



## **ANÁLISE DO CARREGAMENTO IDEAL EM TAMBORES ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES INTERCALADOS**

JENIFFER C. SILVEIRA<sup>1\*</sup>, RONDINELLI M. LIMA<sup>2</sup>, CLAUDIO R. DUARTE<sup>3</sup>, MARCOS A. S. BARROZO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas

<sup>2</sup>Centro de Tecnologia Mineral - Núcleo Regional do Espírito Santo - CETEM/NRES

<sup>3</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Faculdade de Engenharia Química

\*e-mail: jeniffercristinasilveira@gmail.com

**RESUMO** - Os tambores rotatórios com suspensores são comumente usados devido à sua alta capacidade de processamento e versatilidade de aplicação. O carregamento ideal é um parâmetro importante no projeto de tambores rotatórios sendo fundamental sua determinação para adequada operação do equipamento. O objetivo deste trabalho foi estudar o carregamento ideal em tambores rotatórios com suspensores intercalados, configuração esta que carece de informações experimentais acerca da dinâmica granular que ocorre no interior do tambor rotatório. Os resultados mostraram que quanto maior a distância de separação entre os segmentos, maior a velocidade ideal de rotação, uma vez que as partículas apresentam facilidade de escoarem entre os suspensores. A velocidade de carregamento ideal foi diferente para cada seção do tambor devido à distância de separação entre os suspensores intercalados. Constatou-se que os suspensores intercalados com distância de separação de 15° melhoraram a distribuição dos sólidos na seção transversal do equipamento.

### **INTRODUÇÃO**

Os secadores rotatórios com suspensores são comumente usados para o processamento de partículas com diferentes tamanhos, formatos, teor de umidade e fluidez, sendo ideais para a secagem de materiais granulares de escoamento livre, como sementes, grãos, açúcar e minérios (Lee, 2008; Perry e Green, 1997).

Os secadores rotativos com suspensores consistem em um longo tambor cilíndrico que gira em torno do seu próprio eixo longitudinal. O tambor é ligeiramente inclinado em relação à horizontal (0° a 5°) para induzir o fluxo de sólidos de uma extremidade para a outra. Os suspensores são posicionados na circunferência interna do tambor; eles carregam as partículas e as dispersam na corrente de gás quente, aumentando, desta forma, a área de superfície de contato (Geng *et al.*, 2011; Sunkara *et al.*,

2013). A operação consiste em ciclos de carregamento e descarregamento dos suspensores, de modo que uma cortina de partículas é constantemente formada.

Diferentes tipos de suspensores são usados para a secagem de materiais granulares. A geometria do suspensor está diretamente associada com as características do sólido a ser seco. Os suspensores retos são indicados para secagem de partículas muito coesas ou filamentosas (Gu *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2016). Os suspensores retangulares e angulares são frequentemente empregados em diferentes aplicações industriais. Os suspensores angulares de dois segmentos possibilitam o maior carregamento de partículas, garantindo que uma grande quantidade de sólidos seja lançada na corrente de gás. Os suspensores angulares de três segmentos promovem uma adequada mistura do material ainda úmido e um contato eficiente deste com o ar de secagem e, portanto, levam a uma temperatura e teor de

umidade do material uniformes (Mujumdar, 2015; Piton *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, estudos têm sido realizados para investigar os efeitos de variáveis de projeto sobre o comportamento de tambores rotativos com suspensores. Os pesquisadores avaliaram diferentes tipos de suspensores (Baker, 1988; Kelly, 1992; Scherer *et al.*, 2016; Silveira *et al.*, 2020), o número ideal de suspensores (Karali *et al.*, 2018; Nascimento *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2018), e o tamanho de seus segmentos (Karali *et al.*, 2016; Sunkara *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016), a fim de identificar uma geometria de suspensores mais apropriada para cada tipo de material.

Outros estudos na literatura consideraram adaptações em tambores rotativos para aplicações específicas. Por exemplo, para a secagem de partículas finas e quebradiças em um tambor rotativo com suspensores de grande seção transversal, elementos ou divisórias foram usados para aumentar a distribuição de material e reduzir a poeira e trituração por impacto (Keey e Danckwerts, 2013; Perry e Green, 1997). Para materiais granulares com baixa fluidez, suspensores inclinados foram posicionados no início (próximo à alimentação) e fim do tambor (próximo à descarga) para acelerar o fluxo de material (Perry e Green, 1997). Quando as características do sólido muda significativamente durante a secagem, o design do suspensor pode ser alterado ao longo do comprimento do secador (Renaud, Thibault e Alvarez, 2001; Sousani *et al.*, 2019). Essa estratégia também é usada quando diferentes operações ocorrem sequencialmente no tambor rotativo (Guen *et al.*, 2013; Piton *et al.*, 2015). Convencionalmente os suspensores são posicionados de modo alinhado ao longo da casca cilíndrica. De modo que estudos experimentais que investigam e quantificam os efeitos associados ao posicionamento intercalado dos suspensores na casca cilíndrica são escassos.

A carga de sólidos no secador é uma variável importante na caracterização do movimento das partículas. Sendo frequentemente representada em termos do grau de enchimento ( $f$ ), definido como a porcentagem de volume de material particulado alimentado ao equipamento por volume total do tambor. Essa variável operacional influencia a

quantidade e a distribuição de sólidos no equipamento, além de afetar o tempo de residência das partículas ao longo do tambor e a transferência de calor e massa (Karali *et al.*, 2015).

O tambor rotatório pode ser classificado, quanto ao seu carregamento, em: subcarregado, carregamento ideal e sobrecarregado.

O tambor opera subcarregado quando a primeira descarga do suspensor ocorre após a posição angular  $0^\circ$ . Convencionalmente, a posição angular  $0^\circ$  é definida traçando uma linha horizontal que divide o tambor ao meio. Na condição de subcarregamento, os suspensores não estão completamente preenchidos com material e a descarga de material se inicia em posições angulares elevadas. Neste caso, a fração do tempo em que as partículas permanecem em contato com o ar de secagem é menor que o período requerido para a operação eficiente.

Na condição de carregamento ideal, os suspensores estão completamente preenchidos e a descarga de sólidos inicia-se exatamente na posição angular  $0^\circ$ . O carregamento ideal é assumido como o ponto de operação onde ocorre a máxima interação entre os sólidos e o gás de secagem.

O sobrecarregamento ocorre quando a descarga de sólidos se inicia antes da posição angular  $0^\circ$ . Neste caso, o secador opera com carga maior que a necessária para preencher os suspensores, sendo que o material excedente se acumula no fundo do tambor e o contato entre as partículas e o gás de secagem se torna limitado.

O carregamento ideal é um parâmetro importante no projeto de secadores sendo fundamental sua determinação para adequada operação do equipamento. Alterações na velocidade de rotação do tambor possibilitam alcançar o carregamento ideal. A velocidade de rotação tem um efeito significativo no desempenho dos secadores rotativos. Velocidades rotacionais mais altas aumentam a descarga de sólidos na seção transversal do equipamento. Contudo, descargas muito concentradas de material impedem que o ar de secagem penetre a cortina de partículas, acarretando no chamado efeito de blindagem, o que impede o contato íntimo do fluido e os sólidos (Nascimento, Duarte e Barrozo, 2018).

O posicionamento intercalado dos suspensores pode proporcionar uma alternativa a adequada distribuição de sólidos evitando o efeito de blindagem. Estudos numéricos (Ghasemi *et al.*, 2020; Silveira *et al.*, 2022), utilizando a fluidodinâmica computacional, tem avaliado os efeitos do posicionamento alternado dos suspensores. Tais estudos mostram que a distribuição de partículas e a cobertura de seção transversal do tambor rotatório aumentam significativamente ao utilizar essa forma de configuração de suspensores.

Apesar da abrangente literatura sobre tambores rotatórios com suspensores, os efeitos do posicionamento intercalado dos suspensores sobre a dinâmica granular ainda é um assunto pouco explorado experimentalmente. Uma vez que o carregamento ideal é a condição operacional mais eficiente do ponto de vista energético, a determinação experimental desta condição operacional é essencial para otimizar o desempenho desses secadores. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar experimentalmente diferentes condições de carregamento ideal para suspensores intercalados ao longo da casca cilíndrica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 mostra a unidade experimental utilizada neste estudo, a qual é composta de um tambor cilíndrico (item 1) posicionado horizontalmente e operado em modo batelada, um motor elétrico de 2 cv (item 2), um motor-reductor de velocidade (item 3) que permitiu a operação em ampla faixa de velocidade de rotação e um inversor de frequência (item 4) para o controle e a variação da velocidade do tambor.

O tambor cilíndrico foi projetado utilizando a configuração de suspensor ótima obtida por Silveira *et al.* (2022) em um estudo prévio realizado nesta unidade experimental. O tambor possuía doze suspensores de três segmentos cada com dimensões  $l_1 = 10$  mm e  $l_2 = l_3 = 5$  mm e ângulos internos  $\alpha_1 = 95^\circ$ ,  $\alpha_2 = 130^\circ$  e  $\alpha_3 = 145^\circ$ , conforme esquematizado na Figura 2.

O tambor cilíndrico foi feito de material ABS (acrilonitrila butadieno estireno) por impressão 3D a fim de garantir a precisão dos

ângulos entre os segmentos do suspensor. O tambor ABS possuía 94 mm de diâmetro e era formado por um conjunto de anéis com 25 mm de comprimento cada, podendo alcançar um comprimento máximo de 500 mm. Os anéis possibilitavam o posicionamento intercalados dos suspensores ao longo da casca cilíndrica (Figura 3).

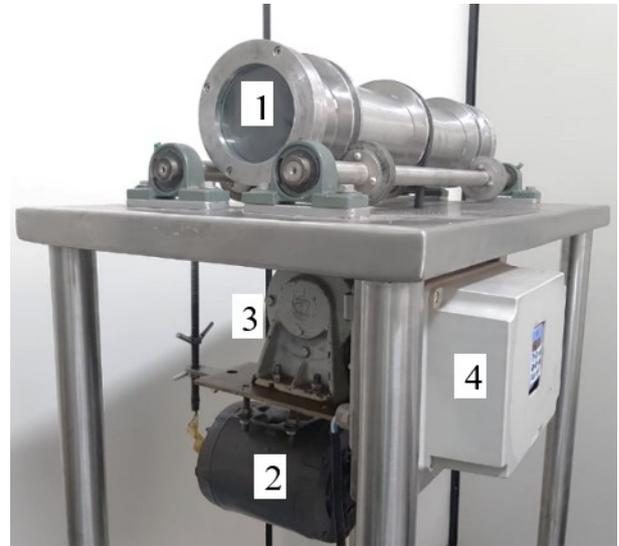


Figura 1: Unidade experimental do tambor rotatório com suspensores.

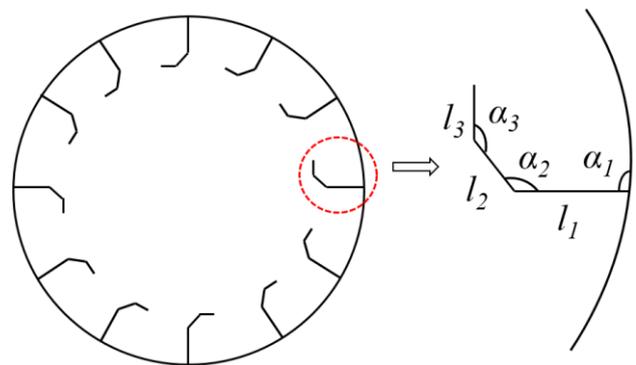


Figura 2: Representação esquemática de um tambor rotatório com suspensores retangulares e suas dimensões típicas

Para avaliar a dinâmica granular no interior do tambor ABS foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro de 1,09 mm, densidade de  $2445 \text{ kg/m}^3$  e porosidade do leito de 0,37 (Nascimento *et al.*, 2015).

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEQ-UFU).

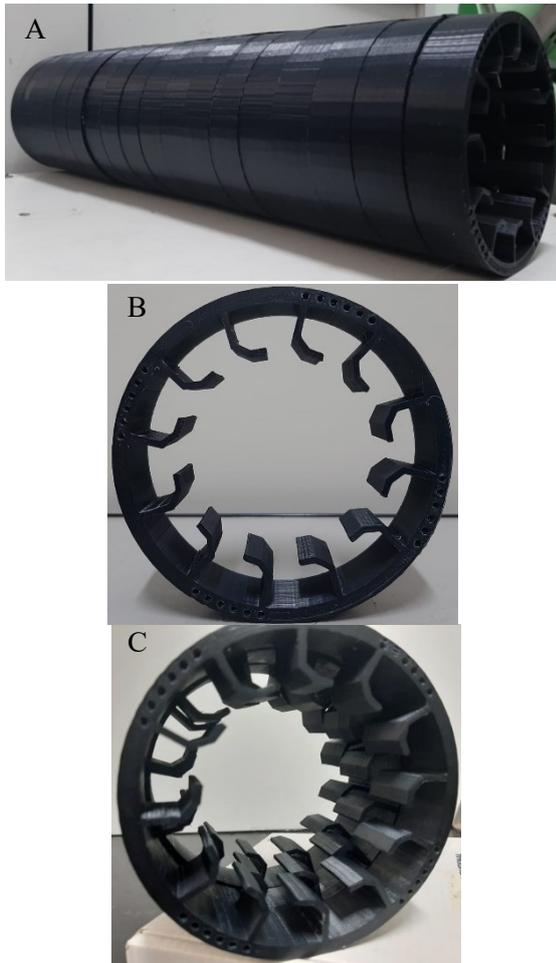


Figura 2: Tambor ABS: (A) visão lateral, (B) um anel e (C) três anéis com posicionamento intercalado ao longo do comprimento do tambor.

Para determinar as velocidades ideais de rotação, um visor de vidro com linhas de referências para diversas posições angulares do tambor foi acoplado ao aparato experimental. O visor foi fixado à mesa de suporte do equipamento, não estando conectado diretamente ao tambor rotatório. Para esta análise, a linha de referência foi definida na posição angular  $0^\circ$ . A Figura 4 apresenta um esquema do aparato utilizado para a medição das velocidades ideais.

Em estudos com tambores rotatórios a velocidade de rotação ( $\omega_{RT}$ ) é representada pelo número de Froude ( $Fr$ ), um adimensional da velocidade que relaciona o raio da circunferência inscrita pela ponta do suspensor ( $R_0$ ), a velocidade de rotação e a gravidade ( $g$ ), Equação 1:

$$Fr = R_0 \frac{\omega_{RT}^2}{g} \quad (1)$$

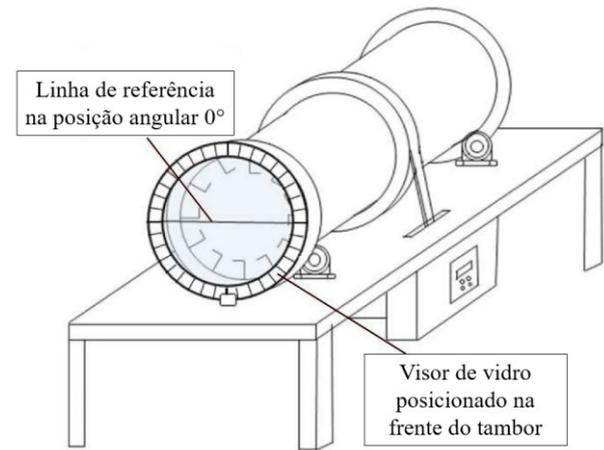


Figura 4: Esquema do aparato utilizado para a medição das velocidades ideais de rotação (Adaptado de Nascimento, 2018).

A literatura recomenda faixas de operação para os tambores em função do grau de enchimento e número de Froude, respectivamente,  $10\% \leq f \leq 15\%$  e  $0,0025 \leq Fr \leq 0,04$  (Perry e Green, 1997; Mujumdar, 2015). A dinâmica das partículas foi investigada considerando ambas as faixas de operação. Foram mensuradas as velocidades ideais de rotação para o tambor operando com 10% a 17% de seu volume ocupado por partículas. A faixa de enchimento investigada foi superior à faixa recomendada pela literatura para que se pudesse analisar as condições de carregamento ideal com números de Froude próximos a 0,04.

As velocidades ideais de rotação foram determinadas para o tambor ABS com 50 mm e 150 mm de comprimento, o equivalente a dois e seis anéis, respectivamente.

Para o tambor ABS com 50 mm de comprimento (2 anéis), a casca cilíndrica foi dividida em duas seções longitudinais (A e B), cada uma equivalente a um anel (Figura 5a). Os suspensores da seção B foram intercalados com os suspensores da seção A. A distância de separação entre os suspensores adjacentes foi definida como  $d$  (Figura 5b). Quatro arranjos de suspensores foram avaliados com as distâncias de separação entre suspensores de  $0^\circ$  (suspensores alinhados),  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$  identificados como Estruturas 1, 2, 3 e 4 respectivamente (Figura 6). As velocidades ideais de rotação para os suspensores intercalados foram obtidas na seção A e na seção B.

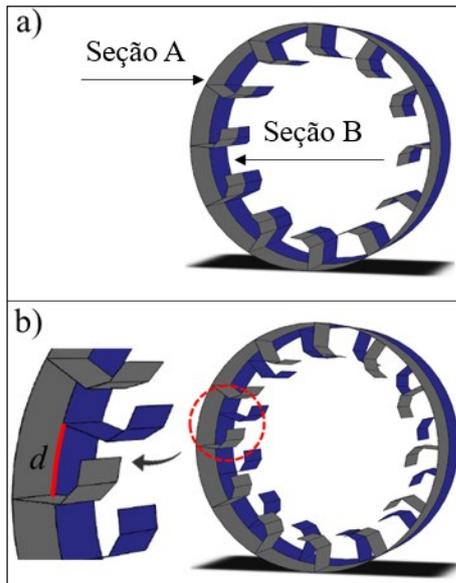


Figura 5: Definição das seções A e B no tambor ABS com 50 mm de comprimento (a) e da distância de separação entre os suspensores (b).

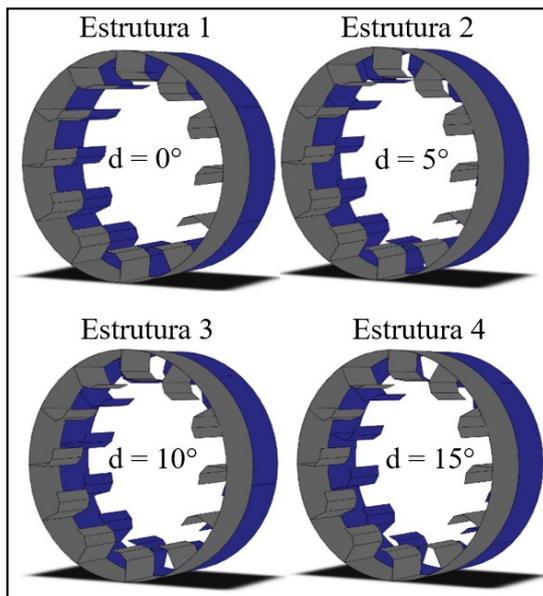


Figura 6: Diferentes arranjos de suspensores intercalados ao longo das paredes do tambor ABS com 50 mm de comprimento.

Para o tambor ABS com 150 mm de comprimento (6 anéis), a casca cilíndrica foi dividida em seis seções longitudinais (A, B, C, D, E e F) de modo que cada seção correspondeu a um anel (Figura ). Um arranjo de suspensores foi considerado nesta análise (Figura 8), denominado como Estrutura 5. Nesta, cada seção foi posicionada a uma distância de separação progressiva em relação à primeira

seção, formando uma casca cilíndrica em formato espiral. A Tabela 1 apresenta a distância de separação entre os suspensores em cada seção para o arranjo em formato espiral (Estrutura 5) assim como a distância de separação para os demais arranjos avaliados (Estrutura 1 a 4).

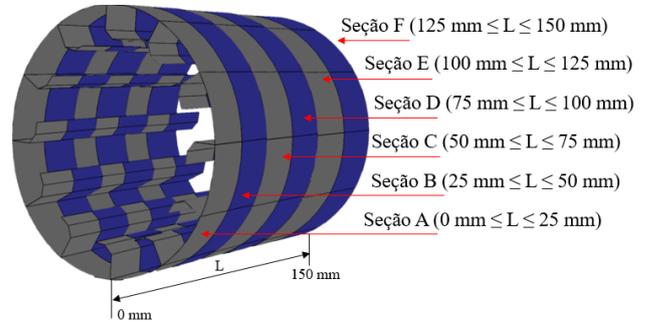


Figura 7: Definição das seções A, B, C, D, E e F no tambor ABS.

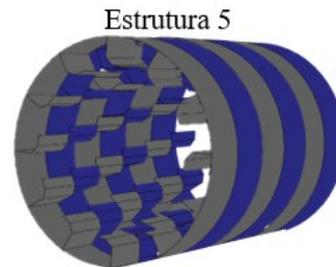


Figura 8: Arranjo de suspensores em formato espiral.

Tabela 1: Distância de separação entre os suspensores em cada seção para os cinco arranjos investigados com o tambor ABS.

Estrutura	Seções					
	A	B	C	D	E	F
1	0°	0°	-	-	-	-
2	0°	5°	-	-	-	-
3	0°	10°	-	-	-	-
4	0°	15°	-	-	-	-
5	0°	5°	10°	15°	20°	25°

Para o tambor ABS com 150 mm de comprimento as velocidades ideais de rotação foram mensuradas apenas na seção A, devido a impossibilidade de visualização experimental das demais seções que compõem a estrutura em formato espiral.

As medidas para ambos os comprimentos do tambor (50 mm e 150 mm), foram realizadas em triplicata e o procedimento adotado é descrito a seguir:

- 1) Primeiramente foi pesada a quantidade de material particulado necessário para avaliar experimentalmente um grau de enchimento predefinido;
- 2) Em seguida, o tambor rotatório foi carregado com partículas, cuja massa correspondia a pesagem realizada na Etapa 1;
- 3) O tambor foi posicionado horizontalmente e os sólidos uniformemente distribuídos ao longo do comprimento do cilindro;
- 4) A rotação foi iniciada a uma velocidade baixa e a posição angular  $0^\circ$  no tambor rotatório foi monitorada a partir da linha de referência. Em seguida, a velocidade de rotação foi gradualmente aumentada até que a primeira descarga ocorresse na posição angular  $0^\circ$ .

Para a identificação precisa do momento em que ocorre a primeira descarga, foi utilizada uma câmera de alta velocidade (marca Fastec, modelo IL5) a uma velocidade de gravação 4500 frames/s. A câmera foi posicionada para capturar as imagens da região próxima à

posição angular  $0^\circ$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A velocidade de rotação para que a descarga de sólidos começasse na posição angular  $0^\circ$  foi determinada experimentalmente para diferentes frações de enchimento do tambor ABS com 50 mm e 150 mm de comprimento.

A Figura 9 mostra o número de Froude ideal para o tambor ABS com 50 mm de comprimento, utilizando suspensores alinhados (Estrutura 1) e intercalados com distância de separação de  $5^\circ$  (Estrutura 2),  $10^\circ$  (Estrutura 3) e  $15^\circ$  (Estrutura 4). Para os suspensores intercalados, é apresentado o número de Froude para o carregamento ideal na seção A e na seção B do tambor. Já a Figura 10 apresenta o número de Froude ideal para o tambor ABS com 150 mm de comprimento e suspensores em formato espiral (Estrutura 5), as medições foram obtidas na seção A desta configuração.

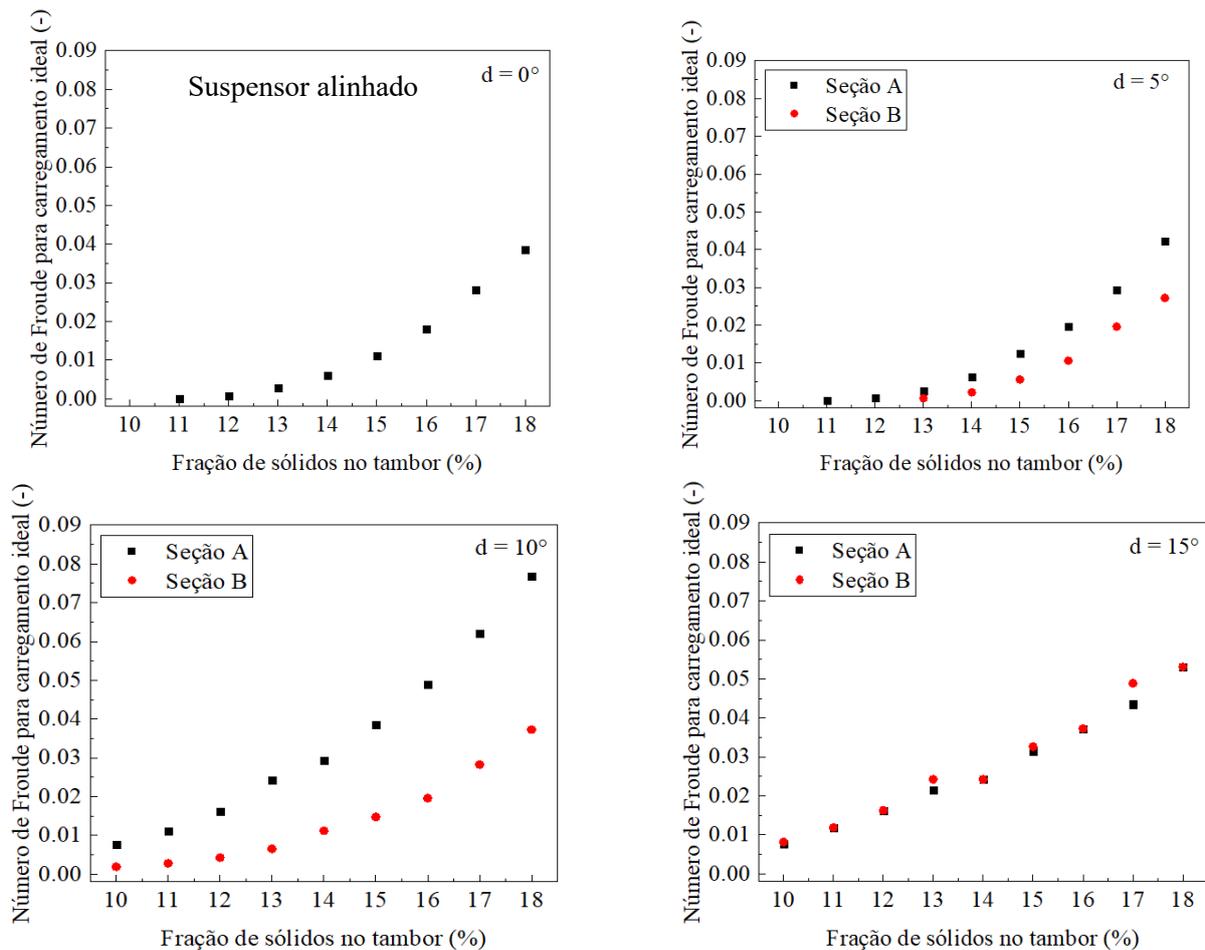


Figura 9: Número de Froude para o carregamento ideal utilizando o tambor ABS com 50 mm de comprimento e suspensores alinhados e intercalados com distância de separação de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$ .

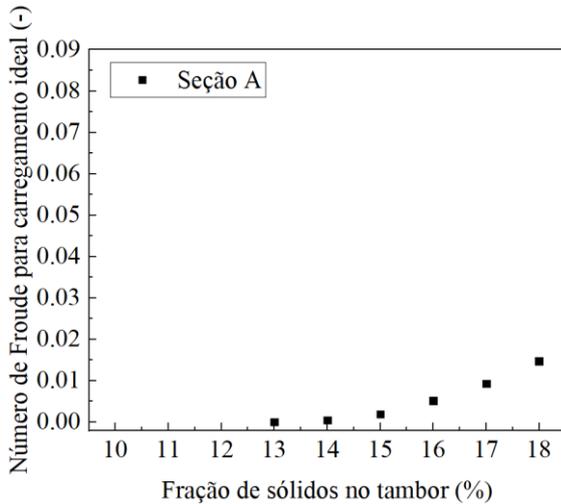


Figura 10: Número de Froude para o carregamento ideal utilizando o tambor ABS com 150 mm de comprimento e suspensores em formato espiral.

Tanto na Figura 9 quanto na Figura 10, observa-se que a medida que o tambor foi preenchido com maiores frações de sólidos, a condição de carregamento ideal foi alcançada aumentando a velocidade de rotação do tambor rotatório, representado pelo aumento do número de Froude ideal. Esse comportamento está associado ao balanço de forças que atuam sobre as partículas no suspensor, sendo elas a força peso, a normal, a centrífuga e a força de atrito. Para que o suspensor seja capaz de carregar uma maior quantidade de partículas até posições angulares mais elevadas, é necessário o aumento da força centrífuga que age sobre as partículas, garantindo, assim, que elas permaneçam no suspensor. Isso é possível através do aumento da velocidade de rotação do tambor.

A Figura 9 também mostra que, para os suspensores intercalados, a velocidade de rotação para a operação no carregamento ideal difere entre as seções A e B, exceto para a distância de separação igual a  $15^\circ$ .

Uma vez que o tambor possui 12 suspensores igualmente espaçados e sua circunferência completa equivale a um giro de  $360^\circ$ , numa mesma seção a distância de separação padrão ( $d_p$ ) entre os suspensores é de  $30^\circ$ . A distância  $d_p$  é formada pela soma da distância de separação do suspensor ( $d$ ), localizada abaixo do suspensor da seção B, e da distância de separação complementar ( $d^c$ ), localizada acima do suspensor da seção B (Figura 11). Para  $d = 15^\circ$ , a distância de

separação entre os suspensores ( $d$ ) e a distância de separação complementar ( $d^c$ ) são iguais (Figura 12). Assim, a condição de carregamento ideal para ambas as seções é alcançada empregando a mesma velocidade de rotação. Nas demais configurações com suspensores intercalados ( $5^\circ$  e  $10^\circ$ ), a distância de separação entre os suspensores ( $d$ ) e a distância de separação complementar ( $d^c$ ) são diferentes. Como pode ser observado na Figura 13 que ilustram essa situação para os suspensores intercalados com  $d = 5^\circ$  e  $d = 10^\circ$ . No caso de suspensores intercalados com distância de separação entre suspensores de  $5^\circ$  e  $10^\circ$ , as velocidades para alcançar o carregamento ideal na seção A e B são distintas.

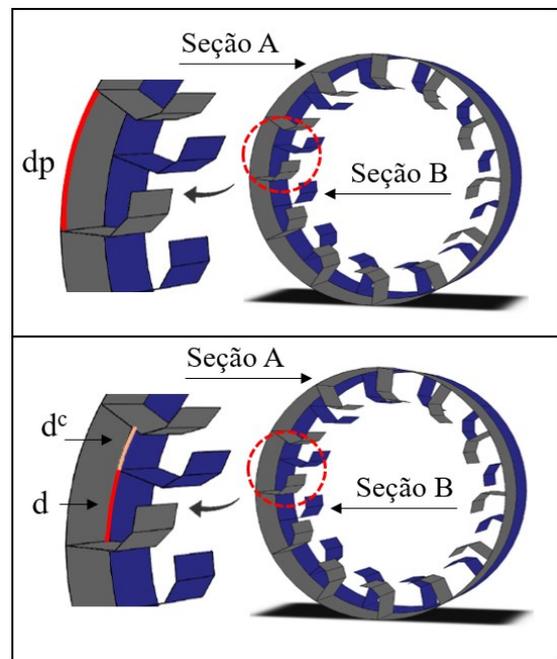


Figura 11: Distância de separação padrão entre suspensores numa mesma seção ( $d_p$ ) e distância de separação complementar ( $d^c$ ).

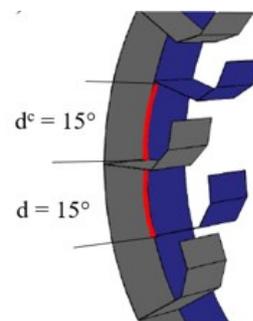


Figura 12: Distância de separação entre suspensores ( $d$ ) e distância de separação complementar ( $d^c$ ) para suspensores intercalados com  $15^\circ$ .

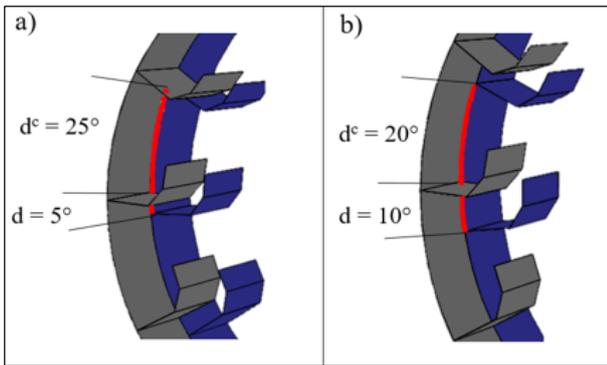


Figura 13: Distância de separação entre suspensores ( $d$ ) e distância de separação complementar ( $d^\circ$ ) para suspensores intercalados com  $5^\circ$  (a) e  $10^\circ$  (b).

A fim de determinar as condições de carregamento ideal para os diferentes arranjos de suspensores intercalados no tambor ABS, foi calculada a média da velocidade ideal de rotação entre as seções A e B. Esta média é apresentada na Figura 14, juntamente com a velocidade ideal obtida para os suspensores alinhados e suspensores em formato espiral, ambas em função do número de Froude.

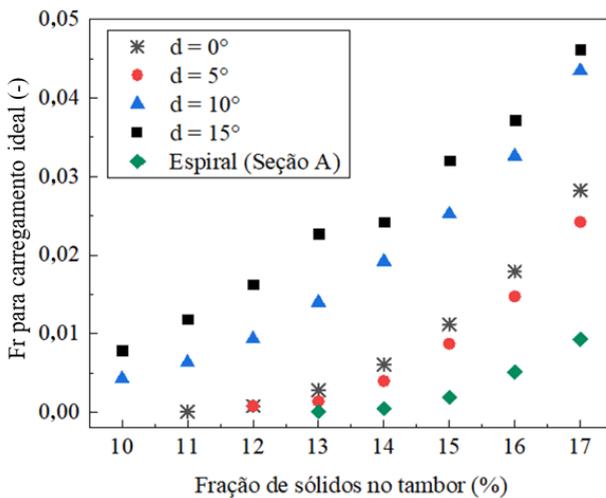


Figura 14: Número de Froude para o carregamento ideal obtido utilizando suspensores intercalados com distância de separação de  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$  (valor médio entre as seções A e B) e suspensores em formato espiral (seção A).

Observa-se na Figura 14 que as velocidades ideais encontradas com os suspensores intercalados com  $d = 5^\circ$  apresentaram uma tendência semelhante aos resultados obtidos com os suspensores alinhados ( $d = 0^\circ$ ). A estrutura com  $d = 5^\circ$

possui um arranjo próximo ao dos suspensores alinhados. Nessa estrutura, os suspensores da seção B estão apenas  $5^\circ$  abaixo ( $d = 5^\circ$ ) dos suspensores da seção A. A Figura 15 apresenta como as partículas se comportam no suspensor para  $d = 5^\circ$  em diferentes instantes de tempo, para o tambor operando na condição de 16% de fração de sólidos e  $Fr = 0,014$ . As partículas carregadas pelos suspensores da seção A são pouco afetadas pela presença dos suspensores intercalados na seção B. O mesmo vale para as partículas na seção B em relação a seção A.

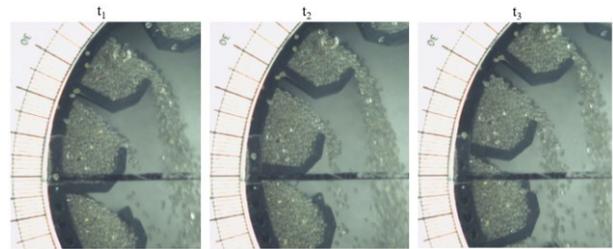


Figura 15: Comportamento das partículas no suspensor em diferentes instantes de tempo ( $t$ ) para  $d = 5^\circ$ , utilizando o tambor ABS com 50 mm de comprimento na condição de 16% de fração de sólidos e  $Fr = 0,014$ .

Para os suspensores intercalados com distância de separação de  $10^\circ$ , a condição de carregamento ideal foi alcançada com velocidades de rotação mais elevadas (Figura 14), comparadas às obtidas para  $d = 0^\circ$ ,  $d = 5^\circ$  e formato espiral. A Figura 16 apresenta o comportamento dos sólidos nos suspensores para  $d = 10^\circ$ , na condição de 11% enchimento do tambor e  $Fr = 0,006$ .

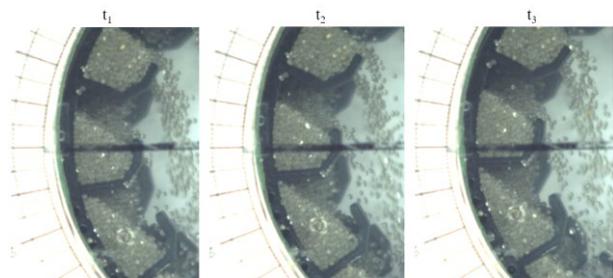


Figura 16: Comportamento das partículas no suspensor em diferentes instantes de tempo ( $t$ ) para  $d = 10^\circ$ , utilizando o tambor ABS com 50 mm de comprimento na condição de 11% de fração de sólidos e  $Fr = 0,006$ .

Como pode ser observado na Figura 16, as partículas apresentam uma mobilidade entre as seções e o descarregamento ocorre com

maior facilidade. Neste caso, é necessária uma velocidade de rotação mais elevada do tambor a fim de garantir que as partículas permaneçam no suspensor e só inicie o descarregamento na posição  $0^\circ$ . Também se observa na Figura 16 que as partículas da seção B caem sobre as partículas já contidas no suspensor da seção A e em seguida são descarregadas. As partículas que o suspensor da seção A descarrega não são necessariamente as partículas carregadas por ele. Se não houvesse o efeito dos suspensores intercalados, os suspensores da seção A provavelmente descarregariam em posições angulares superiores e, portanto, teriam velocidades ideais de rotação menores.

A Figura 17 apresenta o comportamento das partículas utilizando suspensores intercalados com distância de separação de  $15^\circ$  para o tambor operando com fração de enchimento de 14% e  $Fr = 0,024$ . Observa-se um fluxo de sólidos entre uma seção e outra, e as partículas apresentam ainda maior mobilidade neste arranjo de suspensores ( $d = 15^\circ$ ). Isto justifica a necessidade de uma velocidade de rotação mais elevada dentre todos os arranjos investigados para garantir que o descarregamento ocorra na posição de interesse  $0^\circ$ .

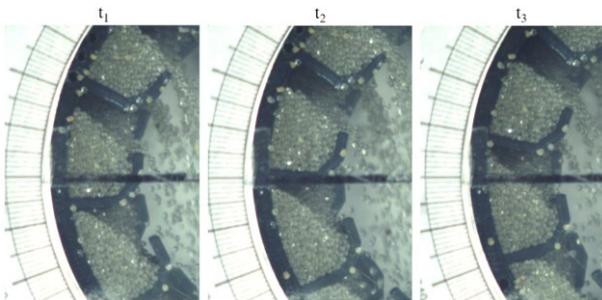


Figura 17: Comportamento das partículas no suspensor em diferentes instantes de tempo ( $t$ ) para  $d = 15^\circ$ , utilizando o tambor ABS com 50 mm de comprimento na condição de 14% de fração de sólidos e  $Fr = 0,024$ .

De modo geral, quando os suspensores intercalados são utilizados no tambor rotatório, observa-se que os suspensores de uma seção afetam o descarregamento dos suspensores na outra seção. Para se ter um comportamento global do tambor com suspensores intercalados ( $d = 5^\circ$  a  $d = 15^\circ$ ), deve-se utilizar a média da velocidade ideal de rotação considerando tanto a seção A quanto a seção B.

Analisando ainda a Figura 14, nota-se que o perfil obtido para o formato espiral apresenta as menores velocidades de rotação para alcançar o carregamento ideal, quando comparada as demais configurações analisadas. Isso significa que a distância de separação progressiva entre os suspensores, que ocorre no formato espiral, permite que os sólidos não sejam descarregados tão rapidamente do suspensor. Além disso, para uma mesma velocidade de rotação, o tambor em formato espiral tende a operar com maior quantidade de partículas na condição de carregamento ideal, quando comparado as demais configurações de suspensores alinhados e intercalados.

A Figura 18 ilustra o perfil granular obtido experimentalmente para o tambor ABS com 50 mm de comprimento operando com 15% de fração de sólidos e  $Fr = 0,011$ , utilizando suspensores alinhados e intercalados.

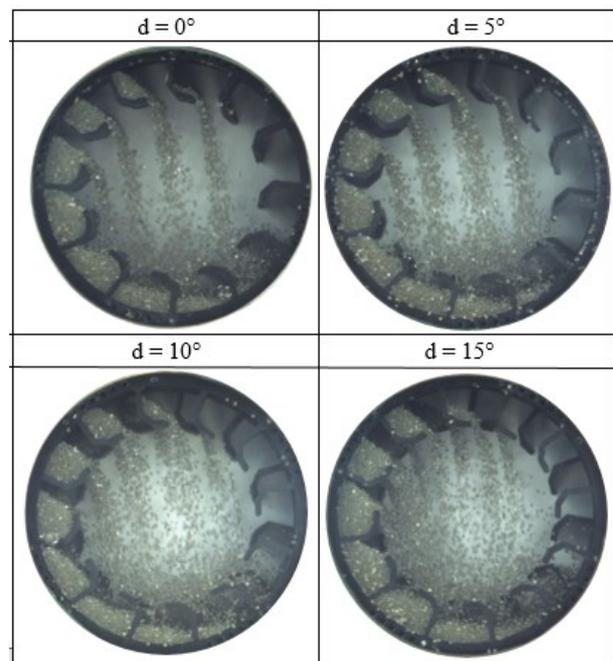


Figura 18: Perfil do leito granular experimental obtido para o tambor ABS com 50 mm de comprimento operando com 15% de fração de sólidos e  $Fr = 0,011$ , utilizando suspensores alinhados e intercalados.

Observa-se na Figura 18 que com o aumento da distância de separação entre os suspensores ocorre uma diminuição dos caminhos preferenciais para a passagem do fluido (regiões entre as descargas dos suspensores). A cortina de partículas que se forma a seção transversal do equipamento se

mostra mais diluída com os suspensores intercalados, o que propicia maior área de contato entre sólido e fluido. Resultados semelhantes foram obtidos nos estudos numéricos realizados por Ghasemi *et al.* (2020) e Silveira *et al.* (2022).

## CONCLUSÕES

Neste estudo foi determinado experimentalmente, a velocidade ideal de rotação de um tambor rotatório com suspensores alinhados e intercalados para diferentes frações de enchimento do tambor. Com estes resultados foi possível observar que:

- ❖ Quanto maior a distância de separação entre os segmentos, maior a velocidade ideal de rotação, uma vez que as partículas apresentam facilidade de escoarem entre os suspensores;
- ❖ A velocidade de carregamento ideal foi diferente para cada seção do tambor ABS devido à distância de separação entre os suspensores intercalados. Observou-se, também que o descarregamento dos sólidos é afetado pelo posicionamento intercalado dos suspensores. Para minimizar este efeito e obter condições operacionais que representem o comportamento global do sistema, deve-se utilizar a média da velocidade ideal de rotação entre as seções;
- ❖ Constatou-se que os suspensores intercalados com distância de separação de  $15^\circ$  melhoraram a distribuição dos sólidos na seção transversal do equipamento. Nessa condição ( $d = 15^\circ$ ), os caminhos preferenciais para a passagem do fluido foram reduzidos e a cortina de partículas tornou-se mais dispersa e uniforme. Isso garante uma mistura mais eficaz das fases, aumentando a área de troca térmica e, conseqüentemente, a transferência de calor e massa neste equipamento.

## NOMENCLATURA

d distância de separação  $[M^0L^1T^0]$   
entre suspensores

$d^c$	distância de separação complementar entre suspensores	$[M^0L^1T^0]$
dp	distância de separação padrão entre suspensores	$[M^0L^1T^0]$
Fr	número de Froude	$[M^0L^0T^0]$
g	gravidade	$[M^0L^1T^{-2}]$
$l_1$	comprimento do primeiro segmento do suspensor	$[M^0L^1T^0]$
$l_2$	comprimento do segundo segmento do suspensor	$[M^0L^1T^0]$
$l_3$	comprimento do terceiro segmento do suspensor	$[M^0L^1T^0]$
L	Comprimento do tambor	$[M^0L^1T^0]$
$R_0$	raio da circunferência inscrita pela ponta do suspensor	$[M^0L^1T^0]$
$\alpha_1$	ângulo entre a parede do tambor e o primeiro segmento	$[M^0L^0T^0]$
$\alpha_2$	ângulo entre o primeiro e o segundo segmento	$[M^0L^0T^0]$
$\alpha_3$	ângulo entre o segundo e o terceiro segmento	$[M^0L^0T^0]$
$\omega_{RT}$	velocidade de rotação	$[M^0L^0T^0]$

## REFERÊNCIAS

- BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary dryers. **Drying Technology**, v. 6, p. 631–653, 1988.
- GENG, F.; LI, Y.; WANG, X.; YUAN, Z.; YAN, Y.; LUO, D. Simulation of dynamic processes on flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary dryer and its comparison with ideo-imaging experiments. **Powder Technology**, v. 207, n. 1–3, p. 175–182, 2011.
- GHASEMI, A.; HASANKHOEI, A.; PARSAPOUR, G.; RAZI, E.; BANISI, S. A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2020.
- GU, C.; LI, P.; YUAN, Z.; YAN, Y.; LUO, D.; LI, B.; LU, D. A new corrected formula to predict mean residence time of flexible filamentous particles in rotary dryers. **Powder Technology**, v. 303, p. 168–175, 2016.
- GUEN, L. LE; HUCHET, F.; DUMOULIN, J.;

- BAUDRU, Y.; TAMAGNY, P. Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor. **Applied Thermal Engineering**, v. 54, n. 1, p. 131–139, 2013.
- KARALI, M. A.; HERZ, F.; SPECHT, E.; MALLMANN, J. Comparison of image analysis methods to determine the optimum loading of flighted rotary drums. **Powder Technology**, v. 291, p. 147–153, 2016.
- KARALI, M. A.; SPECHT, E.; HERZ, F.; MELLMANN, J.; REFAEY, H. A. Unloading characteristics of flights in a flighted rotary drum operated at optimum loading. **Powder Technology**, v. 333, p. 347–352, 2018.
- KARALI, M. A.; SUNKARA, K. R.; HERZ, F.; SPECHT, E. Experimental analysis of a flighted rotary drum to assess the optimum loading. **Chemical Engineering Science**, v. 138, p. 772–779, 2015.
- KEYEY, R. B.; DANCKWERTS, P. V. **Drying: Principles and Practice**. [s.l: s.n.]. v. 13
- KELLY, J. Flight design in rotary dryers. **Drying Technology**, v. 10, n. 4, p. 979–993, 1992.
- LEE, A. Modelling the Solids Transport Phenomena Within Flighted Rotary Dryers. n. May, p. 1–284, 2008.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. [s.l: s.n.].
- NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- NASCIMENTO, S. M.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Analysis of the design loading in a flighted rotating drum using high rotational speeds. **Drying Technology**, v. 36, n. 10, p. 1200–1208, 2018.
- NASCIMENTO, S. M.; LIMA, R. M.; BRANDÃO, R. J.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Eulerian study of flights discharge in a rotating drum. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 97, n. 2, p. 477–484, 2019.
- NASCIMENTO, S. M.; SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R. Solids holdup in flighted rotating drums: An experimental and simulation study. **Powder Technology**, v. 280, p. 18–25, 2015.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Chemical engineers 'HANDBOOK**. 7th. ed. [s.l.] Mc-Graw-Hill, New York, 1997.
- PITON, M.; HUCHET, F.; CORRE, O. LE; GUEN, L. LE; CAZACLIU, B. A coupled thermal-granular model in flights rotary kiln: Industrial validation and process design. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1011–1021, 2015.
- RENAUD, M.; THIBAUT, J.; ALVAREZ, P. I. Influence of solids moisture content on the average residence time in a rotary dryer. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2131–2150, 2001.
- SCHERER, V.; MÖNNIGMANN, M.; BERNER, M. O.; SUDBROCK, F. Coupled DEM–CFD simulation of drying wood chips in a rotary drum – Baffle design and model reduction. **Fuel**, v. 184, p. 896–904, 2016.
- SILVEIRA, J. C.; BRANDAO, R. J.; LIMA, R. M.; MACHADO, M. V. C.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R. A fluid dynamic study of the active phase behavior in a rotary drum with flights of two and three segments. **Powder Technology**, v. 368, p. 297–307, 2020.
- SILVEIRA, J. C.; LIMA, R. M.; BRANDAO, R. J.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A study of the design and arrangement of flights in a rotary drum. **Powder Technology**, v. 395, p. 195–206, 2022.
- SOUSANI, M.; HOBBS, A. M.; ANDERSON, A.; WOOD, R. Accelerated heat transfer simulations using coupled DEM and CFD. **Powder Technology**, 2019.
- SUNKARA, K. R.; HERZ, F.; SPECHT, E.; MELLMANN, J. Influence of flight design on the particle distribution of a flighted rotating drum. **Chemical Engineering Science**, v. 90, p. 101–109, 2013.
- XIE, Q.; CHEN, Z.; MAO, Y.; CHEN, G.; SHEN, W. Case studies of heat conduction in rotary drums with L-shaped lifters via DEM. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 11, n. January, p. 145–152, 2018.
- ZHOU, Z.; LI, J.; ZHOU, J.; LI, S.; FENG, J. Enhancing mixing of cohesive particles by baffles in a rotary drum. **Particuology**, v. 25, p. 104–110, 2016.