabalho de Charlou *et al.* (2013) foi utilizado um *paddle dryer* de eixo único para o estudo do tempo de residência de lodo residual de esgoto utilizando um pulso de solução de cloreto de sódio, sendo medida a condutividade elétrica das amostras coletadas na saída do equipamento, apresentando boa reprodutibilidade dos resultados, sendo feito neste mesmo equipamento a medida de tempo de residência utilizando o método de

fluorescência de raios-X com diferentes traçadores minerais por Charlou *et al.* (2015), sendo o traçador adicionado na seção de entrada por um pulso do tipo Dirac calculado para um tempo de injeção de 2% do tempo de residência estimado, sendo a concentração na saída do equipamento medida em relação ao tempo. Foi verificado a equivalência entre os métodos de medida de tempo de residência por condutividade elétrica e traçadores minerais por fluorescência de raios-X.

Devido a excelente capacidade de mistura dos *paddle dryers*, este tipo de equipamento também já foi empregado como reator por Viola *et al.* (2016) para a produção de etanol de segunda geração a partir de lignocelulose, onde foi observado a melhoria em alguns aspectos do processo como a economia de água.

Para estudos envolvendo a dinâmica de escoamento e mistura, diversas técnicas podem ser utilizadas, sendo que muitas envolvem limitações por só permitir a análise na superfície do leito, principalmente nos casos de grande quantidade de partículas, ou em fluidos translúcidos, como o método da velocimetria por imagem de partículas. Abordagens para análises mais complexas exigem a utilização de equipamentos sofisticados tais como *Positron Particle Tracking (PEPT)* e *Electrical Capacitance Tomography (ECT)*, que muitas vezes possuem diversas restrições quanto a instalação e leitura adequada dos sensores (Ebrahimi *et al.*, 2022, Asachi *et al.*, 2018).

Técnicas de análise de imagem podem ser utilizadas com maior simplicidade para a análise de dinâmica de material particulado, sem a necessidade de intervenção manual para as análises, o que permite a redução do tempo despendido e a possibilidade de quantificação de fenômenos de maneira consistente através ferramentas de baixo custo (Barbosa *et al.*, 2020, Hamzelo et al., 2014, Liao e Tarng, 2009).

Ajayi e Sheehan (2012) utilizaram técnicas de análise de imagem para a avaliação dos sólidos em suspensão e nos *flightbornes* num tambor rotatório, demonstrando a viabilidade e confiabilidade deste tipo de técnica e a importância no tratamento da imagem, como a utilização de filtros. Já o trabalho de Karali *et al.* (2016) utilizou técnicas de análise de imagem para otimizar a

quantidade de material dentro de um tambor rotativo, onde foi possível avaliar aspectos em diferentes condições operacionais através da filmagem do leito do equipamento.

A avaliação do deslocamento do leito utilizando partículas traçadoras que se diferenciam através de sua cor das demais partículas também são uma alternativa, como feito por Bachmann *et al.* (2016), que realizou experimentos com partículas de alumina para avaliação do tempo de residência num secador de leito fluidizado horizontal, sendo o traçador utilizado as próprias partículas de alumina pintadas que eram injetadas na entrada do equipamento e contadas manualmente na saída.

Desta forma, neste trabalho foram empregadas metodologias de análise de imagem nos frames dos vídeos do leito do equipamento, sendo estes resultados correlacionados com os parâmetros experimentais de variáveis tipicamente utilizadas para agitação e escoamento do material no leito de secadores *paddle dryers*.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Unidade experimental e metodologia

A Figura 1 mostra a configuração da unidade experimental para os ensaios de dinâmica do leito.

A unidade experimental contava com um sistema de aquisição e monitoramento de dados implementado no LabView2017™ para a determinação da taxa mássica de saída de areia, além do consumo de torque e potência do motor através dos dados enviados pelo inversor de frequência (CFW700) via comunicação serial. Era considerado que o experimento atingiu o estado estacionário quando o sistema alcançava uma vazão mássica de saída numericamente igual a de alimentação e a potência consumida e o torque no eixo ficavam constantes. O fluxograma da operação é mostrado na Figura 2.

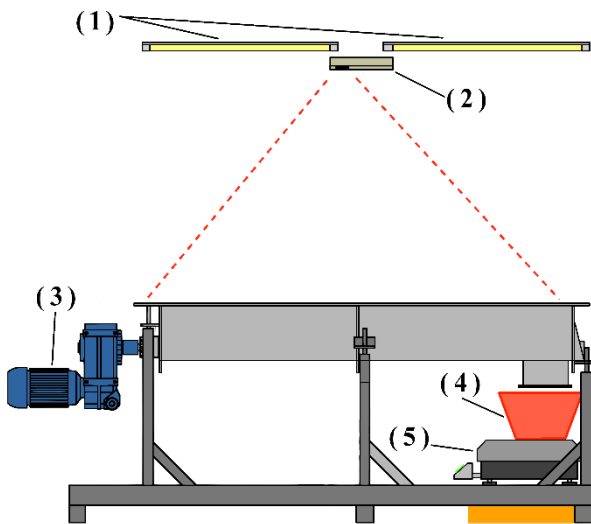


Figura 1: 1) Sistema de iluminação do leito, 2) Suporte para o celular utilizado nas filmagens, 3) Motorreductor de 4cv e redução de 45,02 vezes acoplado ao eixo de agitação, 4) Balde plástico na saída de material do leito e 5) Balança modelo URANO UDC/CO 30/5 para a medida da massa de areia coletada com o tempo na saída do equipamento.

Os experimentos foram gravados por um celular modelo note 10 plus e as análises de imagem foram realizadas no software *imageJ* para os frames nos instantes de tempo de interesse.

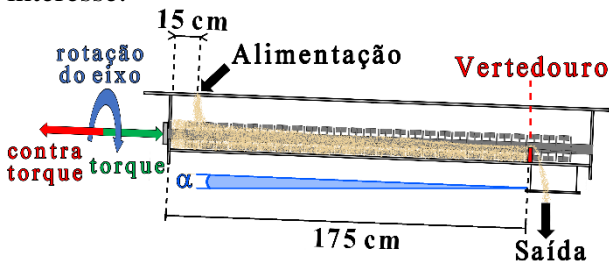


Figura 2: Fluxograma esquemático da operação do Paddle Dryer.

Todas as análises apresentadas neste trabalho foram realizadas com o equipamento operando no estado estacionário.

### Material particulado utilizado

Foram utilizados 310 kg de areia para a realização dos ensaios, sendo 40kg de areia pintada de preto, para ser utilizada como traçador. A Figura 3 mostra a areia comum e a pintada de preto utilizadas nos ensaios.

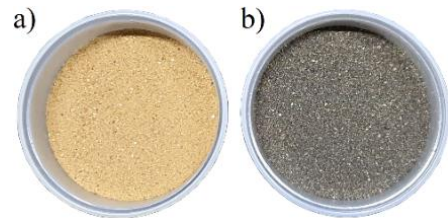


Figura 3: Areia a) comum e b) pintada de preto.

A análise granulométrica das partículas de areia foi realizada por peneiramento vibratório utilizando peneiras da série *Mesh Tyler AS 330 control* da *Retsch* e ajustada de acordo com o modelo Sigmóide, mostrado conforme Equação 1, com parâmetros do modelo apresentados na Tabela 1.

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D}\right)^p} \quad (1)$$

Tabela 1: Granulometria da areia utilizada nos ensaios

Modelo	R <sup>2</sup>	Parâmetros
Sigmóide	0,998	$D_{50}=0,313\text{mm}$ $p=3,60$

### Experimentos realizados

Os experimentos realizados eram iniciados com uma massa total de areia conhecida. Desta forma, para a determinação da massa de areia no leito do equipamento, era pesada a massa de areia fora do equipamento e descontada da massa total, fornecendo a massa de areia retida.

Os dados coletados para análise foram sempre para o equipamento operando em estado estacionário, quando a taxa mássica de saída de areia se igualava a de alimentação, sendo esta mantida constante em 40kg/h (667g/min).

Os experimentos foram realizados em 4 grupos experimentais envolvendo as variáveis independentes: velocidade de rotação do eixo de agitação, em rotações por minuto, altura do vertedouro, que é a barreira de retenção na saída do leito e inclinação, contabilizada em graus.

As variáveis resposta avaliadas foram a massa de areia retida no leito, o tamanho da zona de estagnação, que é a região onde o material no leito fica acima das pás de agitação e apresenta uma baixa taxa de mistura das

partículas na superfície do leito, e a velocidade de deslocamento dos sólidos. Foram realizados 21 experimentos, separados em diferentes grupos experimentais para a avaliação destas variáveis.

A organização dos experimentos realizados é apresentada na Figura 4 para os 4 grupos experimentais descritos a seguir.

Grupo I: 9 experimentos realizados na forma de um planejamento experimental  $3^k$  com duas variáveis independentes: velocidade de rotação do eixo de agitação ( $X_{rpm}$ ) e altura do vertedouro ( $X_V$ ). Inclinação ( $Inc$ ) constante em  $2^\circ$ . Os níveis e codificação das variáveis são mostrados na Tabela 2. Variável resposta: massa de areia retida no leito ( $m$ )

Tabela 2: Níveis e codificação das variáveis do planejamento experimental do Grupo I.

Nível	Rotação do eixo de agitação. ( $X_{rpm}$ )	Altura do vertedouro ( $X_V$ )
-1	15	17
0	20	67
1	25	117

Grupo II: 3 experimentos realizados com variação da inclinação ( $Inc$ ). Nas análises foi aproveitado o experimento no ponto intermediário do Grupo I. Variável resposta: massa de areia retida no leito ( $m$ )

Grupo III: 6 experimentos com o leito do *paddle dryer* na horizontal, sem inclinação, variando a velocidade de rotação do eixo de agitação ( $n_{rpm}$ ) para a análise do tamanho da zona de estagnação. Foi aproveitado o resultado de um experimento do Grupo II, com inclinação de  $0^\circ$ . Variáveis resposta: massa de areia retida no leito ( $m$ ) e tamanho da zona de estagnação ( $L_{estag}$ ).

Grupo IV: 3 ensaios para a análise da velocidade de deslocamento dos sólidos utilizando areia pintada de preto como traçador e variando a altura do vertedouro. Ensaios realizados na velocidade máxima dos experimentos do Grupo I, com  $2^\circ$  de inclinação. A metodologia de análise de imagem aplicada é explicada juntamente com os resultados. Variáveis resposta: velocidade de deslocamento do plug ( $v_{plug}$ ) e dispersão do plug ( $D_{plug}$ ).

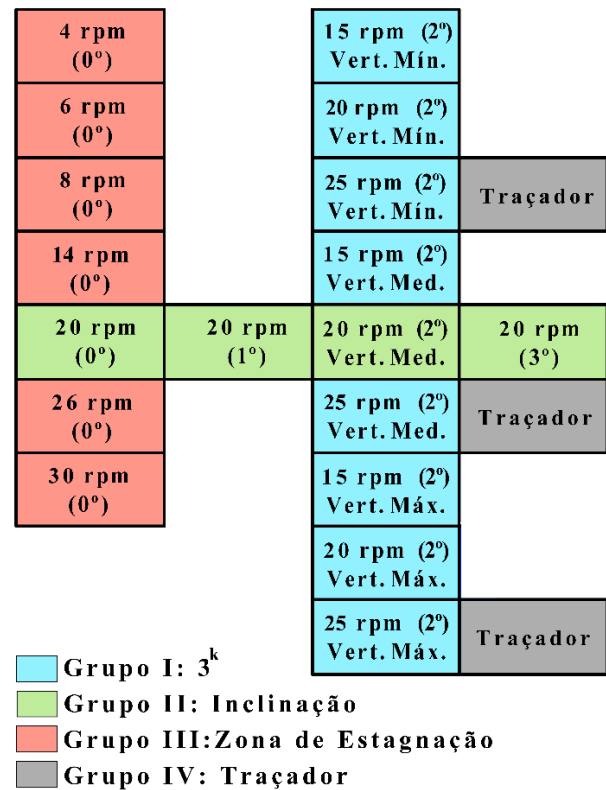


Figura 4: Organização dos 4 grupos experimentais realizados para avaliação da dinâmica do leito.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados dos 4 grupos experimentais realizados para o estudo da dinâmica do leito.

### Resultados dos ensaios do Grupo I

Os resultados dos experimentos do grupo I são mostrados na Figura 5.

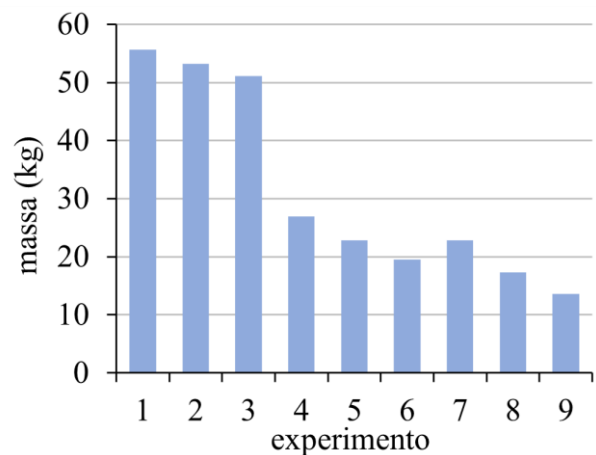


Figura 5: Massa de areia retida no leito para os diferentes experimentos do Grupo I.

A análise estatística para as variáveis independentes significativas foi realizada no software STATISTICA 7. O intervalo de confiança foi de 95% com nível de significância de 5%.

O modelo ajustado e a superfície de resposta para a variável resposta massa retida no leito ( $m$ ) são mostrados na Equação 2 e na Figura 6, respectivamente. Foram considerados os efeitos lineares e quadráticos das variáveis principais e interação entre 2 variáveis. As duas variáveis independentes analisadas para os experimentos do Grupo I, velocidade de rotação do eixo de agitação ( $X_{rpm}$ ) e altura do vertedouro ( $X_V$ ), se mostraram significativas.

$$m(kg) = 23,08 - 3,53X_{rpm} + 17,72X_V + 12,53X_V^2 + 1,17X_VX_{rpm} \quad (2)$$

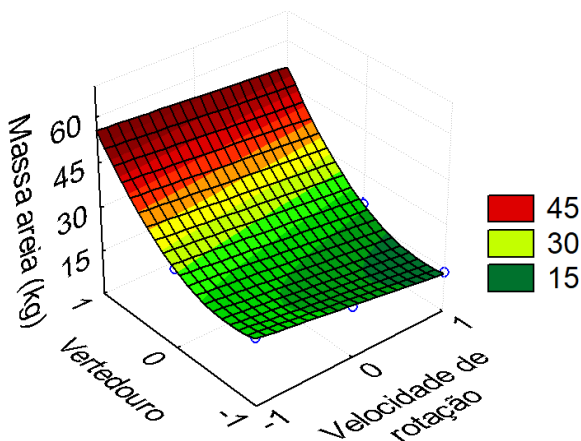


Figura 6: Superfície de resposta para massa de areia retida no leito em função da velocidade de rotação do eixo ( $X_{rpm}$ ) e altura do vertedouro ( $X_V$ ) para os experimentos do Grupo I.

É possível observar na superfície de resposta e no modelo ajustado que para a variável velocidade de rotação do eixo de agitação, quanto maior foi seu valor, menor foi a massa de areia no leito.

Como esperado, obteve-se uma menor massa de areia retida no leito para as maiores velocidades de rotação do eixo ( $X_{rpm}$ ). O motivo disto é que após entrar na seção de alimentação a areia se distribui mais rapidamente ao longo do leito em maiores velocidades de rotação do eixo de agitação

( $X_{rpm}$ ), reduzindo a diferença de altura do leito entre as seções de alimentação e saída de material do equipamento.

Já a altura do vertedouro ( $X_V$ ) possui grande influência na massa de areia retida no leito, sendo possível observar pela superfície de resposta que quanto maior sua altura, maior foi a massa de areia retida no leito. Isto ocorre devido a barreira física formada pelo vertedouro, que faz com que a altura que o leito deve atingir para alcançar a seção de saída dos sólidos seja maior. Pela equação ajustada do modelo e a superfície de resposta, é possível observar que a altura do vertedouro possui maior influência na quantidade de sólidos retida no leito que a velocidade de rotação do eixo de agitação para a faixa analisada.

## Resultados dos ensaios do Grupo II

Na Tabela 3 são apresentados os resultados para a avaliação da influência da variável independente inclinação ( $Inc$ ) na variável resposta massa de areia retida no leito ( $m$ ). Estes ensaios foram para o vertedouro na altura de 67mm e velocidade de rotação do eixo de 20rpm, sendo o resultado do experimento 3 aproveitado do experimento 5 do Grupo I.

Tabela 3: Influência da inclinação na massa retida de sólidos.

Exp	$Inc(^{\circ})$	$m(kg)$
1	0	42,48
2	1	32,60
3	2	22,78
4	3	18,36

É possível observar que o aumento da inclinação contribuiu para a diminuição da massa de areia no leito. A relação entre a massa de areia no leito e a inclinação foi linear para a faixa analisada, como mostra a Figura 7.

A inclinação descendente favorece o deslocamento dos sólidos devido à força gravitacional, que passa a exercer um papel importante em termos de deslocamento do material no leito. Comparando a posição horizontal do leito,  $0^{\circ}$ , e a maior inclinação do leito analisada,  $3^{\circ}$ , a diminuição da massa de areia retida no leito com o aumento da inclinação foi de mais de 50%, mostrando uma forte influência desta variável na configuração dos sólidos no leito. Com a diminuição da



inclinação para  $0^\circ$  foi observado a formação da zona de estagnação acima das pás de agitação, fato que será abordado no tópico seguinte.

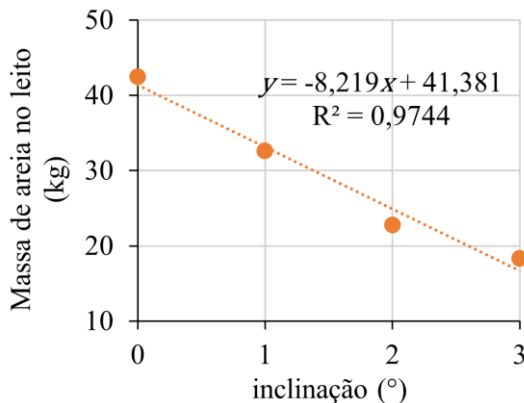


Figura 7: Massa de areia retida em função do ângulo de inclinação e equação ajustada.

### Resultados dos ensaios do Grupo III

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para os ensaios relativos ao comprimento da zona de estagnação ( $L_{estag}$ ) em função da velocidade de rotação do eixo de agitação ( $n_{rpm}$ ) para a altura do vertedouro em 67mm e inclinação de  $0^\circ$ , leito na horizontal, sendo o resultado do experimento 5 aproveitado do experimento 1 do grupo II.

À medida que a velocidade de rotação aumenta, é possível observar que o tamanho da zona de estagnação diminuiu, como mostra a Figura 8, que apresenta as fotos do tamanho da zona de estagnação em função da velocidade de rotação do eixo de agitação. Para a medida do tamanho da zona de estagnação foi utilizado o software *imageJ* aplicado aos frames do vídeo com o equipamento operando no estado estacionário.

Tabela 4: Comprimento da zona de estagnação em função da velocidade de rotação.

Exp	$n_{rpm}$ (rpm)	$m(kg)$	$L_{estag}$ (cm)
1	4	78,26	130,7
2	6	64,85	121,3
3	8	59,42	112,7
4	14	49,07	88,3
5	20	42,48	62,5
6	26	38,19	29,5
7	30	36,46	0

Os resultados são mostrados na forma gráfica na Figura 9, para as variações da massa

no leito e do tamanho da zona de estagnação em função da velocidade de rotação do eixo de agitação.

A alteração no tamanho da zona de estagnação se deve ao fato de que maiores velocidades de rotação do eixo de agitação garantem uma distribuição mais rápida do material que entra na seção de alimentação ao longo do leito. Isso ocorre porque com o aumento da velocidade há um aumento das forças agindo sobre as partículas, o que contribui para a melhoria no grau de mistura, (Jaddi *et al.*, 2022). Porém, na ausência da inclinação, importante força motriz no deslocamento dos sólidos, pode ocorrer o acúmulo de material nas regiões próximas da seção de alimentação, com a altura do leito decaindo à medida que se aproxima do ponto de saída dos sólidos no equipamento.

Foi observado o comprometimento da mistura na superfície do leito na zona de estagnação. Na Figura 10 é mostrado a redução da mistura superficial ao longo do leito em três diferentes pontos ao longo do leito para o experimento 3 do grupo III, com 8 rpm.

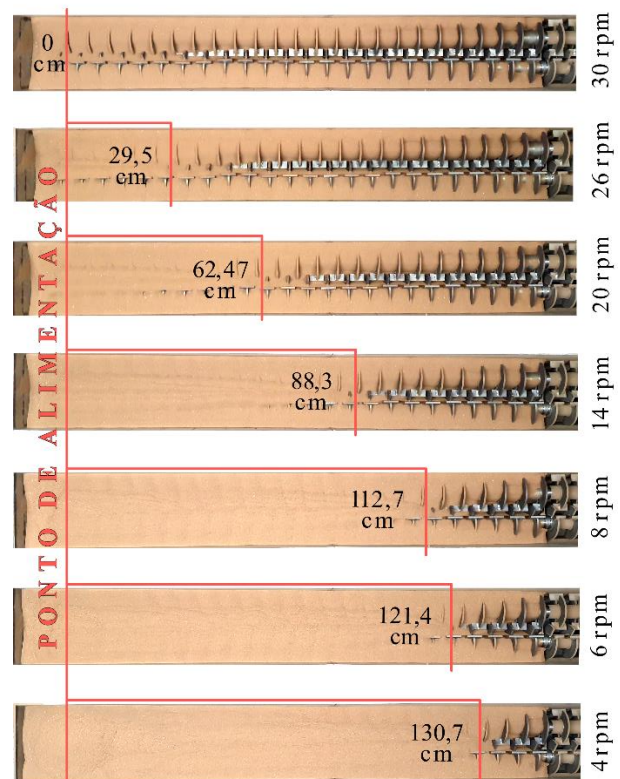


Figura 8: Imagens do tamanho da zona de estagnação em função da velocidade de rotação do eixo de agitação.

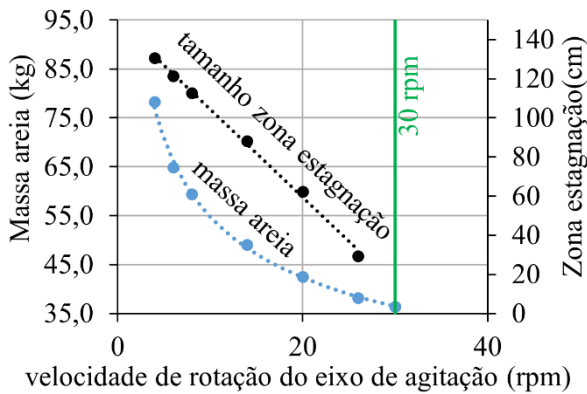


Figura 9: Relação entre o tamanho da zona de estagnação, massa de areia retida no leito e velocidade de rotação do eixo de agitação.

#### Alimentação

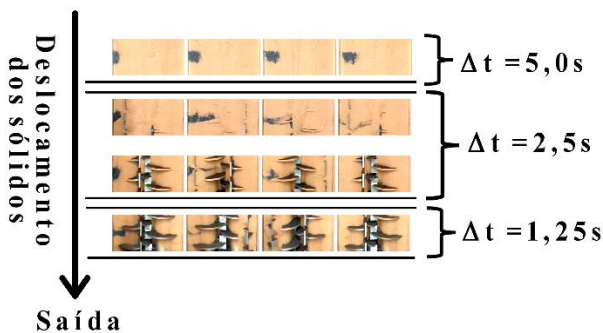


Figura 10: Mistura superficial do material na superfície do equipamento.

A diminuição da velocidade radial de mistura na superfície do leito se deve ao distanciamento das pás de agitação das partículas presentes na superfície, comprometendo a transferência de energia cinética realizada pelas interações partícula-partícula e pá-partícula, como ilustrado na Figura 11.

Desta forma, manter uma velocidade mínima de rotação do eixo de agitação que garanta a distribuição adequada do leito sem que haja o acúmulo de material acima da região de atuação das pás de agitação deve ser um fator a ser observado, sendo os ajustes da velocidade de rotação do eixo de agitação, da altura do vertedouro e da inclinação uma maneira de regular a distribuição e a massa retida no leito, modificando a dinâmica de transporte dos sólidos neste tipo de equipamento.

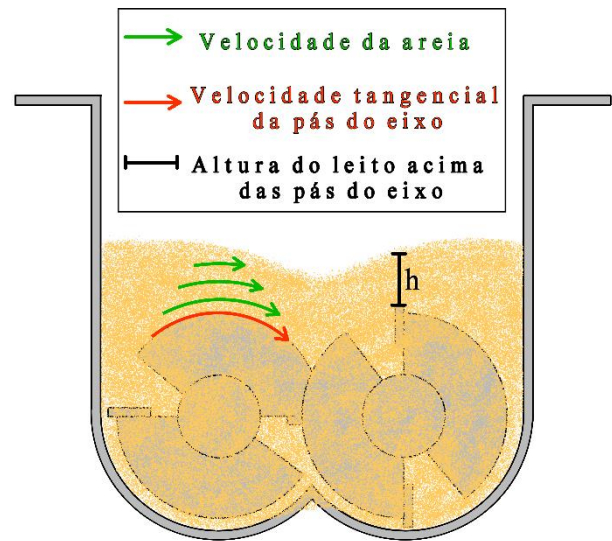


Figura 11: Ilustração do mecanismo fenomenológico para o baixo grau de mistura superficial na zona de estagnação.

O grau de agitação do leito possui aspectos importantes relacionados a secagem em secadores do tipo *paddle dryer*, já que a velocidade de rotação do eixo de agitação é utilizada justamente com o objetivo de se atingir melhor eficiência, facilitando a saída de vapores e melhorando a distribuição de calor no leito e troca térmica com as superfícies de aquecimento (Chen et al., 2016, Arlabosse e Chitu, 2007, Schlunder e Mollekopf, 1984).

#### Resultados dos ensaios do Grupo IV

Na Tabela 5 e na Figura 12 estão apresentados os resultados para os 3 ensaios referentes a variável resposta velocidade de deslocamento do plug ( $v_{plug}$ ) em função da variável independente altura do vertedouro ( $L_V$ ). Estes ensaios foram conduzidos na velocidade de rotação de 25 rpm e inclinação de  $2^\circ$ , sendo esta velocidade de rotação a mais alta dos ensaios de dinâmica do leito em modo contínuo do Grupo I, selecionada como forma a se evitar qualquer formação de zonas de estagnação acima das pás que pudessem influenciar no deslocamento dos sólidos e comprometer as análises de imagem.

Na Figura 12 são mostradas as fotos do deslocamento do plug no leito para as três condições de altura de vertedouro, sendo possível verificar a variação na dispersão do plug e no volume do leito em relação à altura do vertedouro.

Tabela 5: Velocidade de deslocamento e dispersão do plug em função da altura do vertedouro.

Exp	$L_V$ (mm)	$D_{plug}$ (cm)	$v_{plug}$ (cm/min)
1	17	124,08	7,26
2	67	95,44	5,79
3	117	59,52	2,10

A Figura 13 ilustra o procedimento aplicado para a medida do deslocamento e do tamanho do plug em função do tempo. Cada frame retirado do vídeo da gravação do deslocamento do plug foi analisado no *software imageJ* para os tempos de interesse. O tratamento de imagem para cada frame consistiu na correção da intensidade do brilho e do contraste, com a posterior transformação da imagem para 8 bits em tons de cinza. Após isso, o perfil dos pixels da imagem em função de suas posições ao longo do leito foi medido de acordo com os seus tons de cinza, utilizando a ferramenta *plot profile*. Para o cálculo do branco, foi medido o valor dos pixels para o leito ocupado somente com areia comum em cada uma das condições experimentais de altura de vertedouro e posteriormente subtraído de todos os perfis de deslocamento de plug analisados, permitindo a correção das tonalidades devido às diferenças de iluminação no leito, já que a luminosidade é um aspecto importante para coleta coerente de dados via análise de imagem (Karali *et al.*, 2017). Foi então aplicado um tratamento numérico nos dados, invertendo os valores dos pixels para positivo para uma melhor visualização na forma gráfica e determinação da localização do centro de cada plug utilizando integração numérica pelo método dos trapézios. Os procedimentos foram realizados no *software Microsoft Excel*®.

Para a obtenção da velocidade de deslocamento do *plug*,  $v_k$ , foi feita a medida do tempo gasto para seu deslocamento entre dois pontos consecutivos no leito,  $S_k$ , conforme mostrado pela Equação 3. Foram realizadas 3 medidas de velocidade para cada condição de altura de vertedouro e calculada a média e o desvio padrão destas.

$$v_k = \frac{S_{k+1} - S_k}{t_{k+1} + t_k} \quad (3)$$

Já o tamanho do plug foi calculado com a Equação 4, levando em conta o início e o fim do plug.

$$D_k = D_{f-k} - D_{i-k} \quad (4)$$

Sendo  $D_k$  o tamanho do plug,  $D_{i-k}$  o ponto inicial do plug e  $D_{f-k}$  o ponto final do plug, todos para o instante  $t_k$ .

Para cada *plug* realizado foram utilizados 12 potes de areia pintada de preto com 667g cada, alimentados a cada um minuto no lugar da areia comum, totalizando 8,0 kg de areia pintada de preto por *plug*. Após a alimentação de todos os potes com areia pintada, era retomada a alimentação com areia comum.



Figura 12: Tamanho *plug* e volume do leito para o vertedouro na altura a) máxima, b) média e c) mínima.

O gráfico da velocidade de deslocamento e do tamanho do *plug* em função da altura do vertedouro é mostrado na Figura 14.

Analisando os resultados obtidos, é possível observar que quanto menor a altura do



vertedouro, maiores foram a velocidade de deslocamento e a dispersão do *plug*. Isso se deve ao fato de que com a diminuição da altura do vertedouro, há uma diminuição do volume de areia no leito, resultando num leito mais raso, o que aumenta a dispersão do *plug* e diminui o tempo de residência, causando uma maior velocidade de deslocamento dos sólidos

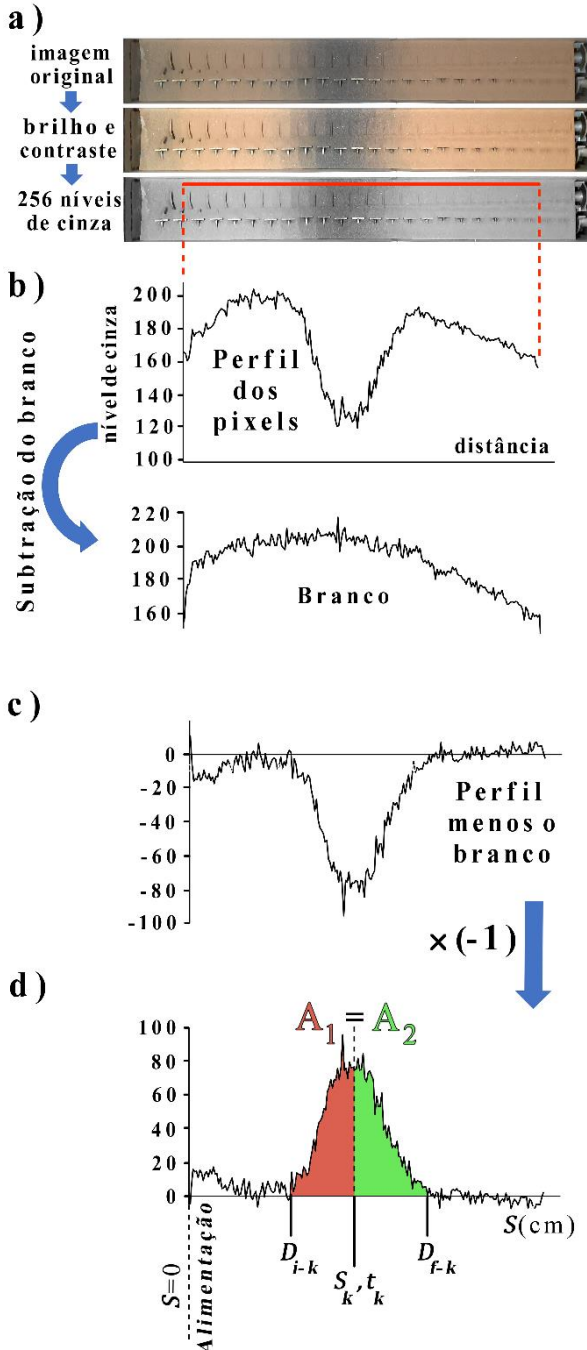


Figura 13: Procedimento para medida do ponto central do *plug* para o cálculo da velocidade de deslocamento e dispersão.

Já a Figura 15 mostra o gráfico com a posição dos *plugs* em relação ao ponto de

alimentação para alguns dos pontos analisados demonstrando o resultado da aplicação da metodologia. É indicado o centro de cada *plug* e o tempo de ensaio para atingir determinada posição, sendo que o tempo zero adotado foi o de alimentação do último pote de areia pintada de preto para cada *plug*.

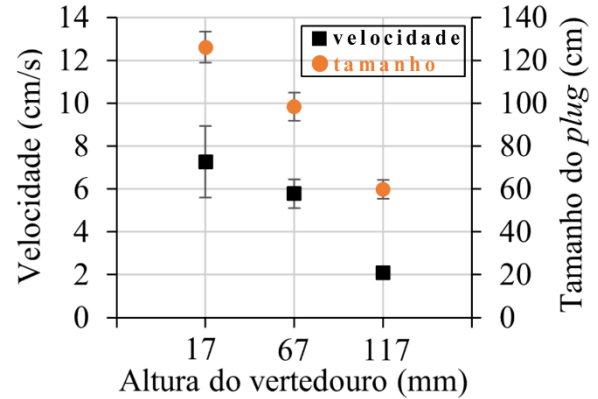


Figura 14: Velocidade de deslocamento e do tamanho do *plug* em função da altura do vertedouro.

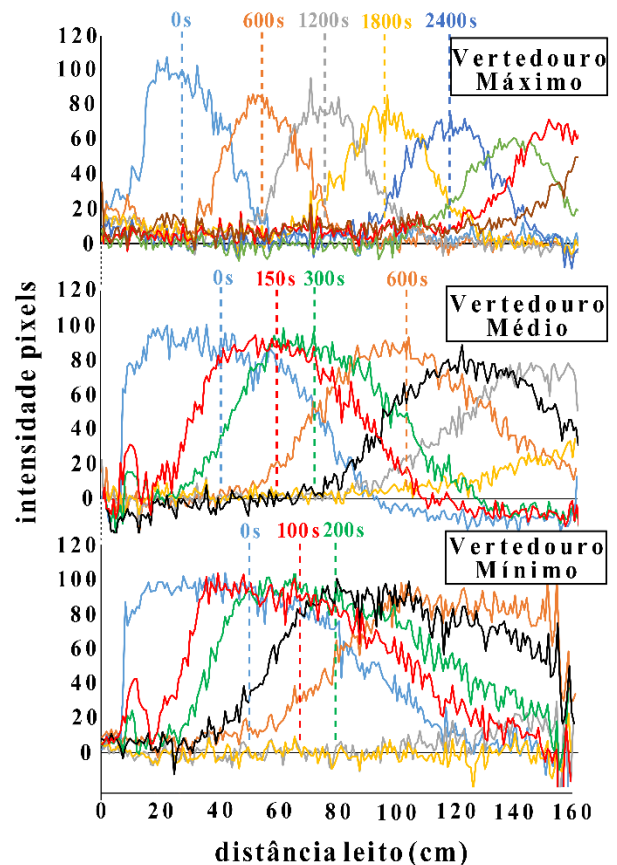


Figura 15: Curvas de intensidade dos pixels da imagem do deslocamento do *plug* em função do tempo para as três alturas de vertedouro.

A análise do deslocamento não foi possível para todos os frames selecionados, já

que o plug deveria estar totalmente dentro do leito para a aplicação da integração numérica da curva para encontrar seu ponto médio no perfil de tonalidade dos pixels.

Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que a altura do vertedouro possui grande influência na velocidade de deslocamento dos sólidos, isso se deve a retenção de material no leito promovida pela altura do vertedouro, fato já discutido nos resultados dos experimentos do planejamento experimental do Grupo I.

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6, juntamente com a estimativa do tempo de residência calculado a partir da velocidade média para cada experimento realizado.

Tabela 6: Estimativa do tempo de residência baseado nas medidas de velocidade de deslocamento do plug.

Exp.	$L_V$ (mm)	$v_{plug}$ (cm/s)	$t_{residência}$ (min)
1	17	7,26	22,04
2	67	5,79	27,68
3	117	2,10	76,56

É importante salientar que a velocidade de deslocamento constante do material no leito, que permitiu a estimativa do tempo de residência, se deve ao fato de que a altura do leito ao longo de todo o equipamento foi relativamente uniforme nos ensaios realizados, já que a velocidade de rotação do eixo era alta o suficiente para garantir uma boa distribuição da areia ao longo do leito.

Diferentemente do observado nestes resultados, quando há formação da zona de estagnação acima das pás há uma variação considerável da altura do leito entre as seções de alimentação e de saída de material, sendo assim a velocidade de deslocamento dos sólidos pode não ser linear, já que a área da seção transversal ao deslocamento da areia no leito se altera significativamente ao longo do equipamento, fazendo com a velocidade axial não seja constante.

Pelos resultados obtidos, também foi possível verificar que o vertedouro pode ser utilizado como forma de regular o tempo de residência do material no equipamento, já que quanto maior sua altura, maior será a retenção

dos sólidos, fator diretamente relacionado ao tempo de residência.

Estes resultados são importantes no caso do uso do equipamento em processo contínuo e com aplicação de secagem, pois deixam claro que a regulagem do tempo de residência e, conseqüentemente, a alteração da cinética de secagem, podem ser realizadas mudando a altura do vertedouro. Desta forma, para uma taxa de alimentação e potência energética constantes, a energia específica é constante no estado estacionário, porém a taxa de transferência de energia por massa de material pode mudar se a massa retida no leito for alterada pela altura do vertedouro, modificando a cinética de secagem.

## CONCLUSÕES

O estudo de dinâmica de leito com areia no modo contínuo mostrou a influência das variáveis independentes velocidade de rotação do eixo de agitação, altura do vertedouro e inclinação e como estas podem ser utilizadas em conjunto ou individualmente para regular a quantidade de material e sua distribuição no leito, alterando, assim, aspectos da dinâmica de escoamento. A diminuição da altura do vertedouro, o aumento da velocidade de rotação do eixo de agitação e o aumento da inclinação mostraram um efeito de diminuição da massa de material retida no leito, influências que podem ser combinadas de diferentes formas em processos de secagem para garantir a escoabilidade do material de acordo com as características da mistura alimentada, como sua densidade, nível de coesão entre as partículas, granulometria e teor de umidade, sendo este último variável ao longo do leito num processo de secagem. Além disso, valores adequados de deslocamento e nível do material no leito garantem melhor contato com superfícies do casco e pás, melhor grau de mistura do leito e exposição superficial mais uniforme, fatores que estão intrinsecamente relacionados com coeficientes de troca de calor e massa e devem ser explorados da melhor forma possível para melhorar a eficiência do processo de secagem num secador do tipo *Paddle Dryer*.

É importante salientar que casos envolvendo o processo de secagem de materiais com diferentes níveis de coesão, umidade e

granulometria, os níveis de influência das variáveis aqui avaliadas pode mudar, alterando a intensidade dos fenômenos apresentados e gerando outros tipos de respostas que não foram possíveis de quantificar com o estudo apresentado neste trabalho.

A análise de imagem permitiu a avaliação de aspectos importantes relacionados a dinâmica de partículas utilizando técnicas pouco invasivas e de baixo custo em termo de utilização de equipamentos e *softwares*.

## NOMENCLATURA

$D_k$  [cm] - tamanho do plug no instante  $t_k$

$D_{i-k}$  [cm] - ponto inicial do plug no leito

$D_{f-k}$  [-] - o ponto final do plug no leito

$D_{plug}$  [cm] - Dispersão do plug.

$Inc$  [°] - Inclinação do *paddle dryer*.

$L_{estag}$  [cm] - Tamanho da zona de estagnação.

$m$  [kg] - Massa de areia retida no leito no estado estacionário.

$n_{rpm}$  [rpm] - Velocidade de rotação do eixo de agitação.

$S_k$  [cm] - posição central do plug.

$t_k$  [s] tempo decorrido

$t_{residência}$  [minutos] - tempo de residência

$v_{plug}$  [cm/s] - Velocidade de deslocamento do plug.

$X_{rpm}$  [-] - Variável codificada para a velocidade de rotação do eixo de agitação.

$X_V$  [-] - Varável codificada para a altura do vertedouro.

## REFERÊNCIAS

- Ajayi, O.O., Sheehan, M.E. (2012), Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers, *Powder Technol.*, Vol. 223, p.123-130.
- Arlabosse, P., Chitu, T. (2007) Identification of the Limiting Mechanism in Contact Drying of Agitated Sewage Sludge, *Dry. Technol.* Vol 25:4, p. 557-567
- 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.
- Bachmann, P., Bück, A., Tsotsas, E. (2016), Investigation of the residence time behavior of particulate products and correlation for the Bodenstein number in horizontal fluidized beds, *Powder Technol.*, Vol 301, p. 1067-1076.
- Barbosa, V.P., Menezes, A.L., Gedraite, R., Ataíde, C.H. (2020), Vibration screening: A detailed study using image analysis techniques to characterize the bed behavior in solid-liquid separation, *Powder Technol.*, Vol. 154, 106383.
- C.W. Liao, Y.S. Tarn (2009), On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution, *Powder Technol.*, Vol. 189, p.508 – 513.
- 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.
- 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.
- Chen, S., Wang, F., Milhé, M., Arlabosse, P., Liang, F., Chi, Y., Nzihou, A., Yan, J. (2016), Experimental and theoretical research on agitated contact drying of sewage sludge in a continuous paddle dryer, *Dry. Technol.* Vol 34:16, p. 1979-1990
- 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.
- Hamzelo, E., Massinaei, M., Mehrshad, N. (2014), Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks, *Powder Technol.*, Vol, 261, p. 185-190.
- Jadidi, B., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A., (2022), Mixing performance analysis of non-cohesive particles in a double paddle blender using DEM and experiments, *Powder Technol.*, Vol. 397, p. 117 – 122.

- Karali, M. A., Specht, E., Herz, F., Mellmann, J. (2016), Comparison of image analysis methods to determine the optimum loading of flighted rotary drums, *Powder Technol*, Vol. 291, p 147-153.
- Karali, M. A., Specht, E., Herz, F., Mellmann, J. (2017), Different camera and light positions to facilitate image analysis processing in rotary drums studies, *Powder Technol*, Vol. 306, p 55-60.
- Schlunder, E.U., Mollekopf, N. (1984), Vacuum Contact Drying of Free Flowing Mechanically Agitated Particulate Material, *Chem. Eng. Process*, Vol 18, p. 93 – 111.
- Tazaki, M., Tsuno, H., Takaoka, M., Shimizu, K. (2011), Modeling of Sludge Behavior in a Steam Dryer, *Dry. Technol.*, Vol 29:14, p. 1748 – 1757.
- Viola, E., Arcieri, G., Zimbardi, F., Valerio, V., Cerone, N., Corato, U. (2016), Evaluation of a pilot-scaled paddle dryer for the production of ethanol from lignocellulose including inhibitor removal and high-solids enzymatic hydrolysis, *Biotechnol. Rep.*, Vol 9, p.38 – 45.