

INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS INERTES NO RENDIMENTO DA SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA UTILIZANDO SECADOR ROTATÓRIO NÃO-CONVENCIONAL

ISABELA P. MENEZES^{1*}, RODOLFO J. BRANDÃO², NATÁLIA P. ALMEIDA¹, REBECA L. GRAFF¹, CLAUDIO R. DUARTE¹, MARCOS A. S. BARROZO¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de Alagoas

*e-mail: isabelamenezes03@hotmail.com

RESUMO – A acerola é uma fruta tropical originada nas Antilhas e o Brasil é o maior produtor do mundo. Por possuir altos índices de vitamina C e outros compostos bioativos, a acerola se popularizou, sendo conhecida pela sua capacidade antioxidante. Neste trabalho, foi realizada a secagem da polpa de acerola utilizando um secador rotatório não-convencional com diferentes partículas inertes de aço inox, cerâmica e polipropileno. Durante a secagem, a polpa reveste as esferas inertes, aumentando a superfície de contato e, com a passagem de ar quente e as colisões partícula-partícula e partícula-parede, obtém-se o pó. Simulações DEM (Método dos Elementos Discretos) foram realizadas para avaliar como a mudança da densidade das esferas afeta a força de colisão, a velocidade das partículas e o número de colisões. Os rendimentos experimentais utilizando as esferas de aço inox, cerâmica e polipropileno foram, respectivamente, 67,51%, 48,40% e 40,08%. Com a mudança de densidade das esferas, a velocidade de partícula e o número de colisões pouco influenciaram. As partículas de aço inox apresentaram maior força normal de colisão, seguida das de cerâmica e polipropileno, o que afetou diretamente no maior valor do rendimento experimental.

INTRODUÇÃO

A importância da secagem de alimentos se encontra na sua capacidade de inibir o crescimento microbiano, reduzir peso e volume de produtos, melhorar a forma de armazenamento e transporte, além de preservar as características biológicas e nutricionais (MOURA, 2016; SANTOS, 2020).

Em termos de aspectos nutricionais e sensoriais, a escolha do processo de secagem é extremamente importante, para garantir que não haja perdas consideráveis de compostos importantes, como antioxidantes e vitaminas, além da degradação de ácidos graxos e proteínas (SABLANI & RAHMAN, 2008).

A acerola (*Malpighia emarginata* DC.) (Figura 1) é uma fruta originada das Antilhas, região da América Central, e passou a ser

explorada comercialmente no Brasil por volta dos anos 80. Atualmente, o Brasil é o maior produtor dessa fruta tropical (EMBRAPA, 2012).



Figura 1: Acerola (*Malpighia emarginata* DC.).

Por possuir elevados teores de ácido ascórbico (vitamina C) e vários outros compostos como vitaminas no complexo B,

proteínas, minerais e fenólicos, bem como devido ao aumento do incentivo à alimentação saudável, essa fruta se popularizou, além de possuir vários compostos bioativos que conferem a ela uma ação antioxidante (BARBOZA; TAVARES, MELO, 1996).

A acerola pode ser consumida “in natura” ou pode ser processada para a fabricação de polpas e sucos. Além disso, há uma demanda no mercado nacional de cosméticos e suplementos vitamínicos, sendo feitos beneficiamentos dessa fruta. Uma alternativa para aumentar a vida útil e manter as propriedades da fruta é a produção de acerola em pó, através de metodologias de secagem de pastas (IBGE, 2017).

O secador rotatório é um dos secadores mais comuns e é altamente empregado nas indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas agrícolas e de mineração. Sua configuração é simples, constituída basicamente de um tambor rotatório de metal levemente inclinado com a horizontal, por onde passa uma corrente de gás. O material a ser seco é introduzido em uma extremidade, movendo-se até a outra extremidade (KROKIDA et al., 2007; LISBOA, 2005).

No interior dos secadores rotatório, é muito comum a presença de suspensores, que têm a função de melhorar a movimentação do material sólido e aumentar a superfície de contato com o gás aquecido. Entretanto, na sua forma convencional estes secadores são usados para materiais granulares, não podendo ser usados para materiais pastosos (LISBOA, 2005).

Uma opção para materiais pastosos é a utilização de partículas inertes. Nesta técnica, a alimentação da pasta entra em contato com as partículas inertes e com a corrente de ar quente. Assim, um filme líquido se forma na superfície das partículas, dando início às mudanças reológicas da pasta, formando um filme fino e quebradiço (FREIRE, et al. 2012; PERAZZINI, 2015).

Ao longo da secagem, quando é atingido um determinado nível de umidade, o filme seco se desprende devido às colisões partícula-partícula e partícula-parede do secador. O pó produzido é então transportado pela corrente gasosa para fora do secador, passando por um

sistema de separação apropriado, geralmente um ciclone (SOUSA, 2017).

Os inertes aumentam a área de contato na transferência de calor (condução) que, somada com a troca de calor que ocorre entre a corrente de ar e a pasta, resultam em rendimentos consideráveis. A densidade e o tamanho das partículas inertes são aspectos que afetam o processo da secagem, pois a adesão e o desprendimento da pasta sobre os inertes governam a cinética de secagem (FREIRE et al., 2012).

O secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) é formado por um cilindro horizontal com suspensores longitudinais e partículas de inerte em seu interior. Os suspensores, juntamente com o cilindro horizontal, formam um único corpo e as partículas inertes formam um leito que ocupa grande parte do volume do cilindro. A rotação do cilindro em conjunto com os suspensores, revolve os inertes dentro do tambor. Nesse secador, a alimentação é concorrente com o gás e a pasta alimentada recobre as partículas inertes em uma fina camada, expondo-a ao fluido de secagem (BURJAILI, 1996).

A cominuição do material seco ocorre devido às colisões partícula-partícula e partícula-parede do cilindro e o pó obtido é arrastado pelo ar de secagem até o separador. O processo do equipamento consiste em duas fases: a secagem e a moagem (atrato e impacto), sendo que a operação como um todo engloba as trocas de calor por condução e convecção e da moagem. Uma particularidade do SRRI é a grande influência que as partículas inertes realizam no desempenho do secador (SANTOS, 2020).

O fluxo de ar do SRRI (Figura 2) é responsável por promover a secagem e transportar o produto final em pó. Como esse ar não promove a movimentação do leito, isso resulta em uma menor demanda do mesmo quando comparado a outros equipamentos que utilizam partículas inertes, como o leito de jorro e o leito fluidizado (BURJAILI, 1996).

Para realizar a secagem de produtos com baixa temperatura de transição vítrea, utiliza-se como alternativa os adjuvantes de secagem, que são aditivos de secagem comuns nas indústrias. Esses aditivos promovem a estabilização da pasta durante a secagem, aumentando a

temperatura de transição vítrea (T_g) e protegendo os compostos bioativos termossensíveis (CANO-CHAUCA et al., 2005).

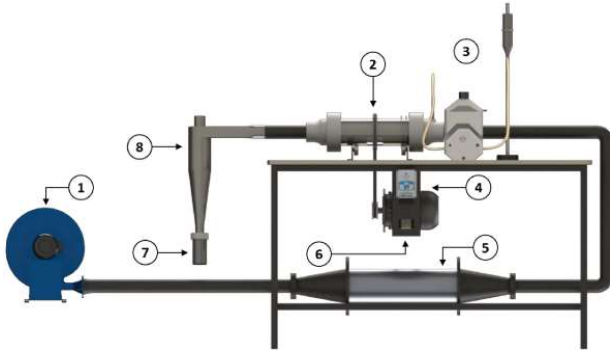


Figura 2: Representação do Secador Rotatório com Recheio de Inertes.

A maltodextrina é um aditivo alimentar seguro para o consumo humano, é solúvel em água e é encontrada na forma de um pó branco ou em solução concentrada (BHANDARI, 2005). Ela é amplamente usada devido ao baixo custo, baixa higroscopicidade (o que evita a aglomeração indesejada de partículas), possui efeito antioxidante e é eficaz na retenção de voláteis de 65 a 80% (COUTINHO, 2007).

O Método dos Elementos Discretos (DEM) tem sido usado para descrever fluxo de partículas em várias aplicações. A simulação do comportamento dessas partículas pode ser uma ferramenta muito interessante para avaliar e prever o desempenho das partículas inertes no interior do tambor rotatório. Essas simulações DEM podem oferecer informações importantes sobre a força de colisão, a velocidade das partículas e o número de colisões, que estão associadas diretamente ao desempenho do processo (SANTOS, et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar como as características do inerte influenciam no rendimento da produção de pó de acerola utilizando o SRRI. Para isso diferentes inertes foram avaliados usando simulações DEM e experimentações.

METODOLOGIA

Simulações numéricas

Em uma abordagem numérica Lagrangeana, a trajetória de cada partícula é rastreada pela aplicação de uma força de

equilíbrio através da segunda lei de Newton (Equações 1 e 2). O equilíbrio contabiliza as interações partícula-partícula e partícula-parede através da aplicação da lei de força-deslocamento para verificar como a força de contato e as forças de campo determinam o movimento. A aceleração e a velocidade das partículas são determinadas por integrais temporais e a posição, rotação e trajetória são recalculadas no final de cada *time-step*

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^t) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i + R_{ij}^t) + \tau_{rij} \quad (2)$$

em que m_i , I_i , ω_i e R_i são massa, velocidade linear, momento de inércia e velocidade angular e raio da partícula i , enquanto F_{ij}^n , F_{ij}^t , e τ_{rij} são as forças nas direções normal e tangencial e o torque entre as partículas i e j , respectivamente (YANG, P.; CHEN, H.; WEN LIU, Y., 2017).

Os modelos de contato aplicados em simulações DEM podem ser classificados em modelos esfera rígida e esfera macia. Na abordagem esfera rígida, as colisões são consideradas como binárias e modeladas instantaneamente no processo. Esse modelo pode ser usado para representar sistemas de baixa concentração granular, onde é improvável que ocorram múltiplas colisões. Já na abordagem da esfera macia, os modelos de colisões de várias partículas podem ser tratados, nos quais um modelo de contato avaliará as contribuições elásticas e plásticas.

Nesse trabalho, foi utilizado o modelo não linear de Hertz-Mindlin como o modelo de contato, que combina a teoria clássica de contato elástico para a direção normal de Hertz e o modelo de não-deslizamento de Mindlin para a direção tangencial. A Tabela 1 demonstra algumas das equações do modelo de Hertz-Mindlin aplicadas nesse estudo, em que razão de Poisson (ν), coeficiente de restituição (e_p), sobreposição normal (δ_n), sobreposição tangencial (δ_t), velocidade relativa normal (v_n^{rel}) e velocidade relativa tangencial (v_t^{rel}) (DI RENZO, DI MAIO, 2004). Considerando o deslocamento tangencial, a força tangencial é limitada pela lei de atrito de Coulomb (F_t^d , max) e torna-se uma função do coeficiente

de atrito estático (μ_s), representada pela Equação 3:

$$F_{t, max}^d = \mu_s F_n \quad (3)$$

Tabela 1: Equações fundamentais do modelo não linear de Hertz-Mindlin

Força normal	$\vec{F}_n = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{\frac{3}{2}} \sqrt{R^*}$
Força normal de amortecimento	$\vec{F}_n^D = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \vec{v}_n^{rel}$
Módulo de Young equivalente	$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i)^2}{E_i} + \frac{(1-\nu_j)^2}{E_j}$
Rigidez normal	$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}$
Coefficiente de amortecimento	$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}}$
Força tangencial	$\vec{F}_t = -8\delta_t G^* \sqrt{R^* \delta_n}$
Força tangencial de amortecimento	$\vec{F}_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_T m^*} \vec{v}_t^{rel}$
Rigidez tangencial	$S_t = 8E^* \sqrt{R^* \delta_n}$
Módulo de cisalhamento equivalente	$\frac{1}{G^*} = \frac{2-\nu_i}{G_i} + \frac{2-\nu_j}{G_j}$

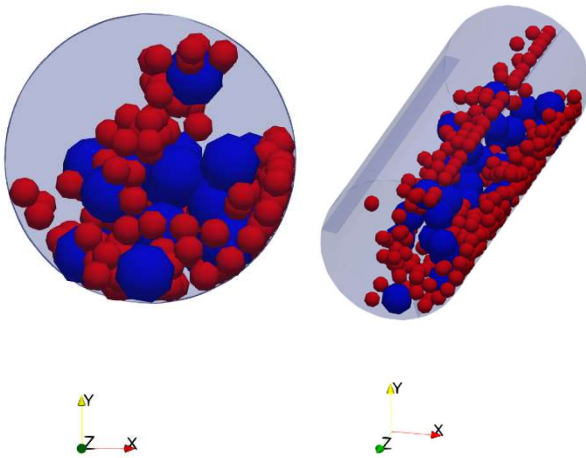


Figura 3: Distribuição das esferas no interior do tambor rotatório com três suspensores.

Condições da simulação

As simulações de DEM foram realizadas utilizando o software Liggths e os parâmetros de entrada no DEM estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de entrada no DEM

Parâmetros	Aço Inox	Cerâmica	Polipropileno
Densidade (kg/m ³)	8000	2300	900
Razão de Poisson	0,2	0,2	0,2
Coefficiente de restituição	0,86	0,86	0,86
Módulo de cisalhamento (Pa)	1.10 ⁺	1.10 ⁺⁶	1.10 ⁺⁶
Coefficiente de atrito estático	0,22	0,23	0,57
Coefficiente de atrito de rolamento	0,01	0,01	0,01
Time-step do DEM (s)	10% do tempo de Rayleigh		
Tempo real de simulação	30 s		

Nesse estudo, utilizou-se esferas de aço inox, cerâmica e polipropileno com diâmetros de 1” e ½” (25,4mm e 12,7mm). O fator de enchimento foi mantido em 35% e a fração de inertes de menor tamanho em 46,21%, totalizando 32 esferas de 1” e 319 esferas de ½”, como mostrado na Figura 3. Para garantir que o sistema se encontrasse em estado estacionário, foram desconsiderados os 5 primeiros segundos de simulação. A escolha destas condições foi baseada em trabalhos anteriores (SANTOS, 2020; NUNES, 2021).

Estudo experimental

Nos ensaios de secagem, foram utilizadas polpas de acerola da marca Mais Fruta, contendo apenas acerola em sua composição. A polpa foi armazenada em freezer a -18°C e descongelada naturalmente para a realização dos experimentos. A maltodextrina da marca Health Labs foi utilizada como aditivo de secagem do processo e a porcentagem adicionada foi de 6,28%.

SANTOS (2020), em seus estudos, mostrou que a combinação entre esferas de 1” e ½” de diâmetro intensificam as forças de

colisão partícula-partícula e partícula parede, além de aumentar o número dessas colisões. Logo, essa configuração foi mantida nesse estudo.

Além disso, a fator de enchimento do tambor rotatório foi fixado em 35%, a vazão do ar de secagem em 10 m/s, a fração de inertes menores em 46,21% e a temperatura em 77,2°C (NUNES, 2021).

Sendo assim, foram realizados experimentos no SRRI com 3 diferentes esferas inertes: de aço inox (8000 kg/m³), cerâmica (2300 kg/m³) e polipropileno (900 kg/m³) (Figura 4), com intuito de avaliar como a densidade dessas partículas influencia no rendimento da secagem.

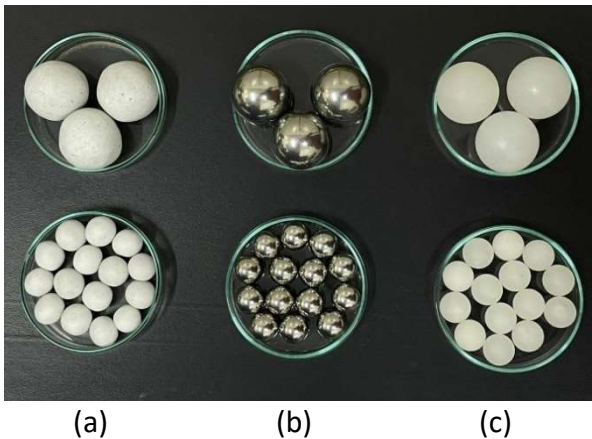


Figura 4: Esferas de diâmetros de 1" e 1/2" de cerâmica (a), aço inox (b) e polipropileno (c).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da força de colisão

Durante o processo de secagem, a polpa alimentada recobre as esferas, formando uma película. Para que haja a remoção dessa camada de polpa, o ar de secagem retira a umidade e, juntamente com a força de colisão entre as partículas inertes, obtém-se o pó que é coletado em um ciclone.

A Figura 5 mostra o resultado da simulação da força normal de colisão obtido por simulação DEM para cada tipo de inerte estudado.

É possível perceber que, com o aumento da densidade da partícula, a força normal de colisão aumenta. Esse fator é importante para obter-se um maior rendimento do processo.

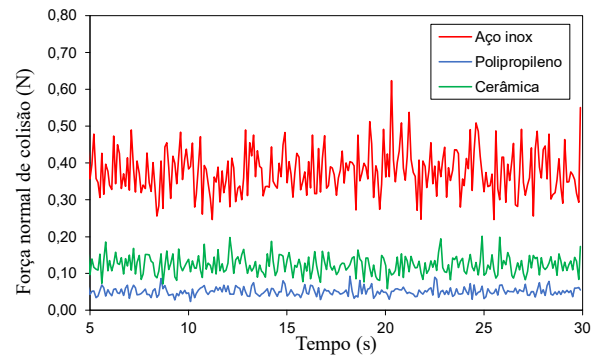


Figura 5: Força normal de colisão por tempo.

A força normal de colisão média para cada tipo de partícula pode ser observada nas Figuras 6 e 7, onde percebe-se que as esferas de aço inox possuem uma força de colisão 204,91% maior do que as de cerâmica e 639,46% maior do que as de polipropileno.

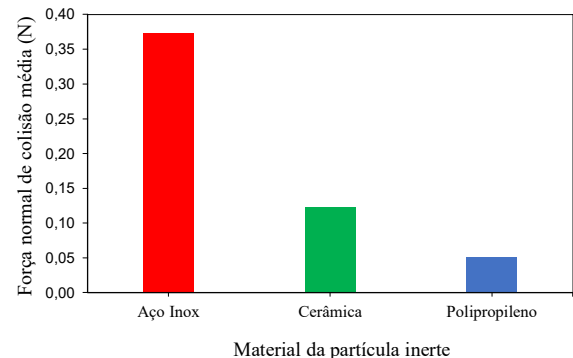


Figura 6: Força normal de colisão média em relação à cada tipo de inerte.

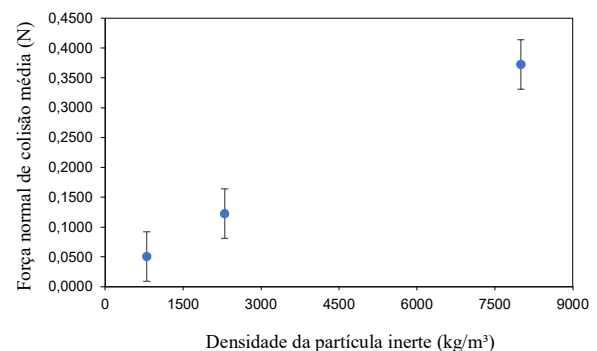


Figura 7: Força normal de colisão média em relação à densidade de cada inerte.

Análise da velocidade de partícula

A velocidade das partículas também é um fator importante para alcançar um bom rendimento. A velocidade com que as partículas se colidem, interfere diretamente na quebra do

filme de polpa que reveste as esferas para a produção do pó.

As Figuras 8 e 9 mostram os resultados das simulações em relação à velocidade das esferas por tempo e à velocidade média dos diferentes materiais que as compõe.

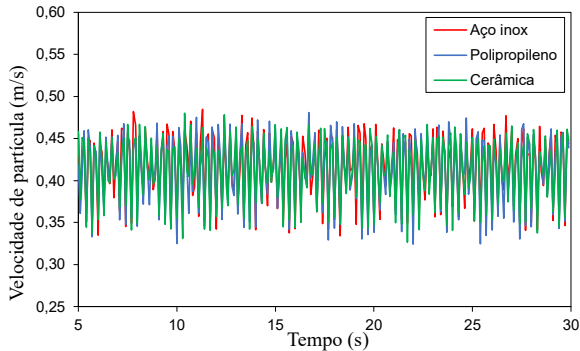


Figura 8: Velocidade normal de colisão por tempo.

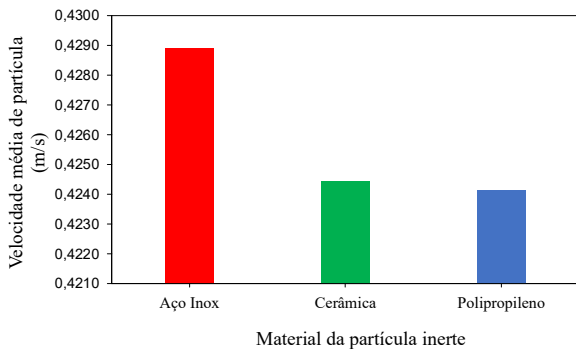


Figura 9: Velocidade média da partícula em relação à cada tipo de inerte.

Pelos gráficos, é possível verificar que as propriedades das esferas inertes tiveram uma menor influência na velocidade de partículas, comparada à força de colisão, onde percebe-se que as esferas de aço inox possuem uma velocidade 1,06% maior quando comparadas com as de cerâmica e 1,13% maior quando comparadas com as de polipropileno.

Análise do número de colisões entre as partículas

O número de colisões entre as partículas por segundo para cada tipo de esfera inerte pode ser observado na Tabela 4 e, posteriormente, na Figura 10.

Observa-se que houve um aumento de 36,67% do número de colisões quando as esferas de polipropileno foram trocadas para as de cerâmica, entretanto quando estas foram

substituídas pelas de aço, este incremento foi menor (4,88%).

Tabela 4: Número de colisões entre as partículas por segundo

Esferas inerte	Número de colisões por segundo
Aço inox	387 ± 35
Cerâmica	369 ± 38
Polipropileno	270 ± 28

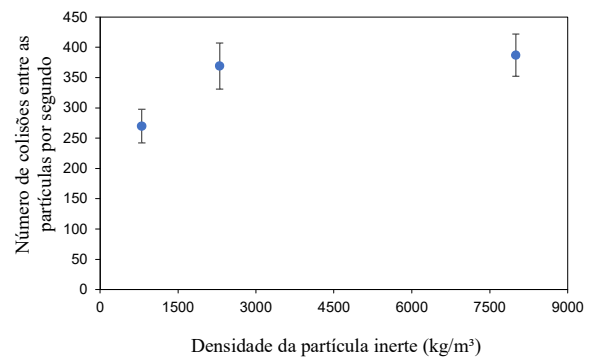


Figura 10: Número de colisões entre as partículas por segundo.

Para melhor visualizar os efeitos destas variáveis, realizou-se uma análise conjunta da magnitude da força normal de colisão média com o número de colisões entre as partículas, obtendo assim, o valor da força normal de uma colisão, que pode ser observado na Figura 11:

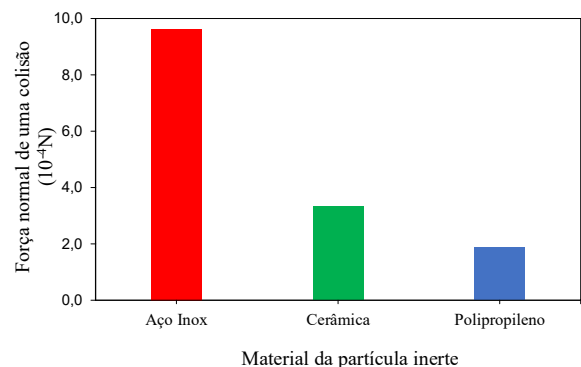


Figura 11: Força normal de uma colisão.

A partir dessa análise, é possível perceber que, apesar do número de colisões dos diferentes inertes ser próximo, a magnitude da força na colisão é bem superior para o aço inox, seguido da cerâmica e do polipropileno.

Resultados experimentais

Os rendimentos médios obtidos nos experimentos podem analisados pela Tabela 3.

Tabela 3: Rendimento da secagem em relação às esferas inertes

Esferas inerte	Rendimento
Aço inox	67,51%
Cerâmica	48,40%
Polipropileno	40,08%

Os resultados experimentais comprovaram o previsto, de acordo com os resultados das simulações. As esferas de aço inox, por possuírem maior densidade, intensificaram as forças de colisão e o número de colisões, resultando no maior rendimento de secagem, de 67,51%. As esferas de cerâmica, por possuírem densidade intermediária, resultaram também em um rendimento intermediário de 48,40%. Por fim, as esferas de polipropileno, de menor densidade, resultaram no menor rendimento (40,08%), como o esperado. Assim foi possível ter um incremento de mais de 27 pontos percentuais no rendimento, por meio de usos de esferas de maior densidade.

CONCLUSÃO

O secador rotatório com recheio de inertes (SRRI), que é um secador não-convencional desenvolvido na FEQUI/UFU, foi utilizado com sucesso na produção de polpa de acerola, fruta que possui alto teor de vitamina C, além de vários outros compostos antioxidantes.

Foi investigado, através das simulações DEM, como a força de colisão, a velocidade das partículas e o número de colisões são influenciadas pela diferença de densidade das esferas inertes. Os resultados das simulações mostraram que o uso das partículas inertes de aço inox levou a uma maior força de colisão. Por fim, o número de colisões não apresentou uma mudança muito significativa, porém associado à força normal de colisão média, observa-se que a magnitude da força de impacto de uma colisão é bem superior para o aço inox.

Para a análise do rendimento, foi avaliado experimentalmente como os diferentes inertes se comportaram na produção de pó de acerola. Os resultados mostraram que o maior rendimento foi obtido utilizando esferas de aço inox, seguido das de cerâmica e de polipropileno. Assim, conclui-se que a força de colisão, a velocidade das partículas e o número de colisões estão diretamente relacionados com o rendimento da secagem.

REFERÊNCIAS

- BARBOZA, S. B. S. C.; TAVARES, E. D.; MELO, M. B. (1996), Instruções para o cultivo da acerola. Aracaju - SE: EMBRAPA.
- BHANDARI, B.R.; HARTEL, R.W. (2005), Phase transitions during food powder producton na powder stability. In: ONWULATA, C. Encapsulated and powdered foods. Boca Raton: Taylor e Francis, p.261-292.
- BURJAILI, M. M., (1996), Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes. Universidade Estadual de Campinas – Campinas – SP (tese de doutorado em Engenharia Química).
- CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. (2005), Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v. 6, p.420-428.
- COUTINHO, A.P.C. (2007), Produção e caracterização de maltodextrinas a partir de amidos de mandioca e batata-doce. Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade Estadual Paulista - Botucatu – SP, 151p. (tese de doutorado em Agronomia).
- DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. (2004). Comparison of Contact-Force Models for the Simulation of Drying Technology 11. Collisions in DEM-Based Granular Flow Codes. Chem. Eng. Sci. 59, 525–541.
- EMBRAPA (2012), A cultura da acerola, 3. ed. rev. e ampli., 144 p., Brasília, DF.
- FREIRE, J. T. et al. (2012), A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support

- Medium. Drying Technology, v. 30, n. 4, p. 330–341.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2017), Produção Agrícola Municipal.
- KROKIDA, M.; MARINOS-KOURIS, D.; MUJUMDAR, A. S. (2007), Rotary Drying. Em: MUJUMDAR, A. S., Handbook of Industrial Drying, Cap 7, p. 151-172, 3a Edição, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton-EUA.
- LISBOA, M. H. (2005), Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes., PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 121 p. (dissertação de mestrado).
- MOURA, B. D. (2016), Estudo da Dinâmica de Secagem em um Secador Rotatório com Alimentação Intermitente. PPGEQ/UFRN – Natal - RN, 123 p.
- NUNES, G. (2021), Estudo numérico da dinâmica de partículas em secador rotatório não-convencional e sua relação com a desidratação de polpa de acerola. PPGEQ/UFU – Uberlândia - MG, 102p. (dissertação de mestrado).
- PERAZZINI, M, T, B. (2015), Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos - São Carlos – SP, 115 p. (tese de doutorado em Engenharia Química).
- SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S. (2008), Fundamentals of Food Dehydration. Em: HUI, Y. H.; CLARY, C.; FARID, M. M.; FASINA, O. O.; NOOMHORM, A.; WELTI-CHANES, J. Food Drying Science and Technology, Cap. 1, p. 1-42, DEStech Publication, Inc, Lancaster-EUA.
- SANTOS, et al. (2021), Analysis of particles collisions in a newly designed rotating dryer and its impact on the Camu-Camu (*Myrciaria dubia*) pulp drying. Drying Technology, v. 40, n. 10, p. 2034-2045.
- SANTOS, R. L. (2020), Estudo da fluidodinâmica de inertes em secador rotatório não convencional e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG, 122p. (dissertação de mestrado).
- SOUSA, E. P. et al. (2017), Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 21, (7), p. 493-498.
- YANG, P.; CHEN, H.; WEN LIU, Y. (2017). Application of Response Surface Methodology and Desirability Approach to Investigate and Optimize the Jet Pump in a Thermoacoustic Stirling Heat Engine. Appl. Therm. Eng. 127, 1005–1014.