

MODELAGEM CFD-DEM DO LEITO DE JORRO CONVENCIONAL E COM CONFINADOR DE FONTE: ANÁLISE DE INTENSIDADE DE COLISÕES E DISSIPACÃO DE ENERGIA

NATALIA P. ALMEIDA^{*1}, MARTIN OLAZAR², CLÁUDIO R. DUARTE¹,
MARCOS A. S. BARROZO¹

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

²Universidade do País Basco, Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: nataliapazin.engquim@gmail.com

RESUMO - O leito de jorro é um equipamento amplamente estudado, devido ao eficiente contato entre sólidos e fluido que proporciona. Sua utilização como extrator mecânico de Bixina da semente de Urucum vem mostrando bons resultados na literatura. Algumas modificações, como a inserção de paredes no interior do leito de jorro, promovem maior atrito entre partículas e podem auxiliar na extração desse corante. A modelagem CFD-DEM permite a obtenção de dados de colisão entre partículas e auxilia na escolha dos equipamentos e condições adequadas para operações que necessitem de atrito entre sólidos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a variação na intensidade de colisão e na dissipação de energia cinética em leitos de jorro com confinador e convencional, através da técnica CFD-DEM e determinar, por meio dessa análise, se essa nova configuração experimental é promissora na extração mecânica. As simulações foram realizadas com partículas irregulares, similares à semente de Urucum, através de um *clump* de esferas. Os resultados mostram que a intensidade de colisões e de contatos é maior no leito de jorro com confinador, quando comparado à configuração convencional. Além disso, foi observada maior dissipação de energia cinética translacional e conversão em energia cinética rotacional.

INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento amplamente utilizado em processos, como secagem, pirólise, granulação e recobrimento de sólidos. Sua grande aplicabilidade se deve às altas taxas de transferência de calor e massa, resultado do contato eficiente entre fluido e partícula (Mathur e Epstein, 1974).

Diversas modificações vindo sendo aplicadas ao leito de jorro convencional para favorecer determinadas operações unitárias. O aumento da vazão de alimentação de ar até o

regime de *jet spouted bed*, por exemplo, favorece a secagem de produtos termossensíveis (Epstein e Grace, 1997). A utilização do tubo *draft* (Epstein e Grace, 1997) e do confinador de fonte no interior do leito de jorro (Tellabide *et al.*, 2020) favorece a estabilidade do equipamento ao se trabalhar com partículas finas.

Além de sua utilização nas operações tradicionais, o leito de jorro vem sendo explorado na extração mecânica por atrito. Alguns trabalhos na literatura obtiveram bons resultados na utilização do equipamento na extração do corante Bixina a partir de sementes de Urucum

(Massarani *et al.*, 1992; Tavares *et al.*, 1999; Alves *et al.*, 2006; Cunha *et al.*, 2009; Barrozo *et al.*, 2013, Taham *et al.*, 2016).

Dentre as vantagens da utilização do leito de jorro como extrator mecânico de Bixina da semente de Urucum, para obtenção de corante, estão a possibilidade de utilizar equipamentos mais simples, que necessitem de menor investimento inicial e a utilização de ar como único fluido no processo, o que elimina a etapa de recuperação do solvente necessária no processo de extração por solventes (Taham *et al.*, 2016).

Na extração mecânica, a remoção de Bixina da camada de arilo da semente de Urucum é feita a partir do atrito ou da raspagem das sementes (Alves, 2001). Nesse processo, a simples movimentação das sementes de Urucum faz com que o choque entre elas provoque um mecanismo de fratura no pericarpo e libere Bixina no fluxo de ar. Além disso, há a possibilidade da secagem de sementes concomitante à extração (Massarani *et al.*, 1992).

Cunha *et al.* (2009) observaram que a presença do tubo *draft* favorece a extração mecânica por atrito, pois promove intensa colisão de partículas em seu entorno.

Taham *et al.* (2016) observaram que a utilização de um anteparo metálico no interior do leito de jorro favorece a colisão e o atrito entre partículas. O estudo mostrou que a produção de pó na extração mecânica em leito de jorro é favorecida na configuração do leito de jorro com anteparo metálico.

Tellabide *et al.* (2020) propuseram a utilização de um anteparo cilíndrico, chamado de confinador de fonte, para estabilização do leito de jorro na operação com partículas finas. Neste estudo, os autores observaram que a movimentação de sólidos em um leito de jorro cônico com fonte confinada é caracterizada por um padrão pulsante, com partículas em movimentos ascendentes e descendentes na região anular. Contudo, dentre os estudos da literatura que utilizam o confinador de fonte, não são encontrados trabalhos que analisem a influência dessa variável no rendimento da

extração mecânica, ou na intensidade de colisão entre partículas.

O conhecimento detalhado do escoamento fluido-partícula no interior dos equipamentos, pode ser muito útil para o projeto e a otimização de processos (Biçer *et al.*, 2020). Embora essa compreensão possa ser alcançada, em sua maioria, através de experimentos, a modelagem numérica é uma eficiente ferramenta neste processo, pois permite a alteração de condições operacionais e da geometria do equipamento de forma menos dispendiosa em comparação com técnicas experimentais. Além disso, através da modelagem, a aquisição de parâmetros como a intensidade de colisão entre partículas pode ser obtida.

Na simulação numérica de fluxos multifásicos, a modelagem CFD-DEM possibilita a aplicação da aproximação Euler-Lagrange em praticamente todos os sistemas que envolvam escoamento sólido-fluido, incluindo aqueles que sejam caracterizados pela utilização de partículas irregulares, como é o caso de biomassas (Norouzi *et al.*, 2016). Nessa técnica, a fase fluida é resolvida através da abordagem Euleriana e a fase particulada, através da Lagrangeana, que discretiza cada partícula pelas equações do movimento de Newton (Norouzi *et al.*, 2016).

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo analisar a variação na intensidade de colisão, contatos e dissipação de energia cinética em um leito de jorro com confinador, através da técnica CFD-DEM. A comparação dos resultados com aqueles obtidos em um leito de jorro sem confinador de fonte é um importante parâmetro para determinar se essa configuração experimental para extração mecânica de Bixina a partir da semente de Urucum é promissora.

METODOLOGIA

Simulação numérica

A abordagem Euler-Lagrange utilizada na técnica CFD-DEM, resolve, para a fase fluida, a Equação de Navier Stokes, conforme as Equações 1 e 2, e para a fase particulada, a

Segunda Lei de Newton do Movimento, como mostram as Equações 3 e 4.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u}_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\varepsilon_f \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon_f \bar{\tau}_f) + \varepsilon_f \rho_f \vec{g} - \vec{F}_{p-f} \quad (2)$$

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum_{i=1}^j \vec{F}_i + m_p \vec{g} \quad (3)$$

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \sum_{j=1}^N \sum_{i \neq j} \vec{T}_{ij} \quad (4)$$

A resolução da Equação de Navier-Stokes foi realizada através do algoritmo SIMPLE (Semi implicit method for pressure linked equation). O modelo de arraste utilizado foi o de Gidaspow (1992). O modelo não-linear de Hertz-Mindlin foi escolhido como modelo de força-deslocamento de partículas para a etapa Lagrangeana e o modelo k- ω SST foi utilizado como modelo de turbulência.

Para considerar a forma irregular da partícula, montou-se por meio de um aglomerado de três esferas, denominado *clump*, a representação de uma semente de Urucum. O *clump* é definido como um conjunto de esferas sobrepostas umas às outras, que age como um único corpo rígido com contornos deformáveis. (Shamsi e Mirghasemi, 2012).



Figura 1: (a) *Clump* de esferas representando a semente de Urucum na modelagem CFD-DEM; (b) semente de Urucum.

Nas simulações CFD-DEM foram utilizadas as propriedades da semente de Urucum estudada por Taham *et al.* (2016), com 1440 kg/m³ de densidade (ρ_p) e diâmetro médio da esfera de mesmo volume que a partícula (d_p) de 3,58 mm, e o fluido de arraste utilizado foi o ar a

25°C com densidade de (ρ_f) 1,225 kg/m³ e viscosidade de 1,789.10⁻⁵ kg/m.s.

Para garantir a estabilidade numérica das simulações, foi adotado um valor abaixo de 20% do tempo de Rayleigh para o passo de tempo de integração da modelagem da fase particulada. O número de Rayleigh (TR) é definido como o tempo que uma onda cisalhante leva para se dispersar através de um sólido, e é utilizado como parâmetro na escolha do *time-step*. A Equação 5 exibe o cálculo do passo de tempo de integração máximo, seguindo a recomendação da literatura, de utilização de um passo de tempo de integração inferior a 0,2TR (Lima, 2017).

$$\Delta t_{max} = 0,2T_R = 0,2 \frac{\pi r_{min}^2 \sqrt{\frac{\rho_p}{g}}}{0,1613 v + 0,8766} \quad (5)$$

Nessa equação, r_{min} é o raio da menor partícula do *clump* e, quanto menor esse valor, menor o *time-step* da fase particulada deve ser. Dessa forma, a utilização de um *clump* com esferas muito pequenas aproximaria o formato da partícula simulada ao formato da semente de Urucum, mas demandaria um gasto computacional demasiadamente elevado.

O *time-step* da fase fluida foi escolhido de forma a não ultrapassar em 100 vezes o da fase particulada, como sugerido por Norouzi *et al.* (2016).

As dimensões do leito de jorro encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões do leito de jorro.

D_0	Diâmetro de entrada do cone	0,038 m
H_c	Altura de cone	0,15 m
D_c	Diâmetro de seção cilíndrica	0,21 m
D_d	Diâmetro do <i>draft</i>	0,045 m
L_d	Altura do <i>draft</i>	0,10 m
h_{draft}	Distância do <i>draft</i> desde a base	0,04 m
D_{conf}	Diâmetro do confinador	0,11 m
L_{conf}	Altura do confinador	0,50 m
h_{conf}	Distância do confinador desde a base	0,25 m

Na resolução do modelo Euler-Lagrange, foram utilizados os *softwares* FLUENT®, para os cálculos da fase fluida, e EDEM®, para os cálculos da fase sólida. Para as simulações, foi construída uma malha computacional composta por 65196 células. Na configuração com confinador de fonte, as delimitações do confinador foram definidas como paredes, e na configuração sem confinador de fonte, como faces de interior, o que permite a passagem de ar e partículas. A densidade das paredes do equipamento (ρ_w) é de 7800 kg/m³.

Na utilização da abordagem Lagrangeana, é necessário o conhecimento de alguns parâmetros de colisão, como os coeficientes de restituição (e), atrito estático (μ) e atrito de rolamento (μ_R), que influenciam no cálculo de atualização de posição e velocidade de partículas, segundo a Lei de Newton do Movimento. No presente estudo, esses valores foram obtidos através de medição direta, seguindo a metodologia de Lima (2020). Os parâmetros numéricos de simulação estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros numéricos das simulações CFD-DEM.

	Parâmetro	Valor
Δt_p	<i>Time-step</i> da fase sólida (s)	2.10^{-5}
Δt_f	<i>Time-step</i> da fase fluida (s)	2.10^{-4}
E	Módulo de Young (GPa)	10^8
ν	Razão de Poisson	0,25
$e_{(p-p)}$	Coef. de restituição part.-part.	0,80
$e_{(p-w)}$	Coef. de restituição part.-parede	0,50
$\mu_{R(p-p)}$	Coef. de rolamento part.-part	0,10
$\mu_{R(p-w)}$	Coef. de rolamento part.-parede	0,01
$\mu_{(p-p)}$	Coef. de atrito estático part.-part.	0,6
$\mu_{(p-w)}$	Coef. de atrito estático part.-parede	0,5

Após a confecção da malha computacional, foram adicionados 1500g de sementes de Urucum no interior dos leitos de jorro para as simulações. As velocidades de jorro mínimo

foram obtidas para a configuração com confinador (14,6 m/s) e sem confinador (16,5 m/s) e, nessa análise, um comportamento silimar àquele citado por Altzibar *et al.* (2017), Estiati *et al.* (2019) e Tellabide *et al.* (2020) foi observado, com alteração na velocidade de jorro mínimo, devido à presença do confinador. A partir disso, foram analisadas as respostas intensidade de colisão e contato (deslizamento) entre partículas e energia cinética translacional e rotacional, para 30%, 40%, 50% e 60% acima das velocidades de jorro mínimo (q_{jm}) para as duas configurações. Como a análise de colisões e dissipação de energia tem por objetivo anteceder a extração mecânica, neste estudo foram escolhidas velocidades superiores à de jorro mínimo, que promovem maior rendimento de pó (Taham *et al.*, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os perfis de velocidade de alimentação estão dispostos na Figura 2 e mostram que na configuração com confinador, uma menor altura de fonte é observada. Este mesmo comportamento foi descrito por Estiati *et al.* (2019) e os autores destacam a ampliação de condições operacionais que o confinador permite, já que menores alturas de equipamento são necessárias para operações com altas vazões de alimentação de ar. Altzibar *et al.* (2017) destacam que a altura de fonte é grandemente influenciada pelo diâmetro do confinador e que quanto maior este, maior é a fonte formada. A explicação para este fato está na maior queda de pressão obtida quando o diâmetro do confinador é menor, o que leva a uma diminuição da altura da fonte (ALTZIBAR, 2017).

Na Figura 2b, pode ser observada, ainda, a presença de duas regiões de recirculação de fluido próximo à parte inferior do confinador de fonte. Altzibar *et al.* (2017) observaram que a distância entre a superfície do leito e a extremidade inferior do confinador é de grande importância, já que para distâncias menores, o atrito é alto e, portanto, a queda de pressão também é alta, o que provoca mais desvio de ar para a zona anular, aprimorando o contato gás-

sólido. Além disso, esse comportamento fluidodinâmico ressalta a importância da utilização de um modelo de turbulência adequado no estudo de simulação CFD-DEM de leitos de jorro com fonte confinada.

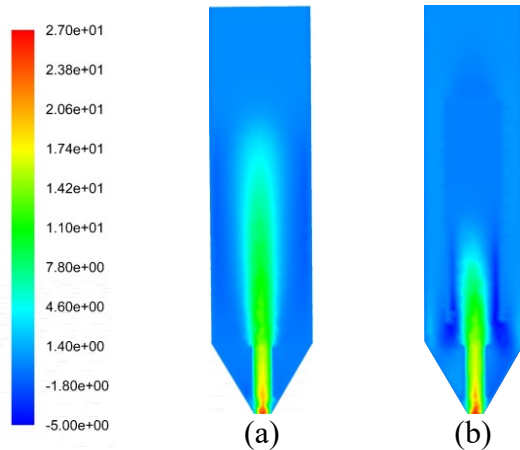


Figura 2: Perfil de velocidade do ar (m/s) para as configurações (a) sem confinador; (b) com confinador de fonte.

A Figura 3 mostra os resultados das simulações para a configuração sem confinador de fonte, para as quatro razões q/q_{jm} de alimentação de ar estudadas.

É possível observar que uma velocidade de alimentação de ar 40% acima do jorro mínimo (Figura 3b) já é suficiente para promover contato de partículas com a parede do equipamento na região anular.

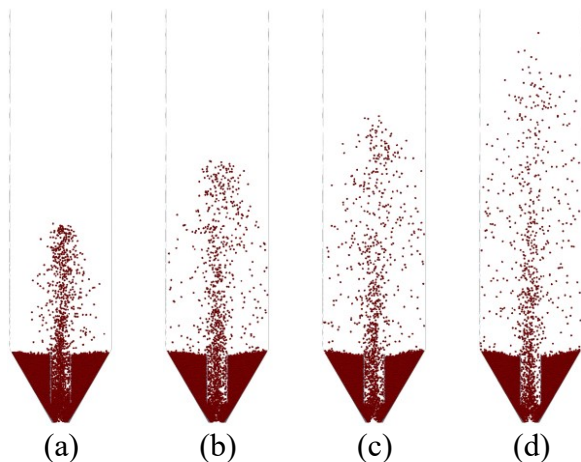


Figura 3: Simulações CFD-DEM do leito de jorro sem confinador para (a) $1,3q/q_{jm}$; (b) $1,4q/q_{jm}$; (c) $1,5q/q_{jm}$; (d) $1,6q/q_{jm}$.

A Figura 4 mostra os resultados das simulações para a configuração com confinador de fonte, para as quatro velocidades de alimentação de ar estudadas.

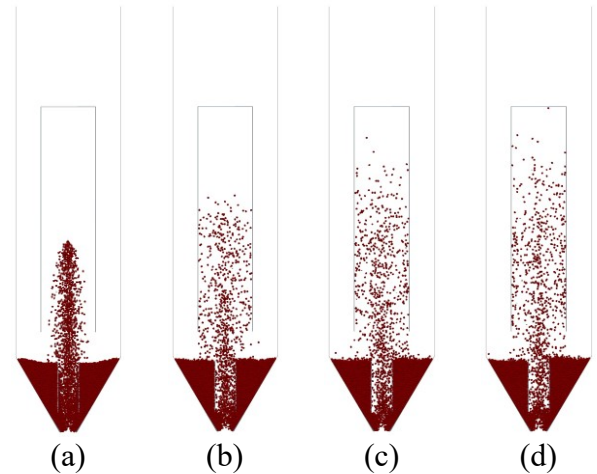


Figura 4: Simulações CFD-DEM do leito de jorro com confinador para (a) $1,3q/q_{jm}$; (b) $1,4q/q_{jm}$; (c) $1,5q/q_{jm}$; (d) $1,6q/q_{jm}$.

É possível observar que, assim como no dimensionamento original para partículas finas (Tellabide *et al.*, 2020), o confinador de fonte é capaz de manter as sementes de Urucum em seu interior, limitando o espaço de escoamento de partículas, mesmo em velocidades mais altas (Figura 4d).

Uma vez visualizado o comportamento das sementes de Urucum no interior do leito de jorro com confinador, e caracterizada a presença de zonas de recirculação de fluido e de aprisionamento de partículas (das regiões de jorro e anular), uma investigação da intensidade de contatos e colisões de partículas nessas duas regiões (jorro e anular) se torna importante no estudo prévio à realização de extração mecânica neste equipamento.

Intensidade de colisões e contatos

A Figura 5 mostra a variação da força de colisão para as velocidades de alimentação 30%, 40%, 50% e 60% acima da velocidade de jorro mínimo, para as configurações sem confinador e com confinador de fonte.

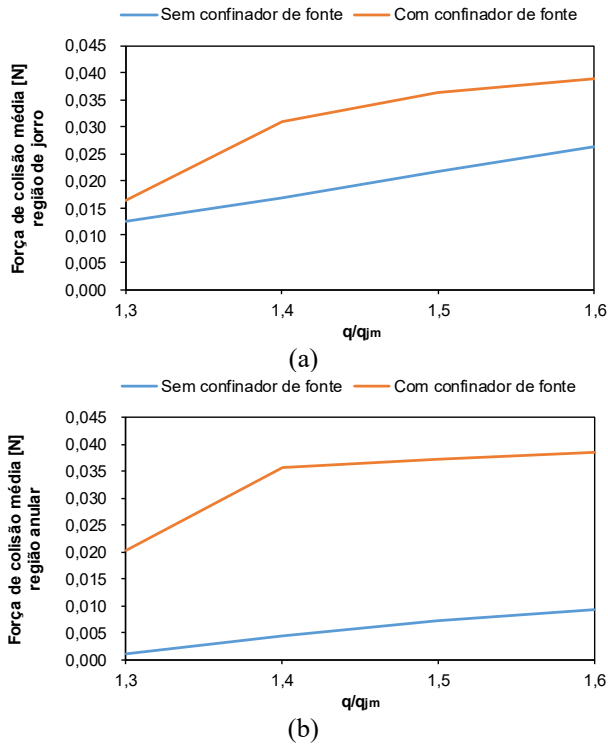


Figura 5: Força de colisão em (a) região de jorro; (b) região anular.

É possível observar que a força de colisão entre partículas é maior na configuração com confinador de fonte, para as regiões de jorro e anular. A figura 5 mostra, adicionalmente, que com a presença do confinador, a intensidade de colisão na região de jorro tem valores muito próximos àqueles da região anular, já que a parede lateral do aparato limita o movimento das partículas e faz com que a região anular se confunda com a região de jorro. Esse movimento foi descrito por Tellabide *et al.* (2021), ao definir o regime no interior do confinador como regime pulsante, caracterizado por partículas em movimento ascendente e descendente na região anular, devido principalmente à incorporação de partículas do ânulo para o jorro. Esse comportamento pulsante explica também a diferença acentuada entre intensidade de colisão sem confinador e com confinador, já que o movimento promove maior velocidade relativa entre as partículas na região anular.

A Figura 6 mostra a variação da força de contato (deslizamento) para as quatro razões q/q_{jm} estudadas, para as configurações sem confinador e com confinador de fonte.

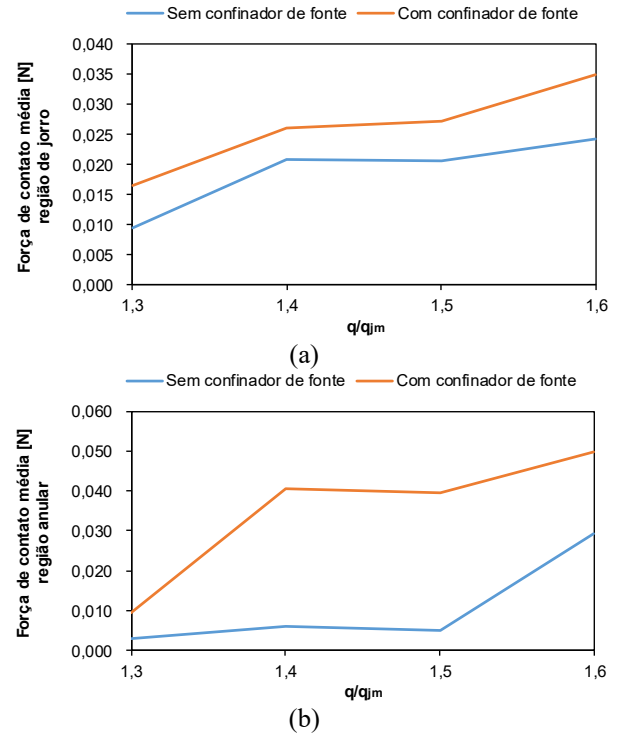


Figura 6: Força de contato em (a) região de jorro; (b) região anular.

Assim como para intensidade de colisões, foi observado que o confinador de fonte promove maior intensidade de contatos, tanto para região de jorro, quanto para região anular. Além disso, com a presença do confinador, a intensidade de contatos na região de jorro tem valores muito próximos àqueles da região anular, fortalecendo mais uma vez a ideia de que as partículas da região anular são incorporadas à região de jorro, o que diminui as diferenças entre as duas regiões.

A Figura 6b mostra que o aumento da velocidade de alimentação de ar de $1,5q_{jm}$ para $1,6q_{jm}$ aumenta consideravelmente a força de contato na região anular para a configuração sem confinador de ar. Esse comportamento pode ser explicado pelo acentuado espalhamento de partículas que ocorre na transição dessas duas velocidades, observado nas Figuras 3c e 3d.

Energia cinética e energia cinética rotacional

A Figura 7 mostra a variação da energia cinética para as velocidades de alimentação 30%, 40%, 50% e 60% acima da velocidade de jorro mínimo, para as configurações sem confinador e com confinador de fonte.

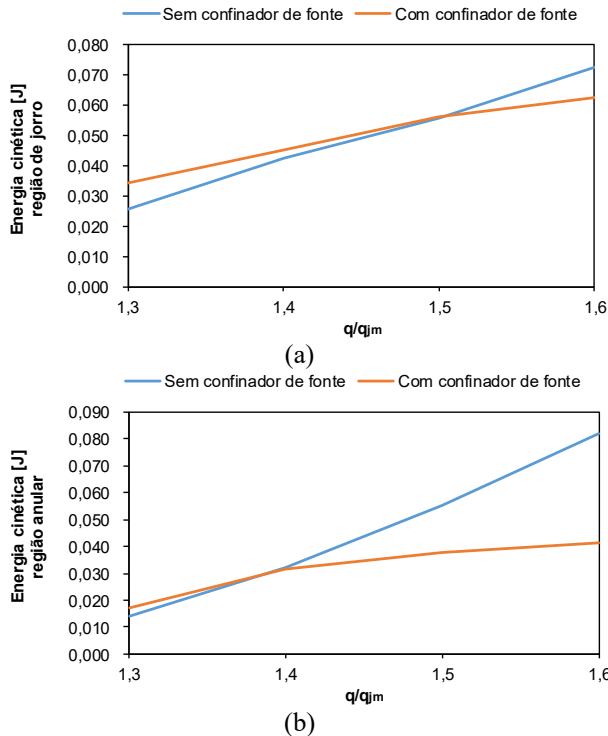


Figura 7: Energia cinética em (a) região de jorro; (b) região anular.

É possível observar que na configuração sem confinador a energia cinética segue um padrão de crescimento, conforme a velocidade de alimentação de ar aumenta, para ambas as regiões analisadas.

Contudo, na configuração com confinador, a partir de uma determinada razão q/q_{jm} , o acréscimo de energia cinética de partículas sofre alteração. Esse comportamento já era esperado, uma vez que com a incorporação de partículas da região anular para a região de jorro, a velocidade média das partículas sofre alteração. Além da mudança na velocidade relativa provocada pelo movimento de pulsação, Norouzi *et al.* (2016) ressaltam que durante o choque entre partículas, uma quantidade significativa de energia cinética é convertida em energia cinética rotacional e é perdida como resultado do atrito no ponto de colisão. Logo, com o aumento da intensidade de colisão de partículas, é esperado que mais energia cinética seja dissipada e que parte dessa dissipação dê origem à energia cinética rotacional, apresentada na Figura 8.

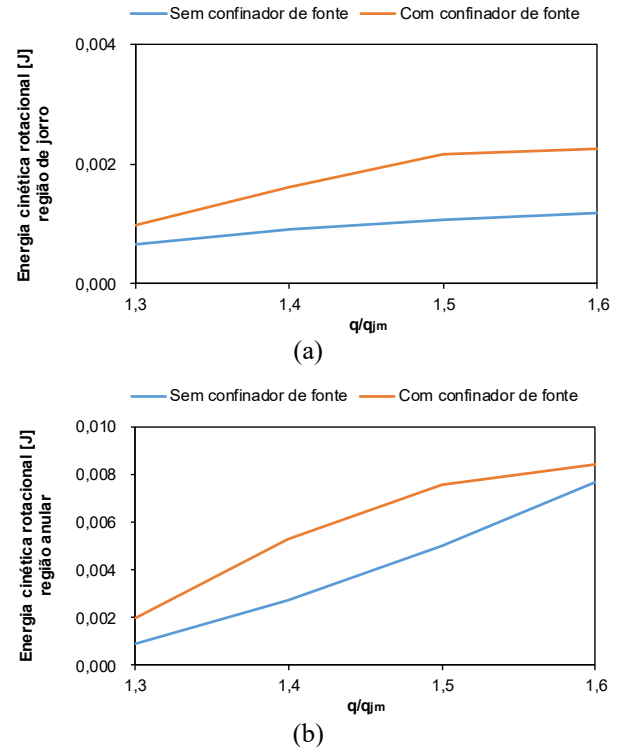


Figura 8: Energia cinética rotacional em (a) região de jorro; (b) região anular.

A alteração no ganho de energia cinética é ainda mais acentuada na região anular do leito de jorro com confinador, como mostra a Figura 7b. Nesse caso, há além da dissipação de energia partícula - partícula, dissipação de energia cinética devido às colisões partícula - parede do confinador. É importante salientar que para razões q/q_{jm} mais baixas, os valores de energia cinética são muito próximos. Nessa condição, como há pouca influência da parede do confinador no movimento das partículas, visto que as regiões de jorro e anular ainda estão bem caracterizadas (Figura 4a), a dissipação de energia é similar àquela observada na condição sem confinador (Figura 3a).

Assim, pode-se assumir que com o aumento da razão q/q_{jm} , as partículas passam a dissipar mais energia translacional, porque colidem com maior intensidade. Esse comportamento é mais acentuado na região anular, pois é justamente nessa região que a parede do confinador afeta a trajetória das partículas, incorporando-as de volta à região de jorro antes que o movimento cíclico

característico do equipamento tenha sido finalizado.

CONCLUSÕES

As simulações computacionais CFD-DEM mostraram que a intensidade de colisão e a intensidade de contato entre partículas são maiores na configuração experimental com confinador de fonte. Como Cunha *et al.*, (2009) e Taham *et al.*, (2016) ressaltaram que tanto o tubo *draft*, quanto o aparato metálico favorecem a fricção das sementes e beneficiam a extração mecânica de corante por atrito, a limitação de partículas no confinador provoca o mesmo comportamento e é esperado que tenha impacto na produção de Bixina.

A maior dissipação de energia cinética translacional e sua conversão em energia cinética rotacional, para a configuração com confinador de fonte, também reforça a informação de que a intensidade de colisão é maior na utilização do aparato.

Dessa forma, a extração mecânica de corante da semente de Urucum utilizando-se um leito de jorro com confinador mostra-se promissora no que diz respeito ao atrito entre partículas.

NOMENCLATURA

ε_f	Porosidade (-)
ρ_f	Densidade do fluido (kg/m)
\vec{u}_f	Velocidade da fase fluida (m/s)
p	Pressão (Pa)
$\bar{\tau}_f$	Tensor tensão (Pa)
g	Aceleração gravitacional (m/s ²)
\vec{F}_{p-f}	Força exercida pelas partículas no fluido (N)
ρ_p	Densidade de partícula (kg/m ³)
d_p	Diâmetro de partícula (mm)
m_p	Massa da partícula (kg)

\vec{u}_p	Velocidade linear da partícula (m/s)
\vec{F}	Força de contato (N)
I_p	Momento de inércia da partícula (kg.m ²)
$\vec{\omega}_p$	Velocidade angular da partícula (m/s)
\vec{T}_{ij}	Torque entre partículas i e j (N/m)
Δt_{max}	Tempo máximo recomendado para <i>time-step</i> da fase particulada (s)
T_R	Número de Rayleigh (-)
r_{min}	Raio da menor partícula do <i>clump</i> (m)
G	Módulo de cisalhamento (N)
D_0	Diâmetro de entrada do cone (m)
H_c	Altura de cone (m)
D_c	Diâmetro de seção cilíndrica (m)
D_d	Diâmetro do <i>draft</i> (m)
L_d	Altura do <i>draft</i> (m)
h_{draft}	Distância do <i>draft</i> desde a base (m)
D_{conf}	Diâmetro do confinador (m)
L_{conf}	Altura do confinador (m)
h_{conf}	Distância do confinador desde a base (m)
ρ_f	Densidade do fluido (kg/m)
μ_f	Viscosidade do fluido (kg/m.s)
ρ_f	Densidade do fluido (kg/m)
ρ_w	Densidade da parede (kg/m)
μ_f	Viscosidade do fluido (kg/m.s)
Δt_p	<i>Time-step</i> da fase sólida (s)
Δt_f	<i>Time-step</i> da fase fluida (s)
$e_{(p-p)}$	Coefficiente de restituição partícula-partícula
$e_{(p-w)}$	Coefficiente de restituição partícula-parede

$\mu_{R(p-p)}$	Coefficiente de rolamento partícula-partícula
$\mu_{R(p-w)}$	Coefficiente de rolamento partícula-parede
$\mu_{(p-p)}$	Coefficiente de atrito estático partícula-partícula
$\mu_{(p-w)}$	Coefficiente de atrito estático partícula-parede
qjm	Velocidade de jorro mínimo (m/s)
q	Velocidade de alimentação na seção de entrada (m/s)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

REFERÊNCIAS

- ALVES, R. W. Extração e purificação de corantes de Urucum. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- ALVES, R. W.; SOUZA, A. A. U.; SOUZA, S. M. A. G.; JAUREGI, P. Recovery of norbixin from a raw extraction solution of annatto pigments using colloidal gas aphrons (CGAs). *v. 48, p. 208–213, 2006.*
- ALTZIBAR, H.; ESTIATI, I.; LOPEZ, G.; SALDARRIAGA, J. F.; AGUARDO, R.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology, v. 312, p. 334-346, 2017.*
- BARROZO, M. A. S.; SANTOS, K. G.; CUNHA, F.G.; Mechanical Extraction of natural dye from Bixa orellana seeds in spouted bed. *Industrial Crops and Products, v. 45, p. 279-282, 2013.*
- BIÇER, N.; ENGIN, T.; YAŞAR, H.; BÜYÜKKAYA, E.; AYDIN, A.; TOPUZ, A. Design optimization of a shell-and-tube heat exchanger with novel three-zonal baffle by using CFD and taguchi method. *International Journal of Thermal Sciences, v. 155, 2020.*
- CUNHA, F. G.; SANTOS, K. G.; ATAÍDE, C. H.; EPSTEIN, N.; BARROZO, M. A. S. Annatto Powder Production in a Spouted Bed: An Experimental and CFD Study. *Industrial & Engineering Chemical Research, v. 48, p. 976–982, 2009.*
- EPSTEIN, Norman; GRACE, J. R. Spouting of particule solids. In: *Hanbook of Powder, Science and Technology, 2 ed., p.532-567. New York: Chapman & Hall, 1997.*
- GIDASPOW, Dimitri; BEZBARUAH, Rukmini; DING, J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization. *Proceedings of the 7th Fluidization Conference, Brisbane, Australia, 3 May 1992.*
- ESTIATI, Idoia; TELLABIDE, Mikel; SALDARRIAGA, Juan Fernando; ALTZIBAR, Haritz; OLAZAR, Martin. Fine particle entrainment in fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology, v.344, p.278-285, 2019.*
- LIMA, R. M. Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana. 2017. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.*
- LIMA, R. M. Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um disco rotatório. 2020. *Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.*
- MASSARANI, G.; PASSOS, M. L. .; BARRETO, D. W. Production of Annatto Concentrates in Spouted Beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, p. 954–959, 1992.*
- MATHUR, Kishan B.; EPSTEIN, Norman. *Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.*
- NOROURZI, Hamid R. ; ZARGHAMI, Reza; SOTUDEH-GHAREBAGHS, Rahmat; MOSTOUFI, Navid. *Coupled CFD-DEM*

modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows. Wiley, 2016.

- SHAMSI, M. M.; MIRGHASEMI, A. A. Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly. *Powder Technology*, v.221, p.431-446, 2012.
- TAHAM, T.; CABRAL, F. A.; BARROZO, M. A. S. Extraction of bixin from annatto seeds using combined technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015.
- TAHAM, T.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S. Improvement of bixin extraction from annatto seeds using a screen-topped spouted bed. *Separation and Purification Technology*, v. 158, p. 313–321, 2016.
- TAVARES, L. E. DIAS, A. R.; ATAÍDE, C. H.; BARROZO, M. A. S. Extração Mecânica da Bixina em leito de Jorro: influência do “draft”, da Carga do Material e da vazão de Ar. *Anais do Congresso de Engenharia de processos do Mercosul, Empromer - Florianópolis – SC*, 1999.
- TELLABIDE, M.; ESTIATI, I.; PABLOS, A.; ALTZIBAR, H.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. New operation regimes in fountain confined conical spouted beds. *Chemical Engineering Science*, v. 211, p. 115255, 2020.
- TELLABIDE, M.; ESTIATI, I.; ATXUTEGI, H.; ALTZIBAR, H.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. Fine particle flow pattern and region delimitation in fountain confined conical spouted beds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 95, p. 312–324, 2021.