



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



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

Isabela Pereira Menezes

Uberlândia – MG

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



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

Isabela Pereira Menezes

Orientadores:

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M543
2023

Menezes, Isabela Pereira, 1998-
Influência da dinâmica de partículas inertes no
rendimento da secagem de polpa de acerola utilizando
secador rotatório não-convencional [recurso eletrônico]
/ Isabela Pereira Menezes. - 2023.

Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Coorientador: Claudio Roberto Duarte.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.81>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos Antonio de
Souza, 1961-, (Orient.). II. Duarte, Claudio Roberto,
1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-graduação em: | Engenharia Química | | | | |
| Defesa de: | Mestrado Acadêmico, 04/2023, PPGEQ | | | | |
| Data: | 9 de fevereiro de 2023 | Hora de início: | 08:30 | Hora de encerramento: | 10:26 |
| Matrícula do Discente: | 12122EQU004 | | | | |
| Nome do Discente: | Isabela Pereira Menezes | | | | |
| Título do Trabalho: | Influência da dinâmica de partículas inertes no rendimento da secagem de polpa de acerola utilizando secador rotatório não convencional | | | | |
| Área de concentração: | Desenvolvimento de Processos Químicos | | | | |
| Linha de pesquisa: | Processos de Separação | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório | | | | |
| ODS-ONU: | ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável e ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura | | | | |

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Jéssika Marina dos Santos - DEQ/UFSJ, Ricardo Amancio Malagoni - FEQUI/UFU, Cláudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, coorientador e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimeada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/02/2023, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jéssika Marina dos Santos, Usuário Externo**, em 09/02/2023, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/02/2023, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/02/2023, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4246598** e o código CRC **FA5DD07E**.

Dedico esse trabalho ao meus pais, Rodrigo e Renata, à minha irmã Mell, ao Lucas, meu namorado, e a todos os familiares e amigos que me apoiaram e me incentivaram nessa jornada.

“Buscai em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça e todas estas coisas vos serão dadas em acréscimo. Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã: o dia de amanhã terá as suas preocupações próprias. A cada dia basta o seu cuidado.”

Mt 6, 33-34

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da minha vida, por ser minha luz e meu sustento. À Nossa Senhora, por me proteger, guiar e iluminar os meus passos e minhas escolhas.

Agradeço imensamente aos meus pais, Rodrigo e Renata, pelo apoio, cuidado, carinho e por todo esforço para que mais essa etapa da minha vida fosse concluída.

À minha irmã, Mell, por ser minha confidente e por me apoiar sempre.

Ao Lucas, meu namorado, por todo incentivo, pela paciência e pelo companheirismo, mesmo com a distância se fazendo presente nessa fase da minha vida.

Aos meus familiares queridos, por todas as orações, pelas vibrações positivas e por torcerem pelo meu sucesso.

Aos meus amigos, pelas conversas e conselhos, sempre serei grata por todos os momentos juntos e por me apoiarem sempre, principalmente nessa fase desafiadora.

À Jéssika, por sempre me apoiar e por não medir esforços para me ajudar nos desafios da pós graduação.

Ao Prof. Dr. Rodolfo Brandão, por compartilhar conhecimentos essenciais a esse trabalho.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Marcos Barrozo e Prof. Dr. Claudio Duarte, por compartilharem tantos ensinamentos e experiências ao longo desse tempo.

Aos professores e colegas da FEQUI e do LSP pelo convívio e aprendizado.

Por fim, a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuem para meu crescimento pessoal e profissional, fazendo com que eu me torne a cada dia uma pessoa melhor.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS | iii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | iv |
| RESUMO | vi |
| ABSTRACT | viii |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 3 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 Acerola..... | 4 |
| 2.2 Processo de secagem | 6 |
| 2.3 Secagem de materiais pastosos..... | 7 |
| 2.4 Secagem de pastas com partículas inertes | 8 |
| 2.5 Temperatura de Transição Vítreas | 9 |
| 2.6 Aditivos de secagem..... | 10 |
| 2.7 Secadores rotatórios convencionais..... | 11 |
| 2.8 Secador rotatório com recheio de inertes | 13 |
| 2.8 Modelagem Lagrangeana de escoamento granular – Métodos dos Elementos Discretos (DEM)..... | 17 |
| CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS | 21 |
| 3.1 Polpa de acerola..... | 21 |
| 3.2 Análises físico-químicas..... | 22 |
| 3.2.1 Umidade | 22 |
| 3.2.2 Atividade de água | 22 |
| 3.2.3 Densidade | 23 |
| 3.2.4 Teor de cinzas..... | 23 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.5 pH | 23 |
| 3.2.6 FRX | 23 |
| 3.2.7 Separação magnética | 24 |
| 3.3 Secador Rotatório com Recheio de Inertes..... | 24 |
| 3.3.1 Unidade Experimental | 24 |
| 3.3.2 Partículas Inertes..... | 26 |
| 3.4 Ensaio de secagem | 27 |
| 3.5 Análise da dinâmica de colisões dos inertes no SRRI utilizando a abordagem do Método dos Elementos Discretos (DEM)..... | 30 |
| 3.6 Otimização das respostas utilizando a função desejabilidade | 32 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 34 |
| 4.1 Estudo numérico da dinâmica da colisão de partículas e a relação com o rendimento de secagem | 34 |
| 4.2 Caracterização da polpa de acerola | 38 |
| 4.3 Secagem da polpa de acerola em SRRI | 40 |
| 4.3.1 Rendimento de secagem | 45 |
| 4.3.2 Otimização..... | 51 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO..... | 56 |
| CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 58 |
| REFERÊNCIAS | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Acerola (<i>Malpighia emarginata</i> D.C.). | 4 |
| Figura 2 - Estruturas da acerola. | 5 |
| Figura 3 - Mecanismo de processo de secagem de pasta sobre superfície de partículas inertes. | 8 |
| Figura 4 - Secador rotatório convencional. | 11 |
| Figura 5 - Tipos comuns de suspensores em secadores rotatórios: (a) retos ou radiais; (b) ângulo reto; (c) angulares; (d) helicoidais. | 12 |
| Figura 6 - Secador rotatório com recheio de inertes. | 13 |
| Figura 7 - Distribuição das partículas inertes no interior do tambor rotatório. | 14 |
| Figura 8 - Polpa de acerola. | 21 |
| Figura 9 - Secador Rotatório com Recheio de Inertes - FEQUI/UFU. | 25 |
| Figura 10 - Tambor rotatório. | 26 |
| Figura 11 - Esferas de densidades e diâmetros diferentes. | 27 |
| Figura 12 - Número de colisões entre as partículas por segundo. | 35 |
| Figura 13 - Força normal média de colisão (N). | 36 |
| Figura 14 - Força normal de uma colisão (N). | 37 |
| Figura 15 - Velocidade média de partícula (m/s). | 37 |
| Figura 16 - Produto em pó obtido após a desidratação da polpa de acerola. | 40 |
| Figura 17 - Visão geral dos rendimentos obtidos na secagem. | 42 |
| Figura 18 - Comparação dos rendimentos dos 3 PCCs. | 43 |
| Figura 19 - Atividade de água para todos os experimentos. | 44 |
| Figura 20 - Umidade (%) para todos os experimentos. | 45 |
| Figura 21 - Valores dos rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais dos três planejamentos composto central. | 46 |
| Figura 22 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de aço inoxidável. | 49 |
| Figura 23 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de cerâmica. | 50 |
| Figura 24 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de polipropileno. | 50 |
| Figura 25 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de aço inoxidável na secagem de acerola em SRRI. | 52 |
| Figura 26 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de cerâmica na secagem de acerola em SRRI. | 52 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de polipropileno na secagem de acerola em SRRI..... | 53 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Linha do tempo do SRRI..... | 15 |
| Tabela 2 - Equações fundamentais do modelo não linear de Hertz-Mindlin. | 19 |
| Tabela 3 - Planejamento Composto Central..... | 30 |
| Tabela 4 - Parâmetros do modelo empregado na abordagem DEM..... | 31 |
| Tabela 5 - Frações de inertes analisadas para cada tipo de inerte. | 32 |
| Tabela 6 - Casos simulados no estudo numérico..... | 34 |
| Tabela 7 - Resultados das análises de caracterização da polpa de acerola..... | 38 |
| Tabela 8 - Valores de pH encontrados na literatura. | 39 |
| Tabela 9 - Composição da polpa e do pó de acerola em FRX..... | 39 |
| Tabela 10 - Resultados do rendimento da secagem da polpa de acerola dos experimentos dos PCC's realizados para cada tipo de inerte..... | 41 |
| Tabela 11 - Valores dos rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais dos três planejamentos composto central..... | 47 |
| Tabela 12 - Condições ótimas encontradas pela aplicação da função desejabilidade para maximização do rendimento na secagem de polpa de acerola em SRRI. | 53 |
| Tabela 13 - Comparação entre os rendimentos obtidos na condição otimizada e na maior condição do PCC para cada tipo de inerte..... | 54 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|---------------|-------------------------------------------------------------|--------------------|
| a | Aceleração | $M^0L^1T^{-2}$ |
| AW | Atividade de água | $M^0L^0T^0$ |
| E | Grau de enchimento | $M^0L^0T^0$ |
| E^* | Módulo de Young equivalente | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| E_i | Módulo de Young da partícula i | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| E_j | Módulo de Young da partícula j | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| $F_{c,n,ij}$ | Força de colisão entre as partículas i e j (normal) | $M^1L^1T^{-2}$ |
| $F_{c,t,ij}$ | Força de colisão entre as partículas i e j (tangencial) | $M^1L^1T^{-2}$ |
| F_n^d | Força de amortecimento na direção normal | $M^1L^1T^{-2}$ |
| F_t^d | Força de amortecimento na direção tangencial | $M^1L^1T^{-2}$ |
| $F_{t,max}^d$ | Força de amortecimento máxima na direção tangencial | $M^1L^1T^{-2}$ |
| FI | Fração entre inertes | $M^0L^0T^0$ |
| g | Gravidade | $M^0L^1T^{-2}$ |
| G^* | Módulo de cisalhamento equivalente | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| G_i | Módulo de cisalhamento da partícula i | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| G_j | Módulo de cisalhamento da partícula j | $M^1L^{-1}T^{-2}$ |
| I_i | Momento de inércia da partícula i | $M^1L^2T^0$ |
| $IC50$ | Índice de inibição | $\mu\text{g/mL}$ |
| m^* | Massa equivalente | $M^1L^0T^0$ |
| m_i | Massa da partícula i | $M^1L^0T^0$ |
| n_p | Número de partículas | $M^0L^0T^0$ |
| R^* | Raio de contato equivalente | $M^0L^1T^0$ |
| R_i | Raio da partícula i | $M^0L^1T^0$ |
| R_j | Raio da partícula j | $M^0L^1T^0$ |
| R | Velocidade de rotação | $M^0L^0T^{-1}$ |
| S_n | Rigidez normal do modelo não-linear | $M^1L^0T^{-2}$ |
| S_t | Rigidez tangencial do modelo não-linear | $M^1L^0T^{-2}$ |
| t | Tempo | $M^0L^0T^1$ |
| T | Temperatura | $^{\circ}\text{C}$ |
| v_i | Velocidade da partícula i | $M^0L^1T^{-1}$ |
| v_{rel}^n | Velocidade relativa na direção normal | $M^0L^1T^{-1}$ |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------|----------------|
| v_{rel}^t | Velocidade relativa na direção tangencial | $M^0L^1T^{-1}$ |
| x_i | Posição da partícula i | $M^1L^0T^0$ |

Símbolos gregos

| | | |
|---------------|---------------------------------------------------|----------------|
| β | Coefficiente de amortecimento | $M^1L^0T^{-1}$ |
| θ_i | Posição angular da partícula i | $M^0L^0T^0$ |
| δn | Sobreposição das partículas na direção normal | $M^0L^1T^0$ |
| δt | Sobreposição das partículas na direção tangencial | $M^0L^1T^0$ |
| ε | Coefficiente de restituição | $M^0L^0T^0$ |
| μ_s | Coefficiente de atrito estático | $M^0L^0T^0$ |
| μ_r | Coefficiente de atrito de rolamento | $M^0L^0T^0$ |
| ρ_S | Densidade da partícula | $M^1L^{-3}T^0$ |
| r_{ij} | Torque entre as partículas i e j | $M^1L^2T^2$ |
| ν_i | Razão de Poisson da partícula i | $M^0L^0T^0$ |
| ν_j | Razão de Poisson da partícula j | $M^0L^0T^0$ |
| ω_i | Velocidade angular da partícula i | $M^0L^1T^{-1}$ |

RESUMO

A acerola (*Malpighia emarginata D.C.*) 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. Devido à alta perecibilidade desse fruto, a secagem é uma alternativa simples e de baixo custo para a preservação, melhorando a forma de armazenamento e transporte, além de reduzir peso, volume e inibir a atividade microbiana. Sendo assim, o secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) apresenta-se como uma alternativa promissora para a produção de produtos desidratados em pó através de pastas de alimentos. Nesse equipamento, uma corrente de ar aquecida entra em contato com a polpa e com as partículas inertes no interior do tambor que, durante a sua rotação, promove as colisões partícula-partícula e partícula-parede. Através dos fenômenos de transferência de calor e massa, ocorre a formação do pó, que é coletado por um ciclone. Diante do apresentado, esse trabalho teve como objetivo investigar a secagem de polpa de acerola utilizando um secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) experimentalmente visando a obtenção de um produto desidratado em pó, além de avaliar como partículas inertes de diferentes densidades influenciam no rendimento da secagem. O estudo numérico foi realizado através de simulações usando a abordagem numérica Lagrangeana (Método dos Elementos Discretos – DEM), cuja lei de contato permitiu obter informações sobre como ocorrem as interações partícula-partícula e partícula-parede do tambor. Para cada tipo de partícula inerte (aço inoxidável, cerâmica e polipropileno) de dois tamanhos diferentes (25,40 mm de diâmetro e 12,70 mm de diâmetro), foram realizadas 5 simulações variando a fração de inertes menores (FI), totalizando 15 simulações, com intuito de avaliar a força normal de colisão, a velocidade de colisão e o número de colisões. Foram fixados os parâmetros de grau de enchimento 35% e velocidade de rotação em 70 rpm. Foi possível analisar que, com o aumento da fração de inertes menores, o número de colisões entre as partículas por segundo também aumentou, o que é favorável ao processo de secagem. Na condição com a menor porcentagem de FI, a força de colisão para as esferas de aço inoxidável foi 424,77% maior do que as de cerâmica e 1209,27% maior do que as de polipropileno. As propriedades das esferas inertes também tiveram influência na velocidade de partículas. A velocidade das esferas de aço inoxidável foi 10,79% maior quando comparadas com as de cerâmica e 66,40% maior quando comparadas com as de polipropileno no caso em que foram obtidos os maiores valores de velocidade. Em relação ao estudo experimental, foi realizada primeiramente a caracterização da polpa de acerola, com

análise de umidade, atividade de água, pH, densidade, teor de cinzas e análise de composição no FRX. Foram realizados três PCC's (um para cada tipo de partícula inerte) a fim de avaliar o efeito da concentração de maltodextrina, fração de inertes menores e temperatura no rendimento da secagem. Cada PCC contou com 16 experimentos, totalizando 48 experimentos. Para todas as condições analisadas, a umidade máxima do produto obtido foi de 3,2% e a maior atividade de água foi de 0,193, garantindo a inibição da atividade microbiana. Com relação ao rendimento de secagem, os maiores resultados foram obtidos utilizando partículas inertes de aço inoxidável, seguidos das de cerâmica e de polipropileno. Os maiores valores de concentração de maltodextrina, fração de inertes e temperatura geraram um maior rendimento da secagem. A otimização realizada resultou em uma concentração de 21,72% de maltodextrina, 75,03% de fração de inertes menores e 95,74°C, com uma desejabilidade de 1,0 (maior valor possível). Para os experimentos realizados nessas condições, obteve-se o rendimento de 82,73% para aço inoxidável, 67,15% para cerâmica e 53,91% para polipropileno. Sendo assim, conclui-se que o SRRI apresentou uma boa eficiência para a desidratação da polpa de acerola e é promissor para novos estudos e para a aplicação industrial.

Palavras-chave: Secador Rotatório com Recheio de Inertes; Abordagem Lagrangeana; *Malpighia emarginata* D.C.; Planejamento Composto Central; Otimização.

ABSTRACT

Acerola (*Malpighia emarginata D.C.*) is a tropical fruit originating in the Antilles and Brazil is the largest producer in the world. For owning high levels of vitamin C and other bioactive compounds, acerola has become popular, being known for its antioxidant capacity. Due to the high perishability of this fruit, drying is a simple and low-cost alternative for preservation, improving storage and transportation, in addition to reducing weight, volume and inhibiting microbial activity. Therefore, the rotary dryer with inert filling (SRRI) presents itself as a promising alternative for the production of powdered dehydrated products from food pastes. In this equipment, a current of heated air comes into contact with the pulp and the inert particles inside the drum which, during its rotation, promote particle-particle and particle-drum wall collisions. Through the phenomena of heat and mass transfer, the formation of powder occurs, which is collected by a cyclone. In view of the above, this work aimed to investigate the drying of acerola pulp using a rotary dryer with inert filling (SRRI) experimentally in order to obtain a powdered dehydrated product, in addition to evaluate how inert particles of different densities influence the drying performance. The numerical study was carried out through simulations using the Lagrangian numerical approach (Discrete Element Method – DEM), whose contact law allowed obtaining information about how particle-particle and particle-drum wall interactions occur. For each type of inert particle (stainless steel, ceramic and polypropylene) of two different sizes (25.40 mm in diameter and 12.70 mm in diameter), 5 simulations were performed varying the fraction of minor inerts (FI), totaling 15 simulations, in order to evaluate the normal collision force, the collision velocity and the number of collisions. The filling degree parameters were fixed at 35% and rotation speed at 70 rpm. It was possible to analyze that, with the increase in the revenue of smaller aggregates, the number off collisions between particles per second also increased, which is favorable to the drying process. In the condition with the lowest percentage of FI, the collision force for stainless steel spheres was 424.77% greater than ceramic spheres and 1209.27% greater than polypropylene spheres. The properties of the inert spheres also had influence on the particle velocity. The speed of the stainless steel spheres was 10.79% higher when compared with the ceramic ones and 66.40% higher when compared with the polypropylene ones in the case in which the highest values of speed were obtained. Regarding the experimental study, the characterization of the acerola pulp was first carried out, with analysis of moisture, water activity, pH, density, ash content and composition analysis in FRX. Three PCC's were carried out (one for each type of inert particle) in order to evaluate the

effect of maltodextrin concentration, minor inert fraction and temperature on the drying yield. Each PCC had 16 experiments, totaling 48 experiments. For all analyzed conditions, the maximum moisture of the product obtained was 3.2% and the highest water activity was 0.193, guaranteeing the inhibition of microbial activity. With regard to drying performance, the best results were obtained using inert stainless steel particles, followed by ceramic and polypropylene particles. The highest values of maltodextrin concentration, inert fraction and temperature generated a higher drying yield. The optimization performed resulted in a concentration of 21.72% of maltodextrin, 75.03% of minor inert fraction and 95.74°C, with a desirability of 1.0 (highest possible value). For the experiments carried out under these conditions, yields of 82,73% were obtained for stainless steel, 67,15% for ceramics and 53,91% for polypropylene. Therefore, it is concluded that the SRRI showed good efficiency for the dehydration of acerola pulp and is promising for further studies and for industrial application.

Keywords: Rotary Dryer with Inert Bed; Lagrangian Approach; *Malphigia emarginata D.C.*; Central Composite Planning; Optimization.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A acerola é uma fruta do gênero *Malpighia* pertencente à família Malpighiaceae. Essa família botânica inclui 75 gêneros e em torno de 1.300 espécies. A aceroleira é uma planta frutífera da região do Norte da América do Sul e Central (Antilhas) e começou a ser muito cultivada em Porto Rico, Cuba, Estados Unidos e, principalmente, no Brasil, que é o principal produtor. Por possuir grande capacidade de aproveitamento industrial e ótimas qualidades nutricionais, como proteínas, cálcio, fósforo, ferro e vitaminas A, B1 e, principalmente, vitamina C, com conteúdo maior que aqueles presentes na laranja e o limão, a acerola passou a ser vista como um grande potencial nutritivo e econômico. A boa aceitação, nacional e internacionalmente, tanto da fruta *in natura* quanto dos seus derivados é um incentivo para a produção e estudos envolvendo a acerola (LIMA, 2014; SANTOS & LIMA, 2020).

A acerola pode também ser encontrada em forma de polpa, contendo em sua composição apenas acerola e água. Essa polpa é considerada um alimento perecível e muito propício para a proliferação de vários micro-organismos, como bactérias, leveduras e fungos. Além disso, a polpa também está sujeita a reações enzimáticas e químicas que são indesejadas. Para evitar a degradação da polpa, é recomendado que ela seja submetida a algum tipo processo, como a secagem, que consiga preservar suas características e prolongar a sua conservação (CELESTINO, 2010, NUNES, 2021).

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. Comparada a outros métodos de preservação de alimentos, a secagem é mais simples e possui menor custo, sendo amplamente utilizada. O produto em pó possui um aumento significativo do tempo de prateleira, além de ser prático e de fácil acesso para o consumo no cotidiano (MOURA, 2016; SANTOS, 2020).

Os materiais pastosos possuem particularidades quando submetidos a processos térmicos, como a secagem, pois podem sofrer modificações nas estruturas reológicas. Logo, o processamento dessas polpas pode ser realizado principalmente em leito de jorro, tambor rotatório, ambos com a presença de inertes e, por fim, o *spray dryer* (DANTAS *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019; SANTOS, 2020).

Nos processos de secagem de materiais pastosos, as partículas inertes são comumente utilizadas para aumentar a superfície de contato e intensificar as transferências de calor e massa. Essas partículas são utilizadas como uma alternativa para a produção de produtos desidratados em pó e já são utilizados no leito de jorro, por exemplo (FREIRE *et al.*, 2012; NUNES, 2021).

Entre os diferentes equipamentos para secagem de materiais pastosos, o secador rotatório com recheio de inertes (SSRI) tem tido resultados bastante promissores. Esse secador é formado por um cilindro horizontal com suspensores longitudinais e partículas de inerte em seu interior. Nesse secador, a alimentação é concorrente com o gás e a pasta alimentada recobre as partículas inertes em uma fina camada, expondo ao fluido de secagem. A secagem ocorre tanto por convecção quanto por condução e ocorre uma economia energética considerável quando comparado ao leito de jorro e ao leito fluidizado, pois o fluido de secagem possui função exclusiva de promover a secagem e o transporte do produto desidratado (BURJAILI, 1996).

Sendo assim, é possível perceber como o secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) é uma alternativa promissora para a produção de produtos desidratados em pó através de pastas de alimentos. Para obter um produto de qualidade, é necessário que sejam avaliadas as condições de operação do secador e como as variáveis do processo influenciam no rendimento da secagem. Uma alternativa que pode contribuir para o melhor entendimento da dinâmica dos inertes nesse tipo de estudo é a simulação numérica.

Os experimentos foram realizados seguindo um Planejamento Composto Central com intuito de avaliar o efeito das variáveis independentes maltodextrina (%), fração de inertes menores (%) e temperatura (°C) no rendimento do processo de secagem da polpa de acerola em SRRI e obtenção do produto desidratado em pó. Além disso, foi avaliado experimentalmente o efeito de diferentes densidades das partículas inertes no interior do secador, utilizando partículas de aço inoxidável, cerâmica e polipropileno.

As simulações computacionais podem ser utilizadas para avaliar as melhores faixas operacionais sem as limitações impostas aos estudos experimentais. No presente trabalho, foi aplicada a abordagem Lagrangeana utilizando o Métodos dos Elementos Discretos (DEM), que permite através do balanço de forças, determinar a trajetória de cada partícula, possibilitando uma análise da interação entre as partículas e entre as partículas e o tambor, o número de colisões, a força de colisão e a velocidade de colisão. Todas essas informações contribuíram para um melhor entendimento da dinâmica do processo da formação do pó.

Diante dos aspectos apresentados, seguem os objetivos do trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho foi investigar experimentalmente a secagem de polpa de acerola utilizando um secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) visando a obtenção de um produto desidratado em pó. Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- Avaliar experimentalmente os efeitos das propriedades dos inertes (densidade e tamanho) sobre o rendimento do processo;
- Identificar as condições que maximizam o rendimento para a melhor produção de material desidratado;
- Verificar a influência de diferentes densidades e tamanhos dos inertes através de simulações DEM e suas relações no rendimento da secagem, através de número de colisões, força de colisão e velocidade de colisão.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a acerola, o processo de secagem, o uso de partículas inertes na secagem de pastas e conceito de temperatura de transição vítrea. Além disso, foi apresentada a importância dos aditivos de secagem, as vantagens e limitações do secador rotatório convencional e o secador rotatório com recheio de inertes. Por fim, foram expostos alguns conceitos e equacionamentos sobre a abordagem Lagrangeana (Método dos Elementos Discretos) utilizada no estudo numérico desse trabalho.

2.1 Acerola

A acerola (*Malpighia emarginata D.C.*) é uma fruta que se originou nas Antilhas, no norte da América do sul e na América Central e se dispersou para diversas regiões do mundo, principalmente em regiões de climas tropicais e subtropicais da América. Também conhecida como “a cereja das Antilhas” (Figura 1), essa fruta causou interesse devido aos seus elevados teores de vitamina C e sua grande capacidade de aproveitamento industrial (DINIZ, 2020; MARANHÃO, 2010).

Figura 1- Acerola (*Malpighia emarginata D.C.*).



Fonte: Diário do Nordeste (2022).

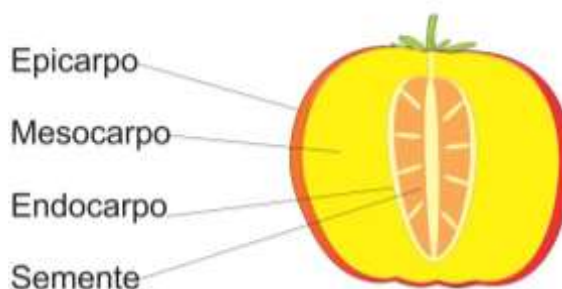
No Brasil, essa árvore frutífera começou a ser introduzida nos anos 50, mas só ganhou expressão econômica a partir dos anos 90, com o aumento dos plantios e difusão em

praticamente todo o território nacional, exceto em regiões de baixas temperaturas e de clima subtropical (COUTO & FERREIRA, 2012).

As árvores aceroleiras são angiospermas dicotiledôneas de pequeno a médio porte (variando entre 1,3 a 3,2 m de altura) de um único tronco e é frequentemente ramificado. As sementes são pequenas e possuem baixa porcentagem de germinação, pois dos três óvulos existentes, apenas um ou dois se desenvolvem devido a vários fatores, como por exemplo a má formação do óvulo ou a falta de fertilização do mesmo (MANICA *et al.*, 2003; COSTA *et al.*, 2003).

O fruto da acerola é uma drupa carnosa que pode variar de forma, peso e tamanho e é formada pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo (Figura 2). A casca externa é chamada de epicarpo e é formada por uma película fina. O mesocarpo é a polpa em si. Já o endocarpo é constituído por três caroços unidos que conferem à acerola o aspecto trilobado. Cada caroço no interior da acerola contém em média de 3 a 5 mm de comprimento e possui forma ovóide (ALMEIDA *et al.*, 2002).

Figura 2 - Estruturas da acerola.



Fonte: CEAGESP (2021).

A tonalidade da acerola se altera com a sua maturação, passando do verde ao amarelo, laranja, vermelho e até roxo. Isso ocorre devido à degradação da clorofila e da síntese de antocianinas e carotenoides. Estudos já catalogaram 18 genótipos de aceroleira, em que a coloração variava de amarelo a vermelho escuro. Quanto mais vermelha e madura for a acerola, maior a presença das antocianinas e maior é a aceitação do consumidor (FREITAS *et al.*, 2006).

Algumas variedades de acerola possuem até 5.000 mg por 100 g de polpa de vitamina C, o que corresponde a aproximadamente 100 vezes mais do que encontrado em uma laranja, ou até 10 vezes mais do que encontrado na goiaba, que são frutas conhecidas por possuir elevados teores de vitamina C (DINIZ, 2020).

2.2 Processo de secagem

Secagem é definida como uma operação de transferência simultânea de calor e massa com objetivo de remover água ou substâncias voláteis de um material. Existem diferentes formas de se realizar uma secagem, seja ela por liofilização, atomização, em estufa, leito de jorro ou em janela de refractância (BERK, 2018).

A secagem pode ocorrer por condução, convecção e radiação e esses três mecanismos são responsáveis pela transferência de energia. A condução ocorre por difusão de calor, através da vibração de moléculas e se propaga necessariamente em sólidos ou em fluidos estacionários. A convecção se dá em fluidos em movimento a partir das forças de empuxo e por diferenças de densidade, podendo ser natural ou forçada. Por fim, a radiação não precisa de um meio físico para se propagar, transcorrendo-se por ondas eletromagnéticas (CHEN, 2008; SABLANI & RAHMAN, 2008).

Em um processo de secagem, é de suma importância o controle e a análise de variáveis importantes, como a temperatura, umidade e fluxo do ar, área superficial exposta à troca térmica, pressão, características específicas do material a ser seco e o teor de umidade desse material. Essas variáveis são fundamentais no controle da eficiência da secagem (MUJUMDAR, 2006).

A importância da secagem 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. Comparada a outros métodos, a secagem é mais simples e possui menor custo, sendo amplamente utilizada (MOURA, 2006; SANTOS, 2020).

A atividade de água é uma propriedade de equilíbrio de um sistema de qualquer estado físico que possua água e que quantifica a parcela de água disponível energeticamente para o crescimento microbiológico. Além disso, quantifica as interações de hidratação e reações químicas, como a de oxidação e é definida como a razão entre a pressão de vapor d'água no alimento e a pressão de vapor saturado da água pura em uma mesma temperatura (BHANDARI & ADHIKARI, 2008; CHEN & PATEL, 2008; FELLOWS, 2006).

Vários processos químicos podem afetar na garantia de um produto final desidratado de qualidade, como o escurecimento, oxidação, perda de cor e de aroma. 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).

2.3 Secagem de materiais pastosos

Denomina-se material pastoso como um sistema sólido-líquido constituído de partículas dispersas em um meio líquido, geralmente tendo como base a água. As pastas podem ser classificadas de acordo com o constituinte da sua fase dispersa, sendo um grupo disperso não ligado e um grupo disperso ligado. No primeiro grupo, a fase dispersa possui movimento livre em relação à fase dispersante, como as emulsões, soluções e suspensões com fase dispersa fina. Já o segundo grupo, a fase dispersa não possui movimento livre em relação à fase dispersante, o que ocorre com os precipitados, tortas de filtração e suspensões com fase dispersa grosseira (PASSOS *et al.*, 1997; STRUMILLO *et al.*, 1983; VIEIRA, 2015).

Os materiais pastosos possuem propriedades que variam com a concentração de sólidos, tamanho, forma de partículas e podem sofrer alterações em suas propriedades quando submetidos ao processo de secagem, sendo essencial a escolha do processo. Essa escolha é baseada no teor de umidade inicial e nas características físicas e reológicas da pasta. As possíveis modificações podem causar aderência da pasta nas paredes do equipamento e formação de aglomerados, aumentando o tempo do processo (BURJAILI, 1996).

O conhecimento adequado da reologia do material é importante para a escolha do projeto de sistema de alimentação, da distribuição do material no interior do secador e da definição das melhores condições do processo. O comportamento reológico se aproxima do newtoniano quando o conteúdo de umidade da pasta é elevado. Para valores baixos de umidade, o comportamento tende ao não-newtoniano (GRBAVCIC *et al.*, 2004).

As pastas de alimentos tendem a se comportar como corpos coloidais porosos-capilares durante a secagem. Esse processamento térmico causa uma transformação dos corpos de um estado elastoplástico a um estado elastoquebradiço através da remoção de umidade. A natureza de ligação da umidade com o material pode ser capilar, osmótica, química ou adsortiva e influencia na transformação dos corpos coloidais (STRUMILLO *et al.*, 1983).

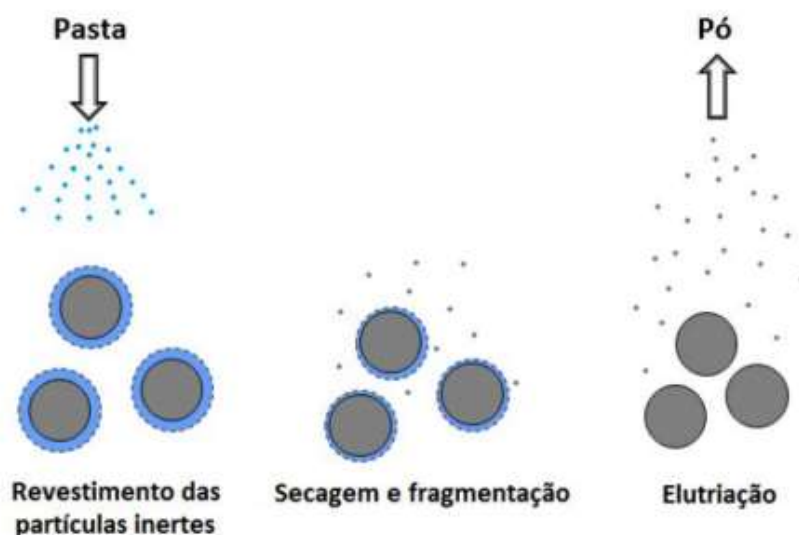
As propriedades físicas, químicas, organolépticas e nutricionais do produto em pó devem ser conservadas quando comparadas à polpa in natura, para garantir a satisfação do mercado (ALMEIDA, 2009).

2.4 Secagem de pastas com partículas inertes

O processo da secagem com partículas de inertes inicia-se com a alimentação da pasta (material úmido), que entra em contato com as partículas inertes imediatamente 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 atinge-se 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 (SOUSA, 2017). As etapas descritas podem ser visualmente observadas na Figura 3.

Figura 3 - Mecanismo de processo de secagem de pasta sobre superfície de partículas inertes.



Fonte: PERAZZINI (2015).

A secagem com partículas inertes geralmente é realizada em leito de jorro, leito fluidizado, leito vibratório, entre outros. 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 (FREIRE *et al.*, 2012).

Materiais fibrosos e gorduras podem aderir às paredes dos inertes e acumular dentro do secador, causando uma redução na eficiência do processo. Para que isso não ocorra, a pasta aderida ao inerte não deve apresentar características elásticas em nenhuma etapa do processo.

Caso contrário, as forças de colisão podem não ser suficientes para romper a polpa quando suficientemente seca (MUJUMDAR, 2006).

A secagem de pastas geralmente é realizada a uma taxa constante e, diferentemente da secagem de sólidos granulares, possui como etapa limitante a evaporação, uma vez que a pasta possui alta umidade e forma uma fina camada na superfície dos inertes, minimizando a etapa de difusão. A dinâmica das partículas começa a influenciar à medida que a umidade diminui, principalmente na etapa de quebra de camada de material seco. Para evitar a aglomeração de material no interior do secador e na superfície dos inertes, a taxa de secagem, o número de colisões entre as partículas inertes e a força dessas colisões devem ser suficientemente altos, para que a taxa de recobrimento não exceda a taxa de remoção do filme (BARRET & FANE, 1989).

Do ponto de vista prático e no contexto de secagem com partículas inertes, a escolha das partículas adequadas ainda é regida pelo conhecimento empírico. De acordo com Freire *et al.* (2012), várias pesquisas nesse âmbito optaram pela utilização de partículas de vidro ou poliméricas, como teflon, polietileno e polipropileno. A rugosidade e o tamanho das partículas são aspectos que afetam o processo da secagem, pois a adesão e o desprendimento da pasta sobre os inertes governam a cinética de secagem.

2.5 Temperatura de Transição Vítrea

Durante a secagem, alguns fatores podem influenciar negativamente no rendimento final do processo ou na estocagem no produto final em pó, como a compactação e pegajosidade. Isso ocorre quando as partículas do material apresentam alta coesão e se aderem às partes internas do secador, também gerando problemas operacionais e dificuldade de manipulação do produto em forma de pó. Quando se trata de produtos termossensíveis, a pasta pode se degradar e adquirir características sensoriais indesejáveis devido ao superaquecimento (BHANDARI, 2005).

Esses fenômenos ocorrem geralmente em pastas que possuem em sua composição uma grande quantidade de substâncias amorfas, ou seja, desorganizadas. A secagem, influenciada pelas condições de processo e pelas características do alimento, pode ser rápida o suficiente para impedir que esses compostos se cristalizem, mesmo em estado amorfo, região onde a atividade da água e umidade são mais altas e a aderência entre as partículas ocorre mais facilmente (SILVA, 2019).

Sendo assim, a temperatura de transição vítrea (Tg) representa a temperatura crítica acima da qual o material estará nesse estado desorganizado. Nessas circunstâncias, a mobilidade é muito limitada e pode ocorrer compactação e pegajosidade dos produtos (BHANDARI & HOWES, 1999; COLLARES, 2001; ROOS, 2010).

Os alimentos ricos em ácidos orgânicos (cítrico, málico e tartárico) e em açúcares de baixo peso molecular (como a frutose, glicose e sacarose) são mais propícios ao comportamento instável descrito, como por exemplo as polpas de frutas. Esses compostos são propícios a aglomeração e pegajosidade, pois são altamente higroscópicos e possuem baixa Tg. Para ser eficiente, a secagem deve ser realizada a baixas temperaturas, o que dificulta o processo (CANO-CHAUCA *et al.*, 2005).

2.6 Aditivos de secagem

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 Tg e protegendo os compostos bioativos termossensíveis (CANO-CHAUCA *et al.*, 2005. JAYASUNDERA *et al.*, 2011).

Os agentes carreadores podem ser carboidratos (amidos, sacaroses, xaropes de milho, maltodextrina, dextranas e ciclodextranas), celuloses (metilcelulose e carboximetilcelulose), gomas (carragena, goma acácia e agar) ou proteínas (gelatinas, albuminas, glúten e peptídeos). Dentre todos esses apresentados, os aditivos a base de amido hidrolisado têm sido amplamente utilizados para obtenção de produtos em pó, por possuírem sabor neutro, serem facilmente digeríveis e possuírem ausência de odor (JULIANO & BARBOSA-CÁNOVAS, 2010).

A maltodextrina e a goma arábica são os aditivos mais comuns na secagem de polpas de frutas, dando origem a pós com baixo teor de umidade e de atividade de água, além de uma maior solubilidade e menor higroscopicidade. Além disso, possuem outras vantagens, como baixo custo, alta disponibilidade e ausência de sabor (TONON *et al.*, 2009).

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 (LOPEZ, 2004). 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%. A dextrose equivalente (DE) é uma medida que indica uma média do peso molecular e é

uma medida que caracteriza a extensão da hidrólise do amido. Conforme o grau de hidrólise aumenta, a média do peso molecular diminui e a DE aumenta. As maltodextrinas podem ser obtidas de amidos de diferentes fontes botânicas e constituem-se em produtos da hidrólise parcial do amido com valores de dextrose equivalente (DE) menor que 20 (COUTINHO, 2007).

2.7 Secadores rotatórios convencionais

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).

Por possuir essa configuração, o secador rotatório (Figura 4) oferece uma ampla superfície de contato do material úmido com o gás, resultando em um produto desidratado uniforme e com altas taxas de secagem (MOURA, 2009).

Figura 4 - Secador rotatório convencional.



Fonte: CARDALL, 2017.

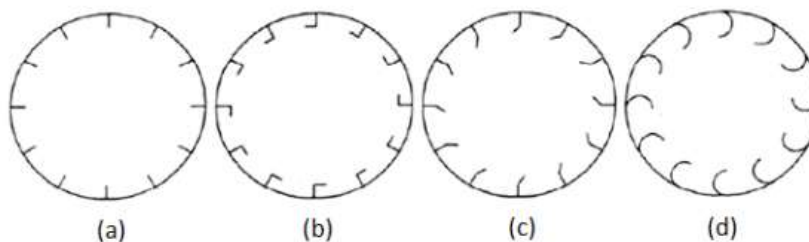
Dentro do secador rotatório, ocorrem três fenômenos simultâneos: transporte do material úmido, troca de calor entre o material e o gás aquecido e transferência de vapor de água do material para a corrente gasosa (MANI & SOKHANSANJ, 2008). Os secadores rotatórios podem ser classificados em aquecimento direto ou indireto, dependendo de como ocorre o contato gás-sólido. Nos secadores rotatórios com aquecimento indireto, o material de

interesse se encontra no interior de um invólucro, que é aquecido externamente por gases quentes que não entram em contato direto com o material. Esse tipo de aquecimento é recomendado para processos com temperaturas superiores a 200°C, quando o sólido granular não pode ser exposto diretamente à corrente gasosa, além de ser utilizado na recuperação de solventes em reações químicas (KROKIDA *et al.*, 2007; MANI & SOKHANSANJ, 2008).

Já nos secadores com aquecimento direto, o ar quente troca calor direto com o material a ser seco, atravessando o interior do secador. Eles são mais utilizados por serem mais econômicos e simples e são subdivididos em fluxo concorrente ou contracorrente. O fluxo concorrente é amplamente utilizado para a secagem de materiais termossensíveis e pegajosos, já que a evaporação da água previne o superaquecimento. O fluxo contracorrente possui grande aplicação nas indústrias de álcool e fertilizantes e origina um produto com baixa umidade final, pois o material já seco é exposto ao gás mais quente (MANI & SOKHANSANJ, 2008).

No interior dos secadores rotatório, é muito comum a presença de arranjos e suspensores, que têm a função de melhorar a movimentação do material sólido e aumentam a superfície de contato com o gás aquecido (Figura 5).

Figura 5 - Tipos comuns de suspensores em secadores rotatórios: (a) retos ou radiais; (b) ângulo reto; (c) angulares; (d) helicoidais.



Fonte: SILVA (2019).

Com a rotação do secador, os sólidos são recolhidos pelos suspensores, levados até a parte mais alta do secador e caem livremente pelo ar. Como os sólidos entram em contato com o gás quente, a maior parte da secagem ocorre nesse momento. Além disso, os suspensores também realizam a função de transportar os sólidos no equipamento (HONORATO, 2006; SILVA, 2019).

O desempenho do secador rotatório está diretamente relacionado com o número de suspensores, a dimensão e a forma combinados com o tipo de material a ser seco. Os

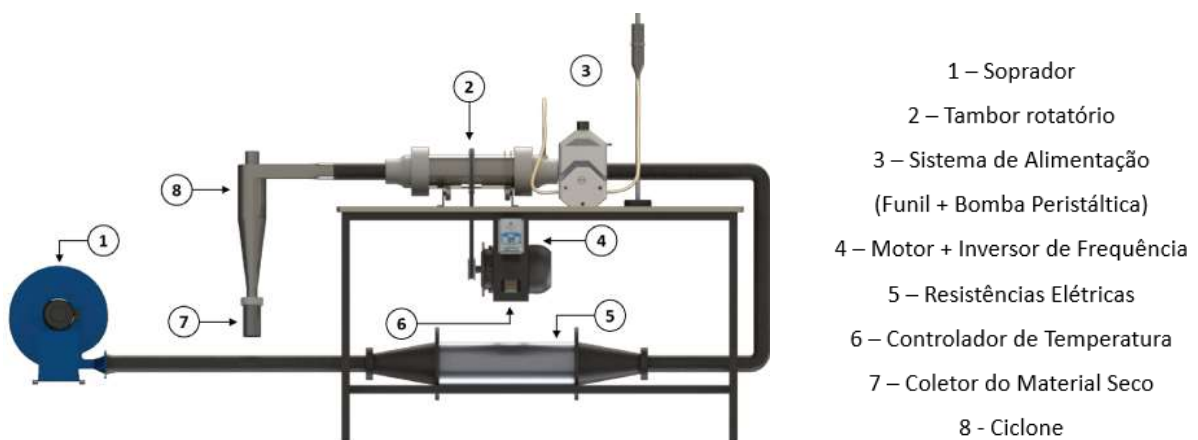
suspensores angulares e helicoidais são indicados para materiais menos aderentes e de fácil movimentação, ao contrário dos suspensores retos, que são recomendados para materiais pegajosos que tendem a aderir nas estruturas internas do secador (KROKIDA *et al.*, 2007; LISBOA, 2005).

Devido ao bom potencial dos secadores rotatórios, e ao fato de que ele é exclusivamente usado para materiais granulares, novas pesquisas foram desenvolvidas para melhorar as características desse equipamento e para permitir a secagem de outros tipos de materiais, como de materiais pastosos e pegajosos. Esses materiais possuem dificuldade de escoamento e geram acúmulo nas paredes do equipamento (HONORATO, 2006).

2.8 Secador rotatório com recheio de inertes

O secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) (Figura 6) foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia Química da UFU (FEQ/UFU) em pesquisa liderada pelo Prof. José R.D. Finzer no final da década de 1980. Ele 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 através do ar de secagem. Nesse secador, a alimentação é concorrente com o gás e a pasta alimentada recobre as partículas inertes em uma fina camada, expondo ao fluido de secagem (BURJAILI, 1996).

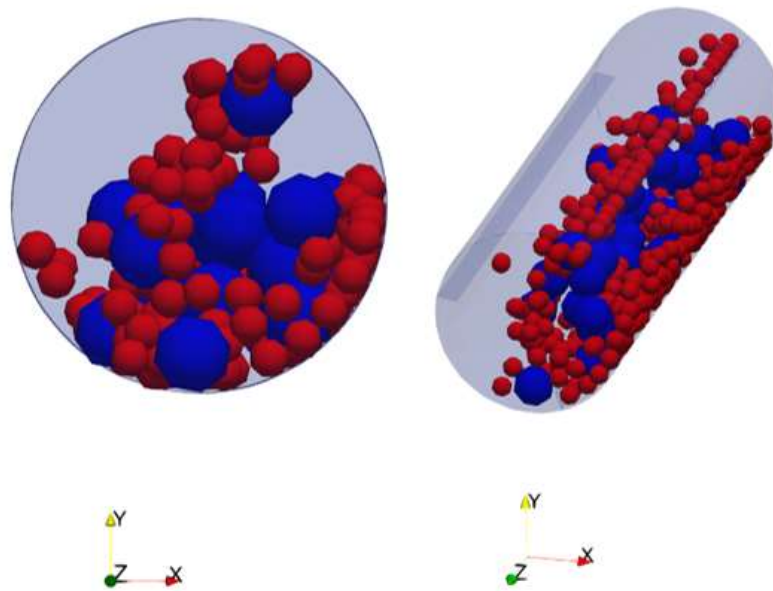
Figura 6 - Secador rotatório com recheio de inertes.



Fonte: Adaptado de Santos (2020).

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 consiste em duas etapas: a cinética de secagem e a cinética de 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 das partículas inertes no desempenho do secador (SANTOS, 2020). Na Figura 7 está representada a distribuição das partículas inertes no interior do tambor rotatório com três suspensores.

Figura 7 - Distribuição das partículas inertes no interior do tambor rotatório.



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

O SRRI tem sido utilizado em trabalhos da literatura aplicados a secagem de materiais pastosos com objetivo de obter um produto em pó que preserve sua qualidade. Na Tabela 1, está representada uma linha do tempo do SRRI desde a idealização e desenvolvimento na FEQUI/UFU, em 1987, até atualmente, com os autores, o ano de publicação e o tema estudado. A primeira fase do SRRI consiste no período entre a sua fundação, em 1987, até 2016, com trabalhos realizados na UFU e na UFRN. Já a segunda fase do SRRI iniciou-se em 2019 e segue até os dias atuais, com um equipamento mais compacto e eficiente.

Tabela 1 - Linha do tempo do SRRI.

| Ano | Tema | Autor |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1987 | Desenvolvimento de uma nova tecnologia | FINZER, BURJAILI, LIMAVERDE - UFU |
| 1988 | Depósito da patente do equipamento | BURJAILI <i>et al.</i> |
| 1990 | Secagem do melaço de cana-de-açúcar utilizando SRRI | ÁLVARES |
| 1994 | Registro da patente conferido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial | BURJAILI <i>et al.</i> |
| 1996 | Secagem da pasta de levedura termolisada utilizando um SRRI | BURJAILI |
| 2000 | Secagem do melaço de cana-de-açúcar e de melaço com aditivo no SRRI | LIMAVERDE JR |
| 2003 | Produção de farinha de banana em SRRI | PADILLA |
| 2006 | Secagem de cefalotórax de camarão em SRRI utilizando esferas inertes de tecnil | HONORATO |
| 2009 | Secagem de resíduos de maracujá em SRRI – automação e sistema de aquisição de dados | MOURA |
| 2016 | Secagem de resíduos de maracujá em SRRI – análise da alimentação e temperatura | MOURA |
| 2019 | Estudo no SRRI para quantificar o efeito de diferentes variáveis operacionais na secagem da microalga <i>spirulina platensis</i> | SILVA (FEQUI/UFU) |
| 2020 | Estudo da fluidodinâmica de inertes em SRRI e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu | SANTOS (FEQUI/UFU) |
| 2021 | Estudo numérico da dinâmica de partículas em SRRI e sua relação com a desidratação de polpa de acerola | NUNES (FEQUI/UFU) |

Moura (2009 e 2016), utilizando o mesmo secador que Honorato (2006), realizou a secagem de resíduos de processamento de maracujá. Em 2009, foi realizada uma automação do sistema de aquisição de dados com intuito de melhorar o monitoramento das variáveis do processo: temperatura e umidade do ar de entrada e saída, rotação do tambor e massa de pó produzida. Em 2016, o foco do trabalho da autora foi analisar os efeitos da intermitência na alimentação e temperatura do ar, além da análise dinâmica através de modelagem matemática.

Silva (2019) realizou um estudo no secador rotatório com recheio de inertes para quantificar o efeito de diferentes variáveis operacionais na secagem da microalga *spirulina platensis*. Foi realizada uma análise do efeito da temperatura do ar de secagem, taxa de alimentação da pasta, velocidade de rotação e grau de enchimento das partículas inertes utilizando um planejamento de composto central. O grau de enchimento e a velocidade de reação foram as variáveis que apresentaram maior efeito no rendimento do ensaio de secagem realizado. A partir das simulações realizadas pelo método dos elementos discretos (DEM), relacionou-se o rendimento medido experimentalmente com o número de colisões ao longo do processo avaliado pelas simulações realizadas.

Santos (2020) realizou um estudo da fluidodinâmica de inertes em secador rotatório não-convencional e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu. O autor realizou um estudo experimental e numérico dos efeitos de variáveis operacionais de um SRRI no sistema de secagem de polpa em termos de rendimento, teor de bioativos e atividade antioxidante do produto. Os experimentos foram realizados usando esferas de porcelana de calcita como partículas inertes e a maltodextrina como agente carreador. O maior rendimento obtido foi utilizando uma combinação de partículas inertes de diferentes tamanhos.

Nunes (2021) realizou o estudo numérico da dinâmica de partículas em secador rotatório não-convencional e sua relação com a desidratação de polpa de acerola. Nesse estudo, foi feita uma análise experimental de diferentes variáveis operacionais analisando o desempenho do SRRI, além de simulações por meio do método dos elementos discretos (DEM), que forneceram conclusões sobre altura e tipo dos suspensores, velocidade de rotação e grau de enchimento do tambor.

2.8 Modelagem Lagrangeana de escoamento granular – Métodos dos Elementos Discretos (DEM)

Cundall e Strack, em 1979, propuseram um estudo do comportamento mecânico de materiais granulares durante a fratura de rochas, ficando conhecido como o método dos elementos discretos (DEM). Esse método vem sendo amplamente utilizado nas pesquisas envolvendo os sistemas particulados (BRANDÃO, 2017).

Nesse tipo de estudo, são consideradas as forças de interação partícula-partícula e partícula-parede, além da aplicação dos balanços de força em cada partícula por tempo, tendo como resposta a aceleração e a posição através do acompanhamento das suas trajetórias no sistema (SANTOS, 2020).

Duas etapas são essenciais para o estudo utilizando modelagem DEM: a segunda lei de Newton e a lei do deslocamento. A segunda lei de Newton é aplicada em cada partícula individualmente para avaliar como as forças de contato e de campo regem o movimento. Já a lei do deslocamento (*displacemet law*) é utilizada para contabilizar as forças de contato partícula-parede e partícula-partícula. Sendo assim, é possível estimar a aceleração da partícula através da razão entre a força resultante e a massa. Com esse valor, através de cada *time-step*, o algoritmo da simulação atualiza os valores de velocidade, deslocamento, rotação e trajetória (PENG, 2014).

Os cálculos nas simulações DEM são realizados em ciclos, em que cada ciclo representa um *time-step*. É necessário garantir que esse intervalo de tempo seja curto, para que o cálculo seja feito entre as partículas que estão em contato, evitando possíveis perturbações de outras partículas. Antes de se iniciar o ciclo, define-se a geometria e o modelo de contato (CUNDALL, STRACK, 1979).

De acordo com Lima (2017), as etapas do ciclo são:

- 1) Identificar as partículas que estão em contato e calcular as forças de contato;
- 2) Calcular a ação das forças resultantes em cada partícula, incluindo as forças externas e de campo;
- 3) Calcular a aceleração e a velocidade das partículas;
- 4) Calcular o deslocamento e rotação das partículas;
- 5) Atualizar a posição das partículas e repetir o processo.

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, apresentada nas Equações (2.1) e (2.2). 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* (YANG, P.; CHEN, H.; WEN LIU, Y., 2017).

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^t) + m_i g \quad (2.1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i + R_{ij}^t) + \tau_{rij} \quad (2.2)$$

em que: m_i , v_i , I_i , ω_i e R_i são massa, velocidade linear, momento de inércia, 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.

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 (BUIST *et al.*, 2016).

O modelo não linear de Hertz-Mindlin é um modelo de contato não linear, 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 2 demonstra as principais equações do modelo de Hertz-Mindlin, apresentadas nas Equações (2.3) a (2.11), utilizando a razão de Poisson (ν), coeficiente de restituição (e_p), sobreposição normal (δ_n), módulo de Young equivalente (E^*), sobreposição tangencial (δ_t), velocidade relativa normal (v_n^{rel}), velocidade relativa tangencial (v_t^{rel}), raio de contato equivalente (R^*), força normal (\vec{F}_n), força normal de amortecimento (\vec{F}_n^D), coeficiente de amortecimento (β), rigidez normal (S_n), massa

equivalente (m^*), componente tangencial da força (\vec{F}_t), rigidez tangencial (S_t) e módulo de cisalhamento equivalente (G^*) (DI RENZO, DI MAIO, 2004).

Tabela 2 - Equações fundamentais do modelo não linear de Hertz-Mindlin.

| | | |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|
| Força normal | $\vec{F}_n = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{\frac{3}{2}} \sqrt{R^*}$ | (2.3) |
| Força normal de amortecimento | $\vec{F}_n^D = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \vec{v}_n^{rel}$ | (2.4) |
| Módulo de Young equivalente | $\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i)^2}{E_i} + \frac{(1-\nu_j)^2}{E_j}$ | (2.5) |
| Rigidez normal | $S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}$ | (2.6) |
| Coefficiente de amortecimento | $\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}}$ | (2.7) |
| Força tangencial | $\vec{F}_t = -\delta \delta_t G^* \sqrt{R^* \delta_n}$ | (2.8) |
| Força tangencial de amortecimento | $\vec{F}_t^D = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_T m^*} \vec{v}_t^{rel}$ | (2.9) |
| Rigidez tangencial | $S_t = \delta E^* \sqrt{R^* \delta_n}$ | (2.10) |
| Módulo de cisalhamento equivalente | $\frac{1}{G^*} = \frac{2-\nu_i}{G_i} + \frac{2-\nu_j}{G_j}$ | (2.11) |

Considerando o deslocamento tangencial, a força tangencial é limitada pela lei de atrito de Coulomb ($F_{t, max}^d$) e torna-se uma função do coeficiente de atrito estático (μ_S), representada pela Equação 2.12:

$$F_{t, max}^d = \mu_S F_n \quad (2.12)$$

As simulações DEM podem ser úteis nas análises de diversos equipamentos, incluindo o secador rotatório com recheio de inertes, devido ao fato de que as colisões das partículas inertes estão diretamente relacionadas com o desempenho do processo.

Os conceitos de colisões e contatos possuem diferenças significativas na abordagem Lagrangeana. Sendo assim, colisão pode ser definida a partir de um processo dinâmico, em que as partículas se chocam com uma força suficiente para permitir uma sobreposição de pelo menos 1% em relação ao seu diâmetro. Por fim, o número de contatos é capaz de contabilizar a quantidade de partículas que estão no contorno e não se sobrepuseram, sendo essa uma aproximação mais adequada para leitos estáticos (YANG; ZOU; YU, 2003).

Analisando duas esferas macias, elas entram em contato em um instante t_0 , se sobrepõem por um determinado tempo e se separam em um instante t_1 . Todo esse processo é contabilizado como uma colisão, independente do tempo de contato ocorrido. As colisões sempre são analisadas em pares e, caso mais de duas esferas se colidam simultaneamente, cada par é separado e contabilizando uma colisão (FRIES *et al.*, 2013).

O tempo crítico de integração de Rayleigh se refere ao tempo necessário para que a onda mecânica de Rayleigh se propague ao longo da superfície da menor partícula, durante a utilização de um modelo de contato não-linear. Sendo assim, a escolha do *time-step* é fundamental para garantir que não haja excessivas sobreposições de partículas, de forma a não exceder o tempo de Rayleigh. É recomendado que o *time-step* não ultrapasse 20% do passo do tempo crítico estabelecido pela Equação 2.13 para sistemas dinâmicos (SANTOS, 2020; THORNTON; RANDALL, 1988; LIMA, 2017).

$$T_R = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_s}{G_i}}}{0,1613.v_i + 0,8766} \quad (2.13)$$

em que: r é o raio da menor partícula do sistema, ρ_s é a densidade da partícula, G_i é o módulo de cisalhamento e v_i é a vazão de Poisson.

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, estão apresentadas as metodologias utilizadas na realização deste trabalho. Primeiramente, a polpa de acerola foi caracterizada quanto à umidade, atividade de água, densidade, teor de cinzas, pH e FRX. Já o produto desidratado em pó foi caracterizado quanto à umidade, atividade de água, FRX e separação magnética. O estudo numérico da dinâmica das partículas foi realizado posteriormente, a fim de obter informações relevantes para o entendimento do processo. Por fim, foi feito o estudo experimental com base em um planejamento, com intuito de avaliar o efeito das variáveis independentes na secagem da polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes.

3.1 Polpa de acerola

Para a realização dos experimentos, foi utilizada a polpa de acerola da marca Mais Fruta (Figura 8), que possui apenas acerola em sua composição. A polpa foi adquirida em embalagens de 100 g por uma distribuidora de polpas em Uberlândia – MG. Elas foram armazenadas em um freezer a -18°C e embaladas individualmente em papel alumínio, protegendo da luz. No dia da realização do experimento, a polpa era retirada do freezer cerca de 3 horas antes para descongelar naturalmente em temperatura ambiente.

Figura 8 - Polpa de acerola.



3.2 Análises físico-químicas

Para a realização da caracterização da polpa de acerola e do pó desidratado, foram realizados alguns procedimentos que serão descritos a seguir. A polpa foi caracterizada quanto à umidade, atividade de água, densidade e teor de cinzas. Já o pó foi caracterizado em relação à umidade, atividade de água e análise de composição no FRX.

3.2.1 Umidade

O teor de umidade em base úmida foi determinado através do método gravimétrico com emprego de calor a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24h em estufa (AOAC, 1995), tanto para a polpa de acerola, quanto para o produto seco no SRRI. Para a realização da secagem, foi utilizada uma estufa da marca Marconi, do modelo MA033. O cálculo da umidade é importante para a análise do rendimento de secagem, que é caracterizado pela razão entre a massa seca de produto coletado e a massa seca de polpa alimentada, como é apresentado na Equação (3.1).

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{m_{\text{produto}}(100 - U_{\text{produto}})}{m_{\text{alimentado}}(100 - U_{\text{polpa}})} \quad (3.1)$$

em que: m_{produto} a massa do pó de acerola (g), U_{produto} o teor de umidade do pó de acerola (%), $m_{\text{alimentado}}$ a massa de polpa alimentada (g) e U_{polpa} o teor de umidade da polpa (%).

3.2.2 Atividade de água

A atividade de água também foi medida tanto para a polpa quanto para o pó de acerola. Esse parâmetro foi medido com uso do equipamento LabSwift da marca Novasina, com a faixa de medição do equipamento variando de 0,030 a 1,000, com precisão de $\pm 0,003$. O equipamento possui uma célula eletrolítica para medição de umidade e sensor infra-vermelho para medição da temperatura superficial da amostra.

A maioria dos fungos, leveduras e bactérias têm seu crescimento inibido quando a atividade de água atinge valores inferiores a 0,70, 0,80 e 0,90, respectivamente, então estipulase que, para valores menores que 0,60, praticamente toda a atividade microbiana seja inibida (FELLOWS, 2006).

3.2.3 Densidade

A densidade, ou massa específica real, foi determinada através do uso de um equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330 que possui sensibilidade de medida de $10^{-4}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Esse equipamento realiza a análise da densidade através de picnometria por gás Hélio e ele determina o volume verdadeiro dos sólidos por variação de pressão do gás em uma câmara de volume já conhecido. O gás Hélio é amplamente usado nessa análise por ser um gás inerte e por penetrar facilmente nos poros das amostras, sendo mais preciso na determinação do volume do sólido. Previamente à essa análise, foi necessário submeter as amostras a estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24h para a secagem e, posteriormente, foram moídas utilizando almofariz e pistilo até atingir a homogeneidade (MOURA; FIGUEIREDO, 2020).

3.2.4 Teor de cinzas

Seguindo a norma analítica E1755-01, foi realizada a determinação do teor de cinzas da polpa de acerola por gravimetria. Para essa análise, amostras de aproximadamente 1g de polpa foram previamente secas em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24h em cadinhos. Utilizando uma mufla da marca EDG, modelo 1150-1P-W1, a amostra foi incinerada a $575 \pm 25^\circ\text{C}$ por 4h. Após a incineração, os cadinhos foram colocados em um dessecador para o resfriamento até atingirem a temperatura ambiente. O resultado foi apresentado em percentual de cinzas em relação a massa inicial (ASTM, 2003).

3.2.5 pH

Uma amostra de 15 g de polpa de acerola foi diluída em 100 mL de água destilada para a determinação do pH. O sistema de agitação com agitador magnético foi mantido por cerca de 30 minutos. Após a agitação, a solução foi filtrada em papel filtro e o pH foi aferido utilizando um pHmetro da marca Gehaka, modelo PG1800.

3.2.6 FRX

Para a determinação da composição química das amostras do pó de acerola, foi utilizado o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX) da marca Bruker, modelo S8 Tiger. As amostras foram feitas na forma de pastilha prensada, sendo o suporte da pastilha de ácido bórico, com apenas a camada mais superficial e central de amostra. Além disso, foi usada

a máscara de 8 mm. A leitura das amostras foi feita usando o método Quant Express. O Quant Express é um método semi-quantitativo *standandless*, calibrado de fábrica. Ele é bem versátil, pois abrange cerca de 70 elementos da tabela periódica, do Flúor ao Urânio.

Já para a determinação da composição química da polpa de acerola, também foi usado o FRX. A análise de líquidos nesse equipamento requer o uso do gás Hélio e o uso de um filme transparente. A escolha desse filme é realizada de acordo com a capacidade que o material da película fina tem de reter com segurança uma amostra durante a preparação e a análise em FRX. O filme escolhido para essa análise foi de polipropileno, que é excelente para a leitura de materiais com concentração de ácidos, álcoois e aldeídos.

3.2.7 Separação magnética

Para avaliar a presença ou ausência de resíduos magnéticos nas amostras de pó de acerola, foi realizada uma separação magnética. Para isso, foi criado um campo magnético através de um ímã, que foi posicionado externamente a um recipiente contendo pó. O pó foi agitado manualmente e depositado em outro recipiente. Após esse procedimento, foi analisado se houve produto preso no fundo do recipiente, identificando ou não a presença de metais na amostra.

3.3 Secador Rotatório com Recheio de Inertes

3.3.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados na unidade experimental que se encontra no Laboratório de Sistemas Particulados (LSP), na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU).

Essa unidade experimental (Figura 9) possui um soprador do tipo ventilador radial da marca Kepler-Weber, modelo 112M, cuja função é realizar o escoamento de ar através de um duto. Esse ar foi aquecido por um conjunto de resistências elétricas acopladas a um variador de voltagem e a velocidade do escoamento do ar foi ajustada utilizando um anemômetro de fio quente da marca TSI Instruments, modelo VelociCalc.

Figura 9 - Secador Rotatório com Recheio de Inertes - FEQUI/UFU.



Um controlador da marca Novus, modelo N1030 ($\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) foi utilizado para o controle da temperatura do ar de secagem e sua malha de controle era composta por um termopar do tipo K, localizado na entrada do tambor rotatório. De acordo com o *setpoint*, o controlador desligava ou ligava o aquecimento com base no sinal recebido pelo termopar. O ar quente entrava no tambor gerando o aquecimento das partículas inertes que, em contato com a pasta formada na superfície dessas partículas, formava uma fina camada, favorecendo as transferências de calor e massa e viabilizando a secagem da pasta. Devido ao atrito causado pelas colisões das partículas inertes entre si e das colisões entre as partículas inertes e a parede do tambor rotatório, o material seco era desprendido e arrastado pela corrente de ar de secagem, sendo posteriormente coletado.

O tambor rotatório foi acoplado a um sistema de rotação composto por uma correia, um motor elétrico da marca WEG, modelo W22 Plus, e um inversor de frequência também da marca WEG, modelo CFW 08. A velocidade de rotação foi monitorada através de um tacômetro

da marca LM393 e a leitura era feita a cada 5 minutos para garantir uma velocidade de rotação constante.

A alimentação da polpa de acerola foi realizada a partir de um sistema composto por um funil, uma mangueira e uma bomba peristáltica da marca MasterFlex, modelo 7553-70. Essa alimentação ocorria de forma concorrente ao ar de secagem, injetando a polpa no interior do tambor rotatório.

Um ciclone *Stairmand* de diâmetro $D_c = 10$ cm foi utilizado como um separador gás-sólido, em que o ar de secagem era eliminado pelo *overflow* e o pó produzido era coletado por um recipiente de vidro no *underflow*.

O tambor rotatório (Figura 10) foi construído em aço inoxidável AISI 304 e possui 12 cm de diâmetro e 36 cm de comprimento, conferindo a ele uma razão $L/D = 3$. Os três suspensores internos ao tambor (do tipo reto) também são de aço inoxidável, possuem 36 cm de comprimento e 2,5 cm de altura. Nas regiões extremas do tambor, onde ele se conecta com as partes fixas do secador, foram anexados anéis de bronze e retentores, visando uma maior preservação do equipamento durante a rotação, sem que houvesse perdas nas juntas do sistema.

Figura 10 - Tambor rotatório.



Fonte: Adaptado de Santos (2020).

3.3.2 Partículas Inertes

Neste trabalho, esferas de aço inoxidável 304 ($\rho_s = 8000 \text{ kg/m}^3$), cerâmica ($\rho_s = 2300 \text{ kg/m}^3$) e polipropileno ($\rho_s = 900 \text{ kg/m}^3$) foram utilizadas como partículas inertes. Além disso, as esferas foram analisadas em dois diâmetros distintos: 1" (25,4 mm) e ½" (12,7 mm). Essas esferas (Figura 11) compõe o recheio do secador rotatório e foram escolhidas por possuírem uma diferença considerável em suas densidades, possibilitando a análise dos efeitos causados

por essa mudança, pois a densidade e o tamanho das partículas inertes são aspectos que afetam diretamente o processo da secagem (FREIRE *et al.*, 2012).

Figura 11 - Esferas de densidades e diâmetros diferentes.



O tamanho das partículas inertes já foi avaliado por Santos (2020), que fez a análise de 6 diferentes configurações (C1 a C6) no carregamento do tambor de inertes de cerâmica de três diâmetros diferentes: 12,70 mm, 19,05 mm e 25,40 mm. A combinação C1 possuía apenas esferas de 25,40mm; C2 apenas esferas de 19,05mm; C3 apenas esferas de 12,70mm; C4 possuía uma combinação entre as esferas de 25,40mm e 19,05mm; C5 uma combinação entre 25,40mm e 12,70mm; C6 uma combinação entre 19,05mm e 12,70mm. O autor comprovou, por meio de estudos numéricos e experimentais, que a combinação de esferas de 12,7 mm e 25,4 mm de diâmetro (C5) gerou uma maior quantidade de colisões, uma maior força de colisão e, conseqüentemente, um maior rendimento no processo.

3.4 Ensaios de secagem

Para a realização dos ensaios de secagem, alguns parâmetros foram determinados com base nos trabalhos anteriores. A velocidade de rotação do tambor foi mantida em 70 rpm e o fator de enchimento (E) do tambor foi fixada em 35%. A velocidade do ar foi controlada em 10 m/s e a alimentação da polpa ocorreu de maneira intermitente, de modo que a cada 7 minutos fossem bombeadas cerca de 15g de polpa no interior do secador. A alimentação intermitente é

utilizada para evitar que o material alimentado se acumule e fique aderido nas paredes do tambor e nas superfícies das partículas inertes, o que dificulta a transferência de calor pelo fluido de secagem (SILVA, 2019; SANTOS, 2020; NUNES, 2021).

Sendo assim, inicialmente o equipamento era montado, com as partículas inertes já no interior do tambor, devidamente pesadas. Realizava-se o controle da vazão de ar, da temperatura e da rotação até que o sistema entrasse em regime permanente (cerca de 30 minutos). Posteriormente, a polpa começava a ser alimentada e, ao final de toda a alimentação, o secador se mantinha em funcionamento por mais 1 hora e 30 minutos, para garantir que todo o material alimentado fosse seco e removido das estruturas do tambor.

A alimentação era preparada com 100 g de polpa de acerola previamente descongelada, adicionada à porcentagem de maltodextrina (DE 11) relativa ao experimento.

Nesse trabalho, as variáveis analisadas foram a concentração de maltodextrina (M), a porcentagem de fração de inertes menores (FI) e a temperatura (T). Logo, para cada experimento, uma condição era seguida.

A maltodextrina (DE 11) foi o aditivo alimentar escolhido para esse estudo com intuito de melhorar a consistência da polpa de acerola, aumentando a temperatura de transição vítrea, o que reduz a pegajosidade e facilita a remoção da polpa das superfícies das partículas inertes e das estruturas internas do secador. Silva (2019) mostrou em seu estudo a influência favorável da presença de maltodextrina no rendimento da secagem de camu-camu em SSRI. Logo, os níveis da variável concentração de maltodextrina (M) desse trabalho foram escolhidos com base no estudo de Silva (2019) e de outros autores que também realizaram a secagem de polpa de frutas com aditivo de secagem.

Em relação à fração de inertes menores, essa variável era medida, a cada experimento, em termos das massas das partículas inertes que compunham o recheio do tambor rotatório. O recheio era composto por esferas de dois diâmetros diferentes (25,4 mm e 12,7 mm de diâmetro). O cálculo da massa para as esferas de menor diâmetro e maior diâmetro era feito de acordo com as Equações (3.2) e (3.3), respectivamente.

$$m_1 = (V_{tambor} - V_{suspensores})(1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot FI \quad (3.2)$$

$$m_2 = (V_{tambor} - V_{suspensores})(1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot (1 - FI) \quad (3.3)$$

em que: ρ_s a densidade da partícula inerte (aço inoxidável: $\rho_s = 8000 \text{ kg/m}^3$; cerâmica: $\rho_s = 2300 \text{ kg/m}^3$; polipropileno: $\rho_s = 900 \text{ kg/m}^3$), ϵ_i a porosidade do leito, E o fator de enchimento e FI a fração de inertes.

Por fim, com o auxílio de um termopar, a cada experimento uma temperatura para o ar de secagem era determinada e fixada no controlador, com a garantia de que essa temperatura fosse mantida no *setpoint*, com precisão de $0,1^\circ\text{C}$. O fluido de secagem passava pelo duto, onde entrava em contato com as resistências elétricas que funcionam de acordo com a necessidade de aquecimento ou resfriamento (sistema *on/off*). O nível máximo de temperatura para esse estudo foi escolhido de acordo com as limitações do equipamento, não extrapolando o máximo suportado para não causar danos à estrutura do secador. Já o nível mínimo foi escolhido observando o fato de que, mesmo com as resistências desligadas, o soprador fosse capaz de aquecer o ar em 35°C .

O fator de enchimento do tambor e a fração de inertes menores foram calculados pelas Equações (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$E (\%) = \frac{V_{inertes}}{V_{tambor} - V_{suspensores}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$FI (\%) = \frac{V_{inerte\ menor}}{V_{inertes}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Vale ressaltar que a variável fração de inertes (FI) representa a proporção, em percentual, do menor inerte (12,70 mm de diâmetro) em relação ao volume total de partículas no tambor, que é delimitado pelo grau de enchimento. Logo, se a fração de inertes é de 70%, por exemplo, isso significa que 70% do volume ocupado pelos inertes é composto pelos inertes de 12,70 mm de diâmetro e 30% é composto pelos inertes de 25,40 mm de diâmetro.

Sendo assim, foi realizado o estudo da influência das variáveis concentração de maltodextrina (M), fração de inertes menores (FI) e temperatura do ar (T) no rendimento da secagem de polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes. Essas três variáveis foram analisadas através de um Planejamento Composto Central (PCC), ortogonal, com 5 níveis e 2 réplicas no ponto central, gerando 16 experimentos. Como, além dessas variáveis, também desejava-se analisar o efeito das diferentes densidades dos inertes, foram realizados 3

PCCs, um para cada tipo de inerte, totalizando 48 experimentos. Na Tabela 3 é apresentado o planejamento, com os níveis codificados e não codificados de cada uma das variáveis.

Tabela 3 - Planejamento Composto Central.

| Níveis | Variáveis independentes | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|
| | Maltodextrina (%) | Fração de inertes menores (%) | Temperatura (°C) |
| -α (-1,287) | 6,28 | 29,97 | 44,26 |
| -1 | 8,00 | 35,00 | 50,00 |
| 0 | 14,00 | 52,50 | 70,00 |
| +1 | 20,0 | 70,00 | 90,00 |
| +α (+1,287) | 21,72 | 75,03 | 95,74 |

As variáveis codificadas podem ser determinadas pelas Equações (3.7), (3.8) e (3.9).

$$\bar{M} = \frac{M-14}{6} \quad (3.7)$$

$$\bar{FI} = \frac{FI-52,5}{17,5} \quad (3.8)$$

$$\bar{T} = \frac{T-70}{20} \quad (3.9)$$

em que: \bar{M} é maltodextrina (%), \bar{FI} a fração de inertes menores (%) e \bar{T} a temperatura (°C).

3.5 Análise da dinâmica de colisões dos inertes no SRRI utilizando a abordagem do Método dos Elementos Discretos (DEM)

Com o intuito de avaliar a magnitude da força de colisão, a frequência das colisões e a velocidade dessas colisões entre as partículas inertes, simulações foram desenvolvidas variando a fração de inertes menores (FI) no interior do tambor rotatório e a densidade (ρ) das partículas inertes. Foram fixados os parâmetros velocidade de rotação em 70 rpm e o grau de enchimento em 35%, de acordo com trabalhos anteriores (SANTOS, 2020).

O estudo numérico foi feito através de simulações usando a abordagem numérica Lagrangeana (Método dos Elementos Discretos – DEM) através do *software* Liggths. As geometrias tridimensionais utilizadas nas simulações foram feitas utilizando o *software* SolidWorks. Para o funcionamento dessas simulações, foi utilizado um computador com

processador Xeon com 24 núcleos. Esse computador pertence ao Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU).

O *time-step* utilizado em todas as simulações foi de cerca de 10% do tempo de Rayleigh e todas as simulações foram feitas através do modelo de contato de Hertz-Mindlin (não-linear). O passo de tempo é um parâmetro que leva em consideração a densidade da partícula, o raio da menor partícula e o módulo de cisalhamento. De acordo com a literatura, o *time-step* máximo a ser utilizado não deve passar de 20% do tempo de Rayleigh, que tem como objetivo garantir que o movimento das partículas não seja afetado pela propagação de ondas de perturbação das vizinhanças (LIMA, 2017). O tempo total de simulação foi de 30 segundos.

Para realizar o cálculo DEM, alguns parâmetros de entrada são necessários na modelagem. Esses parâmetros caracterizam o tipo da partícula utilizada (aço inoxidável, cerâmica e polipropileno), como a densidade, razão de Poisson e módulo de cisalhamento. O coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de rolamento também são parâmetros do modelo empregado para prever o contato entre os inertes da simulação e devem ser especificados quando a interação for partícula-partícula ou partícula-parede. Todos esses parâmetros citados estão apresentados na Tabela 4 e foram utilizados para a realização das simulações computacionais.

Tabela 4 - Parâmetros do modelo empregado na abordagem DEM.

| Parâmetros | Aço Inoxidável | Cerâmica | Polipropileno |
|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Densidade (kg/m³) | 8000 | 2300 | 900 |
| Razão de Poisson | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Coeficiente de restituição | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| Módulo de cisalhamento (Pa) | 1. 10 ⁺⁶ | 1. 10 ⁺⁶ | 1. 10 ⁺⁶ |
| Coeficiente de atrito estático | 0,22 | 0,23 | 0,57 |
| Coeficiente de atrito de rolamento | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Fonte: SANTOS (2020).

Em relação ao preenchimento do tambor rotatório, foram analisadas 5 configurações diferentes de fração de inertes (FI) para cada tipo de inerte (ρ). Como foram analisadas partículas com 3 densidades diferentes, obteve-se 15 simulações. A Tabela 5 apresenta as frações de inertes e a quantidade de partículas de 1" (25,4 mm) e de ½" (12,7 mm) presentes em cada simulação.

Para o cálculo da quantidade de esferas (n_p) de maior e de menor tamanho, utilizou a Equação (3.10), em que ε_i é a porosidade, E é o fator de enchimento e FI a fração de inertes menores.

$$n_p = \frac{V_{tambor} - V_{suspensores}}{V_{particula}} (1 - \varepsilon_i) \cdot E \cdot FI \quad (3.10)$$

Tabela 5 - Frações de inertes analisadas para cada tipo de inerte.

| Fração de inertes menores (%) | Quantidade de esferas de 1" | Quantidade de esferas de ½" |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 35 | 46 | 241 |
| 70 | 21 | 483 |
| 52,5 | 34 | 362 |
| 29,97 | 50 | 207 |
| 75,03 | 18 | 517 |

É importante destacar que antes de Santos (2020), nenhum outro trabalho numérico ou experimental utilizando o secador rotatório com recheio de inertes havia sido analisado variando o tamanho das partículas em seu carregamento. A novidade desse trabalho é realizar, além do carregamento com partículas inertes de diferentes tamanhos, comparar os resultados obtidos entre partículas inertes de 3 densidades diferentes.

3.6 Otimização das respostas utilizando a função desejabilidade

Os resultados obtidos em cada PCC nos rendimentos da secagem da polpa de acerola em SRRI utilizando os diferentes tipos de inertes foram submetidos a uma técnica de otimização multi-resposta utilizando a função desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980). A função desejabilidade permite a maximização ou minimização simultânea de um conjunto de respostas,

convertendo-as em uma função composta com valores entre 0 e 1. Esse método busca alcançar o equilíbrio entre as variáveis e as respostas diferentes. Quanto mais próximo de zero, ou seja, quanto menor o valor, mais indesejável é essa resposta. Logo, o contrário indica uma otimização completa do processo (DERRINGER; SUICH, 1980; SANTOS, 2020).

Através dessa função, foi possível determinar as melhores condições em cada PCC para cada uma das variáveis analisadas: concentração de maltodextrina, fração de inertes menores e temperatura. Sendo assim, com o ponto ótimo de cada PCC definido, foram realizados três experimentos com a finalidade de comparar as informações obtidas pelo software e o rendimento obtido experimentalmente.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos estudos numéricos, que contribuem para o entendimento da dinâmica das partículas inertes no interior do tambor. Além disso, serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização da polpa de acerola, da secagem utilizando o secador rotatório com recheio de inertes e as análises realizadas no produto desidratado, com intuito de avaliar o desempenho do SRRI durante a produção da pasta de fruta estudada.

4.1 Estudo numérico da dinâmica da colisão de partículas e a relação com o rendimento de secagem

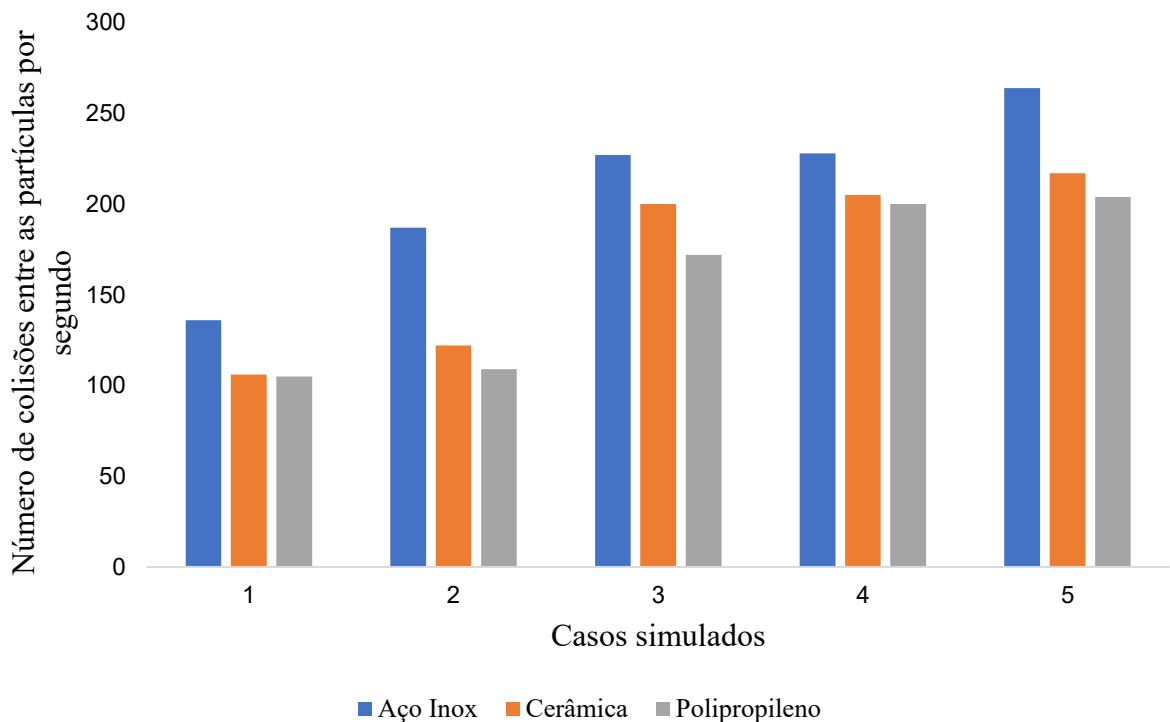
No estudo numérico, foram realizadas cinco simulações para cada tipo de inerte (ρ), variando a fração de inertes de menor tamanho (FI) presentes no interior do tambor rotatório seguindo os mesmos valores do PCC aplicados ao estudo experimental, de $-\alpha$ a $+\alpha$, totalizando quinze simulações (Tabela 6). O intuito dessas simulações foi analisar o efeito da FI e da densidade dos inertes no número de colisões, na força de colisão e na velocidade dessas partículas inertes.

Tabela 6 - Casos simulados no estudo numérico.

| Casos simulados | Fração de inertes menores (%) | Quantidade de esferas de 1" | Quantidade de esferas de ½" |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 29,97 | 50 | 207 |
| 2 | 35 | 46 | 241 |
| 3 | 52,5 | 34 | 362 |
| 4 | 70 | 21 | 483 |
| 5 | 75,03 | 18 | 517 |

Os resultados numéricos relativos ao número de colisões entre as partículas por segundo no interior do tambor para cada caso simulado estão apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Número de colisões entre as partículas por segundo.

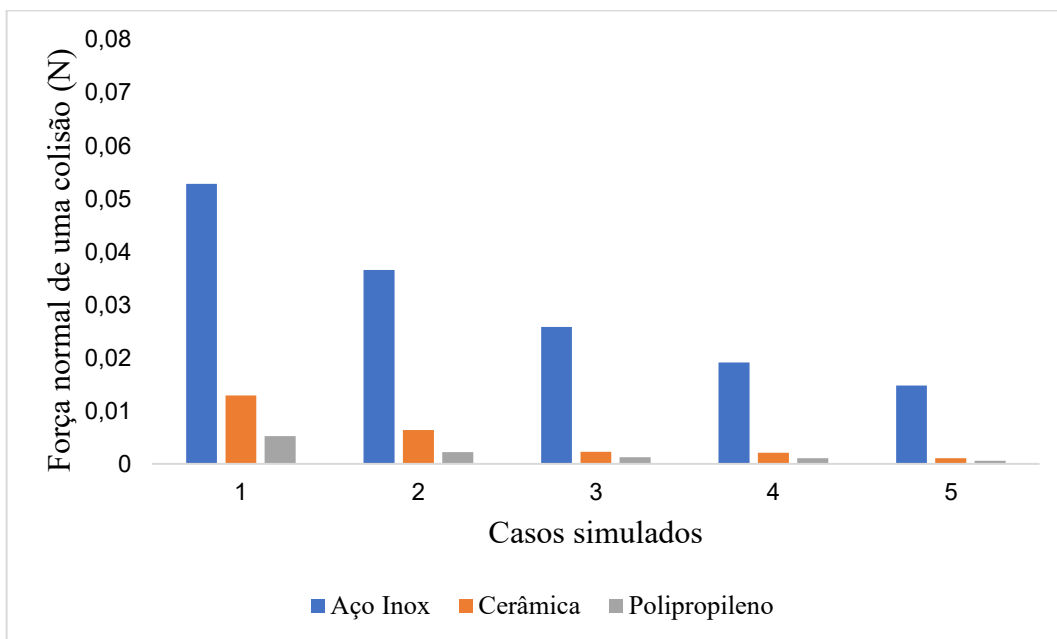


É possível analisar que, com o aumento da quantidade de partículas inertes de menor tamanho ($\frac{1}{2}$ "), o número de colisões entre as partículas por segundo também aumentou. Isso se deve ao fato de que uma maior fração de inertes está relacionada a uma maior quantidade de esferas de menor diâmetro (12,70 mm). Individualmente, cada partícula de menor diâmetro ocupa um menor volume em relação à partícula de maior diâmetro, resultando em uma maior quantidade de partículas no interior do tambor, gerando mais colisões. Além disso, a presença de partículas inertes menores e maiores favorece o aumento do número de contatos. Porém, a força de colisão é desfavorecida, uma vez que as partículas inertes menores se chocam com menos intensidade quando são comparadas com as maiores.

No caso 5, em que houve um maior número de colisões para as partículas dos três tipos de materiais, o número de colisões previsto pela simulação numérica para os inertes de aço inoxidável foi 20,6% maior quando comparado ao de cerâmica e 29,4% maior quando comparado ao de polipropileno.

Os resultados das simulações para a força normal média de colisão obtidos por simulação DEM para cada tipo de inerte estudado nas 5 condições analisadas estão apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Força normal média de colisão (N).



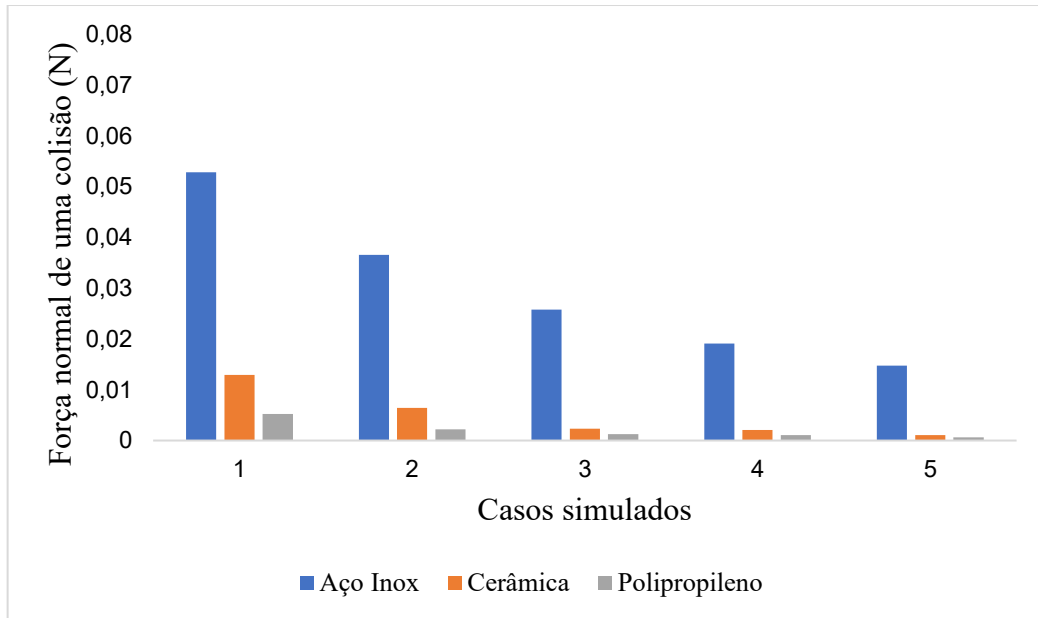
De acordo com as simulações numéricas, observou-se que a magnitude da força normal de colisão é inversamente proporcional ao número de colisões. Isso se deve ao fato de que, com uma maior presença de partículas inertes de menor diâmetro, a força normal de colisão tende a ser menor e, o número de colisões, maior. Para uma mesma velocidade de rotação, a energia transmitida pela rotação do tambor é dividida pelo número de partículas, o que leva a uma menor intensidade de energia associada a cada colisão, resultando em choques com menor intensidade de força normal. Esse comportamento também foi obtido por Santos (2020) e Nunes (2021) no estudo da dinâmica de partículas inertes em SRRI.

Em relação ao tipo de partícula inerte, com o aumento da densidade, a magnitude da força normal de colisão aumenta. As partículas de maior densidade exigem mais energia para girar o tambor. Essa energia, posteriormente, é transferida nas colisões, aumentando a intensidade das mesmas. Esse fator é importante para obter-se um maior rendimento do processo. No caso 1, onde obteve-se os maiores valores de força devido ao menor valor de FI, a força de colisão para as esferas de aço inoxidável foi 424,77% maior do que as de cerâmica e 1209,27% maior do que as de polipropileno.

A Figura 14 mostra os resultados da força normal de uma colisão, relacionando a força normal de colisão média com o número de colisões. É possível observar que o gráfico segue a mesma tendência do anterior (Figura 14). No caso 1, por exemplo, a força normal de uma

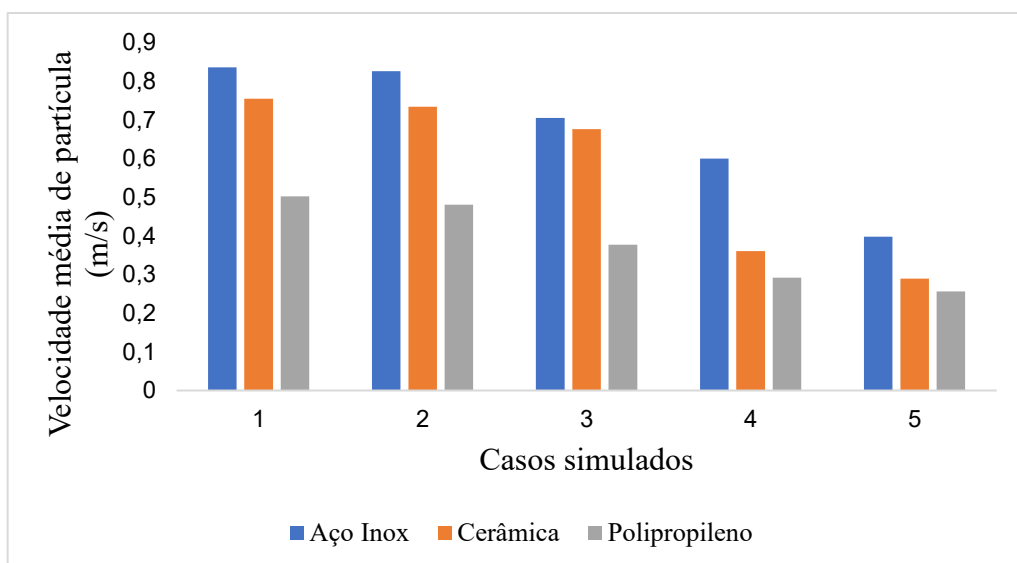
colisão para as partículas de aço inoxidável foi 309,02% maior do que as de cerâmica e 910,97% maior do que as de polipropileno.

Figura 14 - Força normal de uma colisão (N).



A Figura 15 mostra os resultados das simulações em relação à velocidade das esferas por tempo nas 5 condições das simulações para cada tipo de inerte.

Figura 15 - Velocidade média de partícula (m/s).



É possível analisar que o aumento da FI colaborou para a redução da velocidade das partículas. Isso pode ser justificado pelo fato de que, com o aumento da FI, há uma maior quantidade de partículas no interior do tambor, diminuindo o espaço livre para a movimentação dessas partículas. Para as esferas de aço inoxidável, por exemplo, quando comparadas a maior e a menor velocidade (casos 1 e 5), houve um aumento de 100,05%.

Pelo gráfico, é possível verificar que as propriedades das esferas inertes também tiveram influência na velocidade de partículas. No caso 1, onde foram obtidos os maiores valores de velocidade e menor porcentagem de FI, a velocidade das esferas de aço inoxidável foi 10,79% maior quando comparadas com as de cerâmica e 66,40% maior quando comparadas com as de polipropileno. A velocidade das partículas também é um fator importante para alcançar um bom rendimento, pois interfere diretamente na quebra do filme de polpa que reveste as esferas para a produção do pó.

4.2 Caracterização da polpa de acerola

A caracterização da polpa de acerola foi feita com intuito de averiguar o potencial dessa fruta e obter uma base para comparação com o produto desidratado após a secagem. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das análises de caracterização da polpa de acerola.

| Tipo de análise | Resultado |
|-------------------------------------|------------------|
| Umidade (%) (b.u.) | 92,98 ± 0,06 |
| Atividade de água | 0,963 |
| pH | 3,34 |
| Densidade real (g/cm ³) | 1,4893 ± 0,0001 |
| Teor de cinzas (%) | 4,41 ± 0,01 |

A polpa de acerola escolhida para esse estudo contém um alto teor de umidade (92,85%) e, conseqüentemente, um alto valor da atividade de água (0,963). A acidez da acerola é uma característica típica da fruta, e foi comprovada com o resultado da análise de pH, que foi de 3,34. Essa acidez faz com que a maioria dos consumidores optem pelo consumo através de sucos do que da forma in natura. O valor de pH obtido foi comparado com dados da literatura,

em que todos mostram valores inferiores a 3,5. Na Tabela 8 estão apresentados os valores e seus respectivos autores.

Tabela 8 - Valores de pH encontrados na literatura.

| pH | Autores |
|-----------|--------------------------------|
| 3,27 | Merticali <i>et al.</i> (2014) |
| 3,14 | Ribeiro <i>et al.</i> (2018) |
| 3,15 | Dantas <i>et al.</i> (2019) |
| 3,49 | Nunes (2021) |

As cinzas de um alimento são os resíduos inorgânicos, representado pelos sais minerais, que permanecem após a queima da matéria orgânica. Com relação ao teste de cinzas, ele fornece o teor mineral do alimento. O resultado foi expresso como percentual de cinzas em relação a massa inicial. O teor de cinzas em alimentos pode variar dentro do limite de 0,1 até 15%, dependendo do alimento ou das condições em que este se apresenta. No caso da polpa de acerola, o valor obtido foi de $4,41 \pm 0,01$, se enquadrando no padrão (MOREIRA *et al.*, 2021).

A polpa de acerola e o pó obtido pela desidratação da polpa em SRRI com partículas inertes de polipropileno e aço inoxidável foram submetidos ao teste no FRX, para análise de composição (Tabela 9).

Tabela 9 - Composição da polpa e do pó de acerola em FRX.

| Elementos químicos | Concentração dos elementos químicos na amostra | | |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| | Polpa de acerola | Polipropileno | Aço Inoxidável |
| K | 0,14% | 0,40% | 0,48% |
| Cl | 0,04% | 0,10% | 0,09% |
| P | 0,02% | 0,02% | 0,06% |
| Mg | 0,02% | 0,04% | 0,06% |
| Si | 0,03% | 0,04% | 0,04% |
| S | 0,02% | 0,03% | 0,05% |
| Ca | 0,01% | 0,03% | 0,04% |
| Fe | 14 PPM | 0,02% | 0,05% |
| Cr | - | 49 PPM | 0,02% |

Por se tratar de um produto alimentício, o objetivo dessa análise foi avaliar se a utilização do tambor rotatório, que é de aço inoxidável, e o uso das partículas inertes de aço inoxidável poderiam deixar resíduos que impossibilitariam o consumo. Para fim de comparação, foi utilizado o produto desidratado em pó usando partículas inertes de polipropileno como branco, já que estes inertes não são facilmente desgastados. Para as análises dos pós, a matriz utilizada foi de celulose. Já para a análise da polpa líquida, foi utilizada a base aquosa.

Através dos resultados, pode-se observar que os valores de Fe e Cr, que fazem parte da liga metálica que compõe o aço inoxidável, foram valores baixíssimos. De acordo com a OMS (1998), a ingestão de cromo não deve ultrapassar 250 mcg por dia. Em relação ao ferro, mulheres adultas devem ingerir 18 mg/dia e homens adultos, 8 mg/dia (Institute of Medicine, 2001).

No teste de separação magnética, foi usado um ímã para criação de um campo magnético, com intuito de avaliar também se havia ou não a presença de metais nas amostras de produto desidratado em SRRI. Com o teste, foi possível observar que nenhum pó ficou aderido ao fundo do recipiente, identificando a ausência de quantidades significativas de metais na amostra.

4.3 Secagem da polpa de acerola em SRRI

Após a secagem da polpa de acerola utilizando o secador rotatório com recheio de inertes, obteve-se um produto desidratado em pó (Figura 16), com aspecto homogêneo, aroma característico da acerola e com uma tonalidade mais clara quando comparado com a *polpa in natura*.

Figura 16 - Produto em pó obtido após a desidratação da polpa de acerola.



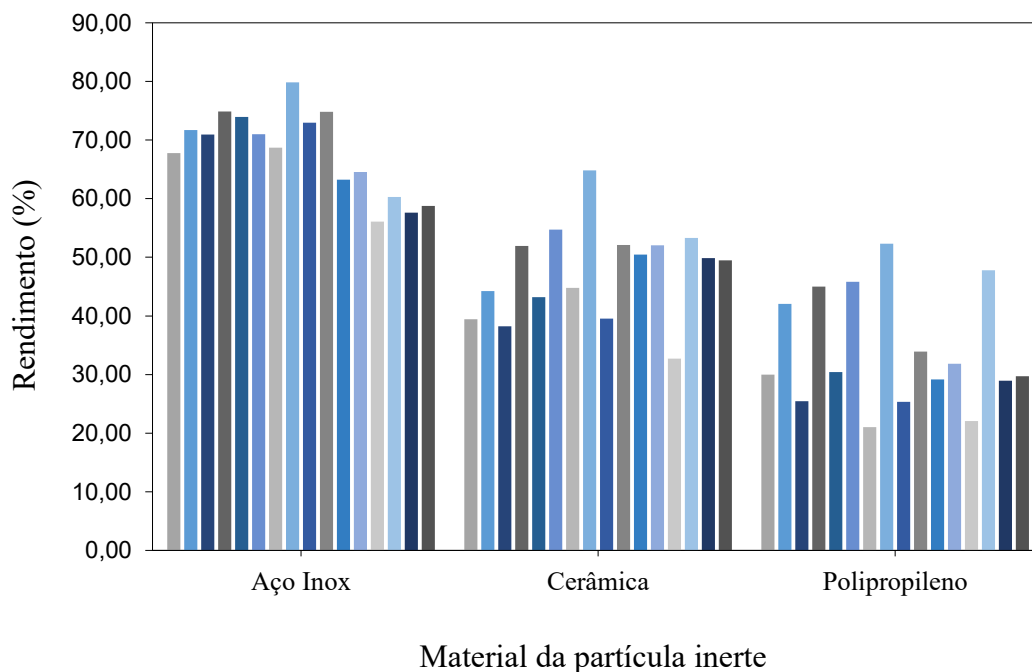
A secagem da polpa de acerola foi realizada seguindo um planejamento composto central (PCC), com 3 variáveis independentes e duas réplicas no ponto central, totalizando 16 experimentos. Foi feito um PCC para cada tipo de esfera: aço inoxidável, cerâmica e polipropileno. Logo, os 3 planejamentos resultaram em um total de 48 experimentos. Em relação às variáveis independentes, avaliou-se o efeito da concentração de maltodextrina (M), fração de inertes menores (FI) e temperatura (T). A variável dependente analisada foi o rendimento da secagem, tanto utilizando partículas inertes de aço inoxidável, quando de cerâmica e de polipropileno. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do rendimento da secagem da polpa de acerola dos experimentos dos PCC's realizados para cada tipo de inerte.

| Exp. | M (%) | FI (%) | T (°C) | Aço Inoxidável (%) | Cerâmica (%) | Polipropileno (%) |
|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 8 | 35 | 50 | 67,78 | 39,45 | 37,97 |
| 2 | 8 | 35 | 90 | 71,69 | 44,26 | 42,04 |
| 3 | 8 | 70 | 50 | 70,92 | 38,26 | 30,47 |
| 4 | 8 | 70 | 90 | 74,89 | 51,94 | 45,01 |
| 5 | 20 | 35 | 50 | 73,94 | 43,18 | 30,41 |
| 6 | 20 | 35 | 90 | 70,98 | 54,72 | 41,80 |
| 7 | 20 | 70 | 50 | 68,71 | 44,78 | 21,01 |
| 8 | 20 | 70 | 90 | 79,84 | 64,82 | 52,34 |
| 9 | 6,28 | 52,5 | 70 | 61,98 | 39,56 | 23,35 |
| 10 | 21,72 | 52,5 | 70 | 74,82 | 52,10 | 33,90 |
| 11 | 14 | 29,97 | 70 | 63,22 | 50,48 | 29,18 |
| 12 | 14 | 75,03 | 70 | 64,52 | 52,03 | 31,86 |
| 13 | 14 | 52,5 | 44,3 | 56,11 | 32,70 | 22,04 |
| 14 | 14 | 52,5 | 95,7 | 60,28 | 53,32 | 37,77 |
| 15 | 14 | 52,5 | 70 | 57,63 | 49,84 | 28,92 |
| 16 | 14 | 52,5 | 70 | 58,75 | 49,48 | 29,72 |

A Figura 17 apresenta uma visão geral dos rendimentos obtidos, separadamente para cada tipo de partícula inerte utilizada durante a secagem.

Figura 17 - Visão geral dos rendimentos obtidos na secagem.

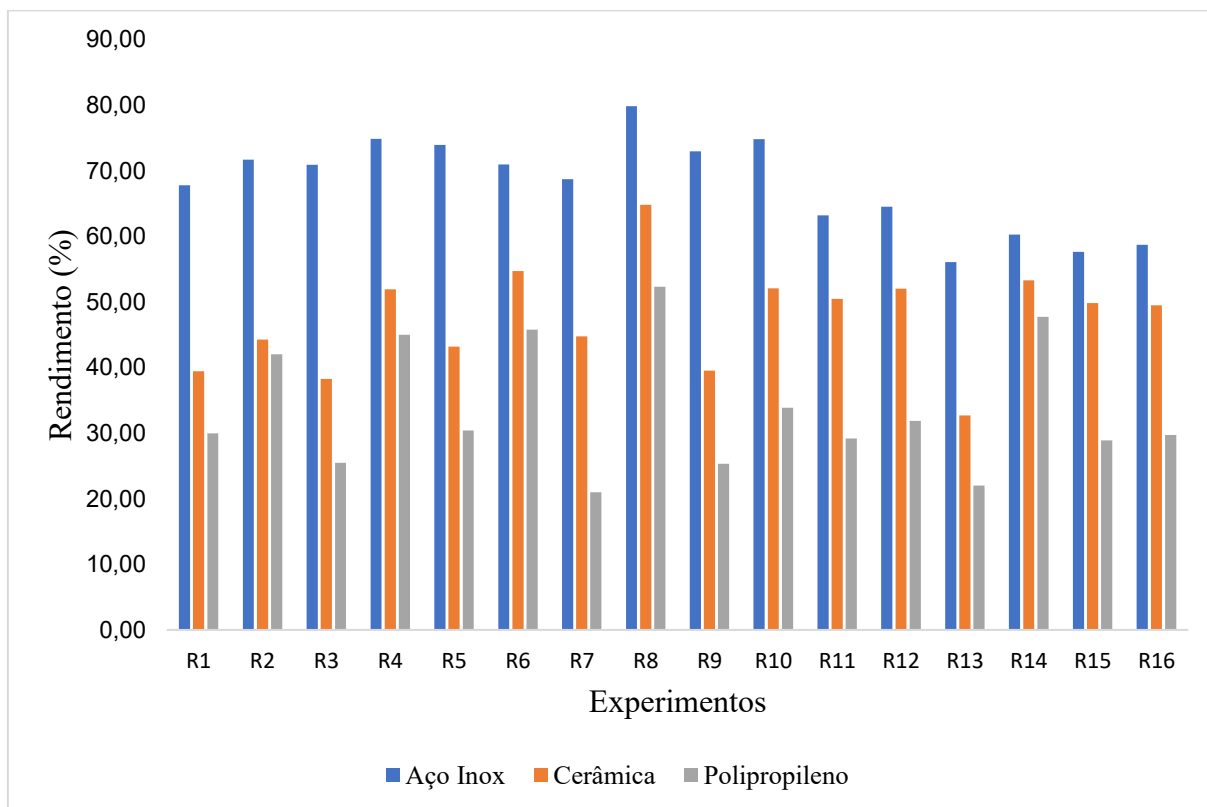


Nesse gráfico é possível observar o maior pico de cada PCC, que para todos os inertes utilizados, ocorreu no experimento 8, com o nível +1 do planejamento composto central para todas as variáveis: 20% de maltodextrina, 70% de fração de inertes menores e 90°C. Os rendimentos obtidos utilizando esferas de aço inoxidável, cerâmica e polipropileno foram, respectivamente, 79,84%, 64,82% e 52,34%. O rendimento utilizando esferas de aço inoxidável foi, em média, 18,81% maior quando comparado aos obtidos para os experimentos usando cerâmica e 34,44% quando comparado ao de polipropileno.

O rendimento utilizando esferas de aço inoxidável foi consideravelmente maior devido ao maior poder calorífico que o ele possui, viabilizando a formação de camadas finas de pasta nas superfícies das esferas. Essas camadas de pasta são secas mais rapidamente, sendo desprendidas e moídas com mais eficiência, formando o pó, que é arrastado pela corrente de ar quente. Além disso, esse resultado já era previsto pelos resultados das simulações numéricas, que mostraram que o número de colisões, a força normal de colisão média e a velocidade das partículas são superiores para as esferas de aço inoxidável, cerâmica e polipropileno, respectivamente.

A Figura 18 demonstra um comparativo, para cada corrida dos experimentos realizados, entre os resultados de rendimento obtidos para cada PCC, usando partículas de aço inoxidável, seguidas de cerâmica e de polipropileno.

Figura 18 - Comparação dos rendimentos dos 3 PCCs.

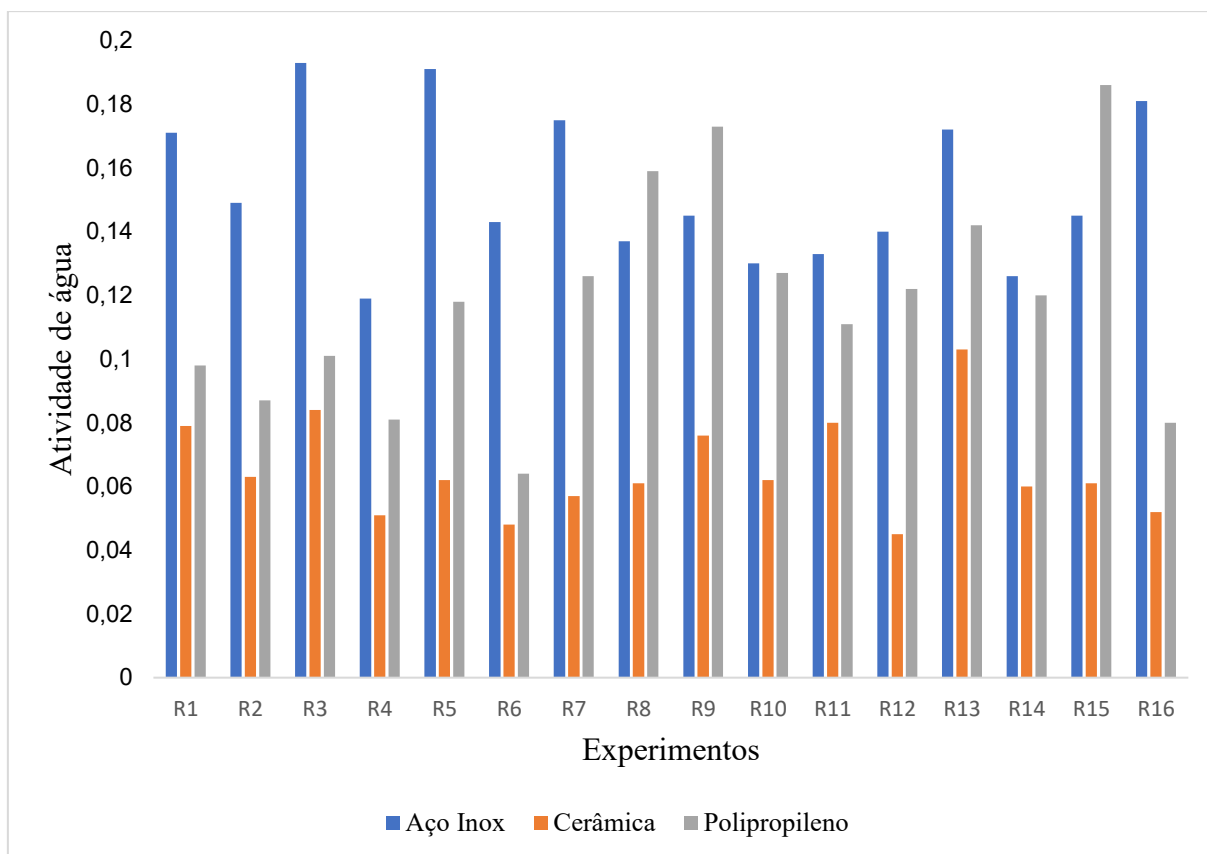


Em todos os 48 experimentos realizados, foram obtidos dados sobre a atividade de água do pó produzido no secador rotatório com recheio de inertes (SRRRI). Os resultados estão demonstrados na Figura 19. Esses resultados variaram entre 0,045 e 0,193, que são baixos e garantem a inibição de atividade microbiana no material. De acordo com Fellows (2006), em valores inferiores a 0,60 de atividade de água, praticamente toda a atividade microbiana é inibida, seja de fungos, leveduras ou bactérias. Para valores de atividade de água muito baixos, pode ocorrer a oxidação de lipídeos. Porém, em produtos que possuem teores lipídicos baixos ou praticamente nulos, como é o caso da polpa de acerola, não ocorre a rancificação, sendo favorável esse baixo teor de atividade de água.

Para resultados inferiores a 0,30, Celestino (2010) afirma que a zona de absorção primária é atingida. Isso significa que as moléculas de água estão tão fortemente ligadas ao

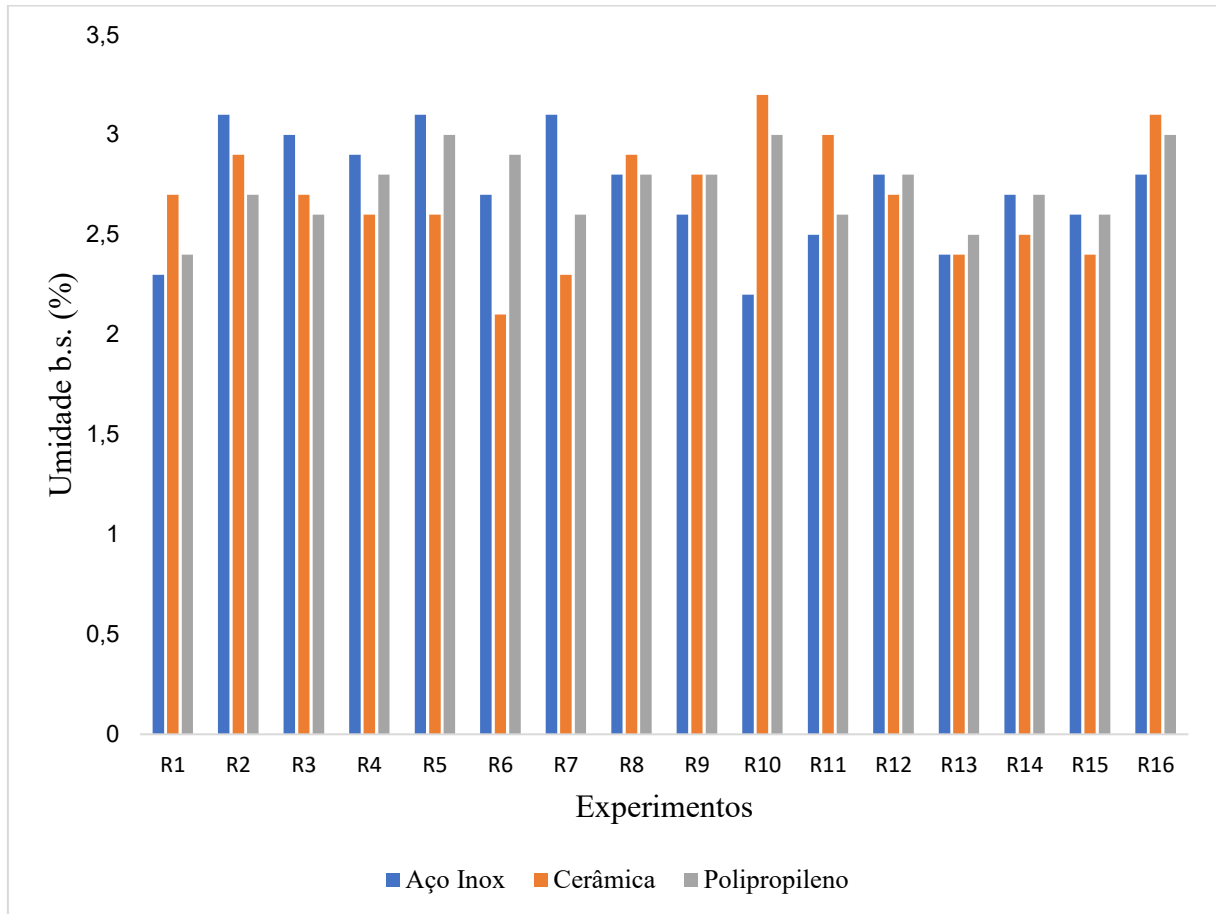
alimento que não podem ser utilizadas para dissolver compostos do alimento. Assim, as reações de degradação e o desenvolvimento de microrganismos são impossibilitados de ocorrer.

Figura 19 - Atividade de água para todos os experimentos.



Com relação à umidade, ela está diretamente ligada à atividade de água, devido à preocupação com a atividade microbiana que deve ser inibida em produtos desidratados em pó. Os resultados obtidos variaram entre 2,1% e 3,2%, o que se encontra dentro dos parâmetros da legislação brasileira para produtos alimentícios secos ou desidratados. Os valores de umidade desses produtos não devem ultrapassar o valor de 12% (ANVISA, 2005). Sendo assim, todos os 48 produtos estão dentro dos parâmetros exigidos. A Figura 20 apresenta os valores de umidade dos produtos para os 3 PCCs.

Figura 20 - Umidade (%) para todos os experimentos.



4.3.1 Rendimento de secagem

Dentre os experimentos realizados utilizando partículas inertes de aço inoxidável, obteve-se uma faixa de rendimento de secagem de 56,11% a 79,84%. Utilizando partículas de cerâmica, os rendimentos foram entre 32,70% e 64,82%. Já para os experimentos utilizando partículas inertes de polipropileno, os resultados de rendimento obtidos foram 21,01 % e 52,34%.

Fazendo um comparativo com outros trabalhos que também realizaram secagem em SRRI, Padilla (2003) realizou a produção de farinha de banana e os seus resultados foram em torno de 72,9%. Honorato (2006) obteve rendimentos entre 32,10% e 83,19% na secagem de cefalotórax de camarão. Moura (2009) encontrou valores que variaram entre 46,0% e 73,5% na secagem de resíduos de maracujá. Silva (2019), na melhor condição da secagem da polpa de camu-camu, alcançou um resultado de 55,33%. Santos (2020) também realizou a secagem de camu-camu em outras condições e os rendimentos variaram entre 56,38% e 84,79%.

Os fatores que impedem que os rendimentos sejam ainda mais altos, são as perdas que ocorrem por acúmulo de massa nas regiões de conexão entre as partes móveis e nas estruturas internas do tambor rotatório, a adesão das superfícies das partículas inertes, além do possível arraste de finos no *overflow* do ciclone (SILVA, 2019). Em condições de maiores temperaturas, os rendimentos obtidos são superiores aos experimentos usando uma temperatura mais branda. Alguns fatores podem ter afetado diretamente o rendimento da secagem, como no recobrimento da polpa alimentada sobre os inertes, na remoção da umidade da polpa e no arraste do produto.

Os experimentos obtidos nos pontos ortogonais, de 9 a 14, e os obtidos nos pontos centrais, 15 e 16, dos três PCCs estão apresentados na Figura 21 e na Tabela 11. A análise desses pontos é interessante, pois neles há a alteração do nível de uma variável, mantendo as demais com valores constantes.

Figura 21 - Valores dos rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais dos três planejamentos composto central.

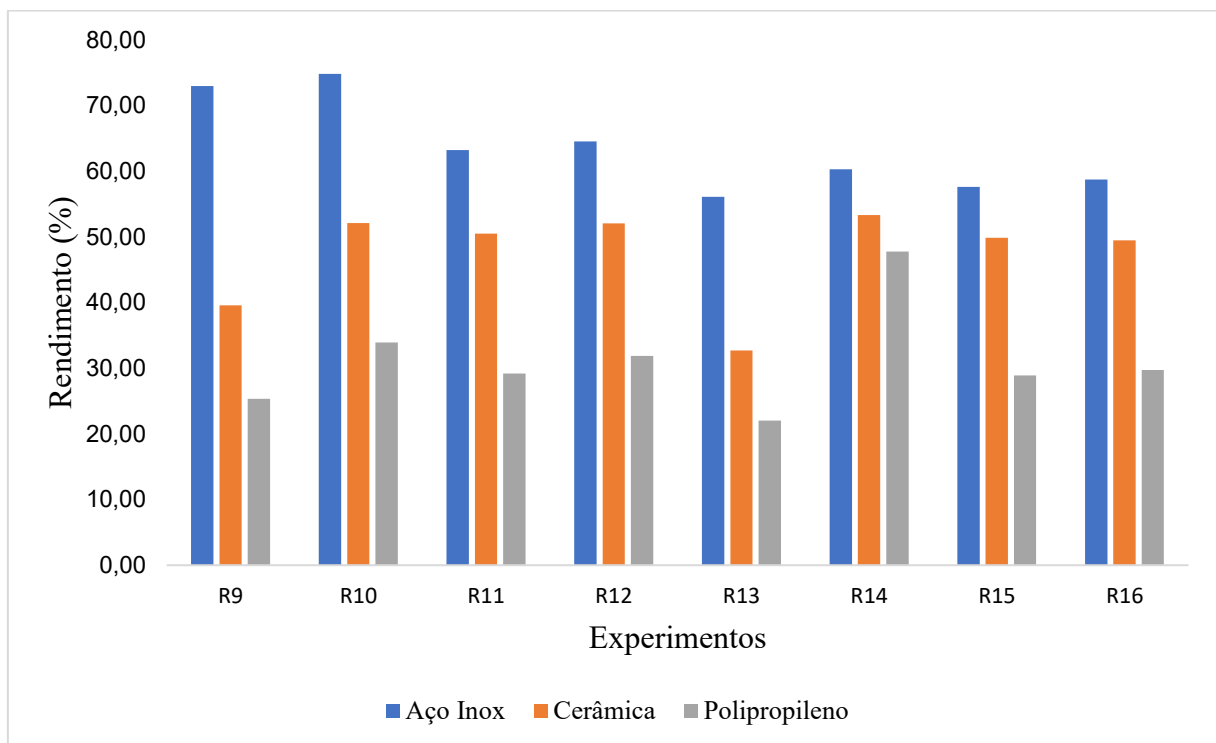


Tabela 11 - Valores dos rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais dos três planejamentos composto central.

| Exp. | M (%) | FI (%) | T (°C) | Aço Inoxidável (%) | Cerâmica (%) | Polipropileno (%) |
|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 9 | 6,28 | 52,5 | 70 | 61,98 | 39,56 | 23,35 |
| 10 | 21,72 | 52,5 | 70 | 74,82 | 52,10 | 33,90 |
| 11 | 14 | 29,97 | 70 | 63,22 | 50,48 | 29,18 |
| 12 | 14 | 75,03 | 70 | 64,52 | 52,03 | 31,86 |
| 13 | 14 | 52,5 | 44,3 | 56,11 | 32,70 | 22,04 |
| 14 | 14 | 52,5 | 95,7 | 60,28 | 53,32 | 37,77 |
| 15 | 14 | 52,5 | 70 | 57,63 | 49,84 | 28,92 |
| 16 | 14 | 52,5 | 70 | 58,75 | 49,48 | 29,72 |

Os valores obtidos nos experimentos nos pontos centrais dos planejamentos (experimentos 15 e 16) indicam uma baixa variabilidade nos testes, indicando que os testes possuem boa reprodutibilidade experimental. Nos pontos centrais, usando as partículas de aço inoxidável, a média foi de 58,19%, usando as de cerâmica, foi de 49,66% e para as de polipropileno, 29,32%.

Fazendo uma análise dos experimentos 13 e 14, é possível perceber que o aumento da temperatura influenciou positivamente no aumento do rendimento. Para o planejamento usando aço inoxidável, o rendimento passou de 56,11% para 60,28%, havendo um aumento de 7,43%. Para o planejamento usando esferas de cerâmica, a variação do rendimento foi de 32,70% para 53,32%, um incremento de 63,06%. Por fim, usando as partículas de polipropileno, o rendimento variou de 22,04% para 37,77%, tendo um aumento de 71,37% com o aumento da temperatura.

Comparando esses pontos (de 9 a 16), os menores valores de rendimentos foram obtidos na corrida 13, em que a temperatura estava no seu menor valor, de 44,3°C. Isso comprova, mais uma vez, como a temperatura influencia positivamente na secagem.

Para avaliar o efeito das variáveis nos resultados obtidos pela secagem em SRR para todos os 48 experimentos dos 3 planejamentos, foi aplicada uma técnica de regressão, utilizando o *software* Statistica, para obter uma equação ajustada aos dados.

Para o PCC usando partículas de aço inoxidável, obteve-se um valor de $R^2 = 0,9589$, com um nível de significância de 15%, para identificação dos parâmetros significativos. Isso significa que 95,89% da variabilidade da resposta é explicada pelo modelo de regressão não-linear. A equação do modelo reduzida está apresentada na Equação (4.1).

$$R (\%) = 58,06 + 1,87 \bar{M} + 20,03 \bar{M}^2 + 2,06 \bar{FI} + 7,91 \bar{FI}^2 + 3,79 \bar{T} + 3,53 \bar{FI} \cdot \bar{T} \quad (4.1)$$

Já para o planejamento usando esferas de cerâmica, o valor de R^2 obtido foi 0,9636, em que 96,36% da variabilidade da resposta é explicada pelo modelo, com um nível de significância de 15%. A Equação (4.2) é a equação do modelo reduzida.

$$R (\%) = 47,67 + 8,79 \bar{M} + 3,57 \bar{FI} + 4,81 \bar{FI}^2 + 13,55 \bar{T} - 5,15 \bar{T}^2 + 3,27 \bar{M} \cdot \bar{T} + 4,34 \bar{FI} \cdot \bar{T} \quad (4.2)$$

Por fim, para o PCC usando partículas de polipropileno, também com um nível de significância de 15%, o valor de $R^2 = 0,9653$ indica que 96,53% da variabilidade das respostas é explicada pelo modelo. A equação reduzida que representa o modelo está descrita na Equação (4.3).

$$R (\%) = 29,15 + 3,19 \bar{M} + 3,92 \bar{FI}^2 + 19,71 \bar{T} + 9,25 \bar{T}^2 + 3,77 \bar{M} \cdot \bar{T} + 5,85 \bar{FI} \cdot \bar{T} \quad (4.3)$$

As variáveis \bar{M} , \bar{FI} e \bar{T} representam a concentração de maltodextrina (%), a fração de inertes menores (%) e temperatura (°C), respectivamente. As equações de codificação estão apresentadas nas Equações (4.4) a (4.6).

$$\bar{M} = \frac{M-14}{6} \quad (4.4)$$

$$\bar{FI} = \frac{FI-52,5}{17,5} \quad (4.5)$$

$$\bar{T} = \frac{T-70}{20} \quad (4.6)$$

Observando as Equações (4.1) a (4.3), que representam o modelo, é possível observar um efeito positivo de \bar{M} , \bar{FI}^2 , \bar{T} e a interação entre as variáveis $\bar{FI} \cdot \bar{T}$ para todos os três

planejamentos. Analisando apenas os planejamentos usando partículas de cerâmica e polipropileno, as variáveis \bar{T}^2 e a interação entre as variáveis $\bar{M} \cdot \bar{T}$ também tiveram um efeito positivo. Esses efeitos positivos indicam que as variáveis influenciam no aumento do rendimento do processo.

Nas Figuras 22 a 24, são apresentadas as superfícies de resposta que mostram, graficamente, a variação do rendimento em função das variáveis T e FI para os três planejamentos utilizando partículas inertes de aço inoxidável, cerâmica e polipropileno, respectivamente. A terceira variável (porcentagem de maltodextrina) foi fixada no ponto central.

Figura 22 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de aço inoxidável.

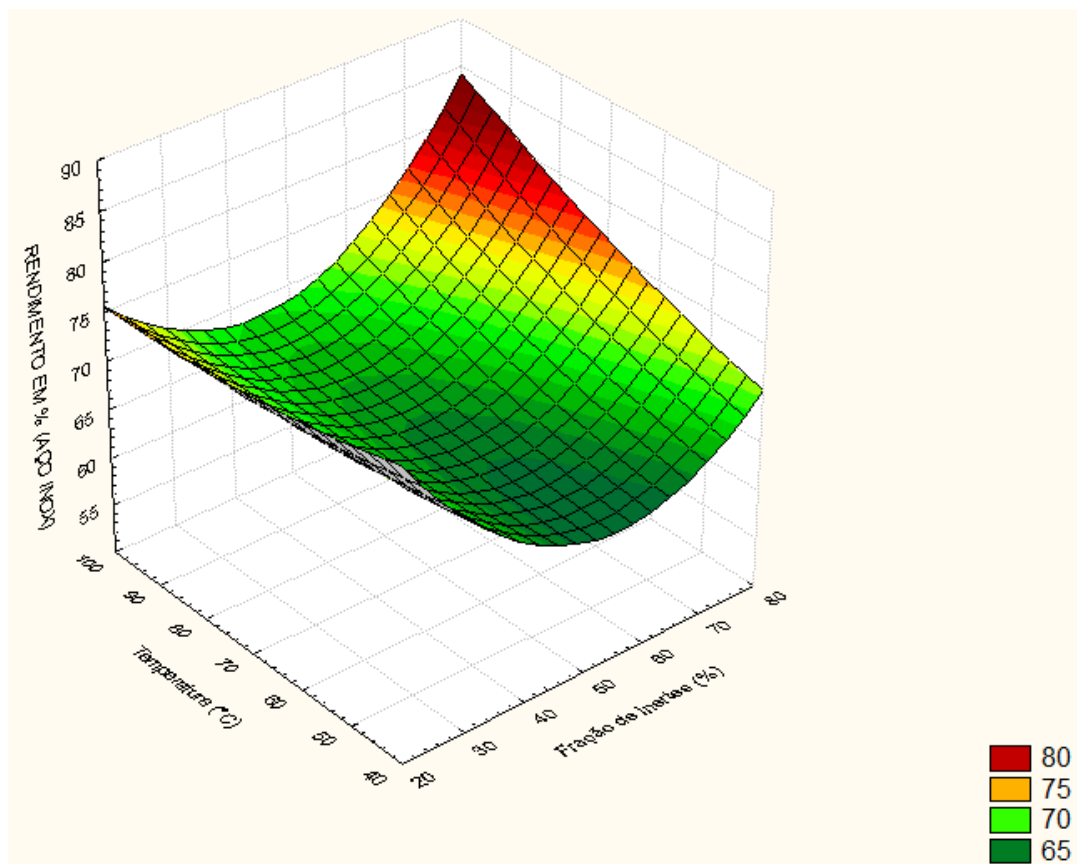


Figura 23 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de cerâmica.

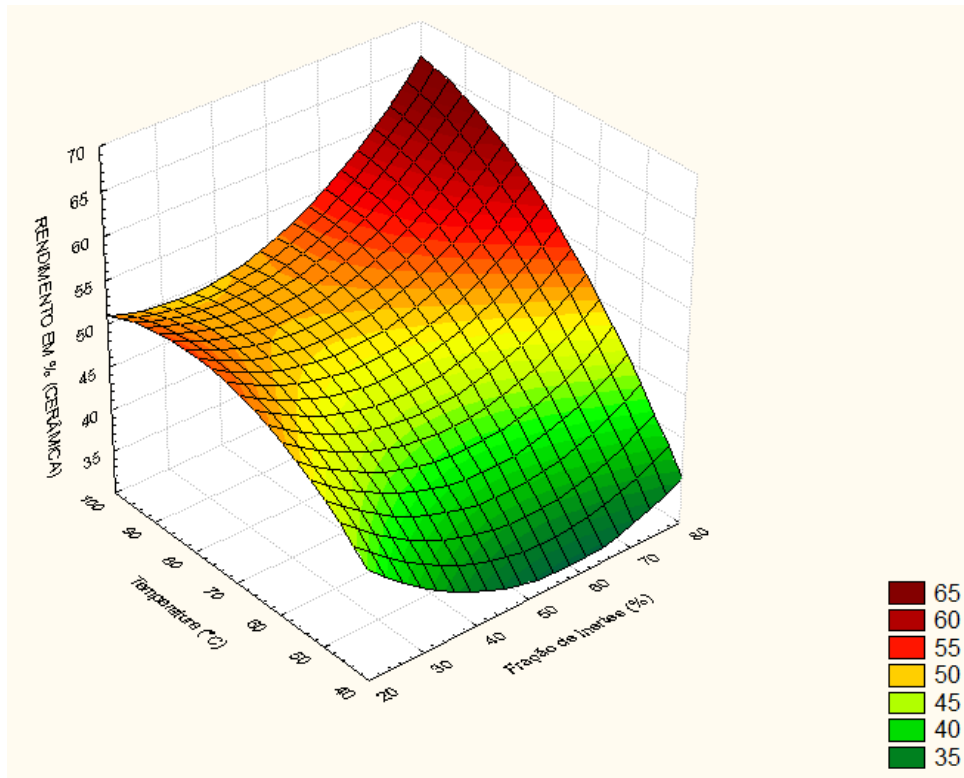
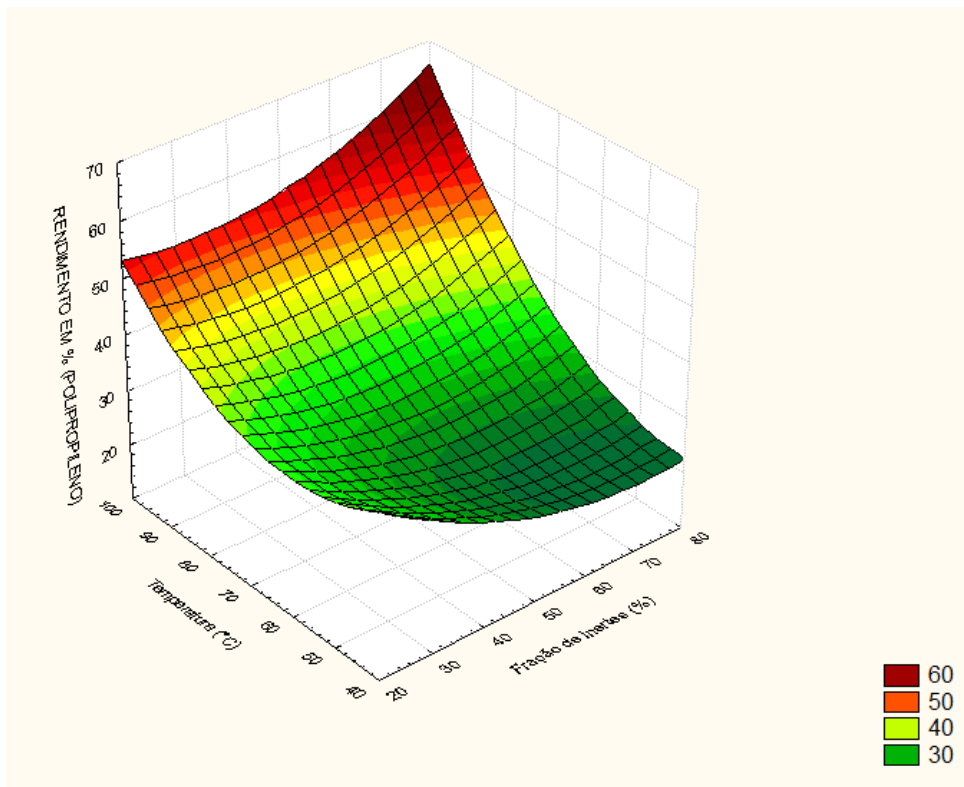


Figura 24 - Superfície de resposta para o PCC utilizando partículas inertes de polipropileno.



Apesar do comportamento não linear, observado nas Figuras 23 a 25, é possível perceber, em geral, a influência positiva da temperatura e da fração de inertes, que já havia sido constatada pelas equações do modelo. Com o aumento de ambas variáveis, houve um efeito positivo no rendimento da secagem. A tendência de ambas superfícies de resposta é que o maior valor de rendimento seja alcançado nas condições $+\alpha$ do planejamento: 21,72% de maltodextrina, 75,03% de fração de inertes e 95,74°C.

Maiores valores de temperatura favorecem o rendimento, pois intensificam o processo de transferência de calor e massa, fazendo com que ocorra uma rápida redução da umidade da polpa alimentada. Além disso, altas temperaturas fazem com que uma menor quantidade de material úmido fique aderido nas superfícies dos inertes e nas estruturas internas no tambor rotatório, gerando menos instabilidade no processo (FREIRE *et al.*, 2012; SANTOS, 2020, NUNES, 2021).

A presença de mais inertes de menor tamanho (12,70 mm de diâmetro) gera um efeito positivo da variável fração de inertes no rendimento da secagem em SRRI. De acordo com as simulações DEM realizadas, é possível perceber que uma maior fração de inertes menores aumenta o número de colisões, favorecendo a secagem. Logo, mesmo em menor proporção, as esferas de maior diâmetro (25,4 mm) também são importantes, pois geram colisões mais fortes, contribuindo também para o processo. Santos (2020) e Nunes (2021) também fizeram conclusões parecidas em trabalhos realizando a secagem de pastas em SRRI.

4.3.2 Otimização

Tendo como objetivo avaliar as condições operacionais que gerem um maior rendimento no processo da secagem, dentro das condições experimentais e limitações do SRRI, foi realizada uma otimização utilizando a técnica de desejabilidade. Esse método leva em consideração os resultados obtidos experimentalmente e busca, através da variação das variáveis independentes, determinar as melhores condições para se obter o maior valor da variável dependente, rendimento.

Com os resultados de cada planejamento composto central relativo a cada tipo de inerte utilizado, bem como das respectivas equações obtidas, apresentadas nas Equações (4.1) a (4.3), foi realizada a otimização para maximização do rendimento na secagem de polpa de acerola em SRRI utilizando a função desejabilidade. As Figuras 25 a 27 demonstram os resultados utilizando partículas inertes de aço inoxidável, de cerâmica e de polipropileno, respectivamente.

Figura 25 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de aço inoxidável na secagem de acerola em SRRI.

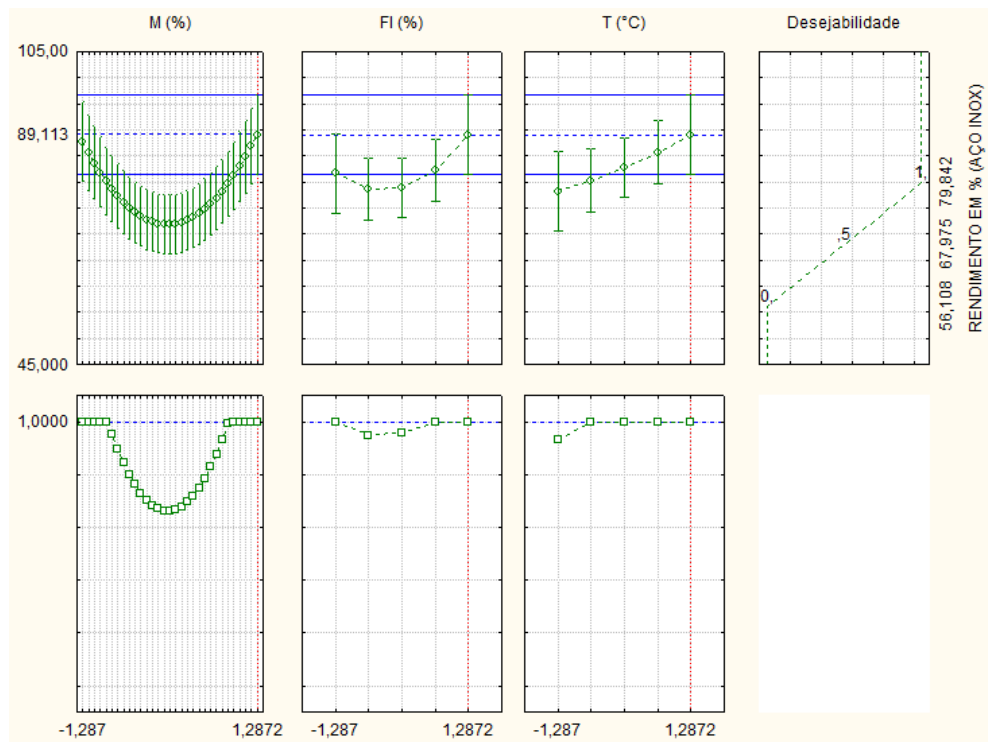


Figura 26 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de cerâmica na secagem de acerola em SRRI.

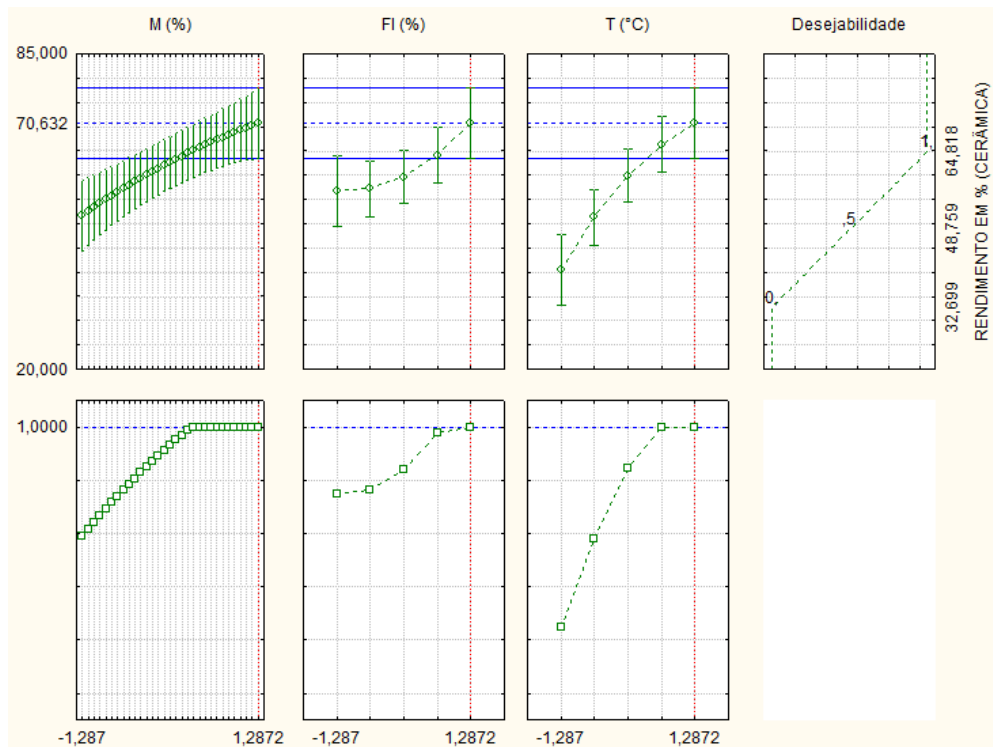
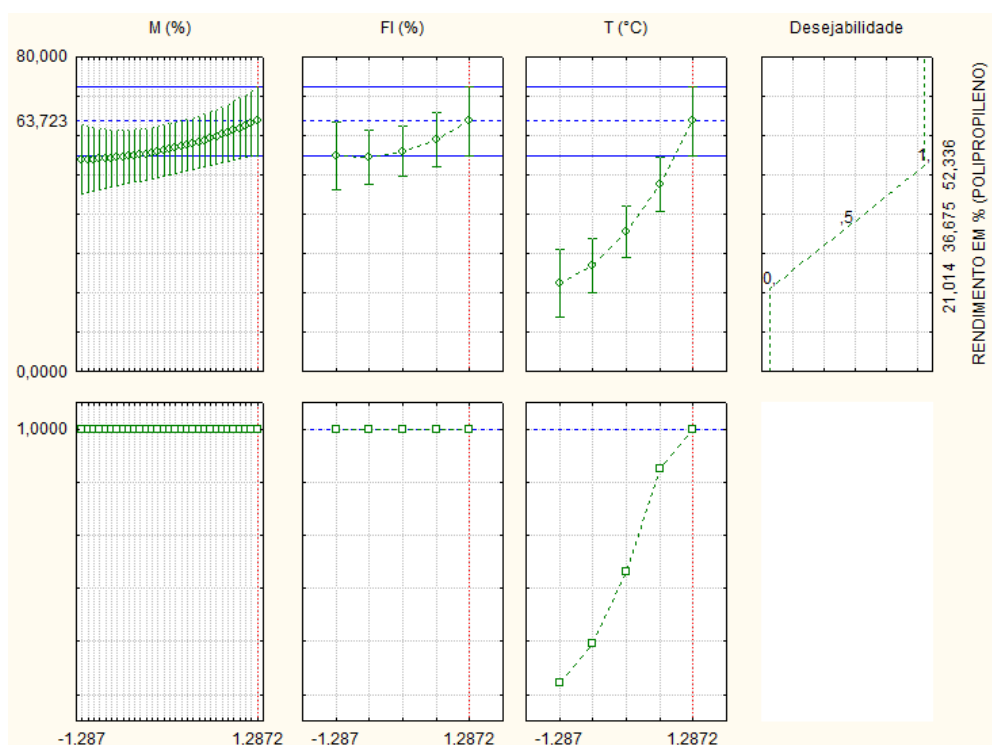


Figura 27 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do PCC utilizando partículas inertes de polipropileno na secagem de acerola em SRRI.



Os resultados obtidos com os níveis ótimos de cada variável independente são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Condições ótimas encontradas pela aplicação da função desejabilidade para maximização do rendimento na secagem de polpa de acerola em SRRI.

| Variáveis independentes | Valores otimizados |
|-------------------------|--------------------|
| Maltodextrina (%) | 21,72% |
| Fração de Inertes (%) | 75,03% |
| Temperatura (°C) | 95,74°C |
| Desejabilidade | 1,0 |

Na Figura 25, para o planejamento usando esferas de aço inoxidável, é possível perceber que valores intermediários de maltodextrina não geraram bons resultados e valores extremos geraram resultados positivos. Para a fração de inertes e a temperatura, os melhores resultados foram obtidos no nível extremo positivo.

Já nas Figuras 26 e 27, para os planejamentos usando partículas inertes de cerâmica e polipropileno, respectivamente, é possível observar uma tendência da curva para o maior nível de todas as variáveis estudadas, sendo os maiores resultados obtidos no nível extremo positivo.

Com os resultados obtidos, foi possível determinar uma condição ótima com a combinação entre maior porcentagem de maltodextrina (21,72%), maior fração de inertes menores (75,03%) e maior temperatura (95,74°C). Essa combinação explora uma situação com maior concentração de aditivo de secagem, que aumenta a temperatura de transição vítrea da polpa e colabora para que ela fique menos aderente e pegajosa. Já a maior presença de inertes de menor diâmetro (12,70 mm), que faz com que o número de colisões no interior do tambor seja bem superior e, por fim, uma temperatura alta, que favorece a troca de calor e acelera a secagem do material alimentado. Sendo assim, foram realizados os experimentos na condição ótima encontrada através da desejabilidade (Tabela 13).

Tabela 13 - Comparação entre os rendimentos obtidos na condição otimizada e na maior condição do PCC para cada tipo de inerte

| Partículas inertes | Rendimentos obtidos na condição ótima | Maiores rendimentos do PCC (condição +1) |
|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| Aço inoxidável | 81,73% | 79,84% |
| Cerâmica | 67,15% | 64,82% |
| Polipropileno | 53,91% | 52,34% |

Para os experimentos realizados nessas condições, obteve-se o rendimento de 81,73% para aço inoxidável, 67,15% para cerâmica e 53,91% para polipropileno. Quando os resultados otimizados foram comparados com os maiores valores de rendimento obtidos no PCC (condição +1 do planejamento), houve um aumento de 3,62% no rendimento para o experimento usando esferas de aço inoxidável, 3,59% para esferas de cerâmica e 3% para as esferas de polipropileno. Esses resultados permitem concluir que o aumento dos valores das variáveis independentes gerou resultados superiores no rendimento da secagem da polpa de acerola em SRRI.

De maneira geral, é possível perceber que o secador rotatório com recheio de inertes foi um equipamento eficiente e bem sucedido na secagem da polpa de acerola. Com esse estudo, foi possível analisar os efeitos das variáveis independentes e como elas afetam no rendimento

da secagem. Além disso, foi possível analisar experimentalmente a influência da densidade das partículas inertes e como elas afetam no rendimento do SRRI. Os resultados positivos mostraram que o produto desidratado de acerola em SRRI possui altos rendimentos, ótima qualidade para ser armazenado e pode ser explorado industrialmente para outros materiais pastosos.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos propostos e diante dos resultados obtidos através do estudo da secagem da polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes, segue então as conclusões apresentadas a seguir:

- Os resultados obtidos através das simulações utilizando a modelagem Lagrangeana da dinâmica de inertes no secador rotatório mostraram-se essenciais para o entendimento do comportamento das partículas dentro do tambor, além de ser fundamental para avaliar a força de colisão, a velocidade de colisão e o número de colisões e a influência desses fatores no rendimento da secagem da polpa de acerola.
- Através dos resultados das simulações realizadas, é possível analisar que houve uma influência direta da densidade do inerte utilizado com o rendimento da secagem. Na simulação em que se obteve os maiores valores de força devido ao menor valor de FI utilizando partículas inertes de aço inoxidável (maior densidade), a força de colisão foi 424,77% maior quando comparada com as partículas inertes de cerâmica (densidade intermediária) e 1209,27% quando comparada com as de polipropileno (menor densidade).
- Das diferentes frações de inertes utilizadas nas simulações DEM, a configuração com 29,97% de esferas inertes menores resultou em uma maior força de colisão, maior velocidade de colisão e menor número de colisões. Em contrapartida, a configuração utilizando 75,03% de partículas inertes menores resultou em valores menos favoráveis de força e de velocidade, porém um número de colisões superior.
- Em relação às caracterizações realizadas para a polpa de acerola, observou-se um elevado teor de umidade e, conseqüentemente, um elevado teor de atividade de água. A polpa possui uma acidez considerável, que foi confirmado com o baixo valor de pH encontrado. Por ser um alimento perecível e sazonal, é de extrema importância a sua conservação adequada. Com a desidratação da polpa e produção do pó, aumenta-se o tempo de prateleira e preserva-se as características essenciais à polpa.
- A secagem em secador rotatório com recheio de inertes resultou em um produto em pó homogêneo, de cor característica à polpa de acerola, em todos os experimentos utilizando as três partículas inertes de densidade diferentes. Em ambos os

planejamentos, os teores de umidade e de atividade de água comprovaram que a secagem em SRRI resultou em uma remoção de umidade suficiente para garantir que não há nenhuma atividade microbiana no produto desidratado obtido.

- Os resultados de rendimento experimentais levam a concluir que a variável que mais influenciou no processo foi a temperatura. O aumento da temperatura intensifica as trocas de calor e massa, favorecendo o processo de secagem. O aumento da fração de inertes menores, de acordo com o que foi analisado pelas simulações DEM, também influenciou diretamente no rendimento.
- Comparando os resultados dos três planejamentos, os experimentos utilizando partículas inertes de aço inoxidável obtiveram maiores valores de rendimento, seguido dos ensaios usando esferas de cerâmica e, por fim, de polipropileno. Esses resultados são justificados pela influência direta da densidade das partículas inertes no rendimento da secagem, comprovado pelos resultados numéricos.
- Os resultados das análises do produto desidratado obtido mostraram que, mesmo nos experimentos utilizando partículas inertes de aço inoxidável, não há presença significativa de resíduos, não afetando na qualidade do produto e sendo seguro para o consumo humano. O potássio é o mineral mais presente nas amostras da polpa e do pó de acerola.
- A otimização realizada, com objetivo de avaliar o maior rendimento da secagem, mostrou que os valores ótimos para as variáveis independentes analisadas foram os valores $+α$ para os três planejamentos: concentração de 21,72% de maltodextrina, fração de inertes menores de 75,03% e uma temperatura de 95,74°C.

No geral, é possível concluir que o uso do secador rotatório com recheio de inertes foi eficiente na secagem da polpa de acerola utilizando diferentes tipos de partículas inertes e possui grande potencial para ser aplicado industrialmente. A junção dos estudos numéricos com os estudos experimentais foi de grande valia para uma análise aprofundada da dinâmica das partículas no interior do tambor e como essa dinâmica influencia na produção do produto desidratado em pó com altos rendimentos.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Uso do secador rotatório com recheio de inertes para a desidratação de outras pastas alimentícias;
- Uso de outros aditivos de secagem a fim de realizar uma comparação com a maltodextrina;
- Análises de qualidade do produto obtido através dos compostos bioativos, como ácido ascórbico, fenólicos e flavonóides;
- Análise nutricional e sensorial do produto obtido;
- Construção de um sistema de isolamento sonoro do tambor rotatório, em vista do barulho emitido pelo SRRI durante o seu funcionamento;
- Análise do consumo energético do SRRI quando comparado com outros equipamentos;
- Automação completa da unidade experimental através de sensores de temperatura, umidade relativa do ar e rotação do tambor, facilitando a coleta dos dados;
- Estudo do torque do motor, com intuito de associar com os resultados da dinâmica do material e fazer uma análise aprofundada do desempenho do equipamento;
- Cálculo do consumo energético necessário para aquecer as partículas inertes (capacitância do leito de partículas);
- Estudo do desgaste e possível substituição das partículas inertes em situações com maior força de colisão.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução da diretoria colegiada - RDC no 273, de 22 de setembro de 2005. **Diário Oficial da União**, 2005.

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 128 p., 2009.

ÁLVARES, C. M. **Secagem de Melão de Cana de Açúcar em Secador Rotatório com Recheio de Inertes**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, 123 p., 1990.

ASTM. **Standard Test Method for Ash in Biomass**. West Conshohocken: ASTM International, 2001.

BARRET, N.; FANE, A. **Drying liquid materials in a spouted bed**. In: *Drying'89*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, p. 415–420, 1989.

BERK, Z. Dehydration. In: **Food Process Engineering and Technology**. 3. ed. Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00022-1>

BHANDARI, B.R.; HARTEL,R.W. **Phase transitions during food powder production and powder stability**. In: ONWULATA,C. *Encapsulated and powdered foods*. Boca Raton:Taylor e Francis, p.261-292, 2005.

BRANDÃO, R. J. **Estudo da Segregação de Material Granular Abordagem Numérica Lagrangeana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 109 p., 2017. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.56>

BUIST, K. A. *et al.* **On an efficient hybrid soft and hard sphere collision integration scheme for DEM**. *Chemical Engineering Science*, v. 153, p. 363–373, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.030>

BURJAILI, M. M. **Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 240 p., 1996.

BURJAILI, M. M.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R. **Secador rotatório com recheio de Inertes**, Registro de Patente PI8804812-8 A2, 14/set/1988. Revista da Propriedade Industrial, n. 1217, p. 36, Rio de Janeiro-RJ, 1994.

BURJAILI, M. M.; LIMAVERDE, J. R.; FINZER, J. R. **Secador rotatório com recheio de inertes: 1 - Desempenho do Equipamento**. Anais do XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia-MG, p. 493-499, 1987.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. **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, 2005.

CELESTINO, S. M. C. **Princípio de Secagem de Alimentos**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.

COLLARES, F. P.; FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. **Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates**. Journal of Food Engineering, v. 61, n. 2, p. 261–267, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00098-0)

COMPANHIA DE ENTREPÓSITOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO (CEAGESP). **Acerola - Guia de identificação**, 2021. Disponível em: Acesso em: 30 nov. 2021.

COUTINHO, A.P.C. **Produção e caracterização de maltodextrinas a partir de amidos de mandioca e batata-doce**. Tese (doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista - Botucatu – SP, 151p., 2007.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies.** v. **Géotechniq**, n. 1, p. 47–65, 1979. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>

DANTAS, T. N. P. *et al.* **Study of model application for drying of pulp fruit in spouted bed with intermittent feeding and accumulation.** *Drying Technology*, v. 36, n. 11, p. 1349–1366, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402785>

DERRINGER, G., SUICH, R. **Simultaneous Optimization of Several Response Variables.** *Journal of Quality Technology*, 12, 214-219, 1980.

DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. **Comparison of Contact-Force Models for the Simulation of Drying Technology.** *Collisions in DEM-Based Granular Flow Codes. Chem. Eng. Sci.* 59, 525–541, 2004.

Diário do Nordeste. **Acerola: veja benefícios, como plantar e como fazer suco**, 2022. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ser-saude/acerola-veja-beneficios-como-plantar-e-como-fazer-suco-1.3240284/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

DINIZ, J. V. **Sistemas de colheita na cultura da acerola: estudo operacional (Malpighia emarginata. DC).** Dissertação (Engenharia Agrícola) – Fortaleza – CE: Universidade Federal do Ceará, 2020.

FELLOWS, P. J. **Food Processing Technology: Principles and Practice.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

FINZER, J. R. D.; BURJAILI, M. M.; LIMAVERDE, J. R. **Alternativa tecnológica de secagem de materiais pastosos: secador rotatório com recheio de inertes.** *Ciência & Engenharia*, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), v. 2(2), p. 97-120, 1993.

FREIRE, J. T. *et al.* **A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium.** *Drying Technology*, v. 30, n. 4, p. 330–341, 2012. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.638149>

FREITAS, C. A. S. DE *et al.* **Acerola: produção, composição, aspectos nutricionais e produtos.** Revista Brasileira de Agrociência, v. 12, n. 4, p. 395–400, 3 nov. 2006. <https://doi.org/10.18539/cast.v12i4.4688>.

FRIES, L. *et al.* **Collision dynamics in fluidised bed granulators: A DEM-CFD study.** Chemical Engineering Science, v. 86, p. 108–123, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.06.026>

GRBAVCIC, Z. B.; ARSENIJEVIC, Z. L.; GARIC-GRULOVIC, R. V. **Drying of slurries in fluidized bed of inert particles.** Drying Technology, v. 22, n. 8, p. 1793–1812, 2004. <https://doi.org/10.1081/DRT-200032742>

HONORATO, G. C. **Concepção de um Secador Rotatório para Secagem do Cefalotórax do Camarão.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, 185 p. 2006.

Institute of Medicine. **Dietary Reference intakes for vitamin A, vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium and Zinc.** Washington: The National Academy Press, 2001.

JAYASUNDERA, M.; ADHIKARI, B.; ADHIKARI, R.; ALDRED, P. **The effect of protein types and low molecular weight surfactants on spray drying of sugar-rich foods.** Food Hydrocolloids, v. 25, p. 459-469, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.07.021>

JULIANO, P.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications.** Annual Review of Food Science and Technology, v. 1, p. 211-239, 2010. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124155>

KROKIDA, M.; MARINOS-KOURIS, D.; MUJUMDAR, A. S. **Rotary Drying.** In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). . Handbook of Industrial Drying. 3. ed. [s.l.] CRC Press, 2006.

LIMA, et.al. **Caracterização e avaliação de frutos de aceroleira**. Fitotecnia. Rev. Bras. Frutic. 36 (3), 2014. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-336/13>

LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2017. <https://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.98>

LIMAVERDE JR, J. R. **Secador Rotatório com Recheio de Inertes Aplicado a Secagem de Materiais Pastosos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, 78 p., 2000.

LISBOA, M. H. **Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, 121 p., 2005.

MANI, S.; SOKHANSANJ, S. **Rotary Drum Dryers**. Em: HUI, Y. H.; CLARY, C.; FARID, M. M.; FASINA, O. O.; NOOMHORM, A.; WELTI-CHANES, J., Food Drying Science and Technology, Cap. 5, p. 99-126, DEStech Publication, Inc, Lancaster-EUA, 2008.

MARANHÃO, C. M. C. **Caracterização física, físico-química e química do fruto da aceroleira (Malpighia emarginata DC), variedade Okinawa, durante o seu desenvolvimento**. Dissertação (Ciência e Tecnologia de Alimentos) – João Pessoa – PB: Universidade Federal da Paraíba, 2010.

MOREIRA, D. B, DIAS, T. de J, ROCHA, V. C. da, & CHAVES, A. C. T. A. **Determinação do teor de cinzas em alimentos e sua relação com a saúde**. *Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação*, 7(10), 3041–3053, 2021.

MOURA, B. D. **Automação de um Sistema Rotatório para Secagem do Rejeito de Maracujá**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, 76 p. 2009.

MOURA, B. D. **Estudo da Dinâmica de Secagem em um Secador Rotatório com Alimentação Intermitente**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN, 123 p. 2016.

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. **Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E. globulus**. Silva Lusitana, v. 10, n. 2, p. 207–216, 2002.

MUJUMDAR, A. S. **Principles, Classification, and Selection of Dryers**. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. 3. ed. CRC Press, 2006.

NUNES, G. **Estudo numérico da dinâmica de partículas em secador rotatório não-convencional e sua relação com a desidratação de polpa de acerola**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, 102 p., 2021.

Organização Mundial de Saúde (OMS). Cromo. In: **Elementos traço na nutrição e saúde humanas**. São Paulo: Rocca, 1998;135-8.

PADILLA, R. Y. C. **Produção de Farinha de Banana em Secador Rotativo com Recheio de Inertes**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, 116 p., 2003.

PENG, B. **Discrete Element Method (DEM) contact models applied to pavement Simulation**. Thesis (Master of Science) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2014.

PERAZZINI, M, T, B. **Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas**. Tese de doutorado em Engenharia Química. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos - São Carlos – SP, 115 p., 2015.

ROSS, J. A.; KASUM, C. M. DIETARY FLAVONOIDS: **Bioavailability, Metabolic Effects, and Safety**. Annual Review of Nutrition, v. 22, p. 19–34, 28 nov. 2003. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.NUTR.22.111401.144957>

SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S. **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, 2008.

SANTOS, R. L. **Estudo da fluidodinâmica de inertes em secador rotatório não-convencional e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2020. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.213>.

SANTOS, R. L. *et al.* **Analysis of particles collisions in a newly designed rotating dryer and its impact on the camu-camu (*Myrciaria dubia*) pulp drying**. Drying Technology, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1915795>.

Santos, T. da S. R. dos., & Lima, R. A. (2020). **Cultivo de *Malpighia emarginata* L. no Brasil: uma revisão integrativa**. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 8(4), 333–338.

SILVA, N. C. *et al.* **Dehydration of microalgae *Spirulina platensis* in a rotary drum with inert bed**. Powder Technology, v. 351, p. 178–185, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.025>

SILVA, N. C. **Uso de metodologias alternativas na secagem de diferentes materiais visando a preservação de compostos bioativos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2066>

SOUSA, E. P. *et al.* **Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 21, (7), p. 493-498, 2017.

STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. **Modern developments in drying of pastelike materials.** In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). *Advances in Drying*. Washington: McGraw Hill, 1983. p. 193–231.

THORNTON, C.; RANDALL, C. W. **Applications of Theoretical Contact Mechanics to Solid Particle System Simulation.** *Studies in Applied Mechanics*, v. 20, p. 133–142, 1 jan. 1988. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70523-5.50023-0>

TONON, R. V., BRABET, C.; HUBINGER, M. D. **Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents.** *Food Research International*, v. 43(3), p. 907-914, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>

VIEIRA, G. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

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.

YANG, R. Y.; ZOU, R. P.; YU, A. B. **Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum.** *Powder Technology*, v. 130, n. 1–3, p. 138–146, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00257-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00257-7)