



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



**ESTUDO NUMÉRICO DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM  
SECADOR ROTATÓRIO NÃO-  
CONVENCIONAL E SUA RELAÇÃO COM A DESIDRATAÇÃO DE  
POLPA DE ACEROLA**

**Gabriela Nunes**

Uberlândia – MG

2021



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



**ESTUDO NUMÉRICO DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM  
SECADOR ROTATÓRIO NÃO-  
CONVENCIONAL E SUA RELAÇÃO COM A DESIDRATAÇÃO DE  
POLPA DE ACEROLA**

**Gabriela Nunes**

Orientadores:

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo

Prof. Dr. Cláudio 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

2021

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

N972 2021	<p>Nunes, Gabriela, 1996- Estudo numérico da dinâmica de partículas em secador rotatório não-convencional e sua relação com a desidratação de polpa de acerola [recurso eletrônico] / Gabriela Nunes. - 2021.</p> <p>Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo. Coorientador: Claudio Roberto Duarte. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.645">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.645</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza, 1961-, (Orient.). II. Duarte, Claudio Roberto, 1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 17/2021, PPGEQ				
Data:	03 de dezembro de 2021	Hora de início:	09:30	Hora de encerramento:	10:13
Matrícula do Discente:	11922EQU005				
Nome do Discente:	Gabriela Nunes				
Título do Trabalho:	Estudo numérico da dinâmica de partículas em secador rotatório não-convencional e sua relação com a desidratação de polpa de acerola				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Secagem de resíduos de frutas e vegetais: estudo experimental e de Fluidodinâmica Computacional (CFD)				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Bruna de Souza Nascimento - DCA/UFLA; Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU; Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, orientador 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 senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

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 03/12/2021, às 10:14, 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 03/12/2021, às 10:14, 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 **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/12/2021, às 10:15, 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 **Bruna de Souza Nascimento, Usuário Externo**, em 03/12/2021, às 10:37, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3221215** e o código CRC **A58E698C**.

---

*Dedico aos meus amados pais, Clairton e Holegma.*

## AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus, pela vida e pela luz que sempre me guia.

Agradeço aos meus pais, Clairton e Hologma, pelo amor e carinho incondicionais. Sou imensamente grata pelo apoio e por me ajudarem em tudo, apesar da distância.

Ao Marcus, meu namorado, por estar sempre ao meu lado com amor, paciência e alegria. Sua companhia foi essencial durante essa etapa.

Aos meus familiares queridos, por não permitirem que eu me sentisse sozinha nessa caminhada.

Aos amigos de longa data e às novas amizades que o mestrado me trouxe, pelo compartilhamento de conhecimentos, conselhos e risadas. Carol, Silvio, Karol, Gisele, Pedro e Leo, vocês foram especiais nesse período!

A todos os colegas do LSP e da FEQUI, pelo convívio e pela ajuda na execução deste trabalho. Em especial, Neiton, Rodolfo, Rondinelli, Raphael, Glaucia, Grazi e Anderson por contribuições em etapas importantes.

Ao professor Washington, responsável pelo Laboratório de Tribologia e Materiais da FEMEC, pela parceria na realização das análises de ângulo de contato. E à Letícia, pelo auxílio durante esse processo.

Aos meus orientadores, professores Marcos Barrozo e Claudio Duarte, pelos ensinamentos, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos difíceis.

A todos os professores que participaram da minha formação, em cada fase da minha vida, permitindo que eu chegasse até aqui.

À FEQUI e à FAPEMIG, pela infraestrutura e pelos recursos financeiros que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Programa Proteger-se da UFU, pelo atendimento terapêutico durante o período de isolamento social.

E a todos que cruzaram meu caminho e, de alguma forma, impactaram na minha vida, ajudando a me transformar na pessoa que sou hoje.

*“Você não acorda um belo dia e se transforma em borboleta  
- crescer é um processo”*

*Rupi Kaur*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1. Justificativas.....	18
1.2. Objetivos.....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1. Acerola.....	21
2.2. Compostos Bioativos.....	23
2.2.1. Compostos fenólicos.....	24
2.2.2. Ácido ascórbico.....	25
2.3. Secagem.....	26
2.3.1. Secagem de materiais pastosos.....	27
2.3.2. Uso de inertes na secagem de pastas.....	28
2.3.3. Aditivos de secagem.....	30
2.3.4. Secadores rotatórios convencionais.....	31
2.3.5. Secador rotatório com recheio de inertes.....	34
2.4. Modelagem Lagrangeana do Escoamento Granular – Método dos Elementos Discretos.....	36
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
3.1. Polpa de acerola.....	43
3.2. Análises físico-químicas.....	44
3.2.1. Umidade e atividade água.....	44
3.2.2. Densidade real.....	44
3.2.3. pH.....	45
3.2.4. Cinzas.....	45
3.2.5. Ângulo de contato.....	45
3.2.6. Análises de compostos bioativos.....	46
3.3. Secador Rotatório com Recheio de Inertes (SRRI).....	48
3.4. Análise numérica da dinâmica de colisão entre partículas inertes.....	52

3.4.1. Análise dos dados computacionais utilizando uma Resposta Combinada (RC).....	56
3.5. Ensaio de secagem .....	57
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
4.1. Estudo numérico e sua relação com o rendimento de secagem.....	60
4.2. Caracterização da polpa de acerola .....	68
4.3. Secagem da polpa de acerola em SRRI.....	70
4.3.1. Rendimento de secagem.....	73
4.3.2. Compostos bioativos .....	76
4.3.3. Otimização multiresposta.....	81
<b>5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....</b>	<b>84</b>
5.1. Conclusão .....	84
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	86
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE A – Casos simulados .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Acerola ( <i>Malpighia emarginata</i> DC).....	22
Figura 2.2 - Estrutura química de uma molécula de flavonoide.....	25
Figura 2.3 - Mecanismo de secagem sobre partículas inertes. ....	29
Figura 2.4 - Ângulo de contato formado num sistema sólido-líquido-vapor. ....	30
Figura 2.5 - Esquema simplificado de um secador rotatório de aquecimento direto. ....	32
Figura 2.6 - Tipos comuns de suspensores em secadores rotatórios. ....	33
Figura 2.7 - Algoritmo empregado nas simulações DEM. ....	38
Figura 3.1 - Polpa de acerola. ....	43
Figura 3.2 - Equipamento utilizado para a determinação do ângulo de contato pelo método da gota séssil e detalhe da medição feita no software <i>Surftens</i> . ....	46
Figura 3.3 - Representação esquemática da unidade experimental contendo o secador rotatório com recheio de inertes. ....	48
Figura 3.4 - Secador Rotatório com Recheio de Inertes (SRRI) e alguns dispositivos em destaque. ....	49
Figura 3.5 - Sistema de monitoramento da velocidade de rotação do tambor (a) e IDE do <i>Arduino</i> (b). ....	50
Figura 3.6 - Representação esquemática do tambor rotatório (a) e vista de seu interior com inertes em detalhe (b). ....	51
Figura 3.7 - Geometria do tambor rotatório com suspensores contínuos de 25 mm (a), com suspensores alternados de 25 mm (b) e com suspensores contínuos de 13 mm (c). ....	55
Figura 3.8 - Esquema simplificado do processamento da polpa de acerola em SRRI para obtenção de um produto na forma de pó. ....	59
Figura 4.1 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 4 suspensores.....	60
Figura 4.2 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 6 suspensores.....	61
Figura 4.3 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 10 suspensores.....	61
Figura 4.4 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 3 suspensores.....	62
Figura 4.5 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 2 suspensores.....	62

Figura 4.6 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 5 suspensores.....	63
Figura 4.7 - Resultados de resposta combinada para todos os casos simulados. ....	64
Figura 4.8 - Efeitos normalizados para o número de colisões.....	66
Figura 4.9 - Efeitos normalizados para a força de colisão.....	66
Figura 4.10 - Resultados da análise de ângulo de contato.....	69
Figura 4.11 - Pó produzido pela desidratação de polpa de acerola em SRRI. ....	70
Figura 4.12 - Atividade de água em função do teor de umidade do pó produzido através da secagem em SRRI.....	72
Figura 4.13 - Rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais do planejamento composto central .....	74
Figura 4.14 - Superfícies de resposta para o rendimento de secagem em função das variáveis independentes. ....	75
Figura 4.15 - Superfícies de resposta para o teor de fenólicos totais (TPC) em função das variáveis independentes.....	77
Figura 4.16 - Superfícies de resposta para o teor de flavonoides totais (TFC) em função das variáveis independentes.....	78
Figura 4.17 - Superfícies de resposta para o teor de ácido ascórbico (AA) em função das variáveis independentes.....	79
Figura 4.18 - Comparação entre teores de compostos bioativos encontrados na polpa e nos pós produzidos em SRRI.....	80
Figura 4.19 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do planejamento de secagem de polpa de acerola em SRRI. ....	82

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1- Parâmetros de entrada para as simulações DEM.....	53
Tabela 3.2 - Níveis das variáveis no planejamento $2^k$ .....	55
Tabela 3.3 - Planejamento Composto Central para a secagem de polpa de acerola em SRRI.	57
Tabela 4.1 - Valores dos fatores das cinco configurações que apresentaram as melhores respostas combinadas. ....	65
Tabela 4.2 - Valores dos resultados das cinco configurações que apresentaram as melhores respostas combinadas. ....	65
Tabela 4.3 - Caracterização da polpa de acerola. ....	68
Tabela 4.4 - Resultados do planejamento composto central realizado para análise do rendimento de secagem da polpa de acerola e dos teores de fenólico totais, flavonoides totais e ácido ascórbico no produto obtido. ....	71
Tabela 4.5 - Condições ótimas encontradas pela otimização da função desejabilidade aplicada aos dados experimentais obtidos. ....	82
Tabela 4.6 - Resultados experimentais e preditos na condição otimizada. ....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

AA	Teor de ácido ascórbico (mg/100 g amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
AS	Altura do suspensor	$M^0L^1T^0$
$d_{NC}$	Desejabilidade referente ao número de colisões	$M^0L^0T^0$
$d_{FC}$	Desejabilidade referente à força de colisão	$M^0L^0T^0$
E	Grau de enchimento	$M^0L^0T^0$
$E^*$	Módulo de Young equivalente	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$e_p$	Coefficiente de restituição referente à colisão da partícula	$M^0L^0T^0$
FC	Força de colisão	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{c,n,ij}$	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)	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{ij}$	Força entre partículas $i$ e $j$	$M^1L^1T^{-2}$
$F_n$	Força normal	$M^1L^1T^{-2}$
$F_n^d$	Força normal de amortecimento	$M^1L^1T^{-2}$
$F_t$	Força tangencial	$M^1L^1T^{-2}$
$F_t^d$	Força tangencial de amortecimento	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{t,max}^d$	Força tangencial máxima de amortecimento	$M^1L^1T^{-2}$
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 $i$	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$I_i$	Momento de inércia da partícula $i$	$M^1L^2T^0$
M	Concentração de maltodextrina	$M^0L^0T^0$
$m^*$	Massa equivalente	$M^1L^0T^0$
$m_i$	Massa da partícula $i$	$M^1L^0T^0$
NC	Número de colisões	$M^0L^0T^0$
$n_p$	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	Velocidade de rotação	$M^0L^0T^{-1}$
RC	Resposta combinada	$M^0L^0T^0$
$S_n$	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	$M^0L^0T^0\theta^1$
TFC	Teor de flavonoides totais (mg/100g de amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
TPC	Teor de fenólicos totais (mg/100g de amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
TS	Tipo de suspensor	$M^0L^0T^0$
$U$	Teor de umidade	$M^0L^0T^0$
$V$	Volume	$M^0L^3T^0$
$v_i$	Velocidade da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$
$v_n^{rel}$	Velocidade relativa normal	$M^0L^1T^{-1}$
$v_t^{rel}$	Velocidade relativa tangencial	$M^0L^1T^{-1}$
$x_i$	Posição da partícula $i$	$M^1L^0T^0$
$\beta$	Coefficiente de amortecimento	$M^1L^0T^{-1}$
$\theta_i$	Posição angular da partícula $i$	$M^0L^0T^0$
$\delta_n$	Sobreposição normal das partículas	$M^0L^1T^0$
$\delta_t$	Sobreposição tangencial das partículas	$M^0L^1T^0$
$\varepsilon$	Porosidade do leito	$M^0L^0T^0$
$\mu_s$	Coefficiente de atrito estático	$M^0L^0T^0$
$\rho_s$	Densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
$\tau_{ij}$	Torque entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^2T^2$
$\nu_i$	Razão de Poisson da partícula $i$	$M^0L^0T^0$
$\omega_i$	Velocidade angular da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$

## RESUMO

A acerola (*Malpighia emarginata* DC) é um fruto conhecido por ser uma das maiores fontes naturais de vitamina C, além de possuir outros compostos benéficos à saúde humana, sendo aplicada não só no setor alimentício, mas também no ramo farmacêutico. No entanto, a alta perecibilidade do fruto *in natura* acarreta em desafios nas etapas pós-colheita, de modo que um processamento adequado é necessário para garantir o aproveitamento do seu potencial nutricional. Nesse sentido, o secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) é uma alternativa para conservação da polpa de acerola, fornecendo produtos na forma de pó, com baixa degradação de compostos bioativos. Neste equipamento, os inertes são aquecidos pelo ar de secagem e os choques entre eles promovem a fragmentação da polpa que se secou na superfície dos sólidos para formação do pó. O movimento das partículas inertes ocorre pela presença de suspensores nas paredes internas do tambor e essa dinâmica tem grande impacto na performance do secador. Diante disso, este trabalho teve como objetivo estudar experimental e numericamente os efeitos de diferentes variáveis operacionais no desempenho de um SRRI para a desidratação de polpa de acerola. No estudo numérico, foram realizadas simulações, por meio do método dos elementos discretos (DEM), que forneceram informações sobre a força de colisão e o número de colisões partícula-partícula e partícula-parede. Tais simulações seguiram planejamentos  $2^k$  para diferentes números de suspensores e tinham como variáveis independentes a velocidade de rotação e o grau de enchimento do tambor, a fração entre os sólidos inertes de 12,70 e 25,40 mm de diâmetro, bem como a altura e o tipo dos suspensores. As respostas DEM obtidas foram combinadas numa única resposta, baseada na função desejabilidade, que permitiu a classificação dos resultados de todas os casos simulados (128) no intervalo entre 0 e 1. Dessa análise, verificou-se que a melhor resposta combinada correspondia à geometria atual do secador (tambor com 3 suspensores contínuos de 25 mm de altura), o que comprovou que as decisões de projeto do equipamento foram adequadas. Também, constatou-se que valores elevados de rotação maximizaram a força de colisão e não tiveram influência significativa no número de colisões; enquanto o aumento do grau de enchimento favoreceu o número de colisões e teve pequeno efeito na força de colisão. Desse modo, para os experimentos, fixou-se as variáveis rotação e grau de enchimento do tambor nos valores mais altos explorados numericamente. O estudo experimental iniciou-se com a caracterização físico-química da polpa, que envolveu, entre outras análises, a determinação do ângulo de contato entre a polpa de acerola – com adição de diferentes concentrações de um agente carreador (maltodextrina) – e a superfície dos inertes cerâmicos. Os ensaios de secagem foram realizados com base em um planejamento composto central (PCC), que avaliou os efeitos dos fatores temperatura do ar de secagem, fração entre inertes e concentração de maltodextrina, no rendimento de secagem e nos teores de compostos bioativos (fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico). Para todas as condições do PCC, o resultado máximo de atividade de água obtido para os pós produzidos foi de 0,103, o que garante a inibição de atividade microbiana durante armazenamento. O rendimento de secagem foi influenciado positivamente pela elevação da temperatura e da fração entre inertes, isto é, pela presença de mais inertes de menor diâmetro; e a adição de maltodextrina foi benéfica em concentrações próximas de um valor médio. Em relação aos compostos bioativos, a concentração de maltodextrina foi a variável que teve maior influência, pela diluição dos demais compostos no alimento. A otimização multiresposta, realizada em busca de maior rendimento e menor degradação de compostos bioativos, resultou em concentração de 6,28% de maltodextrina, fração entre inertes de 46,19% e temperatura de 77,2°C, e obteve-se, para o experimento realizado nesta condição, os melhores teores de compostos bioativos e rendimento de 59,87%. Portanto, concluiu-se que o SRRI foi eficiente para a desidratação de polpa de acerola e tem grande potencial para ser explorado industrialmente, uma vez que produziu, com elevados rendimentos, pós de acerola com características apreciáveis.

**Palavras-chave:** Secador Rotatório com Recheio de Inertes; Colisões entre Partículas; Método dos Elementos Discretos (DEM); Compostos Bioativos; *Malpighia emarginata* DC.

## ABSTRACT

Acerola (*Malpighia emarginata* DC) is a fruit known for being one of the greatest natural sources of vitamin C, in addition to having other compounds beneficial to human health, being applied not only in the food sector, but also in the pharmaceutical sector. However, the high perishability of the fresh fruit poses challenges in the post-harvest stages, so that an adequate processing is necessary to ensure the use of its nutritional potential. In this sense, the rotary dryer with inert bed is an alternative for preserving acerola pulp, providing products in powder form, with low degradation of bioactive compounds. In this equipment, the inerts are heated by the drying air and the shocks between them promote the fragmentation of the pulp that has dried on the surface of the solids to form the powder. The movement of inert particles occurs due to the presence of flights on the drum's inner walls and this dynamic has a great impact on the dryer's performance. Therefore, this work aimed to study experimentally and numerically the effects of different operational variables on the performance of a rotary dryer with inert bed for the dehydration of acerola pulp. In the numerical study, simulations were performed using the discrete element method (DEM), which provided information on the collision force and the number of particle-particle and particle-wall collisions. These simulations followed  $2^k$  factorial designs for different numbers of hangers and had as independent variables the rotation speed and the filling degree of the drum, the fraction between the aggregates of 12.70 and 25.40 mm in diameter, the height and type of hangers. The DEM responses obtained were combined into a single response, based on the desirability function, which allowed the classification of the results of all simulated cases (128) in the range between 0 and 1. From this analysis, it was found that the best combined response corresponded to the geometry current of the dryer (drum with 3 continuous 25 mm high hangers), which proved that the equipment design decisions were appropriate. Also, it was found that high rotation values maximized the collision force and had no significant influence on the number of collisions; while increasing the filling degree favored the number of collisions and had little effect on the collision force. Thus, for the experiments, the variables rotation and drum filling degree were set at the highest numerically explored values. The experimental study began with the physical-chemical characterization of the pulp, which involved, among other analyses, the determination of the contact angle between the acerola pulp – with the addition of different concentrations of a carrier agent (maltodextrin) – and the surface of ceramic inerts. The drying tests were carried out based on a central composite design, which evaluated the effects of the factors drying air temperature, fraction between inerts and maltodextrin concentration, on the drying yield and on the contents of bioactive compounds (phenolics, flavonoids and ascorbic acid). For all the studied conditions, the maximum result of water activity obtained for the produced powders was 0.103, which guarantees the inhibition of microbial activity during storage. The drying yield was positively influenced by the increase in temperature and the fraction between inerts, that is, by the presence of more inerts of smaller diameter; the addition of maltodextrin was beneficial at concentrations close to a medium value. In relation to bioactive compounds, the concentration of maltodextrin was the variable that had the greatest influence, due to the dilution of the other compounds in the food. The multi-response optimization, performed in search of a higher yield and less degradation of bioactive compounds, resulted in a concentration of 6.28% of maltodextrin, a fraction between inerts of 46.19% and a temperature of 77.2°C, and for the experiment carried out in this condition, the best levels of bioactive compounds and a yield of 59.87% were obtained. Therefore, it was concluded that rotary dryer with inert bed was efficient for the dehydration of acerola pulp and has great potential to be industrially exploited, since it produced, with high yields, acerola powders with appreciable characteristics.

**Keywords:** Rotary Dryer with Inert Bed; Particles Collisions; Discrete Element Method (DEM); Bioactive Compounds; *Malpighia emarginata* DC.

## 1. INTRODUÇÃO

Nesta seção são apresentadas as justificativas e os objetivos definidos para o desenvolvimento do estudo sobre a dinâmica de partículas inertes em um secador rotatório não-convencional e a aplicação deste equipamento para a desidratação de polpa de acerola.

### 1.1. Justificativas

A acerola (*Malpighia emarginata DC*) é o fruto da aceroleira, um arbusto nativo dos trópicos e subtropicais americanos, e chama atenção por ser uma das maiores fontes naturais de vitamina C. O conteúdo de ácido ascórbico desta fruta pode chegar a representar 5% de sua polpa – cerca de 80 vezes o encontrado em laranjas e limões. Assim, a acerola tem um grande potencial benéfico à saúde humana e sua demanda no mercado aumentou nos últimos anos, não apenas no setor alimentício, como também no setor farmacêutico e de cosméticos. No entanto, pelo seu elevado teor de umidade, os frutos da aceroleira são perecíveis e apresentam vida útil de 2 a 3 dias em temperatura ambiente, sendo comumente congelados ou transformados em produtos como polpas e sucos. A secagem pode ser também utilizada como uma alternativa nesse sentido, por ser uma das operações unitárias mais importantes para a conservação de alimentos (RIBEIRO; DE FREITAS, 2020; UCHIDA et al., 2011; VENDRAMINI; TRUGO, 2000).

Em linhas gerais, o processo de secagem se dá pela retirada da umidade dos materiais, através da transferência simultânea de calor e massa, reduzindo a ocorrência de reações químicas que provocam deterioração dos produtos. Há uma gama enorme de técnicas que são empregadas na secagem de alimentos, resultando, por via de regra, em um produto com peso e volume reduzidos, o que facilita o transporte e o armazenamento. Além disso, a secagem pode ser empregada para processamento de vários tipos de materiais, em diferentes formas de apresentação. E para garantir que os produtos obtidos conservem propriedades nutricionais e sensoriais, é necessário que o equipamento e a metodologia aplicados sejam adequados às especificações do material a ser seco (BARROS; FREIRE, 2019; BURJAILI, 1996).

No que tange a secagem materiais pastosos, ainda existem lacunas a serem preenchidas, uma vez que a ampla variação nas características físicas das pastas torna a secagem desses materiais desafiadora e requer estudos que agreguem conhecimentos teóricos e abordagens empíricas. Diante disso, grupos de pesquisa interessados em aproveitar esses materiais pastosos elaboram estudos pautados na otimização e na combinação de metodologias já existentes, com

o intuito de desenvolver equipamentos não convencionais que proporcionem melhores condições de secagem, bem como uma redução nos custos de operação e a obtenção de produtos de maior qualidade (FREIRE et al., 2012; SILVA, 2019).

O emprego de partículas inertes para a secagem de materiais pastosos é uma opção interessante já estudada em equipamentos como leito de jorro e competitiva com métodos como *spray-drying*. O uso de sólidos inertes como suporte para a secagem resulta em produtos na forma de pó e possibilita a ocorrência de altas taxas de transferência de calor e massa, o que é ideal para a secagem de materiais com elevado teor de umidade. O mecanismo envolvido nesta técnica é o recobrimento da superfície dos inertes com uma fina camada do material úmido, que vai perdendo umidade até ser removida através de choques entre os inertes e também com as paredes do equipamento. Simultaneamente ocorre a moagem do material seco e o pó é elutriado pelo ar de secagem até um dispositivo de separação, como um ciclone por exemplo (FREIRE et al., 2012).

Nesse âmbito, um secador não convencional muito promissor é o secador rotatório com recheio de inertes desenvolvido na FEQUI/UFU, devido a uma combinação oportuna de tecnologias. Secadores rotatórios já são bastante conhecidos e utilizados industrialmente, pelo seu design simples e sua versatilidade de aplicações, e a inclusão de um recheio de inertes nesse tipo de equipamento permite ele opere na secagem de materiais pastosos. Além disso, o processo de secagem neste secador é favorecido pela presença de suspensores longitudinais que, com auxílio da rotação do tambor, promovem a movimentação dos inertes. A secagem do material úmido se dá tanto por convecção como por condução, e o ar quente é responsável pelo arraste somente do pó produzido, o que acarreta uma economia energética em comparação com a secagem em leito de jorro e leito fluidizado, em que o ar tem o papel de movimentar os inertes (BURJAILI, 1996).

Em vista disso, a aplicação do secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) para a secagem de polpas de frutas, como a acerola, tem grande potencial, não só pelas vantagens citadas, mas também pelo fato de este ser um equipamento ainda sem aplicação industrial, porém com possibilidades para tal utilização. Nesse caso, estudos exploratórios são muito importantes para garantir a obtenção de produtos de qualidade, com baixa degradação de compostos bioativos. Para isso, é necessário que sejam avaliadas desde as propriedades da polpa até condições operacionais relacionadas ao funcionamento do secador, e as simulações numéricas têm uma notável contribuição nesse sentido.

O uso de ferramentas computacionais auxilia na superação de limitações experimentais e permite que a dinâmica das partículas inertes no interior do tambor seja compreendida. O

método dos elementos discretos (DEM), que utiliza a abordagem Lagrangeana, é amplamente empregado para a simulação de materiais particulados em tambores rotatórios e se baseia no acompanhamento individual de cada partícula. Essa abordagem contabiliza as interações de cada partícula com as demais e destas com as paredes do equipamento, por meio de leis de contato e, conseqüentemente, é aplicado um balanço de forças. Assim, as simulações DEM são capazes de favorecer o entendimento do desempenho do secador pelo fornecimento de dados referentes aos choques entre partículas, como a força envolvida nessas colisões e a frequência em que elas ocorrem (NASCIMENTO, 2018; SANTOS et al., 2021).

Ante o exposto, no tópico seguinte são apresentados os objetivos do trabalho.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo geral do trabalho foi estudar experimental e numericamente os efeitos de diferentes variáveis operacionais no desempenho de um secador rotatório com recheio de inertes para a desidratação de polpa de acerola. E citando os objetivos específicos:

- Avaliar numericamente, por meio da abordagem Lagrangeana, a dinâmica de partículas inertes no interior de um tambor rotatório não-convencional;
- verificar a influência de variáveis operacionais e geométricas no número de colisões e na força de colisão entre as partículas inertes através de simulações DEM, bem como sua relação com o desempenho do secador;
- verificar, experimentalmente, a influência de variáveis do processo no rendimento de secagem e na qualidade do produto final, em termos dos teores de compostos bioativos (fenólicos totais, flavonoides totais e ácido ascórbico).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da acerola, dos compostos bioativos, da operação unitária de secagem, do secador rotatório com recheio de inertes e da abordagem numérica Lagrangeana.

### 2.1. Acerola

A acerola (*Malpighia emarginata* DC) é uma fruta de tropical, também conhecida popularmente como cereja das Antilhas, devido à sua origem nesta região da América Central. Alguns dos benefícios da acerola à saúde humana foram descobertos na década de 40, quando cientistas porto-riquenhos constataram um alto teor de vitamina C neste fruto (BARBOZA; TAVARES; MELO, 1996).

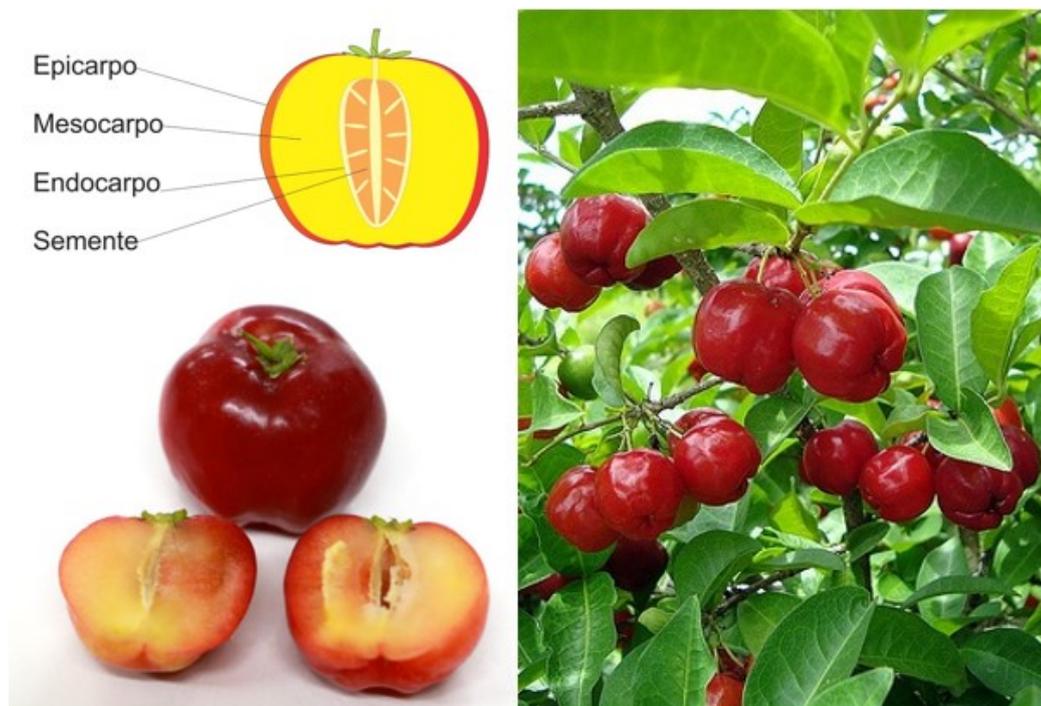
A cultura da acerola no Brasil foi fortemente influenciada pelas pesquisas da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), que se iniciaram em 1956, com sementes que foram trazidas ao país, e foram úteis para disseminar aos brasileiros informações relevantes sobre a acerola, por volta dos anos 80. A partir de então, a fruta passou a ser mais explorada comercialmente, tanto para o consumo interno quanto para exportação, que se destinava principalmente a países da Europa, Japão e Estados Unidos. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de acerola e, segundo o IBGE (2017), a área colhida no ano de 2017 foi de 5753 ha, resultando em uma produção de mais de 60 mil toneladas. O Nordeste é a região com maior produção, destacando-se o estado de Pernambuco (BARBOZA; TAVARES; MELO, 1996; NETTO, 1986; SOUZA et al., 2017).

A aceroleira é um arbusto de tamanho médio, com altura entre 2 e 3 m, ramos densos e espalhados. Ela se desenvolve e produz suficientemente bem em climas tropical e subtropical, a temperaturas médias em torno de 26°C, mas também resiste a temperaturas mais baixas. Além disso, chuvas bem distribuídas a níveis anuais entre 1200 e 1600 mm são favoráveis, e não existem exigências específicas quanto ao tipo de solo (BARBOZA; TAVARES; MELO, 1996; PORTAL EMBRAPA, 2020).

A acerola, fruto da aceroleira (Figura 2.1), é uma drupa, carnosa, onde o epicarpo é uma fina película, o mesocarpo é a polpa – que corresponde a 73% do fruto – e o endocarpo constitui-se de três caroços unidos. A acerola é um fruto climatérico, ou seja, pode amadurecer mesmo depois de colhido, a qual tem sabor ácido e cor que, quando madura, varia de amarelo ao vermelho ou roxo. Algumas características deste fruto são variáveis, por exemplo, o tamanho

deles varia de 1 a 2,5 cm, e o peso, de 3 a 15 g (ADRIANO; LEONEL; EVANGELISTA, 2011; FREITAS et al., 2006).

Figura 2.1 - Acerola (*Malpighia emarginata* DC).



Fonte: Adaptado de CEAGESP (2021) e Rural Pecuária (2020).

A popularização do consumo da acerola está associada a um aumento mundial na conscientização quanto à alimentação saudável. Nesse sentido, acerola se destaca entre outras frutas tropicais devido aos altos teores de ácido ascórbico (constituente da vitamina C) e à presença de outros compostos benéficos à saúde humana em sua composição como carotenoides, compostos fenólicos, vitaminas do complexo B, proteínas e minerais. O teor de ácido ascórbico encontrado neste fruto atinge níveis entre 1000 e 4500 mg/100 g de polpa. Além disso, alguns estudos apontam que a vitamina C produzida pela acerola é melhor absorvida pelo organismo humano do que o ácido ascórbico sintético, devido à presença de outros nutrientes como minerais, fibras e compostos fitoquímicos no fruto que podem favorecer a biodisponibilidade da vitamina C natural (ASSIS et al., 2008; MARQUES; FERREIRA; FREIRE, 2007; XU et al., 2020).

Os vários compostos bioativos que fazem parte da composição da acerola conferem a ela uma ação antioxidante, que representa a função de auxiliar na proteção das células do organismo contra os radicais livres. Dessa forma, a acerola é classificada como um alimento funcional, ou seja, um alimento que apresenta outros benefícios ao corpo humano além de nutrir

(MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2009). No entanto, muitas das características atribuídas à qualidade da acerola, desde aspectos físicos como coloração e tamanho do fruto até o seu conteúdo nutricional, são influenciados por fatores como genética, incidência de luz solar, precipitações, localização, estação do ano, maturação, entre outros (LIMA et al., 2005).

A acerola, assim como outras frutas tropicais, pode ser comercializada *in natura* ou pode ser processada, o que geralmente é feito para aumentar a sua vida útil, uma vez que frutos com alto teor de umidade (a acerola tem em média 90% de umidade em base úmida) tendem a se deteriorar rapidamente após colhidos (MARQUES; FERREIRA; FREIRE, 2007). A acerola pode ser processada para produção de polpa, sucos, extratos em pó, geleias, compotas e sorvetes. Além disso, a ela tem sido associada à composição de diferentes produtos, como enriquecimento de sucos e néctares de outras frutas, antioxidante aplicado a produtos cárneos, bem como fonte de ácido ascórbico para fins farmacêuticos e cosméticos (GALVÃO; GRANZOTTI; NAVARRO, 2019; LUIZ; DA SILVA; ZERMIANI, 2018; MENDES et al., 2012; SILVA; DUARTE; BARROZO, 2019).

## **2.2. Compostos Bioativos**

Em relação à sua origem, os compostos bioativos são metabólitos secundários altamente específicos produzidos pelas plantas com o intuito de protegê-las de estresses bióticos e abióticos. Esses compostos conferem às plantas e a seus produtos características sensoriais como cor e sabor, e são importantes tanto para a evolução dos vegetais quanto para a sua interação com outros seres vivos. Isso porque os alimentos de origem vegetal são a principal fonte natural de compostos bioativos na dieta humana e o seu consumo em grande quantidade reduz o risco de doenças crônicas não transmissíveis (BASTOS; ROGERO; ARÊAS, 2009; BORGES; AMORIM, 2020; SILVA, 2018).

A ANVISA (2002) descreve as substâncias bioativas como nutrientes e não nutrientes que possuem ação metabólica ou fisiológica específica. Nesse âmbito, os compostos bioativos têm a capacidade de auxiliar na proteção contra diversas doenças como hipertensão, obesidade e até cânceres devido às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas, entre outras. Em função da busca do mercado consumidor atual por um estilo de vida mais saudável, tais propriedades são de grande interesse para a indústria, e as substâncias bioativas que são utilizadas como produtos podem ser extraídas de fontes alimentares e não alimentares ou obtidas por síntese (FIGUEIREDO et al., 2013; NASRI, 2017).

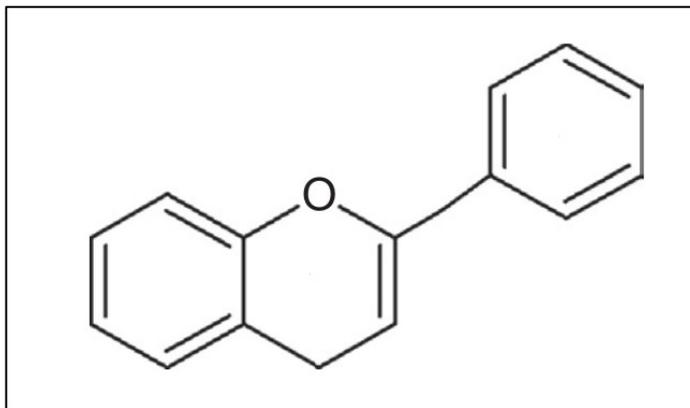
### 2.2.1. Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos e polifenólicos são um dos maiores e mais variados grupos de substâncias do reino vegetal, devido à sua grande diversidade estrutural. Atualmente, são conhecidos mais de 8000 compostos fenólicos, que podem ser divididos em pelo menos 10 classes, de acordo com sua estrutura química, sendo a característica estrutural comum a todos eles um anel aromático contendo um ou mais grupos hidroxila ligados. Geralmente, a ocorrência desses compostos na natureza é em associação a mono e polissacarídeos, ou a ésteres e metil-ésteres, e eles tendem a ser solúveis em água. As principais fontes de compostos fenólicos na alimentação são as frutas de cor vermelha e azul (DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ, 2004; DEL RIO et al., 2013; ROSS; KASUM, 2003)

Os polifenóis são provavelmente as moléculas mais estudadas em termos de interesse nutricional. Existem diversas pesquisas que relacionam esses compostos a efeitos positivos à saúde humana, que visam entender quais os mecanismos associados à sua ação biológica. Os compostos fenólicos têm uma capacidade antioxidante poderosa, dessa forma, protegem as biomoléculas do estresse oxidativo causado pelos radicais livres, por meio da inativação de radicais livres ou da transferência de elétrons (DEL RIO et al., 2010; VALKO et al., 2007). Os benefícios dessas propriedades antioxidantes incluem desde o combate ao envelhecimento até a proteção contra uma gama de patologias e distúrbios metabólicos como diabetes, doenças cardiovasculares e neurológicas (FURUKAWA et al., 2017; ZHANG et al., 2018).

Entre as classes de compostos fenólicos mais importantes para a alimentação humana estão os flavonoides, que compreendem mais de 6000 substâncias conhecidas. A estrutura dos flavonoides é composta por dois anéis aromáticos unidos por uma ponte de três carbonos, frequentemente na forma de um anel heterocíclico (Figura 2.2). Determinadas modificações nessa estrutura originam diferentes compostos descritos como subgrupos dos flavonoides: antocianinas, flavonóis, flavonas, isoflavonas, flavanóis, flavanonas (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA JUNIOR, 2019).

Figura 2.2 - Estrutura química de uma molécula de flavonoide.



Fonte: adaptado de Vuolo, Lima; Marótica Junior (2019).

Os flavonoides incluem um elevado número de substâncias coloridas e a maior parte delas tem coloração que varia do amarelo ao vermelho, devido aos cromóforos conjugados presentes nas moléculas, os quais são responsáveis pela variação de cores das flores, sementes e frutos. Nas plantas, os corantes têm o papel de absorver o excesso de radiação recebida, auxiliando na resistência contra o estresse luminoso (ERLUND, 2004; TROJAK; SKOWRON, 2017). Alguns fatores que influenciam no conteúdo de flavonoides presentes nas frutas e vegetais são as condições edafoclimáticas, a forma de cultivo, o grau de maturação, a variação entre espécies e a parte da planta, bem como as condições de armazenamento. Algumas fontes de flavonoides na alimentação humana são, além das frutas e vegetais frescos, bebidas como chás e vinhos, cereais e especiarias (FAGGIO et al., 2017; FERRER et al., 2008).

### 2.2.2. Ácido ascórbico

O ácido ascórbico, também chamado de vitamina C, é hidrossolúvel e pode ser sintetizado por plantas e por diversas espécies de animais. O ser humano, no entanto, não consegue sintetizá-lo e precisa ingerir diariamente alimentos que contenham esse nutriente. Apesar das maiores fontes de vitamina C serem as frutas frescas, muitas pessoas têm buscado por outras formas de suplementação, como cápsulas, comprimidos efervescentes e alimentos enriquecidos, a fim de uma maior praticidade (RIBEIRO; SERAVALLI, 2007; SILVA, 2018).

A capacidade antioxidante do ácido ascórbico é notável e ele auxilia na preservação dos alimentos, já que suas moléculas sofrem oxidação antes das moléculas do alimento. No organismo humano, ele participa de atividades importantes como formação de tecido conjuntivo, produção de hormônios e anticorpos, biossíntese de aminoácidos e prevenção do

escorbuto. Além disso, o ácido ascórbico ainda tem relação com a regulação do colesterol, a diminuição da concentração de chumbo no sangue, o aumento da fertilidade e uma redução na suscetibilidade ao câncer (BENDICH; LANGSETH, 1995; PIETTA, 2000).

### 2.3. Secagem

Em vista do grande potencial nutritivo da acerola, e sabendo de sua alta perecibilidade, devido ao elevado conteúdo de umidade da sua polpa, faz-se necessário o estudo de técnicas de conservação de alimentos, que permitam um melhor aproveitamento desse fruto. A secagem, também conhecida como desidratação, é uma das operações unitárias mais antigas de que se tem notícia, e consiste no processo de remoção térmica de substâncias voláteis – principalmente a umidade – de um material, com o objetivo de se obter um produto sólido com teor de umidade razoável. Mais precisamente, na secagem, a remoção de umidade ocorre por meio da aplicação de calor sob condições controladas, desse modo, esta definição exclui outras operações unitárias que removem água dos materiais por outros métodos, como separações mecânicas, por exemplo (MUJUMDAR, 2006).

Durante a secagem de um material úmido, ocorrem simultaneamente dois processos: transferência de energia na forma de calor do ambiente externo para a evaporação da umidade superficial do sólido; e transferência da umidade do interior do sólido para a superfície, a qual será evaporada como consequência do primeiro fenômeno. A taxa de secagem é, portanto, determinada pela velocidade com que os dois processos ocorrem, de modo que um deles vai ser o fator limitante. A transferência de calor depende de variáveis externas como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem e área do sólido exposta. Enquanto a transferência de massa é governada pela natureza física, temperatura e umidade do sólido (MUJUMDAR, 2006).

A operação de secagem é amplamente empregada na conservação de alimentos, uma vez que a redução do teor de umidade dos materiais implica em uma inibição do crescimento microbiano e da atividade enzimática, responsáveis pela deterioração dos alimentos. Uma das consequências positivas da desidratação é a redução do peso e do volume dos alimentos, o que diminui os custos associados a transporte e armazenamento. No entanto, a secagem pode prejudicar tanto aspectos sensoriais quanto nutricionais dos alimentos, de modo que o projeto e a operação dos equipamentos devem visar a minimização dessas alterações nos produtos (BARROS; FREIRE, 2019; MUJUMDAR, 2006)

Os equipamentos empregados na secagem – secadores – diferem entre si dependendo do principal método de transferência de calor utilizado, seja ele convecção, condução ou

radiação e, em alguns casos, a combinação destes efeitos. A avaliação correta do processo de secagem é fundamental no desenvolvimento de produtos desidratados, de maneira que algumas condições de secagem mostram-se mais adequadas para determinados tipos de materiais, favorecendo a obtenção de um produto final de melhor qualidade (DANTAS et al., 2019; MUJUMDAR, 2006).

### **2.3.1. Secagem de materiais pastosos**

Os materiais pastosos são observados em diversos segmentos, estando presentes em processos das indústrias química, alimentícia, farmacêutica e outras. Em relação à sua estrutura, estes materiais podem ser definidos como um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um meio líquido, de modo que são abrangidos exemplos como suspensões, lamas, polpas e emulsões (BURJAILI, 1996).

As propriedades dos materiais pastosos dependem de fatores como tamanho e forma das partículas, concentração de sólidos, além das interações entre as partículas e das partículas com o líquido. De fato, a concentração de sólidos afeta bastante as características relacionadas ao escoamento de pastas, de modo que quando há maior teor de umidade, o material tem comportamento de um fluido newtoniano, e quando há um menor teor de umidade, o material tem um comportamento que se aproxima mais do não-newtoniano (PASSOS et al., 1997).

O estudo da secagem dos materiais pastosos torna-se importante pela sua vasta ocorrência na indústria, no entanto, algumas dificuldades podem aparecer neste processo. Estes materiais estão sujeitos a sofrerem modificações em suas propriedades físicas quando expostos a determinados processos térmicos, o que pode favorecer a aderência do material às paredes do equipamento, levando à formação de crostas e a um aumento do tempo de secagem. Sendo assim, o conhecimento de propriedades dos materiais a serem desidratados, bem como das leis que regem as alterações nesses parâmetros durante a secagem, auxiliam na escolha do melhor método a ser empregado e na definição de condições adequadas de operação dos equipamentos (BURJAILI, 1996; PALLAI; SZENTMARJAY; SZIJÁRTÓ, 2001).

A seleção do secador é um processo que envolve não somente o conhecimento teórico, mas também requer uma abordagem empírica, já que cada tipo de secador tem características específicas que o tornam adequado ou não para determinadas aplicações, devido às grandes variações nas características físicas dos materiais pastosos (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC; GARIC-GRULOVIC, 2004). Segundo Burjaili (1996), a inexistência de um padrão de secador a ser recomendado justifica a realização de investigações independentes para cada material a

ser processado e ele reporta levantamentos feitos por Freire (1992), relacionando diversos tipos de secadores para determinados materiais pastosos.

Na indústria, muitos processos envolvem a secagem de pastas para a obtenção de um produto em pó, o que proporciona vantagens dentro do processo, como maior facilidade de manuseio e armazenamento do material, bem como um aumento na durabilidade do mesmo e até redução do consumo de energia (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC; GARIC-GRULOVIC, 2004).

Materiais pastosos de origem orgânica e biológica são geralmente sensíveis ao calor, e são afetados por parâmetros como a temperatura de secagem e o tempo de residência dentro do secador. Nesses casos, as condições operacionais devem obedecer a certos limites, dentro dos quais a qualidade do produto final será mantida (PASSOS et al., 1997). Dentro desta classificação, encontram-se as polpas de frutas, as quais requerem cuidados durante a secagem para que ao final do processo, o alimento seco ainda preserve a textura, cor, sabor e valor nutricional do alimento *in natura*, sendo essas características importantes na aceitação do produto pelo público (DANTAS, 2018). Diante disso, é essencial que métodos de secagem apropriados para esses tipos de materiais sejam investigados.

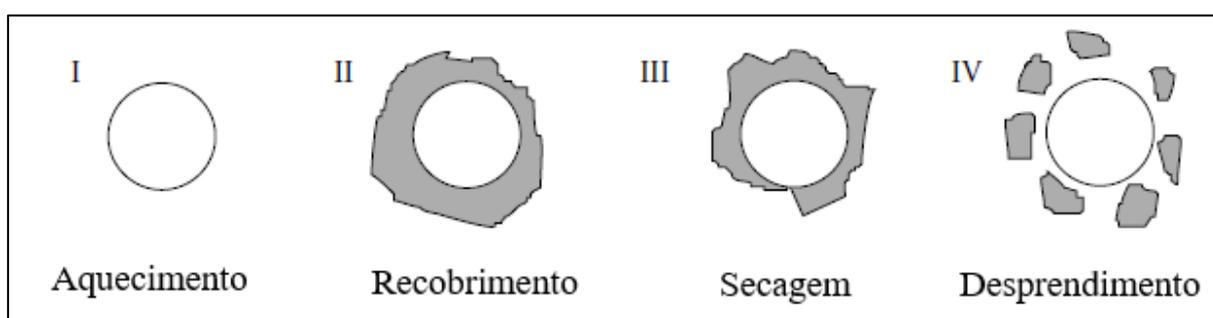
### **2.3.2. Uso de inertes na secagem de pastas**

A secagem de materiais pastosos como soluções, suspensões, lamas e pastas por meio da utilização de suportes sólidos inertes é uma das tecnologias conhecidas para a obtenção de produtos na forma de pó. Apesar desta técnica ter sido desenvolvida na década de 50, na União Soviética (URSS), para secagem industrial de pigmentos, produtos farmacêuticos e de origem biológica, acredita-se que ela não ficou conhecida mundialmente, na época, por barreiras linguísticas. No entanto, nas últimas décadas, o interesse pelo uso de inertes na secagem foi renovado pelo fato desse método produzir pós a taxas de evaporação competitivas com secadores do tipo *spray* e tambor, por exemplo. Atualmente existem vários tipos de secadores que utilizam partículas inertes como secadores de leitos fluidos e também outros tipos nos quais o material é disperso, como secadores pneumáticos (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

O mecanismo que governa esta tecnologia, ilustrado na Figura 2.3 consiste no recobrimento dos sólidos inertes pela alimentação do material úmido sobre eles, dessa forma, uma fina camada do material úmido recobre a superfície dos inertes, onde a secagem ocorre pelo contato com o ar quente de secagem. Nesse caso, a secagem se dá tanto pelo contato do material úmido com as partículas inertes aquecidas (condução), quanto por convecção pela

circulação do ar quente. Quando o material está suficientemente seco ele começa a se desprender da superfície dos inertes e a se fragmentar na forma de um pó, pelas sucessivas colisões entre as partículas e bem como entre as partículas e as paredes do secador. Então o pó é elutriado pelo ar de secagem e segue para um dispositivo de separação, por exemplo, um ciclone. Esse ciclo se repete à medida que o material úmido continua sendo alimentado e os inertes são recobertos novamente (FREIRE et al., 2012; KUDRA; MUJUMDAR, 2009; PALLAI; SZENTMARJAY; SZIJÁRTÓ, 2001).

Figura 2.3 - Mecanismo de secagem sobre partículas inertes.



Fonte: adaptado de Kudra e Mujumdar (2009).

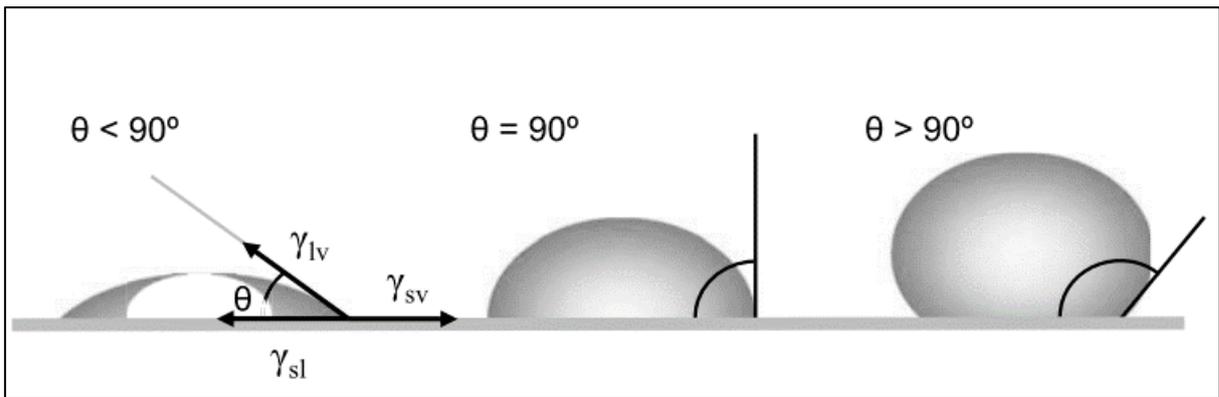
Devido ao conteúdo de umidade elevado dos materiais pastosos, são necessárias técnicas de secagem que permitam a obtenção de altas taxas de transferência de calor e massa, condições que são alcançadas com o uso de inertes. Na operação de secadores contendo partículas inertes, um processo só é estável quando a taxa em que o material seca e se desprende dos inertes for maior do que a taxa em que os inertes são recobertos pelo material úmido. Quando o processo não ocorre dessa forma, o material úmido começa a se acumular sobre as partículas inertes e a operação pode entrar em colapso (FREIRE et al., 2012; KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

O processo de secagem de suspensões com o uso de inertes depende não só das taxas de transferência de calor e massa, mas também da capacidade do filme depositado sobre as partículas inertes de tornar-se friável, o que está relacionado principalmente com a interação desta suspensão com o sólido, podendo beneficiar o recobrimento ou a remoção do material seco, de acordo com as características de molhabilidade e de adesão entre o fluido e o sólido. Nesse sentido, o processo de secagem ocorre quando a força de adesão na interface líquido-sólido é fraca, favorecendo a friabilidade da película formada (DANTAS, 2018).

Já o conceito de molhabilidade diz respeito à capacidade de um líquido de se espalhar sobre a superfície de um sólido, e sua quantificação pode ser feita através da medida do ângulo

de contato. Quando uma gota de líquido é depositada sobre uma superfície sólida, plana e horizontal, define-se como ângulo de contato o ângulo formado na interseção entre a interface líquido-sólido e a interface líquido-vapor, obtido por uma linha tangente aplicada a partir do ponto de contato ao longo da interface líquido-vapor (Figura 2.4). Para baixos valores de ângulo de contato, o líquido molha bem o sólido e espalha-se com facilidade, enquanto que ângulos de contato elevados indicam molhabilidade reduzida (YUAN; LEE, 2013).

Figura 2.4 - Ângulo de contato formado num sistema sólido-líquido-vapor.



Fonte: adaptado de Yuan e Lee (2013).

Além disso, vale ressaltar que a estabilidade da operação de secagem também depende de propriedades do material a ser desidratado. Materiais que formem películas elásticas durante qualquer estágio do processo impactam nas colisões das partículas, fazendo com que os choques não sejam suficientes para romper a camada de material sobre os sólidos inertes. Materiais fibrosos também não são bons candidatos pois podem se acumular entre as partículas no secador. Além disso, materiais excessivamente gordurosos são inapropriados pelo fato de se tornarem pegajosos aos serem aquecidos. Portanto, frequentemente faz-se uso de aditivos que melhoram determinadas características do material úmido, auxiliando no processo de secagem (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

### 2.3.3. Aditivos de secagem

Secagens de polpas de frutas muitas vezes enfrentam alguns problemas relacionado à composição das mesmas, por exemplo, algumas polpas têm grande quantidade de açúcares de baixo peso molecular, o que pode resultar em uma baixa produção de pó, bem como pode conferir aos produtos características indesejáveis como alta coesividade e higroscopicidade.

Nesse sentido, os aditivos de secagem são algumas substâncias comestíveis que podem ser misturadas às polpas a fim de se obter um maior rendimento do processo, por meio da redução das forças de adesão e o aumento da fluidez do pó produzido (DANTAS et al., 2019; DANTAS, 2018).

De maneira geral, existem alguns compostos que já são estudados e conhecidos por proporcionarem melhores resultados quanto à qualidade do produto final. Uma classe de substâncias é a dos carboidratos de alto peso molecular como maltodextrina, amidos, gomas, pectina e alginato. A maltodextrina é um dos mais utilizados industrialmente, por suas características como a capacidade de conferir consistência e textura sem mascarar sabores, evitando a aglomeração de partículas, além de auxiliar na prevenção do escurecimento não enzimático e na retenção de compostos voláteis (OLIVEIRA; FIGUEIRÊDO; QUEIROZ, 2006; WANG; WANG, 2000).

Os compostos proteicos como a clara de ovo também podem ser adicionados às polpas de frutas e, segundo Fang e Bhandari (2012), o uso de pequenas quantidades de proteínas em combinação aos carboidratos, podem alterar as propriedades superficiais do filme líquido a ser seco e promover uma maior eficiência de secagem, bem com uma maior retenção de compostos, devido à migração preferencial da proteína na interface ar/água (SOARES; PEREIRA, 2020). Além disso, existem ainda estudos que investigam a utilização de adjuvantes à base de leite, a fim de se obter produtos de valor agregado e ampliar a utilização destes ingredientes (DANTAS et al., 2019).

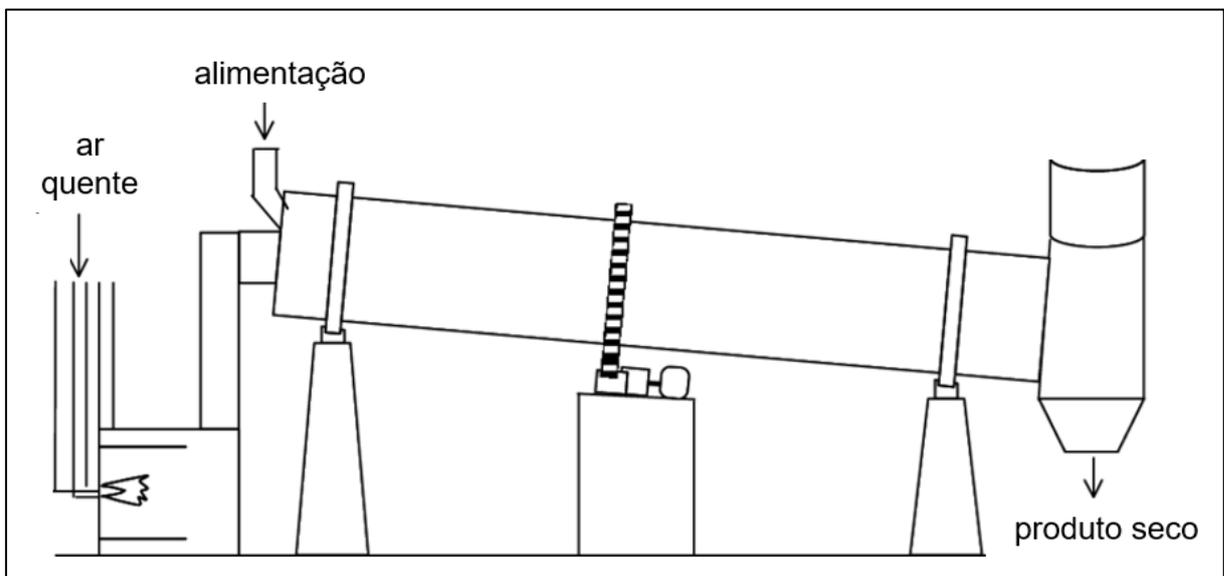
#### **2.3.4. Secadores rotatórios convencionais**

Um tipo de secador industrial muito comum é o secador rotatório, especialmente por seus atributos como baixo custo de operação, grande capacidade, simplicidade de construção e flexibilidade em operar com diversos tipos de materiais. Habitualmente, ele é aplicado para o processamento de sólidos de fácil movimentação, continuamente ou em batelada. E as características operacionais desse tipo de secador, referentes às transferências de calor e massa que nele ocorrem, permitem que ele seja adequado não só para secagem, mas também para outras utilizações como recuperação de solventes, reações químicas, decomposições térmicas e misturas (MOYERS; BALDWIN, 1997; SHEEHAN; BRITTON; SCHNEIDER, 2005).

Secadores rotatórios são compostos, basicamente, por um tambor cilíndrico giratório de metal levemente inclinado na horizontal. O comprimento do cilindro varia bastante de acordo com o material em questão, e geralmente sua medida é de 4 a 10 vezes maior que a medida do

diâmetro. Nesses secadores, o ar aquecido passa pelo cilindro de uma extremidade à outra, de modo que a ampla superfície de contato do material úmido com o ar quente promove altas taxas de secagem. O aquecimento pode se dar de forma direta ou indireta: nos secadores rotatórios de aquecimento direto o gás de secagem passa através do material no interior do secador; enquanto o aquecimento indireto ocorre quando o gás quente passa externamente, sendo separado do material por meio de paredes ou tubos. Um esquema simplificado de um secador rotatório de aquecimento direto é apresentado na Figura 2.5 (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2006; MOYERS; BALDWIN, 1997).

Figura 2.5 - Esquema simplificado de um secador rotatório de aquecimento direto.



Fonte: adaptado de Krokida, Marinos-Kouris e Mujumdar (2006).

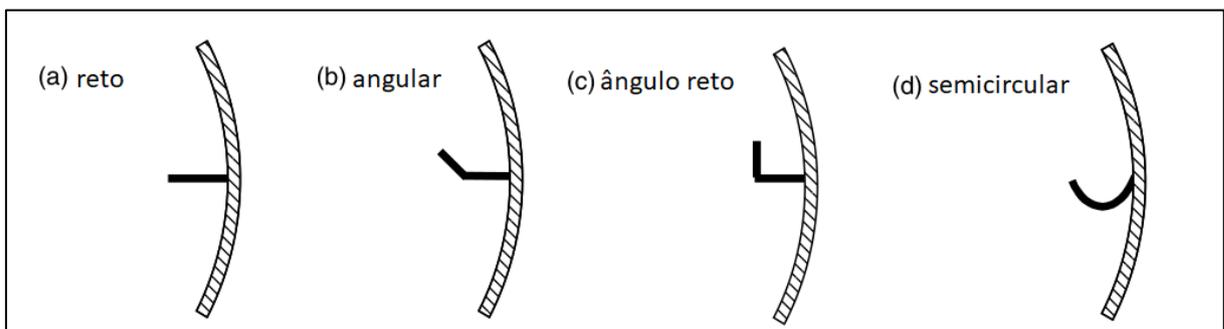
A direção do fluxo de ar dentro do cilindro – concorrente ou contracorrente – pode atrasar ou acelerar o escoamento dos sólidos de uma extremidade à outra, e a escolha por uma ou outra configuração é dependente de limitações impostas pelo material a ser desidratado. Quando o material é sensível a temperaturas altas, o mais indicado é o emprego de fluxo concorrente, uma vez que o ar com maior potencial de secagem está em contato com o material úmido. Dessa forma, ocorre um rápido resfriamento do ar de secagem, em razão da evaporação inicial da umidade superficial do sólido, e a temperatura do produto permanece mais baixa que a temperatura de entrada do gás de secagem. Esse tipo de configuração promove uma secagem uniforme e resulta em um produto final de boa qualidade. Em secadores com fluxo contracorrente, o ar em temperatura mais elevada está em contato com o material seco, logo, o

produto final tem baixa umidade e o consumo energético pode ser reduzido (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2006; MARTIN, 2009).

Entre os secadores rotatórios, um dos tipos mais estudados, são os de aquecimento direto equipados com suspensores (*flights*, em inglês), que são estruturas sobressalentes fixadas nas paredes internas do cilindro, com a função de promover o cascadeamento dos sólidos. Isto é, os sólidos são carregados pelos suspensores até uma determinada altura e então são derrubados, aumentando o contato entre o material e o ar de secagem. De fato, ação dos suspensores melhora a transferência de calor e massa e também auxilia no transporte do material no interior do equipamento (NASCIMENTO, 2018).

Diferenças geométricas nos suspensores influenciam no desempenho do equipamento e o formato desses suspensores geralmente é definido de acordo com as características do material a ser processado (Figura 2.6). Para materiais de fácil escoamento, podem ser utilizados suspensores angulares ou semicirculares, mas para a manipulação de materiais pegajosos, os mais indicados são os suspensores retos, a fim de evitar aderências. Ademais, em casos em que os materiais alteram suas características no decorrer do processamento, podem ser usados tipos diferentes de suspensores ao longo do equipamento (KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2006; MOYERS; BALDWIN, 1997).

Figura 2.6 - Tipos comuns de suspensores em secadores rotatórios.



Fonte: adaptado de Krokida, Marinos-Kouris e Mujumdar (2006).

Além das variações nos suspensores, outras variáveis também têm influência no movimento das partículas e na taxa de secagem em secadores rotatórios, como as dimensões e a inclinação do cilindro, a velocidade de rotação, as taxas de alimentação do material úmido e do gás de secagem e a distribuição granulométrica do material. E apesar dos secadores rotatórios já serem largamente utilizados na indústria, ainda há muito potencial de estudo. Pesquisas à cerca da dinâmica das partículas no equipamento contribuiriam para melhoras na sua eficiência, e adaptações e modificações estruturais nesses secadores favoreceram a sua

versatilidade, permitindo, por exemplo, que eles sejam aplicados no processamento de materiais pastosos (HONORATO, 2006; NASCIMENTO, 2018).

### **2.3.5. Secador rotatório com recheio de inertes**

O secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) é um tipo não-convencional de secador rotatório, que surgiu da união de técnicas já conhecidas e utilizadas em outros equipamentos para a secagem de materiais pastosos, sendo eles: secadores de leite fluidizado, secadores por atomização, secadores giratórios e secadores com operação via contato-sorção (BURJAILI, 1996).

O SRRI é composto por um cilindro horizontal equipado internamente com suspensores longitudinais e um leito de sólidos (esferas) de material inerte, que ocupa parte do volume do cilindro. Nesse secador, a rotação do cilindro, em conjunto com a ação dos suspensores, promove o revolvimento dos inertes, os quais são recobertos com uma fina camada do material pastoso. A alimentação do material úmido ocorre em uma das extremidades do secador, de modo concorrente com o ar de secagem. E na outra extremidade do cilindro acontece a descarga do material seco, que passou por um processo de moagem dentro do equipamento e é carregado até ali para que seja separado do ar de secagem por meio de um ciclone (BURJAILI, 1996).

O processo de secagem neste equipamento se dá por uma combinação de efeitos diferentes. Dos secadores rotatórios, vêm os efeitos de cascata e rolagem, bem como a contribuição do ar aquecido, que nesse caso, tem a função de secagem do material pastoso por convecção e arraste do material desidratado na forma de pó. Há a ação dos inertes, que trazem o princípio de secagem via contato, uma vez que são aquecidos pelo ar de secagem e transferem calor condutivo ao material pastoso que entra em contato com eles. Além disso, existe uma renovação da interface gás-sólido, que está relacionada com a moagem do material por meio das colisões que ocorrem entre as partículas inertes e delas com as paredes do equipamento (BURJAILI, 1996).

Em razão dessas diversas contribuições agrupadas em um único equipamento, o SRRI tem algumas peculiaridades interessantes. A grande influência do atrito e do impacto causados pela operação de moagem tem a capacidade de eliminar inconvenientes como aderência e aglomeração, comuns em secadores de materiais pastosos. Também destaca-se o fato de que, graças à rotação do cilindro com suspensores, o ar de secagem não precisa movimentar o leito de inertes e tem função exclusiva de secagem do material úmido e arraste do pó produzido, o que acarreta uma economia energética (BURJAILI, 1996).

O secador rotatório com recheio de inertes tem seus primeiros registros em congressos e revistas nacionais no ano de 1987, como resultado de trabalhos realizados pelos professores José Roberto Delalibera Finzer, Mauro Marques Burjaili e José Romário Limaverde, na Universidade Federal de Uberlândia. O registro da patente do equipamento foi, posteriormente, conferido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial em 1994 e, a partir deste momento, novos estudos começaram a ser desenvolvidos com o emprego deste secador no processamento de diversos materiais (BURJAILI; FINZER; LIMAVARDE, 1994; BURJAILI; LIMAVARDE; FINZER, 1987).

Burjaili (1996) utilizou o secador rotatório com recheio de inertes para a secagem de levedura termolisada, proveniente da indústria de açúcar e álcool. O material a ser alimentado passou por estudos reológicos para adequação à condição de pasta, dependente da concentração de levedura utilizada. O autor estudou a influência da velocidade de rotação e de parâmetros geométricos como largura, espessura, número e inclinação dos suspensores no comportamento do leito de inertes, composto de esferas de cerâmica e aço. Além disso, foram avaliadas diferentes formas de alimentação (contínua e intermitente), bem como a umidade do produto obtido e a temperatura do ar e do leito de inertes ao longo do cilindro de secagem.

Honorato (2006) empregou o SRRI na secagem de cefalotórax de camarão, com o intuito de proporcionar uma alternativa para o aproveitamento deste subproduto. A autora se baseou em resultados obtidos da secagem em bandeja e em leito de jorro para construir um secador com melhores condições para processamento do material em questão. O equipamento projetado operava com alimentação intermitente e foram estudadas a temperatura e a velocidade do ar, a vazão de alimentação e a concentração do encapsulante albumina. Como respostas, analisou-se a eficiência térmica e de produção de pó, a umidade do produto e o tempo do ensaio.

Moura (2016) realizou um estudo de secagem de resíduo de maracujá em SRRI, avaliando experimentalmente os efeitos de diferentes condições de intermitência da alimentação e de temperatura do ar de secagem nas seguintes respostas: umidade e temperatura do ar na saída do secador e massa produzida. Além disso, foi usado um modelo matemático baseado nos balanços microscópicos de massa e energia das fases sólido e gás, e importantes parâmetros do modelo foram inferidos pela avaliação de propriedades físico-químicas e composicionais do resíduo de maracujá. O modelo matemático foi ajustado com condições experimentais estudadas e simulações exploratórias foram realizadas em diferentes vazões de alimentação do material, em regime contínuo e intermitente, a fim de avaliar características dimensionais de projeto.

Silva (2019) avaliou a secagem da microalga *Spirulina platensis* e do camu-camu em SRRI. Foram estudadas variáveis operacionais como temperatura do ar, intermitência da alimentação, grau de enchimento e rotação do tambor. Analisou-se como resposta, para ambos os materiais, a umidade do produto, os teores de compostos bioativos e o rendimento de secagem. Simulações computacionais, pelo método dos elementos discretos, foram realizadas a fim de avaliar o comportamento fluidodinâmico do secador e relacionar os resultados obtidos experimentalmente com dados numéricos referentes à velocidade das partículas inertes e o número de colisões entre elas durante o funcionamento do secador.

Santos (2020) utilizou o SRRI como alternativa para o aproveitamento da polpa de camu-camu. O autor estudou experimentalmente e numericamente os efeitos de variáveis operacionais no desempenho da secagem. Em relação ao leito de inertes, foi avaliada a influência de se utilizar esferas de três diferentes tamanhos, por meio de uma variável denominada fração entre inertes. Outras variáveis estudadas foram a temperatura do ar, o grau de enchimento do tambor e a velocidade de rotação. Como respostas, foram analisados o rendimento do processo, os teores de compostos bioativos e a atividade antioxidante dos produtos. O estudo numérico foi realizado pela aplicação de simulações, com uso da abordagem Lagrangeana, e obteve-se dados relativos à força de colisão e ao número de colisões partícula-partícula e partícula-parede.

#### **2.4. Modelagem Lagrangeana do Escoamento Granular – Método dos Elementos Discretos**

Em processos complexos, como no caso da secagem utilizando um tambor rotatório, o entendimento pleno da fluidodinâmica no interior do equipamento é complexo. Sendo assim, a utilização de modelos matemáticos que estimam este comportamento, bem como ferramentas computacionais que permitem a aplicação e resolução destes modelos, se tornam uma peça fundamental no estudo destes processos, complementando o conhecimento experimental. Dos diversos tipos de técnicas computacionais e numéricas existentes, as simulações se destacam por serem ferramentas extensas, incluindo desde propriedades físicas do material em estudo, até detalhes geométricos do equipamento, modelados por meio das malhas computacionais. Tradicionalmente, os métodos das simulações seguem duas abordagens matemáticas: a abordagem Euleriana e a Lagrangeana.

A abordagem Euleriana é amplamente utilizada devido ao seu menor custo computacional, tornando-a uma candidata ideal para processos em grandes escalas. Nela, ambas

as fases fluida e sólida são consideradas como contínuas e interpenetrantes. A definição de fração volumétrica é extensivamente utilizada neste método para terminar a contribuição de cada uma das fases para o escoamento como um todo (BRANDÃO, 2017). Usualmente, esta abordagem é empregada em simulações onde não há interesse específico em uma pequena parte; isto é, quando busca-se informações a respeito do comportamento “bulk” ou geral do escoamento.

Já na abordagem Lagrangeana, cada partícula presente na simulação é acompanhada individualmente, permitindo um maior conhecimento sobre as forças atuantes em uma partícula específica e também sobre suas interações com as demais. Assim, um balanço de forças é aplicado em cada partícula rastreada, e por meio de técnicas matemáticas, é possível estimar a posição, a velocidade e a aceleração das mesmas. No caso estudado por este trabalho, a abordagem Lagrangeana se torna mais interessante, justamente pela sua capacidade de acompanhar as partículas individuais, tornando possível a contabilização de informações como força e número de colisões, seja para interações partícula-partícula ou partícula-parede. Um dos métodos que seguem a linha da abordagem Lagrangeana é o Método dos Elementos Discretos (DEM – *Discrete Element Method*) (ALCHIKH-SULAIMAN et al., 2016; ZHENG; YU, 2015).

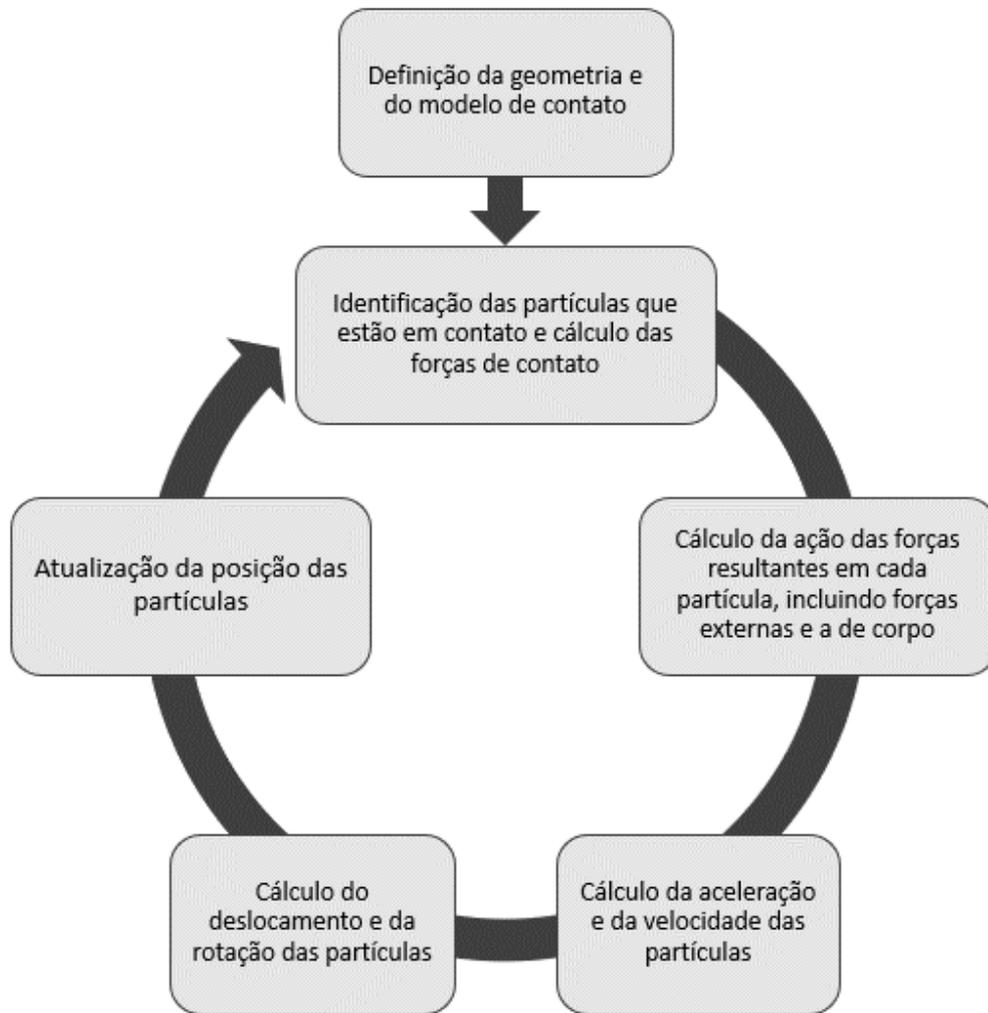
O método dos elementos discretos foi proposto pela primeira vez por Cundall e Strack (1979), a partir de um problema envolvendo a fratura de rochas. Desde então, o método tem sido utilizado em distintas aplicações, entre elas os estudos que buscam entender o comportamento de partículas em tambores rotatórios (GENG et al., 2009, 2011; SANTOS et al., 2016). Uma vantagem a se destacar na abordagem Lagrangeana, frente à Euleriana, é o fato dela exigir uma modelagem menos complexa, e uma desvantagem é o maior custo computacional.

Na Figura 2.7 é apresentado, de maneira simplificada, o ciclo de cálculo que rege o funcionamento das simulações DEM. Vale ressaltar que este algoritmo, chamado *time-stepping*, baseia-se na repetição de uma mesma modelagem em cada etapa do tempo e em cada partícula, de modo que os resultados de cada passo de tempo são baseados nos resultados anteriores (PENG, 2014).

Este método é composto por duas etapas principais. A primeira é a lei do deslocamento, responsável por estimar as forças de interação que ocorrem entre partículas e também com a parede. A segunda etapa é a aplicação da segunda Lei de Newton para cada partícula presente, de modo a realizar a descrição de seu movimento a partir do balanço de forças atuantes. Mais especificamente, este balanço de forças é feito em tempos discretos, definidos pelo *time-step*, permitindo a integração temporal numérica dessas forças para a estimativa das variações de

aceleração, velocidade e posição. A aceleração é determinada pela divisão da força resultando pela massa; enquanto a velocidade e a posição são estimadas de acordo com a posição anterior da partícula (CUNDALL; STRACK, 1979; PENG, 2014).

Figura 2.7 - Algoritmo empregado nas simulações DEM.



Fonte: adaptado de Lima (2017).

A segunda lei de Newton é apresentada pela Equação (2.1).

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij} \quad (2.1)$$

sendo  $m_i$  a massa e  $v_i$  a velocidade da partícula  $i$ , e  $F_{ij}$  a força entre as partículas  $i$  e  $j$ .

Para o caso de uma partícula  $i$  colidindo com uma partícula  $j$  (ou parede  $j$ ), o termo  $F_{ij}$  representa a força de contato, que pode ser decomposta em duas componentes: normal  $F_{c,n,ij}$  e tangencial  $F_{c,t,ij}$ . Além disso, quando necessário, pode-se também adicionar à Equação (2.1) o termo referente a forças de campo, como a força gravitacional  $m_i g$  (CUNDALL; STRACK, 1979; PENG, 2014).

Pelas Equações (2.2) e (2.3) são calculadas a velocidade  $v_i$  e a posição  $x_i$  da partícula, respectivamente.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left( \frac{\sum F_{ij}}{m_i} \right) \Delta t \quad (2.2)$$

$$x_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = x_i^t + v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.3)$$

E a velocidade e a posição angular da partícula são determinadas pelas Equações (2.5) e (2.6), respectivamente. O movimento rotacional da partícula em torno do seu próprio eixo é provocado pelo torque  $\tau_{ij}$  exercido pela partícula durante a colisão.

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j \tau_{ij} \quad (2.4)$$

$$\omega_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left( \frac{\sum \tau_{ij}}{I_i} \right) \Delta t \quad (2.5)$$

$$\theta_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \theta_i^t + \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.6)$$

sendo  $I_i$  o momento de inércia,  $\omega_i$  a velocidade angular e  $\theta_i$  a posição angular da partícula  $i$ , e  $\tau_{ij}$  o torque entre as partículas  $i$  e  $j$ .

É importante que os cálculos realizados sejam influenciados somente pelas partículas que estão em contato direto. Para isso, escolha do passo de tempo deve ser feita de modo que ele seja suficientemente pequeno, a ponto de garantir que, num único passo de tempo, as perturbações não afetem partículas além daquelas que são vizinhas imediatas (CUNDALL; STRACK, 1979).

Em relação à interação entre duas partículas, duas abordagens são comumente empregadas na descrição desse acontecimento: a de esfera rígida, proposta por Alder e Wainwright (1957) e a de esfera macia, proposta por Cundall e Strack (1979). A abordagem de esfera rígida é mais limitada e inadequada para representação de sistemas com alta concentração granular e contatos duradouros, uma vez que assume as colisões como binárias e instantâneas (BRANDÃO, 2017; LIMA, 2017). Já a abordagem de esfera macia é a mais utilizada em simulações DEM, por considerar todo o processo de contato a partir das equações de movimento. Nessa abordagem são consideradas as colisões entre mais de uma partícula e é permitido que as partículas se sobreponham sobre as outras. Modelos de contato são então introduzidos para contabilizar as interações de acordo com a deformação das partículas em contato (SANTOS, 2020).

Existem dois modelos de contato elásticos para o cálculo das forças de contato: o modelo linear e o modelo não-linear. Os modelos lineares elásticos consideram que há uma relação linear entre a deformação e as forças de contato. Enquanto que os modelos não lineares elásticos têm um embasamento teórico mais complexo e levam em consideração o formato das partículas. O modelo não-linear mais aplicado nas simulações DEM resulta de uma combinação da teoria de Hertz (1882), para o contato elástico entre duas partículas na direção normal, com a teoria de Mindlin e Deresiewicz (1953), para a direção tangencial, sem deslizamento (LIMA, 2017).

Pelo modelo de Hertz (1882), a força normal  $F_n$  (Equação (2.7)) é função da sobreposição normal  $\delta_n$ , do raio de contato equivalente  $R^*$  e do módulo de Young equivalente  $E^*$ .

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{3/2} \sqrt{R^*} \quad (2.7)$$

É incluído ainda o efeito da dissipação de energia, de acordo com a lei do amortecimento viscoso, portanto a força normal de amortecimento  $F_n^d$  é dependente do coeficiente de amortecimento  $\beta$ , da rigidez normal  $S_n$ , da velocidade relativa normal  $v_n^{rel}$  e da massa equivalente  $m^*$ , como apresentado nas Equações (2.8) e (2.9) E o módulo de amortecimento dependente do coeficiente de restituição  $e_p$  (Equação (2.10)).

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \quad (2.8)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (2.9)$$

$$\beta = \frac{\ln e_p}{\sqrt{\ln^2 e_p + \pi^2}} \quad (2.10)$$

A componente tangencial da força  $F_t$  (Equação (2.11)) é função da sobreposição tangencial  $\delta_t$  e da rigidez tangencial  $S_t$  (Equação (2.12)), sendo esta última variável dependente do módulo de cisalhamento equivalente  $G^*$ , dado pela Equação (2.13).

$$F_t = -\delta_t S_t \quad (2.11)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2 - \nu_i}{G_i} + \frac{2 - \nu_j}{G_j} \quad (2.13)$$

De forma similar à força normal de amortecimento, a força tangencial de amortecimento  $F_t^d$  é descrita pela Equação (2.14).

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{\overline{rel}} \quad (2.14)$$

sendo  $v_t^{\overline{rel}}$  a velocidade relativa tangencial.

A máxima força tangencial possível é limitada pela lei de atrito de Coulomb, de acordo com a Equação (2.15), e depende do coeficiente de atrito estático  $\mu_s$  e da força normal  $F_n$ .

$$F_{t,máx}^d = \mu_s F_n \quad (2.15)$$

Das simulações DEM é possível extrair resultados que agregam consideravelmente no estudo do desempenho de equipamentos como o secador rotatório com recheio de inertes. Tais resultados podem ser obtidos em termos do fluxo granular, da força despendida na interação

entre partículas, da velocidade relativa de colisão e da frequência com que as colisões acontecem.

Nesse ponto, é válido salientar que, na abordagem Lagrangeana, existem diferenças entre os conceitos de contatos e colisões. O conceito de contato contabiliza as partículas que estão no contorno, sem que haja sobreposição, sendo mais adequado para leitos estáticos. Já no processo de colisão, a força associada ao choque entre as partículas proporciona sobreposição de até 1% em relação ao diâmetro, sendo este um evento independente do tempo em que as partículas permanecem em contato. As colisões são quantificadas em pares, de modo que se mais de duas partículas se chocarem ao mesmo tempo, a separação de cada par é considerada como uma colisão. Além disso, quando considera-se desprezíveis as forças interpartículas de longo alcance, a maior contribuição para o movimento das partículas no leito é proveniente das colisões (FRIES et al., 2013; SANTOS, 2020; YANG; ZOU; YU, 2003).

Por fim, outro conceito importante é o de tempo crítico de integração de Rayleigh (Equação (2.16)), que representa o tempo necessário para a onda mecânica de Rayleigh se propagar ao longo da superfície da menor partícula, durante a utilização de um modelo de contato não-linear. A escolha do passo de tempo influencia no movimento das partículas e nas sobreposições entre elas, e de acordo com observações de Lima (2017), o indicado pela literatura para sistemas dinâmicos é que o *time-step* utilizado não ultrapasse de 20% do passo de tempo crítico (SANTOS, 2020; THORNTON; RANDALL, 1988).

$$t_R = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_s}{G_i}}}{(0,1613\nu_i + 0,8766)} \quad (2.16)$$

sendo  $r$  o raio da menor partícula do sistema,  $\rho_s$  a densidade da partícula,  $G_i$  o módulo de cisalhamento e  $\nu_i$  a razão de Poisson.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção estão descritos os procedimentos metodológicos adotados para a realização deste trabalho. Inicialmente, ocorreu a caracterização da polpa de acerola utilizada. Em seguida, foi desenvolvido um estudo numérico da dinâmica das partículas inertes no interior do tambor rotatório, que forneceu informações importantes a respeito da operação e da geometria do equipamento. E, após a análise dos dados numéricos, prosseguiu-se com o estudo experimental, baseado em ensaios de secagem que visaram avaliar o efeito de variáveis operacionais no processo de desidratação da polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes.

#### 3.1. Polpa de acerola

Nos experimentos, foi utilizada uma polpa de acerola industrializada que contém apenas acerola em sua composição (marca Mais Fruta), obtida em lojas especializadas da cidade de Uberlândia – MG. Esta polpa foi fornecida em embalagens de 100 g, provenientes de um mesmo lote, que foram envolvidas individualmente em papel alumínio e armazenadas em freezer, a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Previamente à realização dos experimentos, a polpa era retirada do freezer e descongelada em temperatura ambiente, por aproximadamente 4 horas.

Figura 3.1 - Polpa de acerola.



### 3.2. Análises físico-químicas

A polpa de acerola passou por algumas análises físico-químicas com o intuito de avaliar suas propriedades e tais caracterizações são descritas nos tópicos a seguir.

#### 3.2.1. Umidade e atividade água

O teor de umidade foi determinado tanto para a polpa de acerola quanto para o produto desidratado no SRRI. Para tal, foi utilizado o método gravimétrico com emprego de calor, à temperatura de  $105 \pm 5$  °C, por 24 h, em uma estufa da marca Marconi, modelo MA033 (AOAC, 1990).

A atividade de água foi medida com uso do equipamento LabSwift da marca Novasina, que possui célula eletrolítica para medição de umidade e sensor infra-vermelho para medição da temperatura superficial da amostra. A faixa de medição do equipamento vai de 0,030 a 1,000, com precisão de  $\pm 0,003$ .

A análise de umidade permitiu que fosse calculado o rendimento do processo de secagem, por meio da Equação (3.1), o qual é caracterizado pela razão entre a massa seca de produto coletado e a massa seca de polpa alimentada.

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

sendo  $m_{\text{produto}}$  a massa do pó de acerola produzido,  $U_{\text{produto}}$  o teor de umidade deste produto,  $m_{\text{alimentação}}$  a massa da polpa alimentada durante o processo de secagem e  $U_{\text{polpa}}$  o teor de umidade da polpa.

#### 3.2.2. Densidade real

A densidade, ou massa específica real, foi medida através de picnometria por gás Hélio, utilizando-se de um equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330, cuja sensibilidade de medida é de  $10^{-4}$  g.cm<sup>-3</sup>. Para esta análise, a polpa foi previamente seca em estufa a  $105 \pm 5$  °C por 24 h, e em seguida foi moída com uso de almofariz e pistilo até a homogeneidade. A picnometria de gás é capaz de determinar o volume de um sólido, mesmo que poroso, pela variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. O gás Hélio é

geralmente utilizado por ser inerte e devido à sua facilidade em penetrar nos poros da amostra, o que confere um maior rigor à medição do volume do sólido (MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

### 3.2.3. pH

Para a determinação do pH, diluiu-se 15 g da polpa de acerola em 100 mL de água destilada e este sistema foi agitado por 30 min, com uso de um agitador magnético. Em seguida, a solução foi filtrada em papel filtro e o pH do sobrenadante foi medido por um pHmetro da marca Gehaka, modelo PG1800 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

### 3.2.4. Cinzas

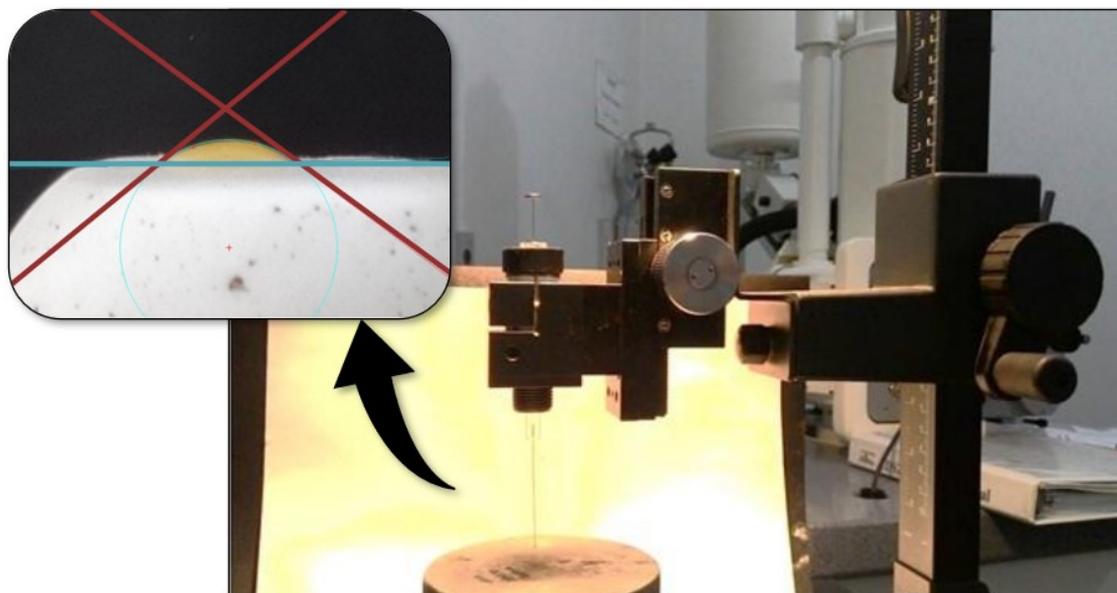
A determinação do teor de cinzas na polpa foi realizada por gravimetria, segundo a norma analítica E1755-01 (ASTM, 2001). Para este procedimento, pesou-se amostras de aproximadamente 1 g de polpa previamente seca em estufa a  $105 \pm 5$  °C por 24 h, em cadinho de massa conhecida. Em uma mufla da marca EDG, modelo 1150-1P-W1, o material foi incinerado a  $575 \pm 25$  °C por 4 h. Finalmente, os cadinhos foram armazenados em dessecador até resfriamento à temperatura ambiente. O resultado foi expresso em percentual de cinzas em relação à massa inicial de amostra.

### 3.2.5. Ângulo de contato

O ângulo de contato entre a polpa e o material das partículas inertes foi medido pelo do método da gota séssil, como proposto por Barbosa (2016). Utilizou-se um equipamento construído pelo Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC – UFU), apresentado na Figura 3.2.

Gotas de volume constante foram depositadas sobre a superfície plana e horizontal de sólidos de porcelana de calcita, com auxílio de uma seringa estrategicamente posicionada. O procedimento foi fotografado e as imagens foram analisadas no software *Surftens*, que fornece resultados para o ângulo de contato. Realizou-se medidas para a polpa pura e para a polpa com adição de diferentes concentrações de maltodextrina (agente carreador): 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 e 20,0 %.

Figura 3.2 - Equipamento utilizado para a determinação do ângulo de contato pelo método da gota séssil e detalhe da medição feita no software *Surftens*.



Fonte: adaptado de Barbosa (2016).

### 3.2.6. Análises de compostos bioativos

Neste trabalho, os compostos bioativos avaliados foram compostos fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico. Tais análises foram realizadas tanto para a polpa de acerola quanto para o produto desidratado pelo SRRI, a fim de estudar a influência da secagem com diferentes condições operacionais na qualidade do produto final. Todas estas análises foram realizadas em ambiente com baixa luminosidade e dois processos distintos de extração foram empregados.

Para a determinação dos teores de fenólicos e flavonoides, utilizou-se metanol como agente extrator, de modo que o reagente e a amostra foram colocados em contato em um tubo com tampa e agitados em vórtex (KASVI/K45-2810) por 3 min. Em seguida, os tubos foram armazenados em ambiente escuro pelo período de 1 h, buscando favorecer a extração dos compostos contidos na amostra. Por fim, filtrou-se a mistura em papel de filtro, obtendo-se o extrato que foi empregado nas análises (SILVA, 2019).

Para a obtenção do extrato a ser utilizado na determinação do teor de ácido ascórbico, as amostras foram maceradas na presença de água destilada, com auxílio de almofariz e pistilo, e posteriormente filtradas (AOAC, 1990).

### **3.2.6.1. Teor de fenólicos totais (TPC)**

A determinação do teor de compostos fenólicos totais foi realizada de acordo com o método Folin-Ciocalteu (SINGLETON; ROSSI, 1965). O reagente Folin-Ciocalteu tem em sua composição o ácido fosfotúngstico ( $H_3PW_{12}O_{40}$ ) e ácido fosfomolibdico ( $H_3PMo_{12}O_{40}$ ) que são reduzidos, por substâncias contidas no extrato, a complexos que conferem uma coloração azul à solução. Dessa forma, é possível quantificar os compostos fenólicos presentes no extrato utilizando um espectrofotômetro (Pró-Análise/V-1200). As leituras foram realizadas com comprimento de onda definido em 622 nm e a curva de calibração foi construída utilizando ácido gálico ( $C_7H_6O_5$ ) como padrão. Os resultados foram expressos em mg de ácido gálico/100 g de amostra em base seca.

### **3.2.6.2. Teor de flavonoides totais (TFC)**

O conteúdo total de flavonoides também foi determinado por um método colorimétrico, segundo a metodologia descrita por Zhishen, Mengcheng e Jianming (1999). Neste procedimento, as ligações entre o íon alumínio ( $Al^{+3}$ ) e grupos presentes na estrutura dos flavonoides trazem uma coloração amarelo-alaranjada à solução. A determinação da concentração de flavonoides presentes no extrato foi feita por espectrofotometria, com leituras no comprimento de onda de 450 nm e a curva de calibração foi construída utilizando rutina ( $C_{27}H_{30}O_{16}$ ) como padrão. Os resultados foram expressos em mg de rutina/100 g de amostra em base seca.

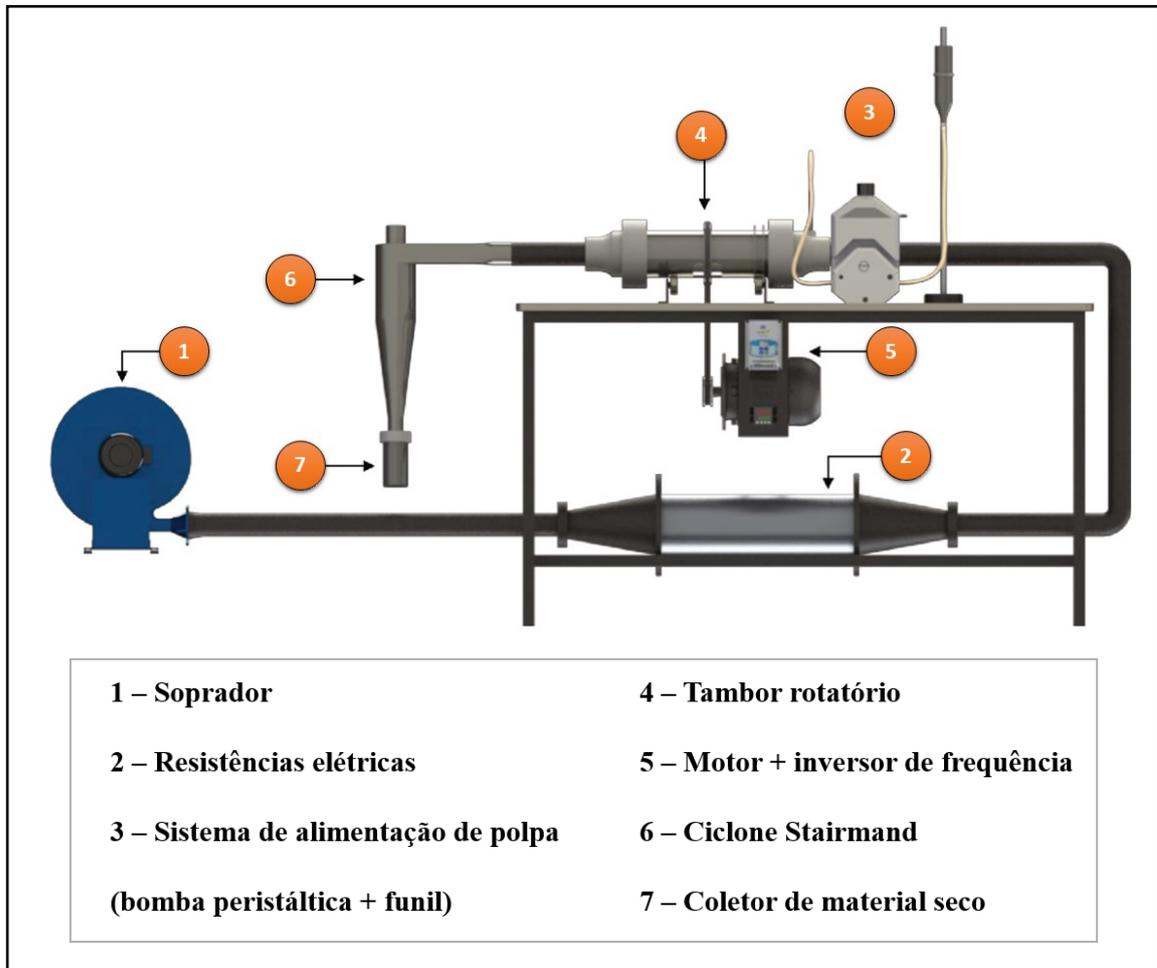
### **3.2.6.3. Teor de ácido ascórbico (AA)**

O teor de ácido ascórbico foi determinado por titulometria, segundo método da AOAC (1990), o qual baseia-se na redução do corante 2,6-diclorofenol-indofenol (DCFI) pelo ácido ascórbico. Juntou-se o extrato obtido previamente a uma solução de ácido oxálico (2%) e a solução resultante foi titulada com a solução de DCFI (0,025%) padronizada. Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico/100 g de amostra em base seca.

### 3.3. Secador Rotatório com Recheio de Inertes (SRRRI)

A unidade experimental fica localizada no Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI – UFU). Os ensaios de secagem foram realizados no secador rotatório com recheio de inertes, em escala de bancada, representado esquematicamente pela Figura 3.3.

Figura 3.3 - Representação esquemática da unidade experimental contendo o secador rotatório com recheio de inertes.



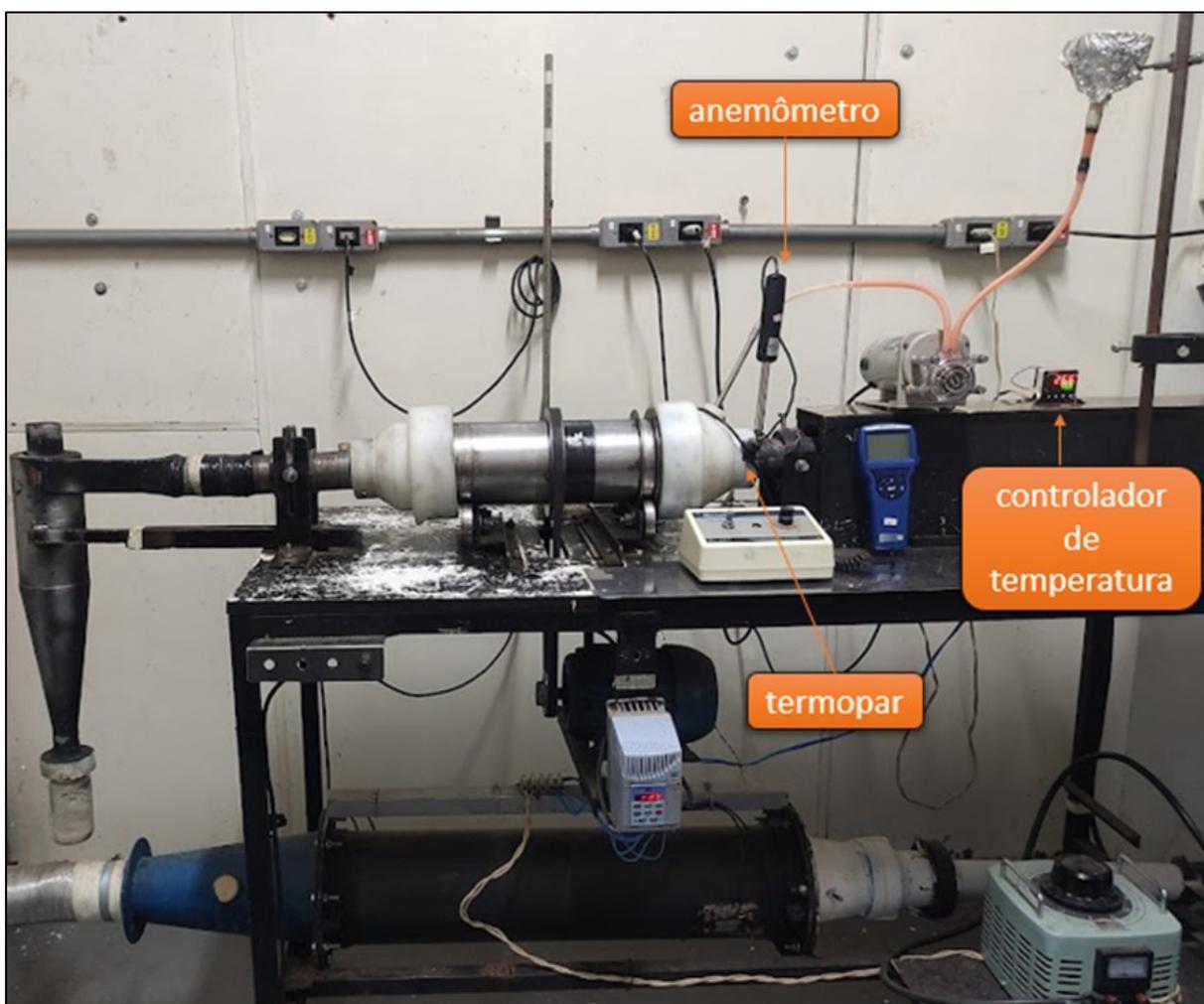
Fonte: adaptado de Santos (2020).

A unidade experimental era composta por um soprador do tipo ventilador radial, da marca Kepler-Weber, modelo 112M. O soprador injetava ar no sistema através de um duto, onde este ar era aquecido por um conjunto de resistências elétricas acopladas a um variador de voltagem. Um anemômetro de fio quente da marca TSI Instruments, modelo VelociCalc,

localizado a montante da câmara de secagem, foi utilizado para a medição da velocidade de escoamento do ar (Figura 3.4).

Para controle da temperatura do ar, foi utilizado um termopar do tipo K, situado na entrada do tambor, o qual enviava um sinal referente à temperatura medida para um controlador da marca Novus, modelo N1030 ( $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) (Figura 3.4). Este controlador efetuava uma estratégia de controle do tipo *on-off* que atuava nas resistências elétricas, de modo que, com base no sinal recebido do termopar, o controlador podia desligar ou ligar o aquecimento, a fim de que a temperatura atingisse e se mantivesse no *set point*. Este ar aquecido percorria o interior do secador rotatório, estabelecendo contato com os inertes e com o material a ser seco.

Figura 3.4 - Secador Rotatório com Recheio de Inertes (SRRI) e alguns dispositivos em destaque.



A rotação do tambor era resultado do trabalho de um motor elétrico (WEG-W22 Plus) e o valor operacional da velocidade angular era definido com auxílio de um inversor de

frequência (WEG - CFW08). Para monitorar a velocidade de rotação do tambor, utilizou-se uma placa de prototipagem eletrônica *Arduino Nano* e um tacômetro que atuou como sensor para detectar os giros do tambor (Figura 3.5). Os sinais emitidos pelo tacômetro eram processados por um programa escrito em C++, que foi compilado e gravado na placa. Dessa forma, a placa enviava a um computador informações de rotação específica, média e desvio padrão das últimas 10 medidas, as quais eram exibidas na tela do computador, através do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do *Arduino*.

Figura 3.5 - Sistema de monitoramento da velocidade de rotação do tambor (a) e IDE do *Arduino* (b).



A polpa era alimentada diretamente no tambor, de forma concorrente em relação ao ar de secagem, por meio de um sistema composto por um funil acoplado a uma bomba peristáltica da marca MasterFlex, modelo 7553-70. Logo após a saída do tambor situava-se um ciclone do tipo *Stairmand* ( $D_c = 10\text{ cm}$ ), que promovia a separação gás-sólido, enviando o material seco para o *underflow*, onde estava acoplado um recipiente coletor.

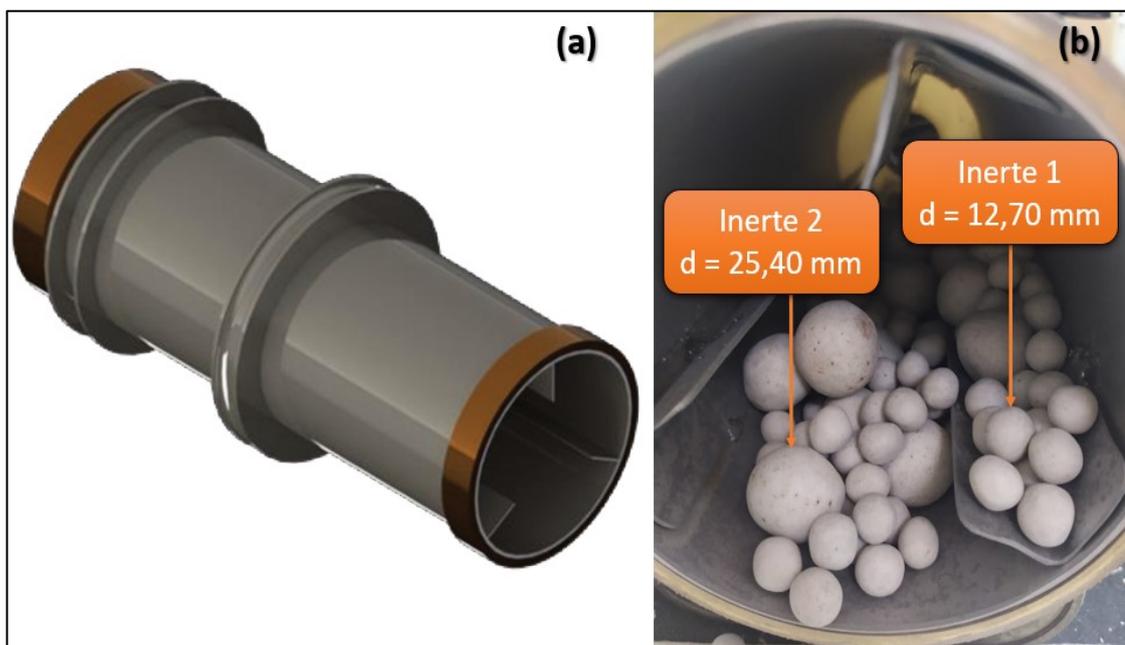
O tambor rotatório utilizado neste trabalho foi confeccionado em aço inox e suas dimensões são: diâmetro de 12 cm e comprimento de 36 cm, como ilustrado na Figura 3.6-a. Visando prolongar a vida útil do equipamento através da prevenção do desgaste de suas peças,

foram instalados anéis de bronze e retentores nas regiões em que há contato entre o tambor e as partes fixas. Essas estruturas possibilitam que o tambor gire livremente sem perdas de material nas juntas. Além disso, o tambor é equipado internamente com três suspensores retos com medida de 25 mm de altura.

As partículas inertes utilizadas nesse trabalho como recheio do secador são esferas de porcelana de calcita, com densidade ( $\rho_s$ ) de 2230 kg/m<sup>3</sup>, e classificadas em dois diâmetros diferentes: 12,70 mm (inerte 1) e 25,40 mm (inerte 2), conforme apresentado na Figura 3.6-b. A escolha por inertes de material cerâmico baseou-se em vantagens como sua resistência à abrasão, evitando que os choques decorrentes da operação do equipamento ocasionem desgaste e contaminação do produto seco. Outra característica positiva é o fato da porcelana conseguir reter calor, o que favorece o processo de secagem (BURJAILI, 1996; HONORATO, 2006).

Já a escolha relativa ao uso de partículas de tamanhos distintos simultaneamente no recheio do tambor, bem como dos diâmetros das partículas utilizadas, teve como base estudos realizados por Santos (2020), que identificaram, por meio de análise numérica, a melhor combinação de inertes. O autor combinou, dois a dois, inertes de três diâmetros diferentes (12,70, 19,05 e 25,40 mm) e observou que a combinação entre os inertes de menor e maior diâmetro, foi a que mais favoreceu o rendimento de secagem, pela maximização simultânea da força de colisão entre partículas e da frequência em que essas colisões ocorrem.

Figura 3.6 - Representação esquemática do tambor rotatório (a) e vista de seu interior com inertes em detalhe (b).



Fonte: adaptado de Santos (2020).

### 3.4. Análise numérica da dinâmica de colisão entre partículas inertes

Neste estudo numérico, simulações foram desenvolvidas em busca de uma melhor compreensão acerca da dinâmica das partículas no interior do tambor rotatório durante seu funcionamento, extraindo-se respostas referentes à magnitude da força de colisão entre as partículas e à frequência em que elas acontecem. Nesse sentido, verificou-se os efeitos das variáveis operacionais grau de enchimento do tambor (E), fração entre inertes (FI) e rotação do tambor (R). Além disso, investigou-se a influência da modificação de aspectos geométricos do tambor rotatório.

As simulações foram realizadas aplicando a abordagem Lagrangeana (método dos elementos discretos – DEM), por meio do *software* EDEM, e as geometrias tridimensionais utilizadas nas simulações foram construídas no *software* SolidWorks. O computador empregado nessas simulações tem processador Xeon com 24 núcleos e pertence ao cluster do Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI – UFU).

Em todas as simulações utilizou-se um *time-step* de 10% do tempo de Rayleigh, segundo recomendações encontradas na literatura de se evitar *time-steps* maiores que 20% do tempo de Rayleigh, a fim de garantir que o movimento das partículas seja influenciado somente por perturbações provenientes da propagação de ondas de suas vizinhas locais (LIMA, 2017). E para cada caso estudado foi simulado um total de 60 segundos do processo.

Os parâmetros de entrada requeridos pelos cálculos realizados durante as simulações DEM envolvem características da partícula utilizada, como densidade, módulo de cisalhamento e razão de Poisson; e também parâmetros relacionados às interações partícula-partícula e partícula-parede, tais como coeficientes de restituição, de atrito estático e de rolamento. Esses valores são apresentados na Tabela 3.1 e foram obtidos da literatura (SANTOS et al., 2021).

Tabela 3.1- Parâmetros de entrada para as simulações DEM.

Parâmetro	Material	Valor
Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Porcelana	2230
	Aço inoxidável	7800
Razão de Poisson (-)	Porcelana	0,2
	Aço inoxidável	0,2
Módulo de cisalhamento (Pa)	Porcelana	1.10 <sup>6</sup>
	Aço inoxidável	1.10 <sup>6</sup>
Coeficiente de Restituição (-)	Partícula-partícula	0,86
	Partícula-parede	0,86
Coeficiente de Atrito Estático (-)	Partícula-partícula	0,23
	Partícula-parede	0,23
Coeficiente de Atrito de Rolamento (-)	Partícula-partícula	0,01
	Partícula-parede	0,01

Fonte: Santos et al (2021).

Em relação às variáveis operacionais estudadas, o grau de enchimento diz respeito ao volume do tambor que é ocupado por partículas inertes, e é calculado por meio da Equação (3.2).

$$E(\%) = \frac{V_{inertes}}{V_{tambor} - V_{suspensores}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

sendo  $V_{inertes}$  o volume ocupado pelo conjunto de partículas inertes no tambor,  $V_{tambor}$  o volume interno do tambor rotatório,  $V_{suspensores}$  o volume ocupado pelos três suspensores.

A variável fração entre inertes foi estabelecida, de acordo com Santos (2020), pela necessidade de se estipular uma proporção, em volume, entre os tipos de inertes que constituíam o recheio do tambor, em termos de tamanho. Quando o volume de inertes que preenchem o tambor inclui partículas de dois tamanhos diferentes, calcula-se a fração entre inertes por meio da Equação (3.3).

$$FI(\%) = \frac{V_{menor\ inerte}}{V_{inertes}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

sendo  $V_{menor\ inerte}$  o volume ocupado por partículas de menor diâmetro no tambor.

Neste estudo, o recheio do tambor era composto por partículas de 12,70 mm (inerte 1) e 25,40 mm (inerte 2), portanto, a variável fração entre inertes representava a proporção percentual do inerte 1 em relação ao volume total de partículas no tambor, delimitado pelo grau de enchimento. Consequentemente, a fração complementar do cálculo apresentado na Equação (3.3) descreve a fração, em volume, do inerte 2. Isto é, uma fração de inertes igual a 60% expressa que 60% do volume ocupado pelo recheio de inertes é composto pelo inerte 1, e 40% desse volume é composto pelo inerte 2.

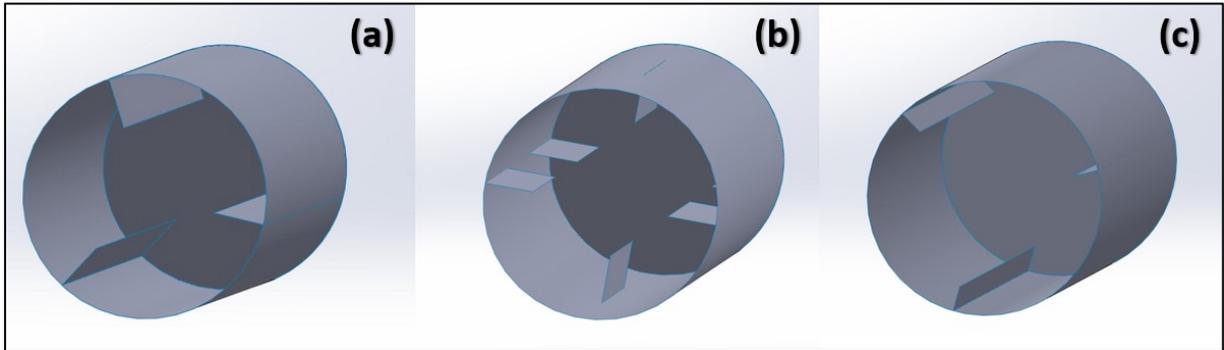
Para as simulações DEM, foi necessário calcular o número de partículas  $n_p$  a serem criadas durante o procedimento computacional. Esse valor do número de partículas depende do grau de enchimento e da fração entre inertes, e foi determinado por meio da Equação (3.4), para cada tamanho de partícula utilizado nos casos simulados.

$$n_p = \frac{(V_{tambor} - V_{suspensores}) \cdot (1 - \varepsilon)}{V_{partícula}} \cdot E.FI \quad (3.4)$$

Já as modificações geométricas foram propostas a partir da configuração atual do SRRI, isto é, um tambor equipado com três suspensores longitudinais contínuos medindo 25 mm de altura. Dessa forma, estudou-se os efeitos de variações na altura dos suspensores (AS) e do tipo de suspensor (TS), variando entre suspensores contínuos e alternados, como é mostrado na Figura 3.7. Os efeitos dessas variáveis geométricas, juntamente com as variáveis operacionais foram avaliados para configurações contendo diferentes números de suspensores, entre 2 e 10.

Vale ressaltar que o valor sugerido para a modificação da altura dos suspensores foi definido com base em estudos realizados em moinhos de bola. Powell (1991) afirma que os suspensores devem ter, no mínimo, a altura do raio da esfera utilizada como corpo moedor para serem capazes de elevar a carga, sendo o raio da maior partícula utilizada neste trabalho igual a 12,7 mm. Além disso, em relação ao tipo de suspensor, devido à forma como os suspensores alternados foram propostos, essa variável foi avaliada apenas para configurações com números pares de suspensores.

Figura 3.7 - Geometria do tambor rotatório com suspensores contínuos de 25 mm (a), com suspensores alternados de 25 mm (b) e com suspensores contínuos de 13 mm (c).



Ante o exposto, executou-se uma série de simulações, com base em planejamentos fatoriais de 2 níveis ( $2^k$ ), como descrito abaixo, e de acordo com os níveis apresentados na Tabela 3.2. Ao todo, foram simulados 128 casos: 96 casos com 5 variáveis ( $3 \times 2^5$ ), 16 casos com 4 variáveis ( $1 \times 2^4$ ) e 16 casos com 3 variáveis ( $2 \times 2^3$ ).

- $k=5$ : variando rotação (R), grau de enchimento (E), fração entre inertes (FI), altura dos suspensores (AS) e tipo de suspensor (TS)

Configurações: 4, 6 e 10 suspensores

- $k=4$ : variando rotação (R), grau de enchimento (E), fração entre inertes (FI) e altura dos suspensores (AS)

Configuração: 3 suspensores

- $k=3$ : variando rotação (R), grau de enchimento (E) e fração entre inertes (FI)

Configurações: 2 e 5 suspensores

Tabela 3.2 - Níveis das variáveis no planejamento  $2^k$ .

Variáveis	Níveis	
	-1	+1
Rotação (rpm)	50	70
Grau de enchimento (%)	25	35
Fração entre inertes (%)	30	70
Altura do suspensor (mm)	13	25
Tipo de suspensor (-)	Alternado	Contínuo

### 3.4.1. Análise dos dados computacionais utilizando uma Resposta Combinada (RC)

Após a execução das simulações no resolvidor numérico EDEM, arquivos de extensão *.csv* contendo informações referentes ao número total de colisões entre partículas e entre partículas e a parede do equipamento, e à componente normal da força de colisão, foram exportados para cada passo de tempo. Dessa forma, sendo o tempo de simulação igual a 60 segundos, obteve-se cerca de 6000 dados brutos para cada uma das 128 simulações realizadas.

Diante disso, a análise individual desses dados era inviável e foi desenvolvido um programa na linguagem *Python* para auxiliar nessa etapa de pós-processamento. O programa extraía, diretamente dos arquivos *.csv*, as informações desejadas e realizava o tratamento de dados adequado, de modo a gerar resultados médios para o número de colisões (NC) e para a força de colisão (FC).

Quando se analisa duas respostas diferentes que resultam de um mesmo processo, existe a chance de se tomar alguma decisão equivocada ao se olhar mais para uma resposta do que para outra. Para não cometer este tipo de erro, e, no geral, para facilitar na interpretação dos dados, foi definida uma resposta que combina informações do número de colisões e da força de colisão. Esta resposta foi denominada Resposta Combinada (RC) e é baseada na função desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980), que é amplamente utilizada em problemas de otimização.

Para tal, primeiro foram definidas duas funções que representam a desejabilidade das respostas NC e FC, de acordo com as Equações (3.5) e (3.6), respectivamente. Nota-se, pelas equações, que as variáveis  $d_{NC}$  e  $d_{FC}$  encontram-se sempre entre zero e um, de forma que  $d_{NC}$  é zero quando o número de colisões for o menor valor observado ( $NC_{mín}$ ), e é igual a um quando o número de colisões for o maior valor observado ( $NC_{máx}$ ). O raciocínio é análogo para a força de colisão.

$$d_{NC} = \frac{NC - NC_{mín}}{NC_{máx} - NC_{mín}} \quad (3.5)$$

$$d_{FC} = \frac{FC - FC_{mín}}{FC_{máx} - FC_{mín}} \quad (3.6)$$

Um aspecto importante a ser destacado é que estas equações levam em consideração o menor e o maior valor observado de cada uma das respostas entre todas as 128 simulações, o

que garante que, independentemente da configuração analisada, o valor mais próximo de 1 será o maior valor para aquela resposta entre todas as configurações estudadas numericamente.

Finalmente, as respostas individuais  $d_{NC}$  e  $d_{FC}$  foram combinadas em uma única resposta, a resposta combinada, por meio da média geométrica, como apresentado na Equação (3.7), que também resulta em valores entre zero e um.

$$RC = \sqrt{d_{NC}d_{FC}} \quad (3.7)$$

Com base nos resultados obtidos para a resposta combinada, foi possível classificar os melhores casos entre as diferentes configurações estudadas para o tambor rotatório e extrair informações que se relacionam com os estudos experimentais.

### 3.5. Ensaios de secagem

Neste trabalho, estudou-se experimentalmente o efeito de três variáveis na secagem da polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes: concentração de maltodextrina (M), fração entre inertes (FI) e temperatura do ar (T). As respostas analisadas foram o rendimento de secagem e os teores de compostos bioativos. Os efeitos destas variáveis foram avaliados através de um Planejamento Composto Central (PCC) ortogonal, totalizando 16 experimentos. Na Tabela 3.3 são apresentados os níveis codificados e originais das variáveis.

Tabela 3.3 - Planejamento Composto Central para a secagem de polpa de acerola em SRRI.

Variáveis independentes	Níveis				
	$-\alpha$ (-1,287)	-1	0	+1	$+\alpha$ (+1,287)
Concentração de maltodextrina (%)	6,28	8,00	14,00	20,00	21,72
Fração entre inertes (%)	29,97	35,00	52,50	70,00	75,03
Temperatura (°C)	44,26	50,00	70,00	90,00	95,74

Para a realização dos experimentos, a unidade era montada e preparava-se o sistema a fim de que ele atingisse o equilíbrio térmico e fluidodinâmico com antecedência de aproximadamente 30 minutos em relação ao início da alimentação. Para tal, ligava-se o soprador, mantendo o ar numa mesma velocidade em todos os experimentos; iniciava-se a rotação do tambor através do inversor de frequência, com monitoramento feito por meio do

*Arduino*; e acionava-se o sistema de aquecimento, fixando a temperatura desejada no controlador (Novus N1030).

A cada experimento, uma determinada temperatura do ar de secagem era fixada no controlador, o qual garantia que a temperatura fosse mantida no *set point*, com precisão de 0,1 °C, com auxílio do termopar situado na entrada do tambor. O ar quente que atravessava o interior do secador atingia a temperatura de operação quando passava pelo duto onde se localizavam as resistências, as quais eram acionadas ou desligadas periodicamente pelo controlador. Para os níveis da variável temperatura no planejamento, escolheu-se um valor máximo que não apresentasse risco à estrutura do equipamento e um valor mínimo baseado no fato de que, mesmo com as resistências desligadas, o funcionamento do soprador radial era capaz de aquecer o ar (35 °C).

O material a ser alimentado no secador consistia da polpa de acerola misturada a diferentes concentrações de maltodextrina (DE 11), que é um aditivo de secagem empregado com o intuito de melhorar a textura da polpa de acerola. Isto porque, estudos realizados por Silva (2019) concluíram que a adição de maltodextrina à polpa de camu-camu processada em SRRI favoreceu o rendimento do processo, uma vez que reduziu a pegajosidade do material e facilitou a sua remoção da superfície dos inertes e das paredes do tambor. O autor alega que estes efeitos estão relacionados com o aumento da temperatura de transição vítrea devido à presença da maltodextrina na polpa. Os níveis da variável concentração de maltodextrina foram, portanto, escolhidos com base nos estudos de Silva (2019) e de outros autores que fizeram uso desse mesmo aditivo em polpas de frutas.

Uma quantidade de aproximadamente 100 g dessa polpa preparada era alimentada no secador a cada experimento. A alimentação foi feita de maneira intermitente, de modo que a cada 7 minutos bombeava-se cerca de 15 g de polpa no tambor, e esse procedimento se repetia até que se esgotasse o material a ser processado. A alimentação intermitente já havia sido anteriormente aplicada nos trabalhos de Burjaili (1996), Honorato (2006), Moura (2009), Silva (2019) e Santos (2020), para estudos feitos neste mesmo tipo de secador rotatório. Optou-se, então, por esse regime de alimentação, buscando evitar que o material úmido se acumulasse no interior do tambor no decorrer da secagem.

Após o fim da alimentação, mantinha-se o SRRI em funcionamento por mais 90 min, com o intuito de assegurar que o máximo de material seco fosse removido do interior do equipamento. E vale ainda ressaltar que durante a realização de todos os experimentos a umidade relativa do ar encontrava-se, em média, em 35%.

Em relação ao recheio do tambor, a variável fração entre inertes era medida, experimentalmente, em termos das massas de partículas inertes a serem utilizadas em cada experimento. Como o recheio era composto por esferas de dois diâmetros diferentes, os cálculos das massas de sólidos foram feitos de acordo com as Equações (3.8) e (3.9), para os inertes de menor diâmetro e para os inertes de maior diâmetro, respectivamente.

$$m_1 = (V_{tambor} - V_{suspensores})(1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot FI \quad (3.8)$$

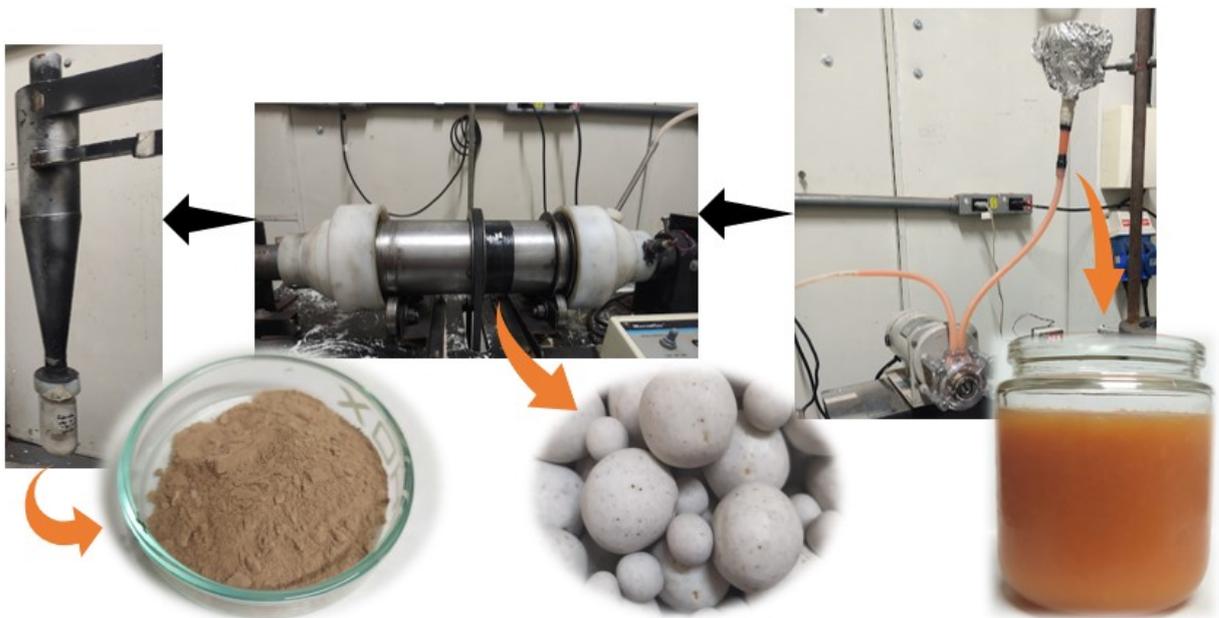
$$m_2 = (V_{tambor} - V_{suspensores})(1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot (1 - FI) \quad (3.9)$$

sendo  $\varepsilon_i$  a porosidade do leito e  $\rho_s$  a densidade da porcelana.

Além disso, os níveis da variável fração entre inertes, bem como os valores referentes ao grau de enchimento e à velocidade de rotação do tambor, foram definidos de acordo com observações feitas durante a análise numérica da dinâmica de colisão entre partículas inertes. O grau de enchimento e a rotação mantiveram-se constantes em todos os experimentos em 35% e 70 rpm, respectivamente.

Na Figura 3.8, algumas etapas do processamento da polpa de acerola no secador rotatório com recheio de inertes são ilustradas de forma esquemática.

Figura 3.8 - Esquema simplificado do processamento da polpa de acerola em SRRI para obtenção de um produto na forma de pó.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são abordados os resultados obtidos do estudo numérico sobre a dinâmica do material particulado no interior do tambor rotatório; das caracterizações da polpa de acerola; dos ensaios de secagem, que trouxeram informações a respeito do desempenho do secador rotatório com recheio de inertes para o processamento do material estudado.

### 4.1. Estudo numérico e sua relação com o rendimento de secagem

Durante o estudo numérico, executou-se uma série de simulações, baseadas em planejamentos fatoriais  $2^k$ , considerando a influência de fatores geométricos e operacionais nas respostas número de colisões (NC) e força de colisão (FC) entre as partículas. Para facilitar a verificação e análise dos resultados, as repostas obtidas numericamente foram posteriormente combinadas em um único resultado, a resposta combinada (RC), que considera informações obtidas dos 128 casos simulados, entre os diferentes planejamentos, para a definição dos valores máximos e mínimos utilizados nos cálculos.

Visualizações gráficas dos resultados obtidos para as respostas DEM são apresentadas nas Figuras 4.1 até 4.6. E as condições em que as simulações foram realizadas, bem como os resultados referentes às desejabilidades de cada resposta e à resposta combinada, encontram-se no Apêndice A.

Figura 4.1 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 4 suspensores.

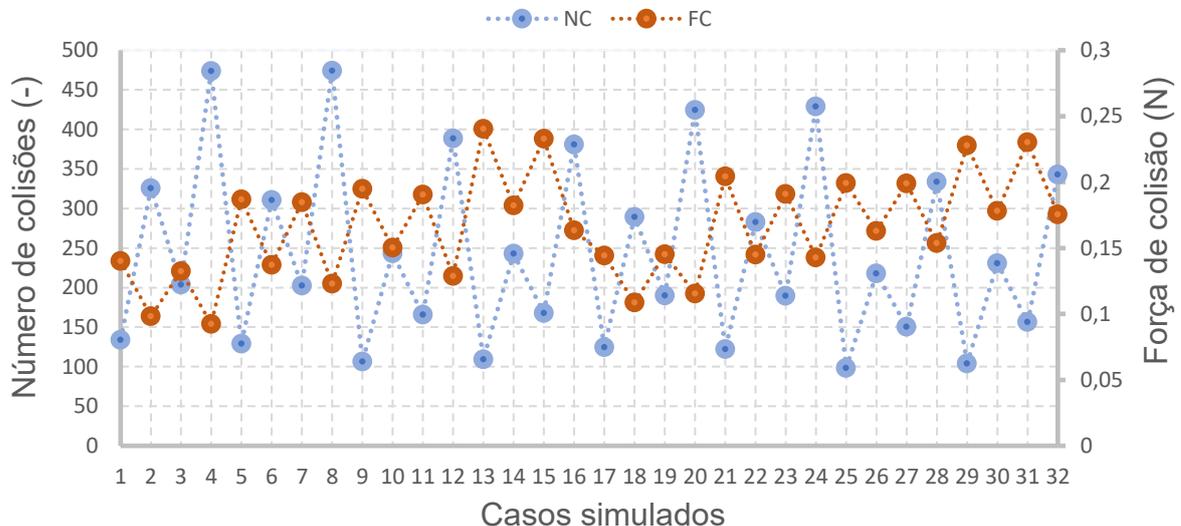


Figura 4.2 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 6 suspensores.

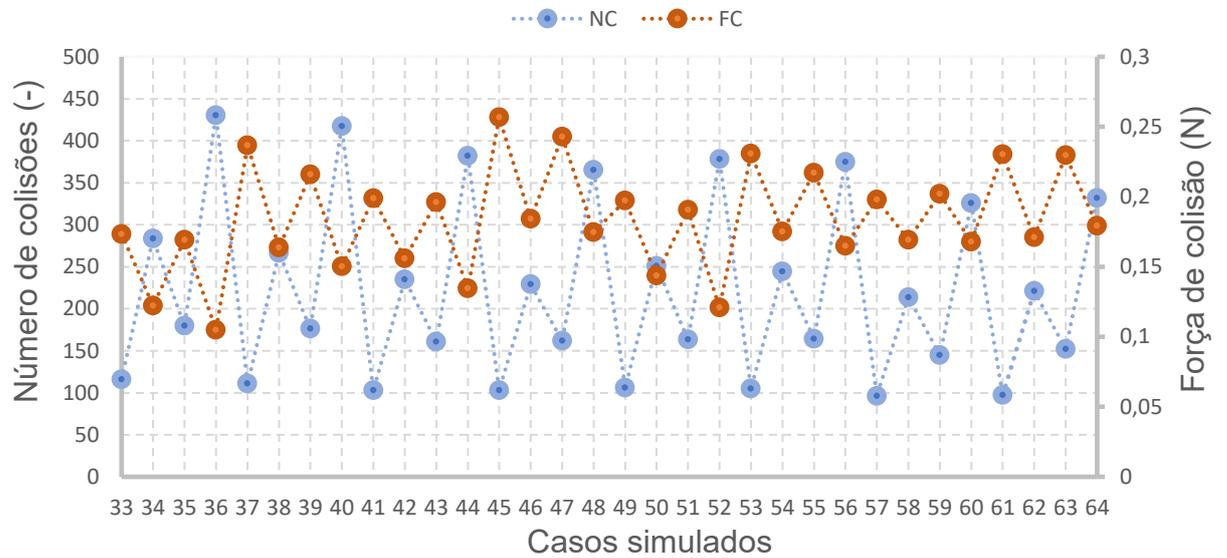


Figura 4.3 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 10 suspensores.

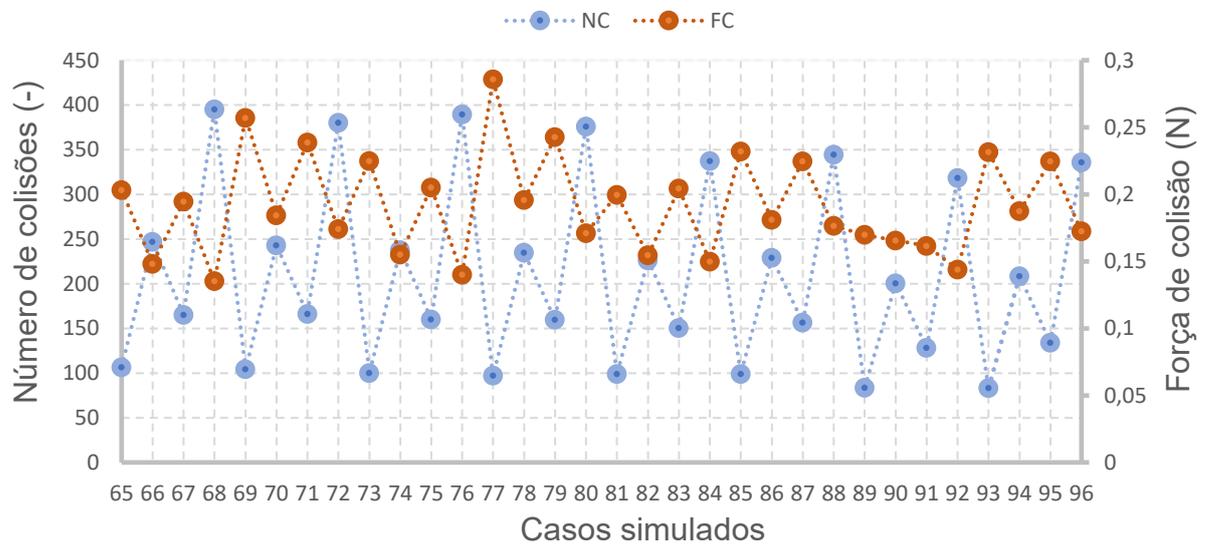


Figura 4.4 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 3 suspensores.

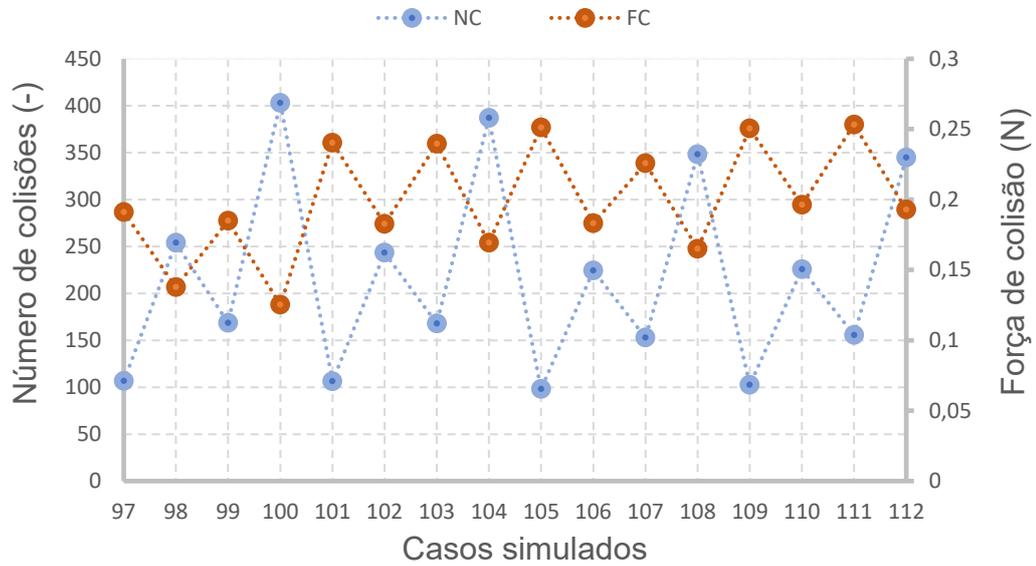


Figura 4.5 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 2 suspensores.

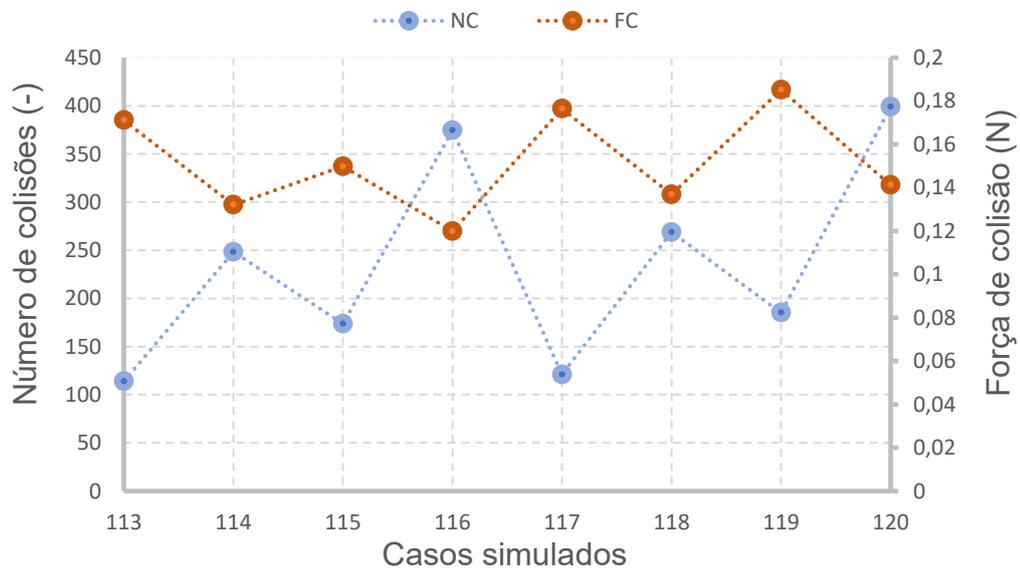
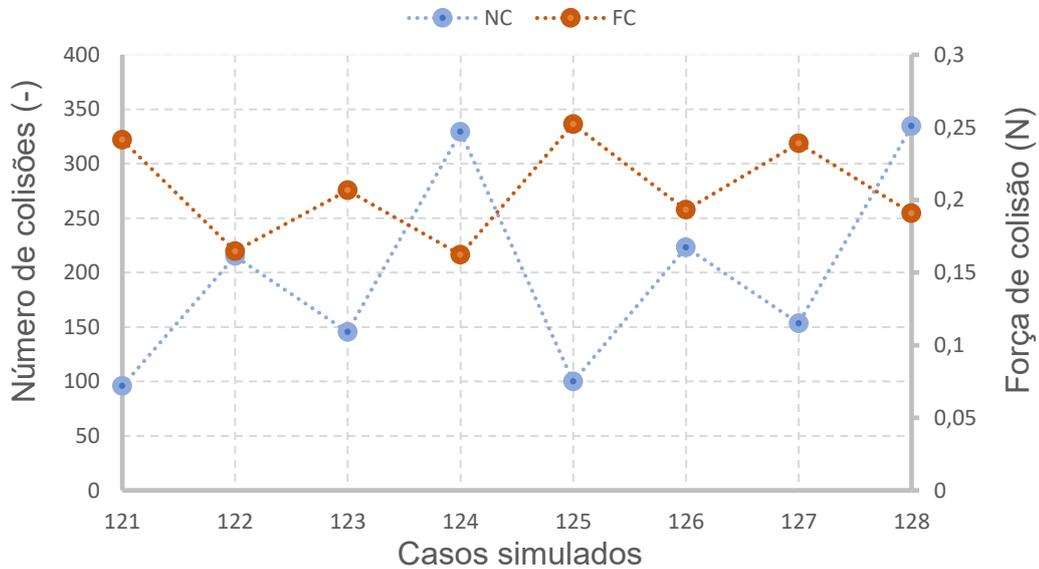


Figura 4.6 - Resultados numéricos do número de colisões e da força de colisão obtidos por meio da simulação DEM, considerando um tambor com 5 suspensores.



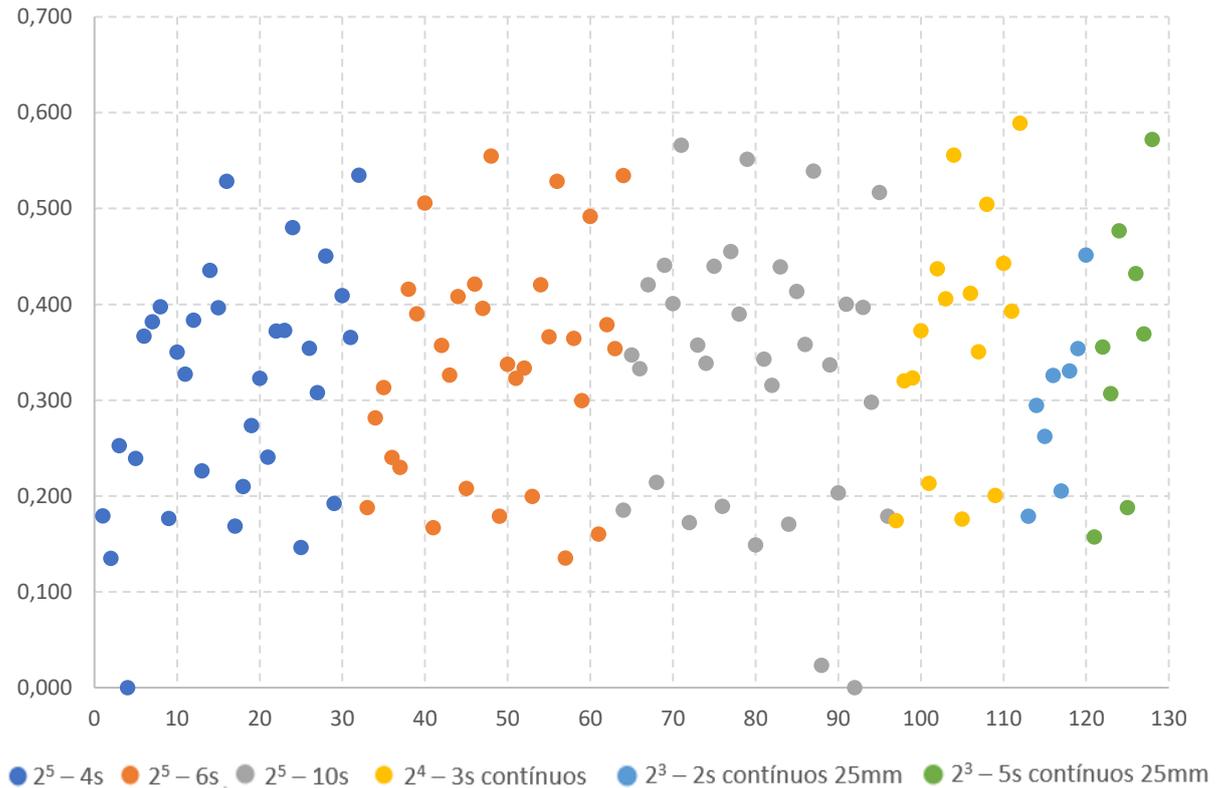
Notou-se, em todas as simulações, que os resultados referentes ao número de colisões e à força de colisão seguem tendências opostas em relação às alterações nas condições dos casos simulados. Ou seja, nas simulações onde observou-se um elevado número de colisões, a magnitude da força desempenhada nessas colisões foi baixa; e o contrário também é válido, então, nos resultados onde se observou elevada força de colisão, o número de colisões contabilizado foi relativamente baixo. Tal comportamento foi também observado por Santos (2020) ao estudar os impactos do uso de inertes com tamanhos diferentes em SRRI.

O desempenho da operação de secagem em SRRI é fortemente influenciado pelos choques entre as partículas inertes, portanto, deseja-se atingir não só um elevado número de colisões, como também uma de força de colisão capaz de garantir o desprendimento do material seco da superfície dos inertes e a fragmentação desse material para a forma de pó. Assim, a divergência de comportamento entre a força e a frequência das colisões gera um ponto crítico de análise, sendo de interesse encontrar uma condição balanceada e satisfatória para estas respostas. Neste ponto, ressalta-se a utilidade e a vantagem de se trabalhar com a resposta combinada: ela reduz o número de variáveis a serem analisadas, ao mesmo tempo em que realiza a função de equilibrar o número de colisão e a força colisão dentro do processo.

Dito isto, os resultados da resposta combinada (RC), descritos no Apêndice A para as 128 simulações realizadas, estão também contidos na Figura 4.7, onde os resultados pertencentes a cada um dos planejamentos  $2^k$  possuem a mesma cor, isto é, cada cor denota

uma configuração com um determinado número de suspensores (como detalhado na seção 3.4). Destaca-se que uma característica da resposta combinada é a de que todos os resultados estão matematicamente restritos no intervalo  $[0, 1]$ , sendo 0 correspondente os menores valores observados nas e, portanto, indesejáveis.

Figura 4.7 - Resultados de resposta combinada para todos os casos simulados.



A utilização desta metodologia de tratamento dos dados numéricos baseada na resposta combinada facilita a tomada de decisões, o que é de interesse no projeto e otimização de equipamentos. No caso específico deste trabalho, pode-se, como exemplo, traçar uma linha horizontal no valor de 0,5 do eixo das ordenadas, e assim descartar grande parte dos resultados que não atingiram este valor; ou seja, pode-se facilmente desconsiderar resultados com desejabilidade inferior a 50%.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os dados das configurações que produziram as cinco melhores respostas combinadas. Observa-se que estas cinco configurações possuem os níveis mais altos (+1) de rotação, de enchimento e de fração entre inertes. Das cinco configurações, a duas primeiras possuem suspensores de 25 mm, e apenas uma possui suspensores do tipo alternado. Sendo importante, portanto, pontuar que a configuração que apresentou a melhor resposta combinada é a configuração atual do equipamento estudado;

assim, este estudo numérico corrobora com as decisões de projeto tomadas na construção deste do secador, que ocorreu durante a realização da pesquisa de Silva (2019).

Tabela 4.1 - Valores dos fatores das cinco configurações que apresentaram as melhores respostas combinadas.

Identificador	Fatores					
	Número de Suspensores (-)	R (rpm)	E (%)	FI (%)	TS (mm)	TS (-)
112	3	70	35	70	25	C
128	5	70	35	70	25	C
72	10	70	35	70	13	A
104	3	70	35	70	13	C
48	6	70	35	70	13	C

Tabela 4.2 - Valores dos resultados das cinco configurações que apresentaram as melhores respostas combinadas.

Identificador	Respostas				
	NC (-)	FC (N)	d <sub>NC</sub> (-)	d <sub>FC</sub> (-)	RC (-)
112	345	0,1927	0,669	0,519	0,589
128	334	0,1909	0,643	0,509	0,572
72	380	0,1741	0,759	0,422	0,566
104	387	0,1693	0,777	0,398	0,556
48	365	0,1748	0,722	0,426	0,555

Os gráficos de Pareto contendo informações sobre os efeitos significativos dos fatores (a um nível de significância de 5%) para o planejamento  $2^5$  relativo à configuração com 4 suspensores, são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9 para as respostas número de colisões e força de colisão, respectivamente. Este tipo de gráfico possui barras horizontais que representam os efeitos de cada variável individualmente e das interações entre elas, de modo que o efeito é tão significativo quanto mais à direita da linha vermelha ele estiver.

Os gráficos referentes à configuração com 4 suspensores são apresentados visando exemplificar a discussão feita a respeito dos efeitos das variáveis independentes nas respostas DEM, efeitos estes que foram observados de maneira similar para as outras configurações investigadas nas simulações deste estudo numérico.

Figura 4.8 - Efeitos normalizados para o número de colisões.

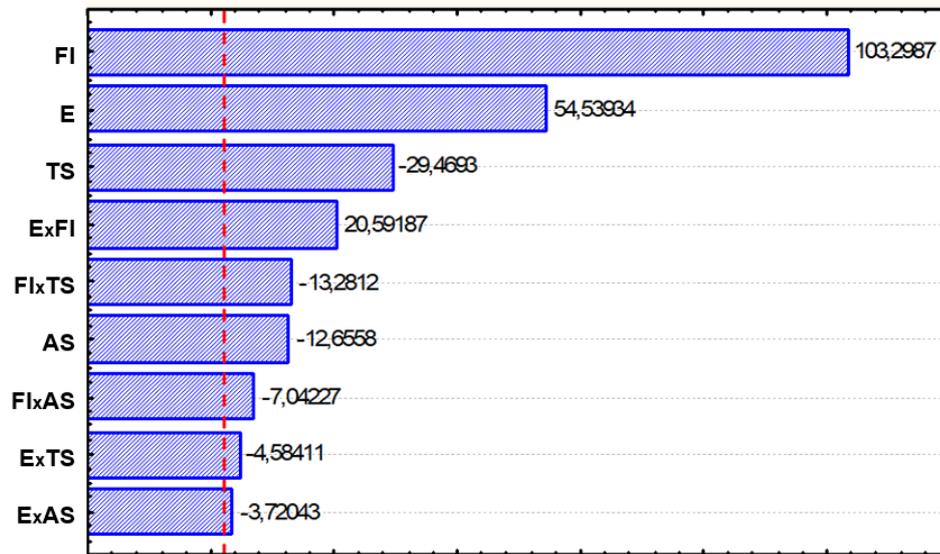
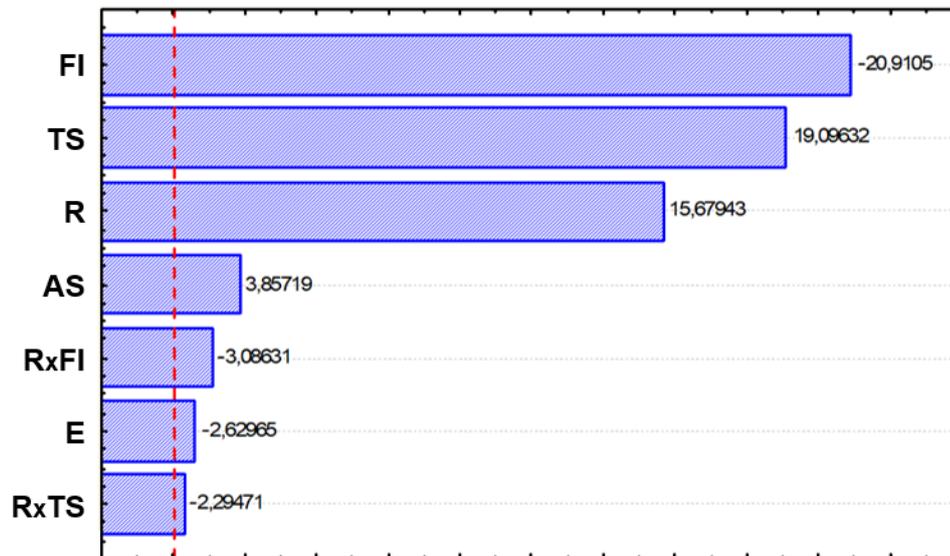


Figura 4.9 - Efeitos normalizados para a força de colisão.



Observa-se que a fração entre inertes foi a variável que mais influenciou em ambas as respostas, impactando positivamente no número de colisões e negativamente na força de colisão. Esta tendência foi observada em todas as 128 simulações. Isso ocorre porque esta fração está relacionada ao inerte de menor diâmetro (12,70 mm), portanto, um FI elevado significa que existem mais partículas de tamanho menor no tambor, em relação aos maiores (25,40 mm), dado um determinado volume interno. Como o inerte de menor diâmetro ocupa, individualmente, um volume menor que o inerte de maior diâmetro, uma maior fração entre inertes, nesse caso, resulta em uma maior quantidade de partículas dentro do tambor, o que

naturalmente ocasiona mais colisões, mas desfavorece a força de colisão, uma vez que os inertes menores se chocam com menos intensidade do que os de maior diâmetro.

Em relação ao número de colisões, o grau de enchimento do equipamento foi a segunda variável que mais a influenciou, seguida pelo tipo de suspensor (contínuo ou alternado). Já os efeitos da altura do suspensor e efeitos de interação entre dois fatores foram relativamente menores; e a rotação do tambor não influenciou significativamente nesta resposta. Para a resposta força de colisão, as variáveis que mais influenciaram significativamente, além da fração entre inertes, foram o tipo de suspensor e a rotação do tambor. Destaca-se que a rotação possui influência positiva na resposta.

É válido analisar detalhadamente o comportamento das variáveis grau de enchimento e rotação do tambor. O grau de enchimento influenciou mais no número de colisões do que na magnitude da força de colisão. Fisicamente, um maior grau de enchimento significa que há uma maior quantidade de partículas ocupando o tambor, logo, há mais chance de que elas se encontrem, favorecendo o número de colisões. No entanto, um enchimento elevado também implica que há menos espaço livre dentro do tambor, o que reduz a altura de queda das partículas após serem carregadas pelos suspensores e, conseqüentemente, reduz a energia potencial acumulada nessas partículas, portanto, espera-se que os choques entre elas sejam menos intensos. Diante disso, tem-se uma informação valiosa: como um maior grau de enchimento do tambor implicou em um maior número de colisões entre partículas e teve baixa influência na força de colisão, pode-se fixar esta variável em um valor elevado, desde que não atrapalhe a estabilidade do equipamento, e estima-se que isto resultará, de maneira geral, em uma maior quantidade de choques.

Já a variável rotação apresentou influência positiva na força de colisão e não teve efeito significativo no número de colisões. O favorecimento da força de colisão é explicado pelo fato de que uma maior velocidade de rotação do tambor concede mais energia às partículas, fazendo com que elas se choquem mais violentamente ao se encontrarem. E em relação à outra resposta, é possível que a variação da velocidade de rotação na faixa operacional usada neste estudo (entre 50 e 70 rpm) não tenha sido suficiente para surtir efeito significativo na frequência em que as partículas se chocam. Portanto, assim como para o caso do grau de enchimento, esta constatação também permite a remoção da variável rotação dos estudos experimentais, uma vez que se pode fixá-la em um valor mais alto, objetivando o favorecimento da magnitude da força de colisão.

#### 4.2. Caracterização da polpa de acerola

A polpa de acerola foi caracterizada com o intuito de checar seu potencial de utilização neste estudo e também para fins de comparação com o material desidratado produzido no secador rotatório com recheio de inertes. Os resultados obtidos na caracterização são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Caracterização da polpa de acerola.

Análise	Resultado obtido
Umidade (%) (b.u.)	93,52 ± 0,06
Atividade de água	0,970
pH	3,49
Densidade real (g.cm <sup>-3</sup> )	1,4978 ± 0,0001
Cinzas (%)	4,35 ± 0,01
Teor de Fenólicos Totais (TPC) (mg <sub>ácido gálico</sub> /100 g b.s.)	2182,27 ± 29,99
Teor de Flavonoides Totais (TFC) (mg <sub>rutina</sub> /100 g b.s.)	2,30 ± 0,02
Teor de Ácido Ascórbico (AA) (mg /100g b.s.)	4652,89 ± 30,76

A polpa de acerola empregada para os experimentos deste trabalho tem um conteúdo de umidade elevado (93,52%) e, conseqüentemente, um alto valor de atividade de água (0,970). Alimentos com valores de atividade de água próximos de 1,0 são considerados altamente perecíveis, pois são propícios para a proliferação de microrganismos como fungos, bactérias e leveduras, além de estarem sujeitos à ocorrência de reações químicas e enzimáticas. Nesse sentido, essa polpa deve ser submetida a alguma operação que promova sua conservação, como é o caso da secagem (CELESTINO, 2010; FELLOWS, 2000).

O valor obtido para pH foi de 3,49, o que confirma a característica ácida já conhecida da acerola. Essa acidez elevada contribui para que haja, geralmente, uma preferência do consumo dessa fruta em sucos, em comparação com sua forma *in natura*. O valor de pH encontrado é próximo de resultados obtidos por Mercali et al. (2014), Ribeiro et al. (2018) e Dantas et al. (2019) para polpas de acerola, sendo eles 3,27, 3,14 e 3,15, respectivamente.

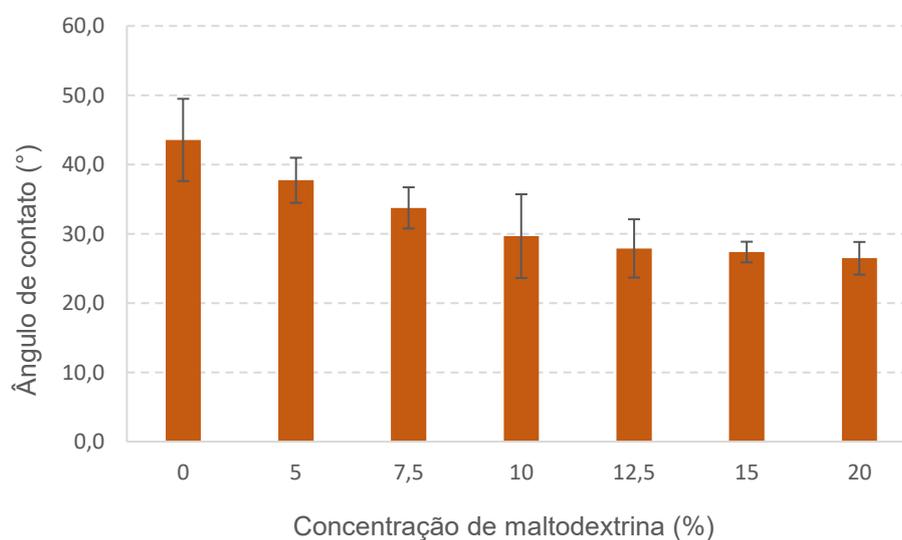
Em relação aos compostos bioativos, o teor de fenólicos totais encontrado para a polpa de acerola neste trabalho foi de 2182,27 mg<sub>ácido gálico</sub>/100 g (b.s), sendo superior a valores como 580,1 e 1445 mg<sub>ácido gálico</sub>/100 g (b.s), reportados por Kuskoski et al. (2006) e Mercali et al. (2014), respectivamente. No entanto, os resultados para TPC encontrados na literatura apresentam ampla

variação, de modo que Silva et al. (2014) reportaram um valor de 29093,47 mg<sub>ácido gálico</sub>/100 g (b.s) para a polpa analisada por eles. Já teor de flavonoides totais encontrado foi de 2,30 mg<sub>rutina</sub>/100 g (b.s.), que é inferior ao valor de 29,09 mg<sub>rutina</sub>/100 g (b.s.) obtido por Stafussa et al. (2018). A variação entre os teores de flavonoides nos alimentos pode se dar por fatores genéticos, bem como pelo tipo de processamento a que foram submetidos (SOUSA et al., 2011).

O conteúdo de ácido ascórbico de 4652,89 mg/100g (b.s.) obtido nesse estudo confirma a existência de uma alta concentração desse composto na acerola. Tal valor é próximo dos resultados de 4715,31 mg/100g (b.s.), reportado por Dantas et al. (2019) para polpa de acerola, e de 4380.59 mg/100g (b.s.) reportado por Moreira et al. (2010) para bagaço de acerola, respectivamente. Diante desse e dos demais resultados para compostos bioativos, nota-se a necessidade de se aproveitar o potencial deste fruto, através de metodologias de conservação que aumentem seu *shelf-life*.

Além das caracterizações citadas até aqui, a polpa pura e com adição de maltodextrina em diferentes concentrações também foi analisada com o intuito de se obter o ângulo de contato entre essas suspensões e a superfície de porcelana das partículas inertes utilizadas como recheio do tambor. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Resultados da análise de ângulo de contato.



Observa-se nos resultados da Figura 4.10, que há uma tendência de diminuição do ângulo de contato com o aumento da concentração de maltodextrina até 10%, e que em concentrações superiores a esta, o aditivo não alterou significativamente a resposta, o que foi constatado também pela aplicação de um teste de Tukey, a um nível de 5% de significância.

Em relação à molhabilidade, sabe-se, pela teoria, que menores ângulos de contato promovem um melhor espalhamento do líquido sobre a superfície do sólido. Nesse sentido, percebe-se que o uso do aditivo teve um efeito favorável ao recobrimento da superfície pela suspensão, uma vez que possibilitou a obtenção de ângulos de contato mais baixos.

Quanto ao processo de secagem, o mecanismo envolvido na secagem de pastas com uso de partículas inertes tem como uma de suas etapas o recobrimento dos sólidos por uma fina camada do material alimentado. Dessa forma, espera-se que a redução do ângulo de contato proporcionada pela maltodextrina seja vantajosa, uma vez que os materiais pastosos capazes de recobrir uma maior área superficial do inerte tendem a favorecer a troca térmica ocorrida tanto por condução – pelo contato com o inerte aquecido – quanto por convecção – por ação do ar quente de secagem.

Silva (2019) estudou a secagem da polpa de camu-camu em SRRI e observou que o uso da maltodextrina resultou em um aumento na produção de pó de aproximadamente 37%. No entanto, a investigação da concentração ideal desse aditivo é necessária, já que o autor relatou uma redução no rendimento de secagem associada a altas concentrações da maltodextrina na polpa. Segundo Burjaili (1996), um dos fatores que causam essa redução é o fato da polpa adquirir um nível de fluidez que descaracteriza a natureza pastosa requerida do material a ser processado em SRRI, com isso pode ocorrer o escorrimento da solução pelo leito de inertes ao invés do recobrimento dos mesmos.

### **4.3. Secagem da polpa de acerola em SRRI**

O processamento da polpa de acerola no secador rotatório com recheio de inertes possibilitou a obtenção de um produto desidratado na forma de um pó homogêneo (Figura 4.11), de cor mais clara que a polpa e com aroma característico da fruta.

Figura 4.11 - Pó produzido pela desidratação de polpa de acerola em SRRI.



Os experimentos de secagem foram realizados segundo um planejamento composto central, com 3 variáveis e réplica no ponto central, totalizando 16 experimentos. As variáveis estudadas foram a concentração de maltodextrina (M), a fração entre inertes (FI) e a temperatura (T). E as respostas coletadas para cada experimento foram o rendimento do processo, o teor de fenólicos totais (TPC), o teor de flavonoides totais (TFC) e o teor de ácido ascórbico (AA). Os pontos do planejamento e seus respectivos resultados encontram-se na Tabela 4.4, e cada uma das respostas será analisada individualmente nas sessões seguintes.

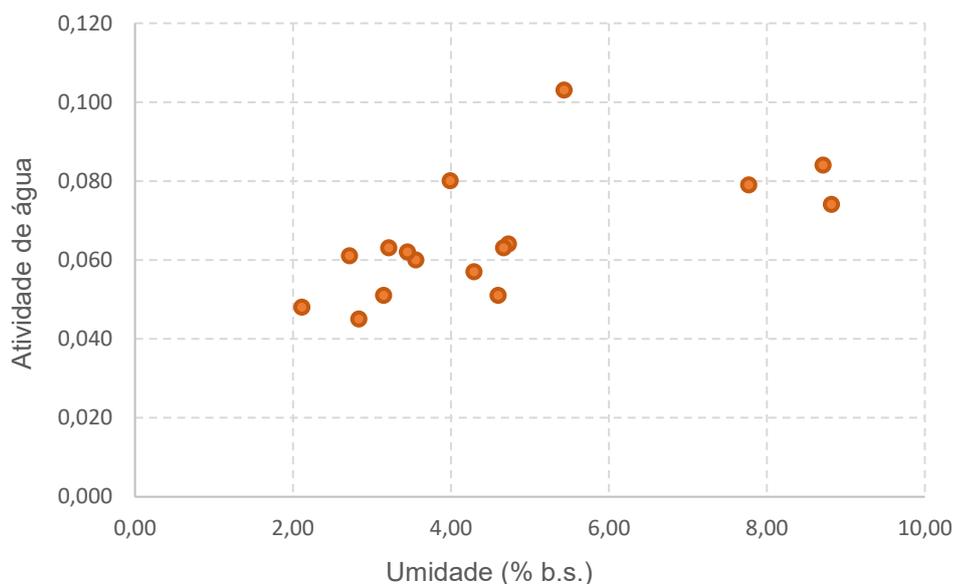
Tabela 4.4 - Resultados do planejamento composto central realizado para análise do rendimento de secagem da polpa de acerola e dos teores de fenólico totais, flavonoides totais e ácido ascórbico no produto obtido.

<b>Exp.</b>	<b>M (%)</b>	<b>FI (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>U (%)</b>	<b>Rend. (%)</b>	<b>TPC (mg/100g)</b>	<b>TFC (mg/100g)</b>	<b>AA (mg/100g)</b>
1	8	35	50	7,77	54,92	1436,51	1,12	1965,84
2	8	35	90	4,73	64,21	1343,09	1,08	1948,89
3	8	70	50	8,71	53,54	1247,40	1,06	1840,66
4	8	70	90	4,60	67,35	1166,28	0,97	1810,54
5	20	35	50	4,67	51,55	1022,80	0,47	1058,24
6	20	35	90	2,12	63,32	918,96	0,41	1033,96
7	20	70	50	4,30	53,20	902,29	0,46	1078,53
8	20	70	90	2,84	73,74	810,68	0,40	1024,69
9	6,28	52,5	70	8,82	58,89	1445,49	1,29	2238,74
10	21,72	52,5	70	3,22	68,19	920,13	0,35	1004,10
11	14	29,97	70	3,99	61,59	1267,86	0,75	1414,45
12	14	75,03	70	2,72	72,84	1178,02	0,66	1363,09
13	14	52,5	44,3	5,44	52,90	1242,85	0,75	1424,26
14	14	52,5	95,7	3,56	71,89	1165,04	0,65	1402,45
15	14	52,5	70	3,45	68,16	1181,12	0,68	1457,26
16	14	52,5	70	3,15	69,38	1194,99	0,69	1434,33

Foram coletados também dados relativos à atividade de água do pó produzido em cada experimento realizado. Esses resultados de atividade de água são apresentados na Figura 4.12, como função da umidade do material analisado, sendo possível notar uma relação de proporcionalidade entre essas duas grandezas. De maneira geral, os produtos com maior

umidade resultaram em maiores valores de atividade de água. A redução de umidade por meio da secagem causou uma diminuição na razão entre a pressão de vapor de água residual no material e a pressão de saturação, ocasionando uma redução na atividade de água.

Figura 4.12 - Atividade de água em função do teor de umidade do pó produzido através da secagem em SRRI.



A busca por valores adequados de umidade e atividade de água está relacionada à preocupação com a segurança microbiológica dos materiais desidratados. Os resultados encontrados para a umidade do produto estão entre 2,12 e 8,82%, em base seca, portanto, estão todos em acordo com a legislação vigente no Brasil para a umidade de produtos vegetais secos ou desidratados. A ANVISA (2005) estipula que a umidade desses produtos não deve ultrapassar o valor de 12%.

Para atividade de água, obteve-se resultados entre 0,045 e 0,103, que são baixos e garantem a inibição de atividade microbiana no material. Segundo Fellows (2000), 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 estipula-se que, para valores menores que 0,60, praticamente toda a atividade microbiana seja inibida. Ainda nesse âmbito, Celestino (2010) assegura que, para resultados menores que 0,30, atinge-se a zona de absorção primária, em que as moléculas de água estão ligadas ao alimento com tanta intensidade que não podem ser utilizadas para dissolver compostos do alimento, inviabilizando a ocorrência de reações de degradação e o desenvolvimento de microrganismos. Portanto, em todas as

condições do planejamento experimental, os produtos obtidos tiveram valores de umidade final e de atividade de água adequados para o armazenamento.

#### 4.3.1. Rendimento de secagem

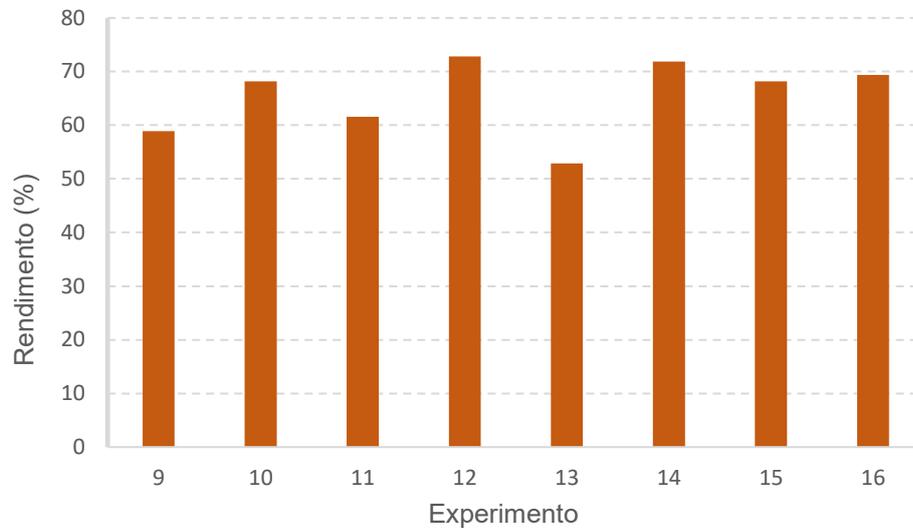
Os experimentos realizados durante o desenvolvimento do planejamento apresentado resultaram em rendimentos entre 51,55 e 73,74%, valores comparáveis a rendimentos obtidos por outros autores que também utilizaram secadores rotatórios com recheio de inertes em seus trabalhos. Honorato (2006) secou cefalotórax de camarão e obteve rendimentos entre 32,10 e 83,19%; Moura (2009) reportou rendimentos de 46,0 até 73,5% para a secagem de resíduo de maracujá; Cabrera-Padilla et al. (2014) encontraram um rendimento máximo de 72,9% para a secagem de pasta de banana e Silva (2019) obteve rendimentos de 65,38 e 55,33% nas melhores condições para a secagem da microalga *Spirulina platensis* e da polpa de camu-camu, respectivamente.

Em termos de aproveitamento da matéria-prima, vale ressaltar que os rendimentos de secagem da polpa de acerola em SRRI são maiores do que os reportados em outros trabalhos que aplicaram métodos de secagem diferentes para a obtenção de pó de acerola. Dantas et al. (2019) encontraram um rendimento máximo de 24,75% para secagem de polpa de acerola com adição de leite em pó em leito de jorro; Araújo et al. (2015) obtiveram rendimentos de até 18,55% para a secagem de suco de acerola em leito de jorro, e Ribeiro et al. (2018) encontraram valores entre 28,0 e 42,7% para secagem de suco de acerola e seriguela com adição de maltodextrina em *spray-drying*.

Segundo Silva (2019), os motivos associados às perdas de rendimento no SRRI são a adesão de material nos inertes e em estruturas do tambor, como suspensores e paredes internas; o acúmulo de material nas conexões do secador e o arraste de finos no *overflow* do ciclone. As características do material que foi alimentado e as condições de operação do secador influenciam na ocorrência de tais contratempos. Pode-se dizer que nos experimentos que resultaram em rendimentos menores que 55% foram enfrentadas maiores dificuldades, provavelmente durante os processos de recobrimento dos inertes pelo material alimentado, remoção de umidade da polpa, produção de pó pelos choques entre inertes e arraste do produto.

O gráfico mostrado na Figura 4.13 contém os resultados de rendimento obtidos nos pontos ortogonais (experimentos 9 a 14) e centrais (experimentos 15 e 16) do planejamento. A análise desses casos é interessante, já que em cada um deles há alteração no nível de apenas uma das variáveis e as demais mantêm-se constantes.

Figura 4.13 - Rendimentos obtidos nos pontos ortogonais e centrais do planejamento composto central



De modo geral, para os pontos ortogonais, é possível observar que todas as variáveis estudadas tiveram influência positiva no rendimento. As réplicas no ponto central (15 e 16), forneceram valores próximos, com baixa variação, indicando que os experimentos realizados na unidade são reprodutíveis, e o rendimento médio obtido para o ponto central foi de 68,77%. Nota-se, por meio da diferença dos valores das corridas 13 e 14, que a temperatura foi o fator que exerceu maior efeito na variação do rendimento, aumentando de 52,90% para 71,89%, quando a temperatura passou de 44,3 °C para 95,7 °C. O maior valor de rendimento observado entre estes pontos (72,84%), ocorreu na corrida 12, onde a fração entre inertes está no nível mais alto (75,03%), indicando que há maior quantidade de inertes de menor diâmetro no tambor. Já o menor valor de rendimento (52,90%) foi encontrado para a corrida realizada na temperatura mais baixa (44,26°C), experimento 13.

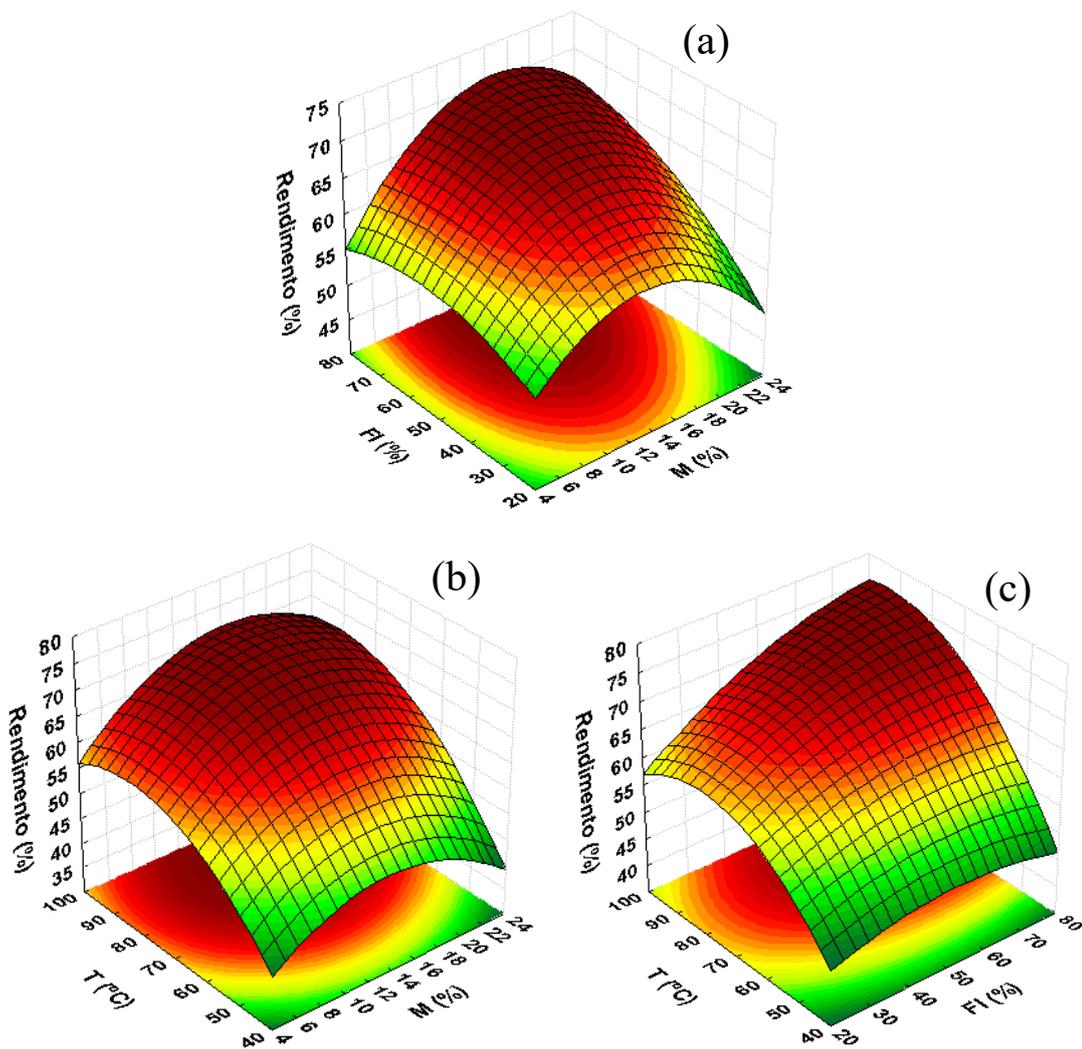
Com o intuito de fornecer informações sobre os efeitos de cada variável no resultado do rendimento para todos os experimentos do planejamento, uma equação foi ajustada aos dados experimentais através de técnicas de regressão. Na Equação (4.1) é apresentado o modelo reduzido de regressão ( $R^2 = 0,8706$ ), no qual são contabilizadas as variáveis significativas a um nível de significância de 5%.

$$\text{Rendimento (\%)} = 68,17 - 6,83\bar{M}^2 + 5,00\bar{FI} + 14,12\bar{T} - 8,21\bar{T}^2 \quad (4.1)$$

sendo  $\bar{M}$ ,  $\bar{FI}$  e  $\bar{T}$  as variáveis concentração de maltodextrina, fração entre inertes e temperatura codificadas, respectivamente  $\left(\bar{M} = \frac{M-14}{6}; \bar{FI} = \frac{FI-52,5}{17,5}; \bar{T} = \frac{T-70}{20}\right)$ , para M e FI em % e T em °C.

Da Equação (4.1), tem-se que o rendimento foi influenciado por todas as variáveis estudadas. A fração entre inertes e a temperatura apresentam contribuições lineares positivas, sendo a temperatura responsável pela maior influência na resposta. Na Figura 4.14, são apresentadas as superfícies de resposta que mostram, graficamente, a variação no rendimento de secagem em função das variáveis independentes, ao longo da faixa estudada nos experimentos.

Figura 4.14 - Superfícies de resposta para o rendimento de secagem em função das variáveis independentes.



Da Figura 4.14-a, percebe-se que concentrações de maltodextrina próximas de um valor médio favoreceram o aumento do rendimento de secagem. Tal observação concorda com as afirmações feitas por Silva (2019) a respeito do rendimento de secagem da polpa de camu-camu. O autor verificou que o efeito positivo da adição de maltodextrina à polpa atingiu um

limite numa determinada quantidade, e quando foram utilizadas concentrações superiores, o rendimento começou a decair. Observa-se também que este melhor valor de  $M$  é próximo daquele que fornece o menor ângulo de contato (Figura 4.10).

A influência positiva da temperatura e da fração de inertes, já constatada pelo modelo, é confirmada através da observação da Figura 4.14-c, onde há uma variação considerável no rendimento de secagem em dependência do aumento de ambas as variáveis. Em relação à temperatura, é esperado que maiores valores dessa variável favoreçam o rendimento, uma vez que altas temperaturas proporcionam uma rápida redução da umidade da polpa alimentada, evitando a ocorrência de instabilidade no processo pelo acúmulo de material ainda úmido no interior do secador (FREIRE et al., 2012; SANTOS, 2020).

Já o efeito positivo da fração de inertes, implica que o rendimento é favorecido pela presença de uma maior proporção de inertes menores (diâmetro de 12,70 mm) no tambor. Das simulações DEM, é sabido que mais partículas menores no leito aumentam o número de colisões em detrimento da força de colisão. Portanto, dos experimentos realizados, percebe-se que mesmo em menor proporção, os inertes maiores (diâmetro de 25,40 mm) são capazes de contribuir com o processo de moagem através de suas colisões mais robustas. Observações parecidas foram feitas por Santos (2020) a respeito do processamento de polpa de camu-camu em secador rotatório com recheio de inertes de diferentes tamanhos.

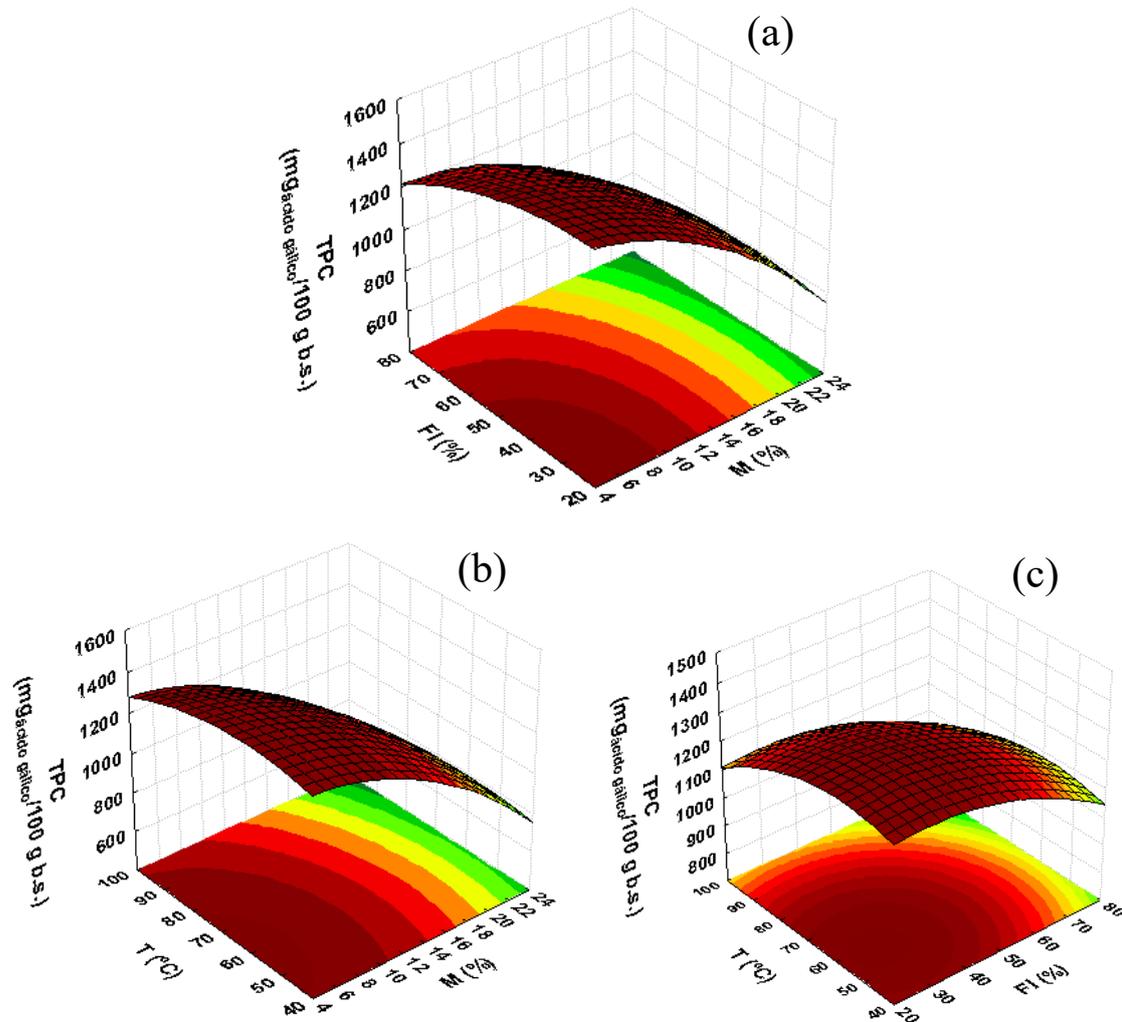
#### 4.3.2. Compostos bioativos

Os pós produzidos pela secagem da polpa de acerola em SRRI foram analisados quanto aos seus teores de compostos bioativos, sendo estes o teor de fenólicos totais (TPC, em  $\text{mg}_{\text{ácido gálico}}/100 \text{ g}$ ), o teor de flavonoides totais (TFC, em  $\text{mg}_{\text{rutina}}/100 \text{ g}$ ) e teor de ácido ascórbico (AA, em  $\text{mg}/100 \text{ g}$ ). A investigação dos efeitos das variáveis independentes nas respostas foi feita por meio de técnicas de regressão, e nessa seção serão apresentados os modelos ajustados aos dados experimentais e as superfícies de resposta, referentes aos resultados obtidos para cada uma das três respostas.

Em relação aos resultados de teor de fenólicos totais (TPC), são apresentados na Equação (4.2) e na Figura 4.15, respectivamente, o modelo reduzido de regressão ( $R^2 = 0,9440$ ), que contabiliza as variáveis significativas a um nível de significância de 5%, e as superfícies de resposta.

$$TPC = 1188,01 - 391,53\bar{M} - 99,82\bar{M}^2 - 125,57\bar{FI} - 83,11\bar{T} \quad (4.2)$$

Figura 4.15 - Superfícies de resposta para o teor de fenólicos totais (TPC) em função das variáveis independentes.

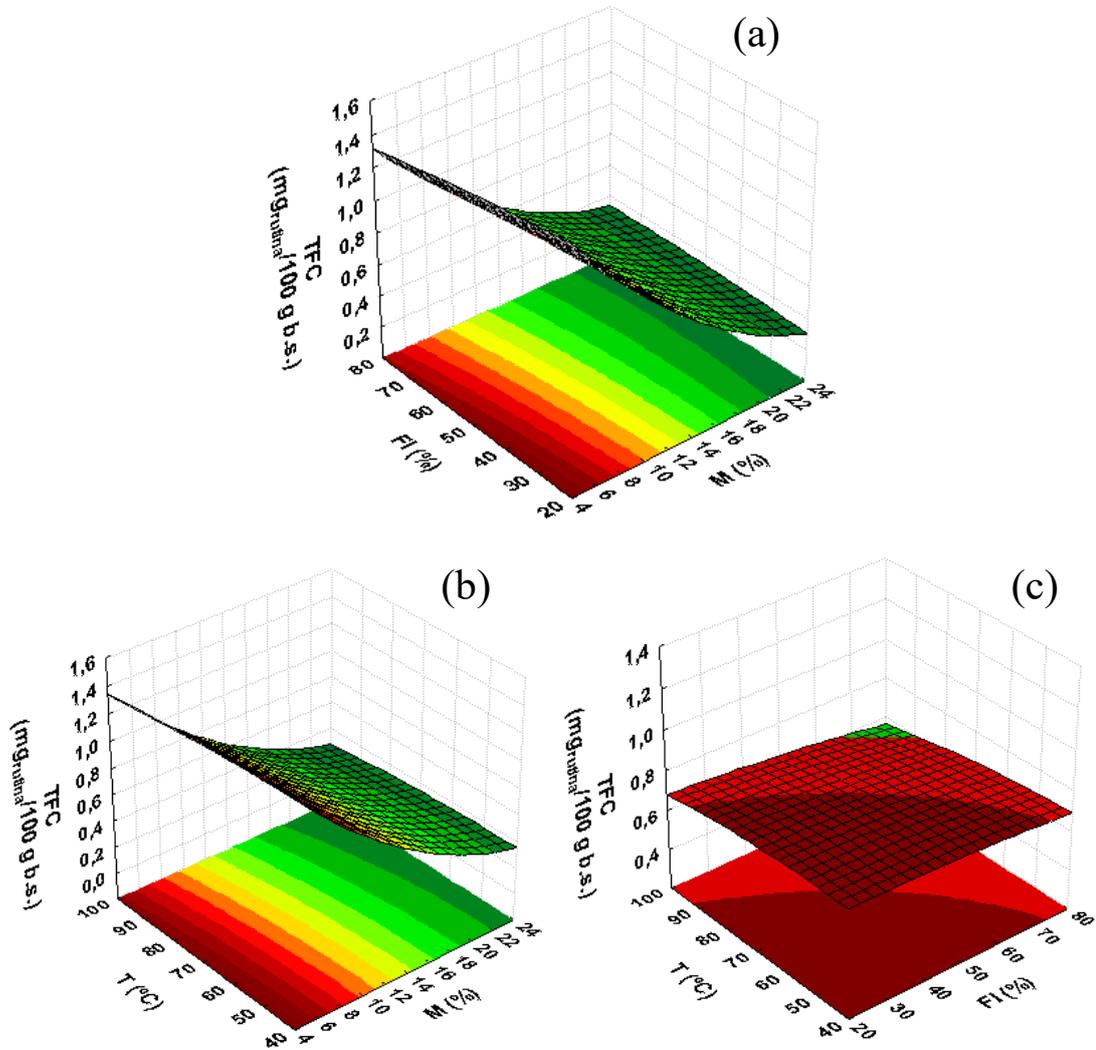


Por meio da Figura 4.15, verifica-se visualmente que o aumento no teor de fenólicos totais é causado pela redução em todas as variáveis estudadas experimentalmente: concentração de maltodextrina, fração de inertes e temperatura. No entanto, o fator que mais exerceu influencia nesta resposta foi a concentração de maltodextrina.

Em relação aos resultados de teor de flavonoides totais (TFC), são apresentados na Equação (4.3) e na Figura 4.16, respectivamente, o modelo reduzido de regressão ( $R^2 = 0,9896$ ), que contabiliza as variáveis significativas a um nível de significância de 5%, e as superfícies de resposta.

$$TFC = 0,69 - 0,66\bar{M} + 0,13\bar{M}^2 - 0,05\bar{F}\bar{I} - 0,06\bar{T} \quad (4.3)$$

Figura 4.16 - Superfícies de resposta para o teor de flavonoides totais (TFC) em função das variáveis independentes.



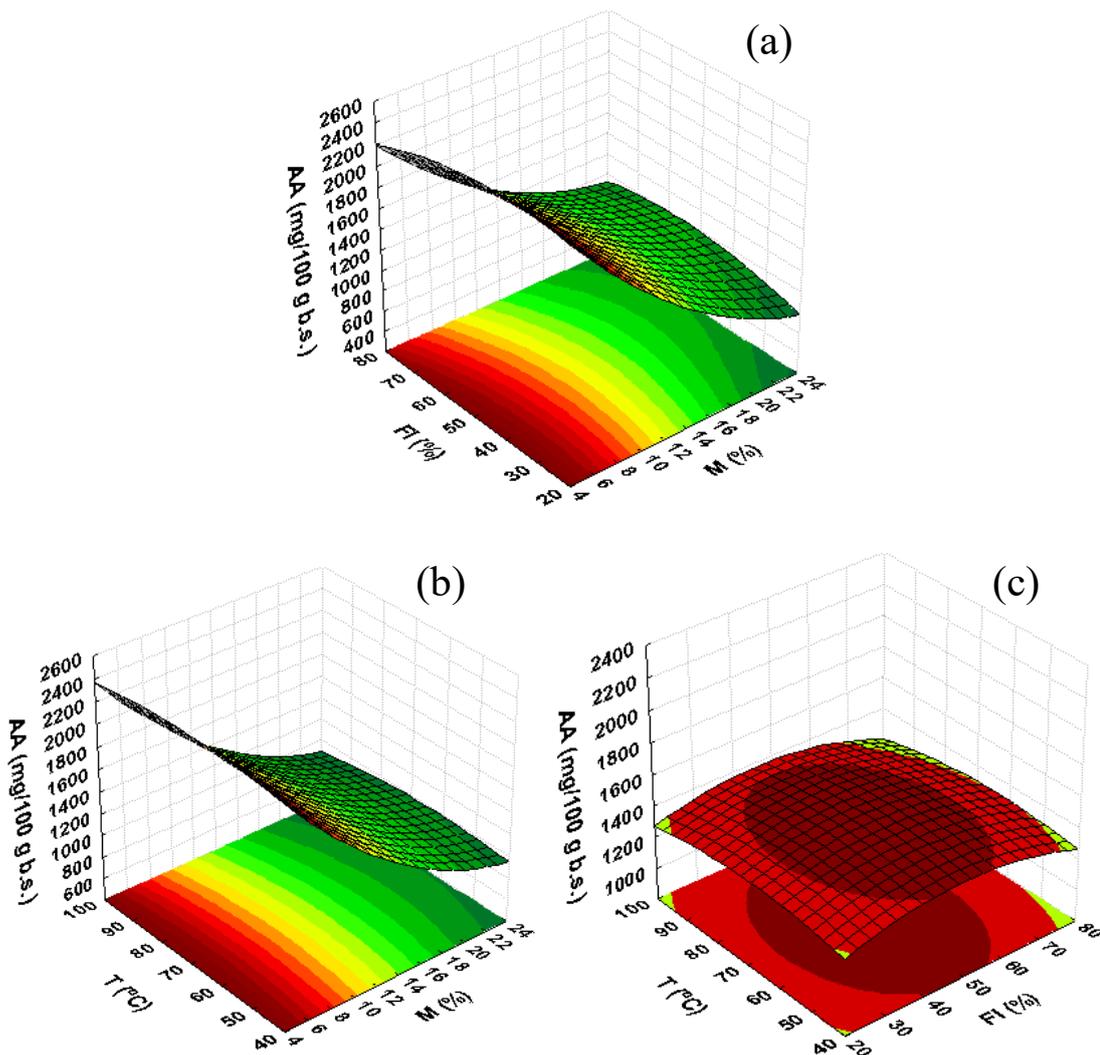
Da mesma forma que para os compostos fenólicos, todos os fatores analisados influenciaram negativamente na resposta de teor de flavonoides totais, sendo a concentração de maltodextrina o fator que mais influenciou na resposta e o único fator que apresenta um termo quadrático. Tanto quanto pelo modelo descrito na Equação (4.3), quanto pela Figura 4.16-c, percebe-se que a temperatura de secagem e a fração entre inertes não tiveram uma influência tão considerável na resposta, quando comparados com a concentração de maltodextrina.

Em relação aos resultados de teor de ácido ascórbico (AA), são apresentados na Equação (4.4) e na Figura 4.17, respectivamente, o modelo reduzido de regressão ( $R^2 = 0,9924$ ), que

contabiliza as variáveis significativas a um nível de significância de 5%, e as superfícies de resposta.

$$AA = 1434,81 - 876,77\bar{M} + 188,42\bar{M}^2 - 56,33\bar{FI} - 92,42\bar{FI}^2 + 68,64\bar{M} \cdot \bar{FI} \quad (4.4)$$

Figura 4.17 - Superfícies de resposta para o teor de ácido ascórbico (AA) em função das variáveis independentes.

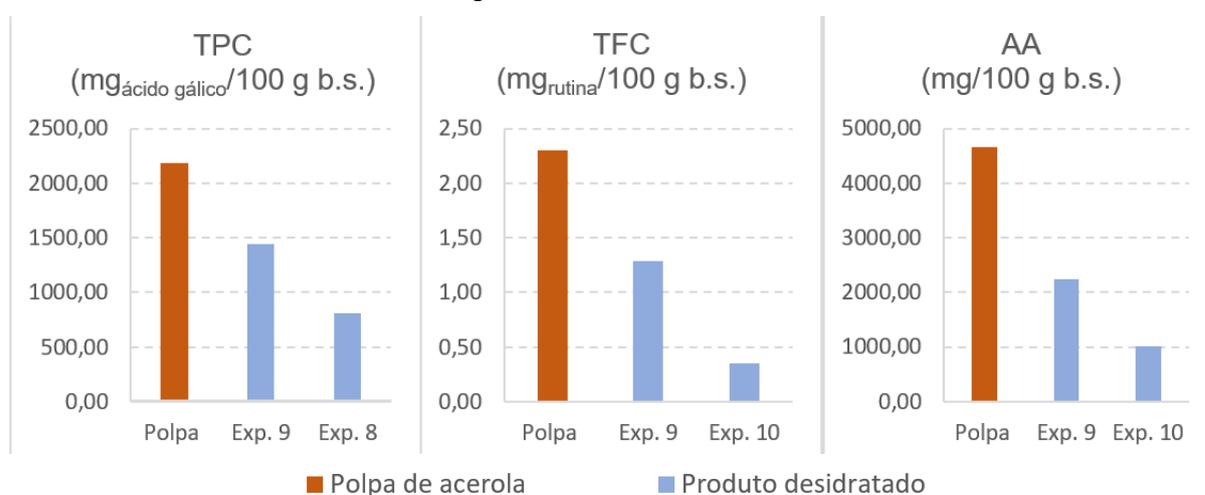


O teor de ácido ascórbico nos pós foi influenciado negativamente pela concentração de maltodextrina e pela fração entre inertes. A concentração de maltodextrina, como no caso dos compostos anteriores, foi o fator que mais impactou na resposta e também possui um termo quadrático positivo no modelo obtido (Equação (4.4)). Já a temperatura de secagem, no nível de significância estudado, não interferiu significativamente na resposta, o que pode ter relação com o uso da maltodextrina. Segundo Wang, Yuan e Yue (2015), a maltodextrina possui

propriedades de proteção contra oxidação, sendo capaz de promover uma encapsulação com menor permeabilidade de oxigênio. Esse efeito de proteção da vitamina C pelo uso de maltodextrina foi relatado por Garcia et al. (2020) para a secagem de camu-camu por *spray-drying*, de modo que o pó obtido pelos autores teve baixa redução de tal composto bioativo em relação à polpa.

Visando entender melhor os efeitos do uso do secador rotatório com recheio de inertes para a produção de pós desidratados de acerola, foi feita uma comparação entre o conteúdo de compostos bioativos obtidos para a polpa e para os pós. Os gráficos apresentados na Figura 4.18 contêm informações dos resultados mais baixos e mais elevados encontrados entre todos os experimentos realizados no planejamento, para cada um dos compostos. Em comparação com a polpa, para os casos em que houve maior degradação, tem-se que o teor de fenólicos totais foi reduzido em 2,7 vezes; o teor de flavonoides totais foi reduzido em 6,6 vezes e o teor de ácido ascórbico foi reduzido em 4,6 vezes.

Figura 4.18 - Comparação entre teores de compostos bioativos encontrados na polpa e nos pós produzidos em SRRI.



Destaca-se inicialmente que o experimento 9 foi o que apresentou todos os melhores resultados de compostos bioativos, sendo 1445,49 mg ácido gálico/100 g de fenólicos totais, 1,29 mg rutina/100 g de flavonoides totais e 2238,74 mg/100 g de ácido ascórbico (em base seca). Esse experimento foi realizado no nível mais baixo da variável concentração de maltodextrina (6,28%) e nos níveis intermediários das variáveis fração entre inertes (52,5%) e temperatura (70°C).

O produto do experimento 8 foi o que apresentou o teor mais baixo de fenólicos totais (810,68 mg ácido gálico/100 g b.s.), sendo este experimento realizado no nível (+1) de todas as

variáveis independentes: M = 20%, FI = 70% e T = 90°C. E o produto do experimento 10 resultou em teores mais baixos de flavonoides e ácido ascórbico (respectivamente, 0,35 mg<sub>rutina</sub>/100 g e 1004,10 mg/100 g, em base seca), sendo realizado no maior nível da variável concentração de maltodextrina (21,72%) e nos níveis intermediários das demais variáveis.

Tais resultados confirmam a grande influência da variável concentração de maltodextrina no teor de compostos bioativos e evidenciam o fato de que o uso de altas quantidades de aditivo pode trazer prejuízos à qualidade do produto final, devido à diluição dos demais compostos contidos no alimento.

Vale ressaltar que mesmo com a degradação observada dos compostos bioativos, o produto obtido do processamento em SRRI ainda tem características apreciáveis. O teor de fenólicos totais dos pós de acerola foi, em média, maior do que valores relatados por Silva et al. (2014) para polpas de outras frutas como abacaxi, manga e maracujá, com teores de 990,76, 652,59 e 765,09 mg<sub>ácido gálico</sub>/100 g, respectivamente. Além disso, o teor de ácido ascórbico nos pós também é expressivo, de modo que o maior resultado aqui obtido é próximo de resultados obtidos para a secagem de camu-camu, o fruto conhecido por ser a maior fonte natural de vitamina C. Santos (2020) secou camu-camu em SRRI e obteve valores de ácido ascórbico entre 2121,04 e 2516,56 mg/100g.

### 4.3.3. Otimização multiresposta

Para determinar as condições experimentais ótimas, que resultam em um processo de secagem com o maior rendimento e a menor degradação dos compostos bioativos presentes na polpa de acerola, realizou-se uma otimização dos modelos gerados a partir dos dados experimentais, aplicando a técnica da função desejabilidade para combinar as respostas de interesse (DERRINGER; SUICH, 1980).

A otimização busca maximizar o rendimento, o teor de fenólicos totais, de flavonoides totais e de ácido ascórbico, por meio da variação dos fatores concentração de maltodextrina, fração entre inertes e temperatura. A análise realizada é apresentada na Figura 4.19, e os resultados para os níveis ótimos dos fatores independentes estão disponíveis na Tabela 4.5. A desejabilidade obtida foi de 0,8077, e é importante salientar que a função desejabilidade calcula as condições mais favoráveis em relação a todas as respostas, o que não necessariamente fornece os valores máximos que as respostas poderiam apresentar individualmente.

Figura 4.19 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do planejamento de secagem de polpa de acerola em SRRI.

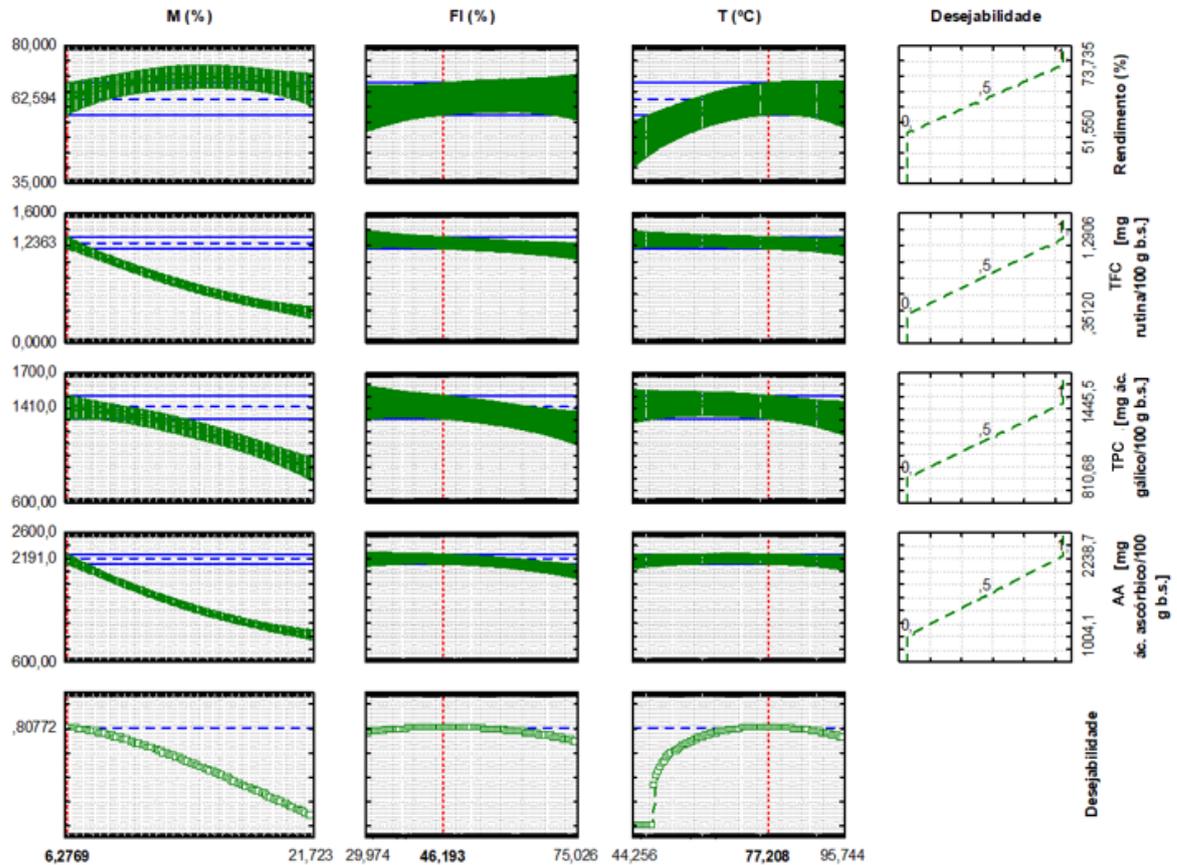


Tabela 4.5 - Condições ótimas encontradas pela otimização da função desejabilidade aplicada aos dados experimentais obtidos.

Fatores	Valor ótimo
Concentração de maltodextrina (%)	6,28
Fração de inertes menores (%)	46,19
Temperatura (°C)	77,21

Pelos resultados obtidos, constata-se que apesar de uma concentração intermediária de maltodextrina adicionada à polpa favorecer o rendimento de secagem, para todas as respostas referentes aos compostos bioativos, o uso da menor concentração possível do aditivo foi mais benéfico, dessa forma o valor determinado para essa variável foi o nível mais baixo (6,28%). O uso de uma quantidade baixa de aditivo também é uma vantagem em termos financeiros, pois acarreta menores custos ao processo.

O valor ótimo da fração entre inertes (46,19%) indica uma proporção quase equivalente entre inertes menores e maiores, próxima do nível central desta variável, apontando que há uma

necessidade de se equilibrar as contribuições que cada tamanho de inerte traz ao processo. A temperatura ótima foi determinada como sendo 77,21 °C, valor elevado o suficiente para trazer bons resultados de rendimento, mas não o bastante para causar degradação considerável nos compostos bioativos da polpa.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as respostas preditas pela função desejabilidade para o ponto ótimo e os resultados obtidos experimentalmente nesta condição. Percebe-se que houve uma boa concordância entre tais valores, com desvio máximo de 11,74%. Essa concordância, juntamente com os valores de  $R^2$  próximos de 1, indicam que os modelos de regressão obtidos neste trabalho se ajustam bem aos dados experimentais e são confiáveis para prever o comportamento das respostas dentro dos limites estudados.

Tabela 4.6 - Resultados experimentais e preditos para a condição otimizada.

<b>Respostas</b>	<b>Preditas</b>	<b>Experimentais</b>	<b>Desvios (%)</b>
Rendimento (%)	62,59	59,87	4,54
TPC (mg <sub>ácido gálico</sub> /100 g b.s.)	1409,99	1525,17 ± 28,54	7,55
TFC (mg <sub>rutina</sub> /100 g b.s.)	1,24	1,40 ± 0,02	11,74
AA (mg/100 g b.s.)	2190,97	2284,48 ± 15,40	4,09

Além disso, deve-se destacar que as respostas para os teores de compostos bioativos obtidas do experimento realizado nas condições ótimas foram as maiores entre todos os experimentos executados neste trabalho. E o rendimento, apesar de ser inferior a outros valores relatados em condições operacionais diferentes durante o desenvolvimento do PCC, ainda é alto em comparação com rendimentos reportados por outros autores que secaram polpa de acerola em equipamentos diferentes, como foi discutido na seção 4.3.1.

Ante o exposto, percebe-se que o emprego do secador rotatório com recheio de inertes para a desidratação da polpa de acerola foi bem sucedido, visto que forneceu, com alto rendimento, pós com excelentes teores de compostos bioativos e em boas condições para armazenamento. Portanto, de maneira geral, os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram o potencial de aplicação deste equipamento industrialmente, para o processamento não só de polpa de acerola, mas também de outros materiais pastosos a serem explorados.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Esta seção descreve as conclusões obtidas a partir do estudo da desidratação de polpa de acerola em secador rotatório com recheio de inertes, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusão

As principais conclusões do presente trabalho são apresentadas a seguir:

- Do estudo numérico, foi possível classificar todos os dados obtidos a partir da análise de uma resposta que combinava resultados de força de colisão e número de colisões. Com isso, concluiu-se que a configuração que apresentou a melhor resposta combinada corresponde à geometria atual do SRRI (tambor com 3 suspensores contínuos de 25 mm de altura), comprovando que as decisões de projeto do equipamento foram adequadas.
- Ainda com base nos resultados do estudo numérico, verificou-se que a fração entre inertes foi a variável que mais influenciou em ambas as respostas DEM. Além disso, valores elevados de rotação do tambor contribuíram para o aumento da força de colisão e não tiveram influência significativa no número de colisões. Enquanto o aumento do grau de enchimento do tambor beneficiou fortemente o número de colisões e teve um efeito leve na força de colisão. Assim, para os experimentos, pôde-se fixar as variáveis rotação e grau de enchimento do tambor nos valores mais altos explorados pelas simulações.
- Das caracterizações realizadas na polpa de acerola, verificou-se que ela apresenta um elevado teor de umidade e atividade de água, bem como uma considerável acidez. Resultados obtidos de medidas de ângulo de contato constataram que a adição de maltodextrina à polpa tem impacto nas suas propriedades físicas, aumentando sua fluidez. E com relação aos compostos bioativos, a polpa mostrou-se uma excelente fonte de compostos fenólicos e ácido ascórbico. Comprovou-se, portanto, a necessidade de conservação desse material extremamente precioso, visando aproveitamento do seu potencial nutricional.

- A secagem da polpa de acerola no SRRI resultou em um produto na forma de um pó homogêneo. E análises de umidade e atividade de água realizadas neste material desidratado comprovaram que a remoção de umidade proporcionada pelo processo de secagem em SRRI foi eficiente para garantir a segurança microbiológica do produto, reduzindo sua perecibilidade.
- Dos ensaios de secagem, obteve-se elevados resultados de rendimento e constatou-se que esta resposta foi influenciada mais intensamente pelo aumento da temperatura, devido ao favorecimento das taxas de transferência de calor e massa. Além disso, o aumento da fração entre inertes também favoreceu o rendimento, em concordância com o que foi observado numericamente.
- Das variáveis estudadas no planejamento experimental, a concentração de maltodextrina foi a que mais influenciou nos teores de compostos bioativos, pela diluição das demais substâncias presentes no alimento. Também foi percebido que, apesar de o processo de secagem ter acarretado um certo grau de deterioração dos compostos bioativos, o produto desidratado ainda possui teores notáveis de compostos fenólicos e ácido ascórbico, principalmente.
- A otimização multiresposta, realizada visando simultaneamente um maior rendimento de secagem e menor degradação dos compostos bioativos, apontou que os valores ótimos das variáveis independentes são uma concentração de 6,28% de maltodextrina, fração entre inertes de 46,19% e temperatura de 77,2°C. E os resultados obtidos experimentalmente para esta condição ótima resultaram nos mais altos teores de compostos bioativos e em um rendimento de 59,87%, próximos do que havia sido predito.

Em suma, concluiu-se que o secador rotatório com recheio de inertes foi eficiente na desidratação de polpa de acerola e tem grande potencial para ser explorado industrialmente. Por meio dos estudos desenvolvidos neste trabalho, foi possível relacionar variações nas condições operacionais do equipamento com os resultados obtidos acerca da qualidade do produto, e tal discussão foi ainda enriquecida por informações sobre a dinâmica entre as partículas inertes, fornecidas pelo estudo numérico. Com isso, chegou-se em um processo capaz de produzir, com alto rendimento, pós de acerola com características apreciáveis, em termos de compostos bioativos, e seguros para armazenamento.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros, faz-se as seguintes sugestões:

- Análise de outros materiais inertes como recheio do tambor, objetivando correlacionar a densidade do material particulado com o número de colisões, força de colisão e rendimento de secagem.
- Estudo sobre o consumo energético do secador e a influência da carga (grau de enchimento e fração entre inertes) nesta resposta.
- Secagem de outros materiais puros e combinados com diferentes aditivos, estendendo o domínio de aplicações do equipamento.
- Automatização completa da unidade experimental, utilizando sensores de temperatura e umidade relativa do ar para auxiliar na coleta de dados. Além disso, sugere-se a implementação de um controlador proporcional-derivativo-integral a governar a rotação do tambor, permitindo seu controle via *software*.
- Investigação numérica a respeito da velocidade dos inertes durante o funcionamento do tambor, de modo a se obter informações da velocidade média e da variação da velocidade de uma partícula no decorrer do tempo.

## REFERÊNCIAS

- ADRIANO, E.; LEONEL, S.; EVANGELISTA, R. M. Qualidade de fruto da aceroleira cv. Olivier em dois estádios de maturação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. SPEC. ISSUE 1, p. 541–545, 2011.
- AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução da diretoria colegiada - RDC nº 273, de 22 de setembro de 2005. **Diário Oficial da União**, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução RDC n. 02/2002. **Diário Oficial da União**, 2002.
- ALCHIKH-SULAIMAN, B. et al. Using the discrete element method to assess the mixing of polydisperse solid particles in a rotary drum. **Particuology**, v. 25, p. 133–142, 1 abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.05.006>.
- ALDER, B. J.; WAINWRIGHT, T. E. Phase transition for a hard sphere system. **The Journal of Chemical Physics**, v. 27, n. 5, p. 1208–1209, 1957. <https://doi.org/10.1063/1.1743957>.
- ARAÚJO, A. D. A. et al. Production and spouted bed drying of acerola juice containing oligosaccharides. **Food and Bioprocess Processing**, v. 94, p. 565–571, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.08.005>.
- ASSIS, S. A. et al. Acerola: importance, culture conditions, production and biochemical aspects. **Fruits**, v. 63, n. 2, p. 93–101, 2008. <https://doi.org/10.1051/fruits:2007051>.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**. 15. ed. Washington, DC: Aoac Intl, 1990.
- ASTM. **Standard Test Method for Ash in Biomass**. West Conshohocken: ASTM International, 2001.
- BARBOSA, T. P. **Características funcionais de implantes dentários: topografia superficial e molhabilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2016. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.280>.
- BARBOZA, S. B. S. C.; TAVARES, E. D.; MELO, M. B. **Instruções para o cultivo da acerola**. Aracaju - SE: EMBRAPA, 1996.

BARROS, J. P. A. DE A.; FREIRE, J. T. Secagem em leito de jorro com agitador mecânico. In: ALBINI, G.; FREIRE, J. T. (Eds.). **Tópicos Especiais em Sistemas Particulados**. 1. ed. São Carlos: UFSCar, 2019. p. 1–31.

BASTOS, D. H. M.; ROGERO, M. M.; ARÊAS, A. G. Effects of dietary bioactive compounds on obesity induced inflammation. **Arq Bras Endocrinol Metab**, v. 53, n. 5, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0004-27302009000500017>.

BENDICH, A.; LANGSETH, L. The health effects of vitamin C supplementation: a review. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 14, n. 2, p. 124–136, 1 abr. 1995. <https://doi.org/10.1080/07315724.1995.10718484>.

BLIBLIOTECA VIRTUAL EM SAÚDE DO MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Alimentos Funcionais**. Disponível em: <[https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/dicas/220\\_alimentos\\_funcionais.html](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/dicas/220_alimentos_funcionais.html)>. Acesso em: 11 maio. 2020.

BORGES, L. P.; AMORIM, V. A. METABÓLITOS SECUNDÁRIOS DE PLANTAS. **Revista Agrotecnologia, Ipameri**, n. 11, p. 54–67, 2020.

BRANDÃO, R. J. **Estudo da segregação de material granular em tambor rotatório empregando a abordagem numérica Lagrangeana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)—Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2017. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.56>.

BURJAILI, M. M. **Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)—Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 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, 1994.

BURJAILI, M. M.; LIMAVERDE, J. R.; FINZER, J. R. D. Secador rotatório com recheio de inertes. **Anais do XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos**, p. 493–499, 1987.

CABRERA-PADILLA, R. Y. et al. Drying of banana paste in rotatory dryer with inert bed. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, n. 1, p. 41–50, 2014. <https://doi.org/10.1590/BJFT.2014.007>.

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

COMPANHIA DE ENTREPÓSITOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO (CEAGESP). **Acerola - Guia de identificação**. Disponível em: <<https://ceagesp.gov.br/hortiescolha/hortipedia/acerola/>>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47–65, 25 maio 1979. <https://doi.org/10.1680/GEOT.1979.29.1.47>.

DANTAS, S. C. DE M. et al. Spouted-bed drying of acerola pulp (*Malpighia emarginata* DC): Effects of adding milk and milk protein on process performance and characterization of dried fruit powders. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 6, p. e13205, 1 out. 2019. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13205>.

DANTAS, T. N. P. **Influência das propriedades físicas de graviola e aditivos na secagem em leito de jorro com alimentação intermitente**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N. PROPRIEDADES ANTIOXIDANTES DE COMPOSTOS FENÓLICOS . **Visão Acadêmica**, v. 5, n. 1, p. 33–40, 2004.

DEL RIO, D. et al. Polyphenols and health: What compounds are involved? **Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases**, v. 20, n. 1, p. 1–6, 1 jan. 2010. <https://doi.org/10.1016/J.NUMECD.2009.05.015>.

DEL RIO, D. et al. Dietary (Poly)phenolics in Human Health: Structures, Bioavailability, and Evidence of Protective Effects Against Chronic Diseases. <https://home.liebertpub.com/ars>, v. 18, n. 14, p. 1818–1892, 4 abr. 2013. <https://doi.org/10.1089/ARS.2012.4581>.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

<https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.

ERLUND, I. Review of the flavonoids quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources, bioactivities, bioavailability, and epidemiology. **Nutrition Research**, v. 24, n. 10, p. 851–874, 1 out. 2004. <https://doi.org/10.1016/J.NUTRES.2004.07.005>.

FAGGIO, C. et al. Flavonoids and platelet aggregation: A brief review. **European Journal of Pharmacology**, v. 807, p. 91–101, 15 jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/J.EJPHAR.2017.04.009>.

FANG, Z.; BHANDARI, B. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice. **Food Research International**, v. 48, n. 2, p. 478–483, 1 out. 2012. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2012.05.025>.

FELLOWS, P. J. **Food Processing Technology: Principles and Practice**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

FERRER, J.-L. et al. Structure and function of enzymes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 46, n. 3, mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.12.009>.

FIGUEIREDO, A. C. et al. **Guia para Comprovação da Segurança de Alimentos e Ingredientes**. Brasília: ANVISA, 2013.

FREIRE, J. T. Secagem de pastas em leite de jorro. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. (Eds.). **Tópicos Especiais em Secagem**. São Carlos: UFSCar, 1992. v. 1p. 41–85.

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, 4 fev. 2013. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2012.06.026>.

FURUKAWA, S. et al. Increased oxidative stress in obesity and its impact on metabolic syndrome. **The Journal of Clinical Investigation**, v. 114, n. 12, p. 1752–1761, 5 maio 2017. <https://doi.org/10.1172/JCI21625>.

GALVÃO, A. L.; GRANZOTTI, G. I.; NAVARRO, F. F. Extrato de Acerola em Formulações Cosméticas. **Cosmetics & Toiletries**, v. 31, 2019.

GARCIA, V. A. DOS S. et al. Vitamin C stability in acerola and camu-camu powder obtained by spray drying. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. 1–13, 2020. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.23719>.

GENG, F. et al. Numerical simulation on mixing kinetics of slender particles in a rotary dryer. **Powder Technology**, v. 193, n. 1, p. 50–58, 10 jul. 2009. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2009.02.005>.

GENG, F. et al. Simulation of dynamic processes on flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary dryer and its comparison with video-imaging experiments. **Powder Technology**, v. 207, n. 1–3, p. 175–182, 15 fev. 2011. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2010.10.027>.

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>.

HERTZ, H. R. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. **Journal Für Die Reine und Angewandte Mathematik**, v. 92, p. 156–171, 1882. <https://doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>.

HONORATO, G. C. **Concepção de um secador rotatório para secagem do cefalotórax do camarão**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: IAL, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: [https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo\\_agro/resultadosagro/agricultura.html?l](https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?l)

ocalidade=0&tema=76215>. Acesso em: 28 nov. 2021.

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.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced Drying Technologies**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

KUSKOSKI, E. M. et al. Frutos tropicais silvestres e polpas de frutas congeladas: atividade antioxidante, polifenóis e antocianinas. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1283–1287, 2006.

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

LIMA, V. L. A. G. et al. Total phenolic and carotenoid contents in acerola genotypes harvested at three ripening stages. **Food Chemistry**, v. 90, n. 4, p. 565–568, 1 maio 2005. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2004.04.014>.

LUIZ, A. H. M.; DA SILVA, K. L.; ZERMIANI, T. Acerola: fonte de Vitamina C natural aplicada em produtos cárneos. **Dois Rodas: Flavors & Botanicals**, 2018.

MARQUES, L. G.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Freeze-drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 46, n. 5, p. 451–457, 1 maio 2007. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2006.04.011>.

MARTIN, S. **Secador de fluxos concorrente e contracorrente e avaliação do seu desempenho na secagem de café cereja descascado**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)—Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

MENDES, A. M. S. et al. **A cultura da acerola**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

MERCALI, G. D. et al. Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: Effect of electric field frequency. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 1–7, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.011>.

MINDLIN, R. D.; DERESIEWICZ, H. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique

Forces. **Journal of Applied Mechanics**, v. 20, n. 3, p. 327–344, 1 set. 1953. <https://doi.org/10.1115/1.4010702>.

MOREIRA, G. E. G. et al. Ascorbic acid and anthocyanin retention during spray drying of acerola pomace extract. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 34, p. 915–925, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00409.x>.

MOURA, B. D. **Automação de um sistema rotatório para secagem do rejeito de maracujá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

MOURA, B. D. **Estudo da dinâmica de secagem em um secador rotatório com alimentação intermitente**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 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.

MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W. Psychrometry, Evaporative Cooling, and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. (Eds.). . **Perry's chemical engineers' handbook**. 7. ed. McGraw-Hill, 1997.

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

NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2018. <https://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.775>.

NASRI, M. Protein Hydrolysates and Biopeptides: Production, Biological Activities, and Applications in Foods and Health Benefits. A Review. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 81, p. 109–159, 1 jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/BS.AFNR.2016.10.003>.

NETTO, L. M. **Acerola: a cereja tropical**. São Paulo: Nobel, 1986.

OLIVEIRA, F. M. N.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. DE M. Análise comparativa

de polpas de pitanga integral, formulada e em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 1, p. 25–33, 2006.

PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; SZIJJÁRTÓ, E. Effect of partial processes of drying on inert particles on product quality. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 2019–2032, 2001. <https://doi.org/10.1081/DRT-100107286>.

PASSOS, M. L. et al. Drying Of Pastes In Spouted Beds Of Inert Particles: Design Criteria And Modeling. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 605–624, 1997. <https://doi.org/10.1080/07373939708917249>.

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

PIETTA, P.-G. Flavonoids as Antioxidants. **Journal of Natural Products**, v. 63, n. 7, p. 1035–1042, 2000. <https://doi.org/10.1021/NP9904509>.

PORTAL EMBRAPA. **Acerola**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/acerola>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

POWELL, M. S. The effect of liner design on the motion of the outer grinding elements in a rotary mill. **International Journal of Mineral Processing**, v. 31, p. 163–193, 1991. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(91\)90025-E](https://doi.org/10.1016/0301-7516(91)90025-E).

RIBEIRO, B. S.; DE FREITAS, S. T. Maturity stage at harvest and storage temperature to maintain postharvest quality of acerola fruit. **Scientia Horticulturae**, v. 260, p. 108901, 27 jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.108901>.

RIBEIRO, C. M. C. M. et al. Optimization of the spray drying process conditions for acerola and seriguela juice mix. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 48–55, 22 out. 2018. <https://doi.org/10.1590/FST.36217>.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de Alimentos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

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>.

RURAL PECUÁRIA. **Como Plantar Acerola**. Disponível em: <<https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/fruticultura/como-plantar-acerola.html>>.

Acesso em: 28 abr. 2020.

SANTOS, D. A. et al. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 2, p. 692–703, 1 mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2016.02.027>.

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>.

SHEEHAN, M. E.; BRITTON, P. F.; SCHNEIDER, P. A. A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 15, p. 4171–4182, 1 ago. 2005. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2005.02.055>.

SILVA, L. M. R. DA et al. Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil. **Food Chemistry**, v. 143, p. 398–404, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.001>.

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

SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.793>.

SILVA, P. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A novel system for drying of agro-industrial acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) waste for use as bioactive compound source. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 52, p. 350–357, 1 mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.01.018>.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, 1965.

SOARES, A. C.; PEREIRA, N. R. Secagem da polpa de jambolão (*Syzygium cumini*) em secador de leito de jorro: efeito da clara de ovo como agente carreador de secagem na qualidade do produto. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, 2020. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.07519>.

SOUSA, M. S. B. et al. Nutritional characterization and antioxidant compounds in pulp residues of tropical fruits. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 554–559, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000300017>.

SOUZA, F. F. et al. **Contribuições das Pesquisas Realizadas na Embrapa Semiárido para a Cultura da Aceroleira**. Petrolina - PE: Embrapa Semiárido, 2017.

STAFUSSA, A. P. et al. Bioactive compounds of 44 traditional and exotic Brazilian fruit pulps: phenolic compounds and antioxidant activity. **International Journal of Food Properties**, v. 21, n. 1, p. 106–118, 2018. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1409761>.

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

TROJAK, M.; SKOWRON, E. Role of anthocyanins in high-light stress response. **World Scientific News**, v. 81, n. 2, p. 145–163, 2017.

UCHIDA, E. et al. Absorption and excretion of ascorbic acid alone and in acerola (*Malpighia emarginata*) juice: comparison in health japanese subjects. **Biological & Pharmaceutical Bulletin**, v. 34, n. 11, p. 1744–1747, 2011. <https://doi.org/10.1248/bpb.34.1744>.

VALKO, M. et al. Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human

disease. **The International Journal of Biochemistry & Cell Biology**, v. 39, n. 1, p. 44–84, 1 jan. 2007. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCEL.2006.07.001>.

VENDRAMINI, A. L.; TRUGO, L. C. Chemical composition of acerola fruit (*Malpighia puniceifolia* L.) at three stages of maturity. **Food Chemistry**, v. 71, n. 2, p. 195–198, 1 nov. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00152-7).

VUOLO, M. M.; LIMA, V. S.; MARÓSTICA JUNIOR, M. R. Phenolic Compounds: Structure, Classification, and Antioxidant Power. In: **Bioactive Compounds: Health Benefits and Potential Applications**. Woodhead Publishing, 2019. p. 33–50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00002-5>.

WANG, J.; WANG, L. Structures and properties of commercial maltodextrins from corn, potato, and rice starches. **Starch/Starke**, v. 52, p. 296–304, 2000. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(20009\)52:8/9<296::AID-STAR296>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1521-379X(20009)52:8/9<296::AID-STAR296>3.0.CO;2-A).

WANG, X.; YUAN, Y.; YUE, T. The application of starch-based ingredients in flavor encapsulation. **Starch/Stärke**, v. 67, p. 225–236, 2015. <https://doi.org/10.1002/star.201400163>.

XU, M. et al. Metabolomic analysis of acerola cherry (*Malpighia emarginata*) fruit during ripening development via UPLC-Q-TOF and contribution to the antioxidant activity. **Food Research International**, v. 130, p. 108915, 1 abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.108915>.

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, 19 fev. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00257-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00257-7).

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact Angle and Wetting Properties. In: **Surface Science Techniques. Springer Series in Surface Sciences**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. v. 51p. 3–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1_1).

ZHANG, Y. et al. Interaction of phenolic acids and their derivatives with human serum albumin: Structure–affinity relationships and effects on antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 240, p. 1072–1080, 1 fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.07.100>.

ZHENG, Q. J.; YU, A. B. Modelling the granular flow in a rotating drum by the Eulerian finite element method. **Powder Technology**, v. 286, p. 361–370, 1 dez. 2015. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.08.025>.

ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Food Chemistry**, v. 64, n. 4, p. 555–559, 1 mar. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2).

## APÊNDICE A – Casos simulados

Tabela A – Condições em que as simulações foram executadas e resultados de desejabilidade do número de colisões, desejabilidade da força de colisão e resposta combinada.

<b>Caso</b>	<b>NS (-)</b>	<b>TS (-)</b>	<b>AS (mm)</b>	<b>R (rpm)</b>	<b>E (%)</b>	<b>FI (%)</b>	<b>d<sub>NC</sub> (-)</b>	<b>d<sub>FC</sub> (-)</b>	<b>RC (-)</b>
1	4	A	13	50	25	30	0,130	0,247	0,179
2	4	A	13	50	25	70	0,620	0,029	0,135
3	4	A	13	50	35	30	0,308	0,207	0,252
4	4	A	13	50	35	70	0,998	0,000	0,000
5	4	A	13	70	25	30	0,117	0,488	0,239
6	4	A	13	70	25	70	0,582	0,231	0,367
7	4	A	13	70	35	30	0,305	0,478	0,382
8	4	A	13	70	35	70	1,000	0,158	0,398
9	4	C	13	50	25	30	0,059	0,530	0,177
10	4	C	13	50	25	70	0,410	0,299	0,350
11	4	C	13	50	35	30	0,211	0,507	0,327
12	4	C	13	50	35	70	0,781	0,188	0,383
13	4	C	13	70	25	30	0,067	0,766	0,226
14	4	C	13	70	25	70	0,408	0,465	0,436
15	4	C	13	70	35	30	0,216	0,726	0,396
16	4	C	13	70	35	70	0,762	0,366	0,528
17	4	A	25	50	25	30	0,106	0,268	0,169
18	4	A	25	50	25	70	0,527	0,083	0,210
19	4	A	25	50	35	30	0,274	0,273	0,273
20	4	A	25	50	35	70	0,873	0,119	0,323
21	4	A	25	70	25	30	0,100	0,578	0,240
22	4	A	25	70	25	70	0,510	0,271	0,372
23	4	A	25	70	35	30	0,273	0,510	0,373
24	4	A	25	70	35	70	0,884	0,261	0,480
25	4	C	25	50	25	30	0,039	0,552	0,146
26	4	C	25	50	25	70	0,344	0,365	0,354
27	4	C	25	50	35	30	0,172	0,551	0,308
28	4	C	25	50	35	70	0,640	0,317	0,450
29	4	C	25	70	25	30	0,053	0,700	0,192
30	4	C	25	70	25	70	0,378	0,443	0,409
31	4	C	25	70	35	30	0,187	0,713	0,366
32	4	C	25	70	35	70	0,665	0,430	0,535
33	6	A	13	50	25	30	0,084	0,419	0,188
34	6	A	13	50	25	70	0,512	0,155	0,282
35	6	A	13	50	35	30	0,247	0,397	0,313
36	6	A	13	50	35	70	0,888	0,065	0,240

<b>Caso</b>	<b>NS (-)</b>	<b>TS (-)</b>	<b>AS (mm)</b>	<b>R (rpm)</b>	<b>E (%)</b>	<b>FI (%)</b>	<b>d<sub>NC</sub> (-)</b>	<b>d<sub>FC</sub> (-)</b>	<b>RC (-)</b>
37	6	A	13	70	25	30	0,071	0,747	0,230
38	6	A	13	70	25	70	0,469	0,369	0,416
39	6	A	13	70	35	30	0,238	0,639	0,390
40	6	A	13	70	35	70	0,855	0,299	0,506
41	6	C	13	50	25	30	0,051	0,551	0,167
42	6	C	13	50	25	70	0,388	0,329	0,357
43	6	C	13	50	35	30	0,198	0,536	0,326
44	6	C	13	50	35	70	0,764	0,218	0,408
45	6	C	13	70	25	30	0,051	0,850	0,208
46	6	C	13	70	25	70	0,373	0,475	0,421
47	6	C	13	70	35	30	0,201	0,779	0,396
48	6	C	13	70	35	70	0,722	0,426	0,555
49	6	A	25	50	25	30	0,059	0,542	0,179
50	6	A	25	50	25	70	0,429	0,265	0,337
51	6	A	25	50	35	30	0,205	0,508	0,323
52	6	A	25	50	35	70	0,754	0,148	0,334
53	6	A	25	70	25	30	0,056	0,716	0,200
54	6	A	25	70	25	70	0,413	0,429	0,421
55	6	A	25	70	35	30	0,208	0,646	0,366
56	6	A	25	70	35	70	0,746	0,375	0,529
57	6	C	25	50	25	30	0,034	0,546	0,135
58	6	C	25	50	25	70	0,334	0,398	0,364
59	6	C	25	50	35	30	0,158	0,567	0,299
60	6	C	25	50	35	70	0,620	0,390	0,492
61	6	C	25	70	25	30	0,036	0,714	0,160
62	6	C	25	70	25	70	0,353	0,407	0,379
63	6	C	25	70	35	30	0,176	0,710	0,354
64	6	C	25	70	35	70	0,636	0,449	0,534
65	10	A	13	50	25	30	0,060	0,573	0,185
66	10	A	13	50	25	70	0,418	0,288	0,347
67	10	A	13	50	35	30	0,210	0,528	0,333
68	10	A	13	50	35	70	0,798	0,222	0,420
69	10	A	13	70	25	30	0,054	0,852	0,214
70	10	A	13	70	25	70	0,408	0,476	0,441
71	10	A	13	70	35	30	0,212	0,756	0,401
72	10	A	13	70	35	70	0,759	0,422	0,566
73	10	C	13	50	25	30	0,043	0,686	0,172
74	10	C	13	50	25	70	0,395	0,324	0,358
75	10	C	13	50	35	30	0,197	0,583	0,339
76	10	C	13	50	35	70	0,784	0,247	0,440
77	10	C	13	70	25	30	0,036	1,000	0,189

<b>Caso</b>	<b>NS (-)</b>	<b>TS (-)</b>	<b>AS (mm)</b>	<b>R (rpm)</b>	<b>E (%)</b>	<b>FI (%)</b>	<b>d<sub>NC</sub> (-)</b>	<b>d<sub>FC</sub> (-)</b>	<b>RC (-)</b>
78	10	C	13	70	25	70	0,387	0,535	0,455
79	10	C	13	70	35	30	0,195	0,778	0,390
80	10	C	13	70	35	70	0,749	0,406	0,552
81	10	A	25	50	25	30	0,040	0,555	0,149
82	10	A	25	50	25	70	0,366	0,321	0,343
83	10	A	25	50	35	30	0,172	0,579	0,316
84	10	A	25	50	35	70	0,650	0,297	0,439
85	10	A	25	70	25	30	0,040	0,723	0,170
86	10	A	25	70	25	70	0,373	0,459	0,414
87	10	A	25	70	35	30	0,188	0,684	0,358
88	10	A	25	70	35	70	0,668	0,435	0,539
89	10	C	25	50	25	30	0,001	0,400	0,024
90	10	C	25	50	25	70	0,300	0,378	0,337
91	10	C	25	50	35	30	0,116	0,358	0,203
92	10	C	25	50	35	70	0,601	0,266	0,400
93	10	C	25	70	25	30	0,000	0,720	0,000
94	10	C	25	70	25	70	0,320	0,492	0,397
95	10	C	25	70	35	30	0,130	0,684	0,298
96	10	C	25	70	35	70	0,646	0,413	0,517
97	3	C	13	50	25	30	0,059	0,511	0,174
98	3	C	13	50	25	70	0,437	0,235	0,320
99	3	C	13	50	35	30	0,219	0,478	0,323
100	3	C	13	50	35	70	0,818	0,170	0,373
101	3	C	13	70	25	30	0,059	0,765	0,213
102	3	C	13	70	25	70	0,409	0,467	0,437
103	3	C	13	70	35	30	0,217	0,761	0,406
104	3	C	13	70	35	70	0,777	0,398	0,556
105	3	C	25	50	25	30	0,038	0,821	0,176
106	3	C	25	50	25	70	0,361	0,469	0,412
107	3	C	25	50	35	30	0,178	0,690	0,350
108	3	C	25	50	35	70	0,678	0,376	0,505
109	3	C	25	70	25	30	0,049	0,817	0,201
110	3	C	25	70	25	70	0,365	0,537	0,443
111	3	C	25	70	35	30	0,186	0,832	0,393
112	3	C	25	70	35	70	0,669	0,519	0,589
113	2	C	25	50	25	30	0,079	0,407	0,179
114	2	C	25	50	25	70	0,422	0,205	0,294
115	2	C	25	50	35	30	0,231	0,297	0,262
116	2	C	25	50	35	70	0,745	0,142	0,326
117	2	C	25	70	25	30	0,097	0,435	0,205
118	2	C	25	70	25	70	0,475	0,230	0,330

<b>Caso</b>	<b>NS (-)</b>	<b>TS (-)</b>	<b>AS (mm)</b>	<b>R (rpm)</b>	<b>E (%)</b>	<b>FI (%)</b>	<b>d<sub>NC</sub> (-)</b>	<b>d<sub>FC</sub> (-)</b>	<b>RC (-)</b>
119	2	C	25	70	35	30	0,261	0,480	0,354
120	2	C	25	70	35	70	0,808	0,252	0,452
121	5	C	25	50	25	30	0,032	0,771	0,157
122	5	C	25	50	25	70	0,337	0,374	0,355
123	5	C	25	50	35	30	0,159	0,591	0,307
124	5	C	25	50	35	70	0,629	0,361	0,477
125	5	C	25	70	25	30	0,043	0,827	0,188
126	5	C	25	70	25	70	0,358	0,522	0,432
127	5	C	25	70	35	30	0,180	0,759	0,369
128	5	C	25	70	35	70	0,643	0,509	0,572