



DEYVID HENRIQUE BRAGA

**SECAGEM DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO
DESPOLPAMENTO DE ACEROLA (*Malpighia spp.*) EM
LEITO DE JORRO**

LAVRAS – MG

2023

DEYVID HENRIQUE BRAGA

**SECAGEM DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO
DESPOLPAMENTO DE ACEROLA (*Malpighia spp.*) EM
LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof^ª. Dr^ª. Iara Hernandez Rodriguez Ansoni

Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Isabele Cristina Bicalho

Co-orientadora

LAVRAS – MG

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Braga, Deyvid Henrique.

Secagem do resíduo industrial do despolpamento de acerola
(Malpighia spp.) em leito de jorro / Deyvid Henrique Braga. - 2022.

67 p. : il.

Orientador(a): Iara Hernandez Rodriguez Ansoni.

Coorientador(a): Isabele Cristina Bicalho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Resíduo de acerola. 2. Leito de jorro convencional. 3.
Compostos bioativos. I. Ansoni, Iara Hernandez Rodriguez. II.
Bicalho, Isabele Cristina. III. Título.

DEYVID HENRIQUE BRAGA

**SECAGEM DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO DESPOLPAMENTO DE ACEROLA
(*Malphigia spp.*) EM LEITO DE JORRO**

**DRYING OF INDUSTRIAL ACEROLA (*Malphigia spp.*) RESIDUE OF PULPLIN IN
SPOUTED BED**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 16 de dezembro de 2022

Profª Drª Renata de Aquino Brito Lima Corrêa – UFLA

Drª Juliana Farinassi Mendes – EMBRAPA

Profª Iara Hernandez Rodriguez Ansoni
Orientadora

Profª Isabele Cristina Bicalho
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2023**

À minha mãe Loide por todo apoio e por sempre acreditar nos meus sonhos.

*À minha avó Idalci por ter sido meu suporte
durante toda a minha vida.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

É inegável que ninguém faz nada na vida sozinho, somos fruto das pessoas que encontramos durante a vida e das experiências que tivemos. E com esse trabalho não seria diferente, não teria uma linha sequer sem a contribuição de cada uma das pessoas ou grupo de pessoas que agregaram em minha vida. Diante disso, agradeço:

À Deus pela sua infinita misericórdia.

Àquelas a quem dediquei esse trabalho, que não consigo encontrar palavras para agradecer, mas meu amor é incondicional.

Ao meu pai Gilson e as minhas irmãs.

Ao meu avô Ubirajara, que infelizmente não está mais aqui para desfrutar comigo dessa conquista.

Aos meus tios Heber e Taciana pelo incentivo e apoio.

Ao Nino, meu grande amigo.

Aos meus amigos da graduação, em especial, Kaique, Karina, Caio, Patricia e Mariana.

Aos amigos meus Colégio Losango, em especial, Ana Consuelo, Augusto, Breno, Carol, Éder, Fais, Sônia e Mirlaine.

Aos meus alunos e ex-alunos.

À minha irmã de mestrado, Amanda.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos da UFLA, e aos seus professores, em especial, Iara, Isabele, José Guilherme, Lizzy, Fabiana, Alexandre, Diego, Jaime e Bruna.

Aos técnicos do Laboratório de Processos e Separações Mecânicas do DEG-UFLA, Felipe e Shiley. Ao Prof. Eduardo e aos colegas do laboratório de Pós Colheita de Frutas e Hortaliças do DCA-UFLA pela disponibilidade em me ajudar na realização das análises.

Às professoras Iara e Isabele, por terem abraçado a causa e sempre terem sido presentes e atuantes na realização desse mestrado.

À ESAL e a Escola de Engenharia da UFLA pela excelente estrutura cedida para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, instituição que possuo muito apreço e carinho, que fez os rumos da minha vida serem os melhores.

RESUMO

A acerola é uma fruta típica das Américas e de forte incidência no Brasil, país que se destaca na produção, consumo e exportação do fruto. Sua cadeia agroindustrial envolve, em grande parte, o despulpamento dos frutos, que geram, um resíduo composto majoritariamente de sementes bem como cascas e bagaço. Esse resíduo possui apelo funcional pela presença de compostos bioativos. Viabilizar o aproveitamento desse resíduo é uma alternativa para o desenvolvimento de um processo mais eficiente e sustentável. No entanto, esse tipo de resíduo contém alta umidade o que contribui para sua rápida deterioração e, por isso, é essencial que este seja submetido a um processo de secagem, permitindo assim, prolongar a sua vida útil, para um posterior aproveitamento por exemplo, na produção de farinhas. Uma das alternativas é a secagem em leito de jorro, equipamento que se destaca pelas altas taxas de transferência de calor e de massa, o que contribui para uma redução de umidade de forma eficiente. Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi o estudo da secagem do resíduo de despulpamento de acerola em leito de jorro, analisando-se a influência do processo na qualidade funcional do resíduo. Foi feita a caracterização física do resíduo e do meio poroso por meio da medição das seguintes propriedades: diâmetro médio, esfericidade, densidade aparente e *bulk* e *bulk* compactada, porosidade *bulk*, peso de mil sementes, umidade e ângulo de repouso. Além disso, foram realizadas análises de vitamina C e DPPH. Além disso, experimentos de secagem foram realizados em um leito de jorro convencional variando-se os parâmetros: % de resíduo *in natura*, velocidade e temperatura do ar de secagem. O meio poroso, apresentou altos valores de densidade *bulk* (567,69 kg/m³) e ângulo de repouso (56°) e baixa porosidade (0,6), indicando dificuldade de fluidização do material. Por esse motivo, foram utilizadas misturas, com 20% e 30% de resíduo de acerola *in natura* nos testes de secagem. A partir da curva característica do leito foram identificados os parâmetros fluidodinâmicos para as duas frações de misturas. Foi possível identificar que maiores valores de temperatura e velocidade do ar e menores porcentagens de material úmido na mistura, proporcionam uma maior redução da umidade do resíduo, sendo que a melhor condição de secagem foi observada para o experimento com 20% de material úmido, velocidade do ar de secagem de 36 m/s e temperatura de 60°C. De maneira geral, o leito de jorro mostrou-se eficaz na remoção de umidade e na conservação dos compostos bioativos do resíduo de acerola, operando em períodos curtos com baixas temperaturas de ar.

Palavras-chave: Aproveitamento de resíduos. Leito de jorro convencional. Compostos bioativos. Resíduo de acerola.

ABSTRACT

Acerola is a typical fruit of the Americas and with a strong incidence in Brazil, a country that stands out in the production, consumption and export of the fruit. Its agro-industrial chain involves, to a large extent, the pulping of the fruits, which generate a residue composed mainly of seeds, as well as peels and bagasse. This residue has functional appeal due to the presence of bioactive compounds. Enabling the use of this residue is an alternative for the development of a more efficient and sustainable process. However, this type of waste contains high humidity, which contributes to its rapid deterioration and, therefore, it is essential that it undergoes a drying process, thus allowing it to prolong its useful life, for later use, for example, in flour production. One of the alternatives is spouted bed drying, equipment that stands out for its high rates of heat and mass transfer, which contributes to an efficient reduction of humidity. Given the above, the objective of the present work was to study the drying of acerola pulping residue in spouted beds, analyzing the influence of the process on the functional quality of the residue. The physical characterization of the residue and the porous medium was carried out by measuring the following properties: average diameter, sphericity, apparent density and bulk and compacted bulk, bulk porosity, weight of a thousand seeds, moisture and angle of repose. In addition, vitamin C and DPPH analyzes were performed. In addition, drying experiments were carried out in a conventional spouted bed, varying the parameters: % of residue in natura, speed and temperature of the drying air. The porous medium showed high values of bulk density (567.69 kg/m^3) and angle of repose (56°) and low porosity (0.6), indicating difficulty in fluidizing the material. For this reason, mixtures with 20% and 30% of in natura acerola residue were used in the drying tests. From the characteristic curve of the bed, the fluid dynamic parameters were identified for the two mixture fractions. It was possible to identify that higher values of temperature and air velocity and lower percentages of wet material in the mixture, provide a greater reduction in waste moisture, and the best drying condition was observed for the experiment with 20% of wet material, speed of drying air of 36 m/s and temperature of 60°C . In general, the spouted bed was effective in removing moisture and preserving the bioactive compounds from the acerola residue, operating in short periods with low air temperatures.

Keywords: Use of residue. Conventional spouted bed. Bioactive compounds. Acerola residue.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Aceroleira..... | 17 |
| Figura 3.2 – Acerola. | 17 |
| Figura 3.3 – Mecanismo da secagem em sólidos. | 20 |
| Figura 3.4 - Curvas de (a) variação da umidade do sólido em função do tempo, (b) taxa de secagem do sólido em função do teor de umidade. | 22 |
| Figura 3.5 – Representação de um leito de jorro convencional. | 24 |
| Figura 3.6 – Regimes de escoamento no leito de jorro. | 25 |
| Figura 3.7 – Curva Característica do leito de jorro. | 27 |
| Figura 4.1 – Resíduo do despulpamento de acerola. | 32 |
| Figura 4.2 – Aparato utilizado para compactação do material. | 36 |
| Figura 4.3 – Ângulo de repouso dinâmico. | 37 |
| Figura 4.5 – Unidade de leito de jorro (LPSM/UFLA). | 40 |
| Figura 5.1 – Resíduo de acerola <i>in natura</i> e seco..... | 45 |
| Figura 5.2 – Escala de Krumbein (eixo y: esfericidade; eixo x: grau de arredondamento). | 46 |
| Figura 5.3 – Diagrama de Geldart (as leituras no gráfico das sementes <i>in natura</i> apresentam coloração lilás e após secas apresentam coloração amarela)..... | 48 |
| Figura 5.4 - Cinética de secagem do resíduo de acerola <i>in natura</i> em estufa. ..Erro! Indicador não definido. | |
| Figura 5.5 – Curva característica da mistura de resíduo de acerola em leito de jorro, contendo 20% de resíduo <i>in natura</i> | 51 |
| Figura 5.6 – Curva característica da mistura de resíduo de acerola em leito de jorro, contendo 30% de resíduo <i>in natura</i> | 51 |
| Figura 5.7 – Distribuição de resíduos para a umidade final. | 55 |
| Figura 5.8 – Superfície de resposta para as variáveis X e T, com V=0..... | 56 |
| Figura 5.9 – Superfície de resposta para as variáveis V e T, com X=0..... | 56 |
| Figura 5.10 – Superfície de resposta para as variáveis V e X, com T=0..... | 56 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 Composição nutricional da acerola..... | 18 |
| Tabela 3.2 - Compostos bioativos de interesse no resíduo de despolpamento de acerola. | 19 |
| Tabela 4.1 – Escoabilidade de sólidos em função do ângulo de repouso..... | 38 |
| Tabela 4.2 – Planejamento dos experimentos de secagem em leito de jorro. | 42 |
| Tabela 5.1 – Resultados da caracterização do resíduo de acerola <i>in natura</i> e seco. | 44 |
| Tabela 5.2 – Resultados da caracterização do meio poroso para o resíduo <i>in natura</i> e seco...47 | |
| Tabela 5.3 – Densidade e ângulo de repouso para misturas com diferentes porcentagens de resíduo <i>in natura</i> | 50 |
| Tabela 5.4 – Umidade para o resíduo do despolpamento de acerola. | 53 |
| Tabela 5.5 –Planejamento fatorial 2 ³ dos ensaios de secagem. | 54 |
| Tabela 5.6 – Resultados da regressão para a umidade final. | 55 |
| Tabela 5.7 – Resultados das análises de compostos bioativos. | 58 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 Introdução | 12 |
| Capítulo 2 Objetivos | 14 |
| 2.1 Objetivo geral | 14 |
| 2.2 Objetivos específicos | 14 |
| Capítulo 3 Referencial Teórico..... | 15 |
| 3.1 Subprodutos e resíduos agroindustriais | 15 |
| 3.1.1 Utilização de sementes e cascas na alimentação | 16 |
| 3.2 Acerola e seu resíduo de despolpamento..... | 16 |
| 3.3 Secagem..... | 19 |
| 3.3.1 Curvas de secagem | 21 |
| 3.4 Leito de jorro | 23 |
| 3.4.1 Regiões características..... | 24 |
| 3.4.2 Regimes de escoamento..... | 25 |
| 3.4.3 Tipos de leitos de jorro | 26 |
| 3.4.4 Fluidodinâmica do leito de jorro | 27 |
| 3.4.4.1 Parâmetros fluidodinâmicos | 29 |
| 3.4.5 Secagem de resíduos agroindustriais em leito de jorro | 30 |
| Capítulo 4 Materiais e métodos | 32 |
| 4.1 Matéria prima | 32 |
| 4.2 Caracterização do resíduo de despolpamento da acerola | 32 |
| 4.2.1 Caracterização das partículas..... | 33 |
| 4.2.1.1 Diâmetro médio | 33 |
| 4.2.1.2 Densidade aparente..... | 33 |
| 4.2.1.3 Esfericidade | 34 |
| 4.2.1.4 Peso de 1000 sementes | 34 |
| 4.2.1.5 Umidade | 34 |
| 4.2.3 Caracterização do meio poroso..... | 35 |
| 4.2.3.1 Densidade bulk e bulk compactada | 35 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3.2 Porosidade bulk | 36 |
| 4.2.3.3 Ângulo de repouso e Índice de Hausner | 37 |
| 4.2.4 Determinação dos compostos bioativos | 38 |
| 4.2.4.1 Determinação do conteúdo de vitamina C..... | 38 |
| 4.2.4.2 Atividade antioxidante pela captura do radical livre DPPH..... | 39 |
| 4.3 Unidade experimental..... | 40 |
| 4.4 Metodologia experimental..... | 41 |
| 4.4.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro..... | 41 |
| 4.4.2 Secagem em leito de jorro | 42 |
| Capítulo 5 Resultados e discussão..... | 44 |
| 5.1 Caracterização do resíduo do despulpamento de acerola | 44 |
| 5.2 Caracterização do meio poroso..... | 47 |
| 5.3 Densidade e ângulo de repouso das misturas de resíduo de acerola in natura e seco. ... | 49 |
| 5.4 Curva característica da mistura de resíduo de acerola in natura e seco..... | 50 |
| 5.5 Secagem da mistura de resíduo de acerola in natura e seco em leito de jorro..... | 53 |
| 5.6 Compostos bioativos | 58 |
| Capítulo 6 Conclusões | 61 |

Capítulo 1 Introdução

A acerola (*Malpighia spp.*) é uma fruta proveniente das Américas, com forte incidência no Brasil. De acordo com Silveira et al. (2020), a produção brasileira de acerola gira em torno de 70 mil toneladas por ano, com a região nordeste contribuindo com uma produção em torno de 64% da capacidade nacional. A demanda de acerola está ligada principalmente às agroindústrias que, durante o seu processamento, produzem diversos produtos, dentre eles a polpa de fruta congelada, que atende ao mercado interno e também ao mercado internacional (RITZINGER; RITZINGER, 2011). A acerola possui um grande diferencial, seu conteúdo de Vitamina C, que eleva seu valor agregado e atende a um grande mercado consumidor.

Entretanto, a produção de polpa de acerola gera um resíduo que consiste basicamente das sementes da fruta e bagaço, que é geralmente descartado e, que além de poluir o meio ambiente, é considerado como desperdício de um produto com estimado valor nutricional. Cerca de 40% do volume de produção de acerola trata-se do resíduo de despulpamento. Dada a produção anual e a quantidade da fruta processada, são gerados em torno de 92 toneladas/ano de resíduo de acerola (JÚNIOR, 2012). Uma alternativa é, portanto, a utilização desse resíduo em outras formulações, no entanto, tal prática pode causar estranheza ao consumidor principalmente por este tipo resíduo não possuir um apelo sensorial considerável.

A importância do aproveitamento do resíduo do despulpamento de acerola radica na sua composição que inclui compostos bioativos de interesse, como compostos fenólicos, ácidos orgânicos e vitamina C, substâncias que atuam como antioxidantes, eliminando os radicais livres resultantes do metabolismo energético do corpo humano.

Alguns autores vem realizando trabalhos com o intuito de estudar o aproveitamento das sementes e bagaço de acerola, para produção, por exemplo, de farinhas, que adicionadas às formulações podem enriquecê-las nutricionalmente (CRUZ et al., 2019; SOUSA et al., 2011; TEDESCO, 2018).

Para um melhor aproveitamento do resíduo de acerola, a etapa de secagem é essencial, uma vez que esse tipo de resíduo contém alto teor de umidade, o que contribui para sua rápida degradação. A secagem é uma operação unitária que consiste em remover a água do alimento, o que diminui sua atividade de água e, promove, conseqüentemente, um considerável aumento de sua vida útil. A operação de secagem tem como característica principal a transferência simultânea de calor e massa. A secagem pode ocorrer pelos mecanismos de condução, isto é,

por transferência direta de calor ou por convecção, através da passagem de um fluido, geralmente ar, através da superfície do material a ser desidratado.

Para a secagem do resíduo do despulpamento de acerola, podem ser utilizados diversos métodos, entre eles a secagem convectiva. Existem trabalhos na literatura sobre a secagem do resíduo de despulpamento de acerola em estufas, com e sem circulação forçada de ar e também em secador de bandejas (TEDESCO, 2018; NÓBREGA, 2012).

Uma técnica alternativa, que apresenta um contato mais intenso entre as fases gás e sólido, possibilitando a obtenção de altas taxas de transferência de calor e massa, é a secagem em leito de jorro. Esse tipo de secador consiste em um leito cônico-cilíndrico, em sua configuração convencional, onde é injetado ar de secagem, que movimenta as partículas em seu interior num formato característico de jorro. Sua aplicação na secagem de sementes e resíduos de frutas tem sido explorada em alguns trabalhos, como por exemplo, na secagem de semente de painço (NASCIMENTO, 2014), de sementes de linhaça (SANTANA, 2011) e na secagem de resíduo do processamento de frutas cítricas (VIOTTO, 2007).

Existem alguns trabalhos sobre a secagem do resíduo do despulpamento de acerola em leito de jorro, dentre eles, o que mais se destaca é o de Bortolotti (2012), em que foi realizada a secagem de uma mistura contendo soja e o resíduo do despulpamento de acerola. Outro trabalho encontrado na literatura é o de Júnior (2012), que realizou a secagem do resíduo do despulpamento de acerola em forma de pasta em leito de jorro, obtendo bons resultados no que diz respeito à estabilidade dos compostos bioativos.

Diante do exposto, no presente trabalho avaliou-se um leito de jorro convencional de grandes dimensões na secagem do resíduo do despulpamento de acerola. Além disso, foram analisadas as características físicas e funcionais do produto seco, dado que as altas temperaturas de operação podem degradar compostos bioativos termossensíveis. O trabalho se justifica pela importância do aprofundamento no estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro de grande dimensão e da avaliação da eficiência do equipamento quando aplicado na secagem de resíduos agroindustriais.

Capítulo 2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Estudar a secagem do resíduo de despulpamento da acerola em leito de jorro e verificar a estabilidade dos compostos bioativos do resíduo após a secagem.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar o resíduo de acerola;
- ✓ Estudar o mecanismo da secagem do resíduo de acerola em leito de jorro;
- ✓ Verificar a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem e da fração de mistura do resíduo seco e *in natura* na umidade final do material.
- ✓ Investigar a fluidodinâmica do leito de jorro a partir da obtenção da curva característica de queda de pressão *versus* vazão de ar.
- ✓ Avaliar a qualidade funcional do resíduo de acerola após a secagem em leito de jorro em relação ao resíduo *in natura*, através de análises de antioxidantes e vitamina C.

Capítulo 3 Referencial Teórico

3.1 Subprodutos e resíduos agroindustriais

A atividade agroindustrial tem crescido muito no Brasil, com o objetivo de suprir as demandas alimentares da população, participando com cerca de 5,9% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Essa atividade inclui o beneficiamento, transformação e processamento dos produtos e das matérias-primas provenientes da agropecuária (EMBRAPA, 2019). Tudo isso gera um questionamento: Como produzir e distribuir alimentos para tantas pessoas de forma mais eficiente e sustentável?

Resíduos e subprodutos são gerados a partir da manipulação de produtos agropecuários, como os alimentos. Os resíduos da indústria de alimentos representam potencial para gerar impactos ambientais e um sério problema operacional para as respectivas indústrias (GOULA; LAZARIDES, 2015). A cadeia produtiva das agroindústrias gera mais de 500 milhões de toneladas de resíduos e subprodutos anualmente, em toda a América Latina (EMBRAPA, 2019).

O uso dos subprodutos e resíduos agroindustriais contribui na eficiência e sustentabilidade dos processos produtivos reduzindo os custos de produção, aumentando o aproveitamento da matéria prima e reduzindo o impacto causado pelo descarte desses resíduos no meio ambiente (SOARES, 2017). Quando o assunto é reaproveitamento de resíduos para a alimentação, é usual a utilização de cascas e sementes que podem ser consumidas *in natura*, secas ou na forma de farinhas. O ato de se aproveitar o máximo do alimento é conhecido como aproveitamento integral.

Resíduos gerados inevitavelmente durante a etapa de processamento de alimentos, podem ser ricos em compostos de interesse, como antioxidantes, vitaminas e minerais, apresentando, portanto, alta atividade biológica e características nutricionais, o que aumenta a sua possibilidade de uso (GOULA; LAZARIDES, 2015). A secagem de resíduos oriundos do processamento de alimentos viabiliza seu uso, posterior, por exemplo, no enriquecimento de outros alimentos, com um apelo funcional (SOUSA et al., 2011), e sua adição em diversas formulações tais como: bolos, tortas, biscoitos, produtos cárneos, dentre outros.

3.1.1 Utilização de sementes e cascas na alimentação

A utilização de partes não convencionais de alimentos que apresentam segurança para o consumo, pode enriquecer a formulação de alimentos, pois possuem fibras, vitaminas e minerais (HACHMANN; BASSO, 2013). Em alguns casos, o valor nutricional das partes não convencionais chega a superar aqueles das partes convencionais (COSTA; LIMA; MELLO, 2017).

As sementes e as cascas de frutas e vegetais podem, em alguns casos, não possuir grande apelo sensorial, com isso, uma das alternativas para aumentar o seu consumo pode ser o seu processamento e transformação em outros produtos tais como farinha. O uso de farinhas alimentícias para o enriquecimento dos alimentos, como por exemplo, farinha de frutos do cerrado para o enriquecimento de pães ou a sua adição em bolos, tortas entre outros produtos, tem sido estudado em diversos trabalhos da literatura (HACHMANN, 2013; LAGO, 2018; SILVA, 2017). Essa forma de utilização de partes não convencionais dos alimentos pode causar um certo estranhamento por parte dos consumidores, o que poderia ser atenuado por meio de, por exemplo, divulgação científica das propriedades e vantagens do uso desse tipo de formulação (PEREIRA, 2018).

No trabalho de Storck et al. (2013) foi medido o valor calórico de preparações adicionadas de partes não convencionais de frutas e hortaliças. Foi observado que essa adição não refletiu em um aumento importante no valor energético de diferentes preparações, mostrando que, como não há uma alteração importante no teor calórico, cascas e sementes podem aumentar o teor nutricional dessas preparações. Ainda nesse sentido, com relação à quantidade de proteína encontrada nas partes descartadas quando comparada à quantidade encontrada na parte nobre do alimento, pode-se observar que, para a maioria das frutas e hortaliças, o valor é semelhante ou superior ao encontrado nas partes habitualmente consumidas.

3.2 Acerola e seu resíduo de despulpamento

A acerola é o fruto da aceroleira (Figura 3.1), arbusto da família das *malpighiáceas*, que tem origem nas Américas (MESQUITA; VIGOA, 2000). O arbusto tem uma altura máxima de até 3 metros, possui a copa bastante densa composta por pequenas folhas verde-escuras e brilhantes. Suas flores, que surgem de três a quatro semanas antes da frutificação, são rósea-esbranquiçadas e são da forma de cachos. Com relação ao fruto (Figura 3.2), este possui

coloração que vai de alaranjado para vinho, passando pelo vermelho, coloração advinda da presença de antocianinas.

As características do fruto (Figura 3.2) foram descritas por Ritzinger e Ritzinger (2011), conforme o trecho abaixo:

Os frutos são drupas tricarpeladas, com epicarpo (casca) fino, mesocarpo (polpa) carnoso e succulento, e endocarpo constituído de três caroços triangulares, alongados, com textura de pergaminho e superfície reticulada, podendo ou não conter uma semente cada. A forma do fruto pode ser redonda, oval ou achatada, e o peso pode variar de 3 a 16g. A superfície do fruto pode ser lisa ou apresentar, entre os carpelos, sulcos rasos ou profundos. A cor da casca do fruto imaturo normalmente apresenta-se verde, podendo também ser alvacenta ou verde-arroxeadada. Em frutos maduros, a cor da casca pode variar de vermelho-amarelada, vermelho-alaranjada ou vermelha a vermelho-púrpura. A cor da polpa pode ser amarela, alaranjada ou vermelha. As sementes são pequenas, monoembriônicas, não albuminadas, apresentando, na extremidade mais estreita, uma pequena saliência, que é a radícula embrionária.

Figura 3.1 - Aceroleira.



Fonte: Do autor.

Figura 3.2 – Acerola.



Fonte: Do autor.

O cultivo de acerola no Brasil é feito em todo o território nacional, com algumas limitações na região sul em função das baixas temperaturas. Dados do último censo agropecuário mostram os estados de Pernambuco, Ceará e Sergipe como os maiores produtores de acerola no Brasil (IBGE, 2017). A maior parte da produção de acerola no país atende à demanda das indústrias de processamento, principalmente para obtenção da polpa da fruta, que posteriormente, é também exportada para diversos países (SEBRAE, 2016). O processamento anual de acerola no ano de 2017 foi de, aproximadamente, 70 mil toneladas (SILVEIRA; ROSSI; PECHE, 2020).

A acerola possui estimado valor nutricional, pois é rica em antioxidantes, vitamina C e antocianinas, além de se tratar de um alimento de baixo valor calórico (CRUZ et al., 2019). Na Tabela 3.1 é apresentado o conteúdo nutricional da acerola, destacando-se como principal atrativo o seu alto teor de vitamina C.

Tabela 3.1 Composição nutricional da acerola.

| Nutriente | Conteúdo |
|---------------------------------|-----------------|
| Umidade % | 90,5 |
| Proteínas (g/100g) | 0,9 |
| Lipídeos (g/100g) | 0,2 |
| Carboidratos (g/100g) | 8,0 |
| Fibra alimentar (g/100g) | 1,5 |
| Cinzas (g/100g) | 0,4 |
| Vitamina C (mg/100g) | 941 |

Fonte: Unicamp (2011).

Segundo Chang *et al.* (2018), a acerola possui teor de vitamina C e de compostos fenólicos considerável, por vezes até maior que os encontrados em outras frutas que são conhecidas como fontes essenciais desses micronutrientes, tais como, a uva, o açaí, o morango e a manga.

Segundo Tedesco (2018), o resíduo de despulpamento de acerola se apresenta como um produto com grande concentração de compostos bioativos, alguns deles em concentrações até superiores àquelas encontradas na polpa. A Tabela 3.2 apresenta os teores de alguns compostos bioativos encontrados no resíduo de despulpamento da acerola (SOUSA *et al.*, 2011).

Tabela 3.2 - Compostos bioativos de interesse no resíduo de despulpamento de acerola.

| Nutriente | Conteúdo |
|--|-----------------|
| Ácido Ascórbico (mg/100g) | 247,62 |
| Fenólicos (mg EAG/100g) | 1,04 |
| Antocianinas ($\mu\text{g}/100\text{g}$) | 8,84 |
| Flavonóides ($\mu\text{g}/\text{g}$) | 89,55 |
| Carotenóides ($\mu\text{g}/100\text{g}$) | 881,56 |

Fonte: Sousa *et al.* (2011).

O resíduo do despulpamento de acerola pode ser utilizado para diversos fins, sejam eles alimentícios ou não. Tedesco (2018), por exemplo, utilizou os compostos bioativos do resíduo para criar um filme de desintegração oral, na área odontológica. Nóbrega (2012) realizou a secagem do resíduo para obtenção de farinha, com o intuito de posteriormente adicioná-la a outros alimentos agregando valor às formulações.

O resíduo do despulpamento de acerola é um material com alto valor nutricional e alto teor de umidade, o que o torna um excelente meio de crescimento microbiano e, portanto, um alimento perecível. Diante disso, é importante, caso se tenha interesse em sua utilização, a aplicação de métodos de conservação. Um desses métodos é a secagem.

3.3 Secagem

A secagem é uma operação unitária que tem como objetivo a remoção de água do interior de um sólido através do fornecimento de calor. O processo envolve dois mecanismos, transferência de calor e de massa. A transferência de massa ocorre para remoção da umidade do interior do sólido, no qual a água é transferida por difusão do interior do sólido para sua superfície. O processo de transferência de calor ocorre pois o sólido necessita de energia na forma de calor para ceder às moléculas de água e removê-las do alimento, isto é, pelo processo de evaporação do líquido, no qual a água da superfície do sólido é posteriormente transferida para a corrente de ar por convecção (TADINI *et al.*, 2019).

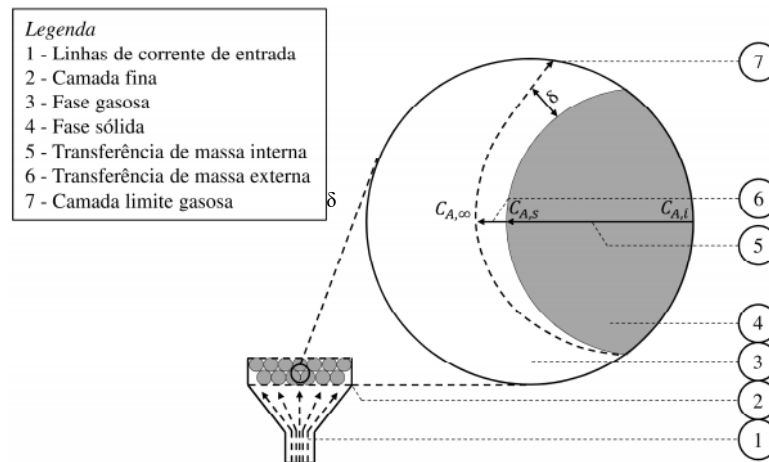
Para um melhor entendimento do mecanismo de secagem, é necessário conhecer as formas nas quais a água se encontra presente nos alimentos, forma livre ou ligada. Caso a água esteja presente no alimento sem se ligar a outros compostos por interações intermoleculares,

esta é conhecida como água livre e o teor de água livre em um alimento é conhecido como Atividade de Água (TADINI et al., 2019). No entanto, se a água se encontra ligada aos solutos presentes na composição do alimento, sejam eles íons, compostos polares ou compostos apolares, esta será conhecida como água ligada, sendo, portanto, mais difícil de ser removida do alimento (DAMODARAM; PARKIN, 2019).

Na secagem convectiva, uma corrente de fluido (ar aquecido) entra em contato com o material, maneira pela qual ocorre a transferência de calor para evaporar o líquido, enquanto isso, o mesmo ar, com baixa umidade, serve como sorvedouro para remoção do vapor d'água, maneira pela qual ocorre a transferência de massa (DIAS, 2018).

A transferência de massa nesse processo pode ser dividida em duas etapas (1) Transferência de massa do interior da partícula até a sua superfície (Transferência interna); (2) Transferência de massa da superfície da partícula para a fase fluida (Transferência externa) (ALTINO, 2019 apud RATTI, 2009). Ambas as etapas estão representadas na Figura 3.3, onde $C_{A,i}$ é a concentração do componente no seio da fase sólida, $C_{A,s}$ é a concentração do componente na superfície da partícula e $C_{A,\infty}$ é a concentração do componente no ar de secagem.

Figura 3.3 – Mecanismo da secagem em sólidos.



Fonte: Adaptado de Altino (2019).

A transferência de massa no interior da partícula possui diversos mecanismos: difusão das fases líquidas e vapor, efusão, termodifusão, forças capilares, pressão osmótica e gradiente de pressão (ALTINO, 2019), sendo que a maior resistência à transferência de massa será a distância, dentro do sólido, a ser percorrida pelas moléculas de água, desde o seio da fase sólida até a interface. Já o transporte fora da partícula ocorre através de uma camada limite de gás por

dois mecanismos principais: convecção pelo movimento do fluido e difusão (pelo gradiente de concentração), sendo o principal mecanismo de transporte, a convecção (ALTINO, 2019).

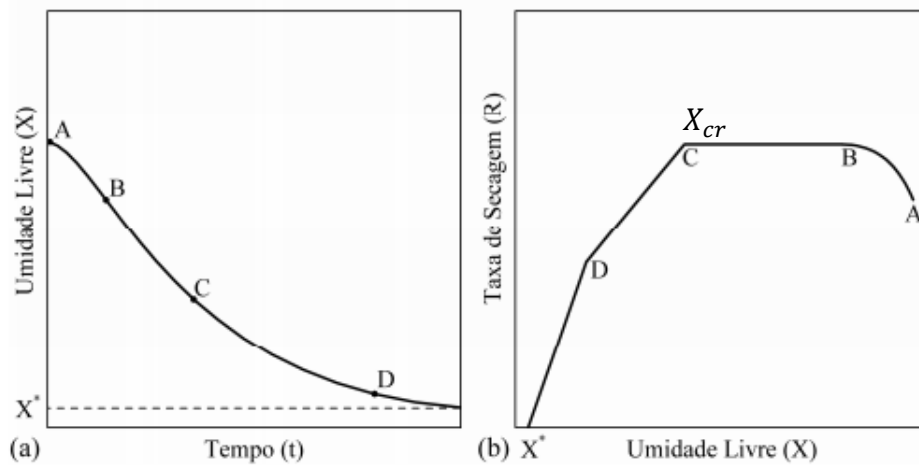
A operação de secagem convectiva pode ser feita de duas maneiras, de forma natural ou artificial. No que diz respeito à secagem natural, é utilizado o sol como fonte de calor e o ar atmosférico como fluido de secagem, sendo que todos os fenômenos de transferência de calor ocorrem principalmente por radiação térmica, enquanto, a transferência de massa ocorre, por difusão e por convecção natural. No que diz respeito à secagem artificial, que é mais eficiente que a natural, existe uma fonte de calor, além da possibilidade de movimentação forçada do ar de secagem. São exemplos de secadores artificiais: secadores de bandeja, secadores de túnel, secadores de esteira, secador de tambor rotativo, atomizador (*spray-dryer*), leito fluidizado, leito de jorro, entre outros. A escolha da técnica adequada de secagem depende principalmente dos custos envolvidos no processo, da natureza do material a ser desidratado e da forma do produto final desejado (CELESTINO, 2010).

A secagem ou desidratação de alimentos visa principalmente a conservação e redução de perdas do produto, através da inibição do crescimento microbiano e da atividade enzimática. Porém, é um processo que envolve um elevado gasto energético, em função da quantidade de calor necessária para retirar as diferentes camadas de água presentes nos alimentos (DAMODARAN, 2017). Além disso, o calor envolvido na operação e condições inadequadas do processo podem degradar compostos bioativos de frutas e hortaliças reduzindo a qualidade do produto (MEDEIROS, 2002).

3.3.1 Curvas de secagem

Como dito anteriormente, a secagem de sólidos possui certa complexidade, envolvendo o transporte de calor e de massa e a ocorrência de possíveis modificações no material, como degradação de alguns compostos (compostos bioativos) e a formação de outros (compostos de coloração) (MUJUMDAR, 2014). As etapas e mecanismos envolvidos no processo de secagem de sólidos podem ser analisados através de uma abordagem experimental com o levantamento de curvas conhecidas como curvas de secagem (ALTINO, 2019). Estas curvas relacionam a umidade do sólido em função do tempo de operação ou a taxa de secagem do material em função da umidade do sólido, conforme apresentado na Figura 3.4 e auxiliam na obtenção de condições operacionais desejadas, na avaliação do processo e no projeto de equipamentos (TADINI et al., 2019).

Figura 3.4 - Curvas de (a) variação da umidade do sólido em função do tempo, (b) taxa de secagem do sólido em função do teor de umidade.



Fonte: Altino (2019).

Para um melhor entendimento do processo de secagem, pode-se definir a umidade de equilíbrio (X^*), como a quantidade de água que o sólido consegue atingir após ser submetido ao processo de secagem à uma certa temperatura e umidade relativa do ar. Esse valor de umidade corresponde ao ponto de equilíbrio entre as pressões de vapor da água no sólido e no ambiente. A umidade crítica (X_{cr}) é o valor da umidade alcançado no momento em que a taxa de secagem passa de um valor máximo e constante para um valor decrescente (CARVALHO et al., 2022).

Na curva AB (Figura 3.4), o material entra em contato com o meio secante até que as temperaturas do sólido e do ar de secagem estejam em equilíbrio térmico. O segmento BC, em seguida, representa o período de taxa constante, onde a superfície do sólido está saturada com água, possuindo como consequência a evaporação do líquido superficial sem influência da parte interior do sólido na secagem. Durante o tempo de secagem, ainda no intervalo BC, a temperatura superficial atinge a temperatura de bulbo úmido, a partir da qual, o líquido retirado da superfície é repostado pelo líquido do interior do sólido (FOUST *et al.*, 1980).

No ponto C é cessado o período de taxa constante, por ser o último ponto onde a superfície do sólido está saturada de água, conhecido como ponto de umidade crítica. O segmento CD é denominado “primeiro período de taxa decrescente”. Durante esse período, toda a superfície do sólido fica menos rica em líquido, e o mecanismo dominante passa a ser agora a difusão no interior da partícula, que é mais lenta que a transferência de massa que ocorre entre a água na superfície do sólido e o ar de secagem. No ponto D, já não há nenhum elemento de área que

estará saturado com água. O vapor retido no interior do sólido difunde-se para a superfície e é transferido para a corrente de ar quase que imediatamente. Prosseguindo-se além do ponto D, observa-se que toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido. De maneira que, com a diminuição contínua da umidade, a resistência a ser vencida pela condução do calor e a difusão da massa aumenta até alcançar a umidade de equilíbrio (ALTINO, 2019; FOUST *et al.*, 1980).

3.4 Leito de jorro

Para suprir expectativas cada vez maiores em termos de eficiência energética, qualidade superior de produtos e processos mais rápidos, são necessárias operações melhor projetadas e mais controladas (SPREUTELS *et al.*, 2014). Surgem então, opções para obtenção de produtos secos, com adição mínima de coadjuvantes de tecnologia, e que apresentam bom desempenho de secagem e altos coeficientes de transferência de calor e massa (SOUSA, 2017). Dentre essas novas técnicas tem-se a secagem em leito de jorro. A técnica tem se mostrado promissora em vários tipos de aplicações, que vão além da tradicional secagem de sólidos, entre elas, a secagem de material pastoso (MEDEIROS *et al.*, 2001; ROCHA *et al.*, 2011; SOUSA, 2017) e o recobrimento de partículas (DUARTE, 2006; GONÇALVES, 2019; JÚNIOR, 2012).

O secador do tipo leito de jorro foi desenvolvido no ano de 1954, por Gishler e Mathur, com o objetivo principal de secar grãos de trigo. Uma das vantagens apresentadas pelo equipamento para a secagem é a sua capacidade de operar à temperaturas acima das utilizadas em técnicas convencionais sem a ocorrência de perda da qualidade do material, devido ao contato íntimo entre as fases gás e sólido no interior do equipamento (MARRETO, 2006).

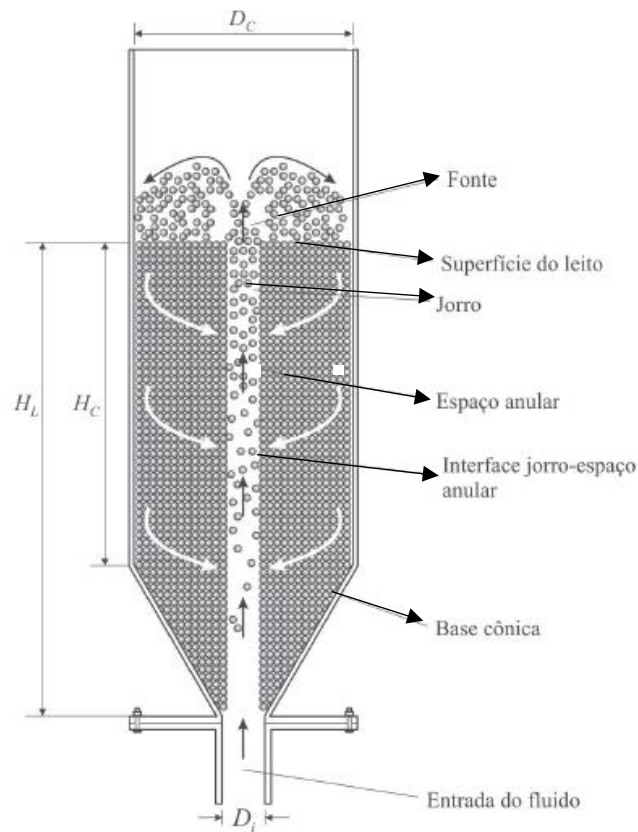
A representação esquemática de um leito de jorro convencional é apresentada na Figura 3.5, onde H_L é a altura do leito, H_C é a altura da coluna, D_C é o diâmetro da coluna e D_i é o diâmetro interno. De acordo com Tadini *et al.* (2015), o leito de jorro convencional é caracterizado por uma seção superior cilíndrica e uma seção inferior cônica com o vértice truncado, para eliminar zonas de estagnação, sendo dividido em três zonas de escoamento, as regiões características: região de jorro, região anular e região de fonte, que serão explicadas mais adiante.

Uma das desvantagens da técnica de leito de jorro é o atrito gerado entre as partículas, que pode causar danos ao material, dependendo da sua sensibilidade (DUARTE, 2006). Além disso, na secagem de materiais pastosos, por exemplo, o leito de jorro pode não ser uma técnica

tão eficiente em função do possível colapso do leito que pode ocorrer em função da composição do material (MEDEIROS et al., 2001).

Algumas modificações ao leito de jorro convencional têm sido sugeridas de maneira a driblar algumas das limitações da técnica, como por exemplo, o desenvolvimento de dispositivos que permitem a formação de múltiplos canais de jorro ou até mesmo leitos que possuem injeção de ar nas laterais, dentre outras alterações (MARRETO, 2006).

Figura 3.5 – Representação de um leito de jorro convencional.



Fonte: Tadini et al. (2015).

3.4.1 Regiões características

Com a injeção de fluido na parte inferior do leito de jorro, têm-se a formação de diferentes regiões de contato fluido-partícula, sendo estas denominadas como: região de jorro, região anular e região de fonte (Figura 3.5). A região de jorro, também denominada região central ou canal preferencial, é a região onde ocorre o transporte pneumático ascendente do material

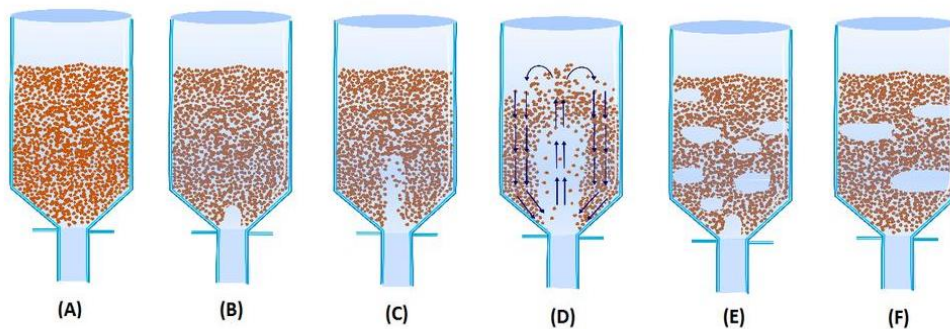
particulado, concorrente ao escoamento do ar, sendo uma região diluída, caracterizada por uma alta porosidade. A região de fonte é a região que se localiza acima da superfície do leito, em que as partículas que acabam de sair da região central, perdem velocidade caindo na região anular, localizada entre o jorro e a parede do equipamento. A região anular, também denominada região deslizante, é o local onde as partículas escoam em configuração contracorrente ao ar (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

O movimento cíclico das partículas no leito, primeiro na região central, seguido da região de fonte e por fim, através da região anular, que retorna ao início na região central, propicia altos coeficientes de transferência de calor e massa, o que torna o leito de jorro um equipamento atrativo para a operação de secagem (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

3.4.2 Regimes de escoamento

A Figura 3.6 ilustra os regimes de escoamento em um leito de jorro de acordo com a vazão do ar de entrada.

Figura 3.6 – Regimes de escoamento no leito.



Fonte: Do Nascimento (2014).

De acordo com a Figura 3.6 e segundo Dogan et al. (2000), os diferentes regimes de escoamento identificados em um leito de jorro são:

- Leito fixo: em A, para pequenas vazões de ar, o fluido percola pelas partículas sem fluidizar o leito.
- Jato interno: em B ocorre a formação de uma cavidade onde futuramente irá se formar a região central do leito. O leito ainda permanece fixo e maiores vazões de ar são requeridas para aumentar essa cavidade.

- Leito fluidizado: em C, após a formação do jato interno, ocorre o aumento na vazão do ar, que leva à fluidização da parte superior do leito.
- Jorro: em D, o leito forma o jorro convencional.
- Jorro em fase diluída: ocorre quando a região anular possui a mesma concentração de partículas que o jorro central, válido para alta relação de escoamento do ar.
- Regime borbulhante (*Slugging*): em E e F, não se forma o jorro estável e o escoamento de ar passa a formar bolhas no leito.
- Jorro inconsistente: regime observado para grandes vazões de ar, caracterizado por uma enorme pulsação de partículas na altura da fonte.

3.4.3 Tipos de leitos de jorro

O leito de jorro pode ser classificado em diferentes tipos de acordo com a sua geometria e características. São alguns desses tipos:

- Leito de jorro cônico: sua principal característica é a ausência de partículas na região cilíndrica. Esse tipo de leito permite maior capacidade de carga na alimentação se comparado ao leito de jorro convencional, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, e permite a secagem de materiais com maior tendência à aglomeração e que possuem alta umidade (LOURENÇO, 2006).
- Leito de jorro com tubo interno (tubo *draft*): Nesse tipo de leito de jorro, é adicionado ao equipamento um tubo na região central. O tubo direciona o ar na região de jorro central do leito, possibilitando uma redução na queda de pressão máxima, além do aumento do tempo de residência das partículas e homogeneização da circulação. Porém, possui como desvantagem a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, podendo prejudicar à eficiência da secagem (LOURENÇO, 2006).
- Leito de jorro aerado: na parte cônica do leito há uma vazão auxiliar de ar que causa aumento da porosidade nessa região, e conseqüentemente, um aumento das taxas de transferência de calor e massa (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud LOURENÇO, 2006).
- Leito de seção retangular: equipamento muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como, por exemplo, no processo de recobrimento. O leito é

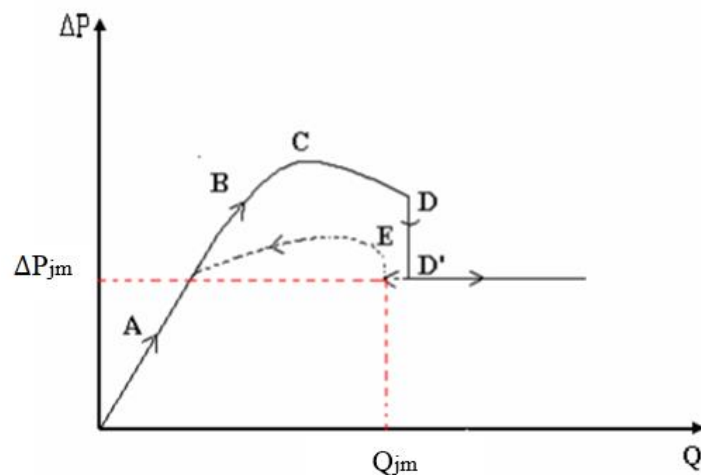
composto por uma seção retangular com base de tronco de pirâmide (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud LOURENÇO, 2006).

- Leito vibro-jorrado: um sistema mecânico de vibração na base do leito aumenta a agitação das partículas (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud LOURENÇO, 2006).

3.4.4 Fluidodinâmica do leito de jorro

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro é imprescindível para o entendimento do processo de secagem e dos fenômenos envolvidos na operação. A partir da curva característica do leito (Figura 3.7) que representa os dados de queda de pressão no leito em função da vazão do fluido, é possível determinar os parâmetros fluidodinâmicos de maior interesse para o projeto e operação do leito.

Figura 3.7 – Curva Característica do leito de jorro.



Fonte: Cunha (2008).

De acordo com Mathur e Epstein (1974):

- O segmento AB representa o aumento linear da queda de pressão à medida que aumenta a vazão de ar. Neste momento, o leito pode ser caracterizado como um leito fixo. Durante esta condição, as partículas permanecem imóveis e o ar de secagem percola os espaços vazios sem gerar fluidização. Em consequência, ocorre o aumento da queda de pressão com o aumento da velocidade de ar;

- O segmento BC representa o crescimento da queda de pressão no leito com o aumento da vazão de ar com um comportamento não linear. Nesse segmento, a vazão de ar já é alta o suficiente para empurrar as partículas que encontram-se próximas ao bocal de injeção e formar assim, uma cavidade no leito acima da entrada de fluido (CUNHA, 2008). As partículas que rodeiam essa cavidade ficam comprimidas, formando um arco compactado, que provoca a diminuição da porosidade e oferece uma resistência maior ao escoamento do fluido, e por isso a pressão total através do leito continua a aumentar (DUARTE, 2006).
- O ponto C representa o ponto crítico onde se inicia a formação de um jorro no interior do leito;
- O segmento CD representa a diminuição da queda de pressão à medida que a vazão de ar aumenta, devido à menor resistência que o leito oferece ao escoamento de ar no interior da coluna;
- O ponto D é onde ocorre a expansão do leito, isto é, as partículas são deslocadas do núcleo central e ocorre a formação do jorro no topo do leito;
- O ponto D' representa o momento em que o leito todo se torna móvel e um jorro contínuo é estabelecido. Esse ponto é causado por um pequeno acréscimo na vazão de ar além do ponto D. O jorro rompe a superfície do leito e devido a isso, a concentração de sólidos acima do jorro diminui bruscamente, causando redução drástica da pressão.
- A partir do ponto D', um aumento da vazão de ar não causa mudanças na queda de pressão pois o ar passa pela região de jorro percorrendo caminhos que oferecem uma menor resistência ao escoamento de ar. Além disso, a partir desse ponto o regime de jorro é estável, caracterizado pelo desenvolvimento da fonte e pela circulação de partículas de maneira uniforme (CUNHA, 2008).
- Após isso, com uma pequena redução na vazão de ar, têm-se o colapso do jorro e um aumento repentino da queda de pressão para o ponto E. Se a vazão de ar continuar sendo diminuída, a pressão irá decrescer continuamente, representando o segmento EA. Neste segmento, a energia requerida pelo fluido para penetrar nos sólidos não é mais despendida durante o colapso do jorro (CUNHA, 2008).
- A linha sólida da Figura 3.7 é denominada curva de ida, e é obtida pelo aumento gradativo da vazão de ar enquanto a linha pontilhada é conhecida como curva de volta, pois é obtida por um processo inverso ao anterior (CUNHA, 2008).

A partir da curva característica do leito de jorro é possível obter parâmetros fluidodinâmicos importantes, como a velocidade mínima de jorro, a queda de pressão de jorro mínimo e a queda de pressão máxima.

3.4.4.1 Parâmetros fluidodinâmicos

Do ponto de vista da fluidodinâmica, os principais parâmetros relacionados ao projeto e operação de um leito de jorro são a queda de pressão máxima, a queda de pressão de jorro estável e a velocidade mínima de jorro (CUNHA, 2008; DOGAN et al., 2000).

Há dois pontos importantes na curva característica do leito de jorro (Figura 3.7), a queda de pressão máxima e a queda de pressão de jorro estável. A queda de pressão máxima (Ponto C) é a queda de pressão que ocorre logo antes do jorro ser estabelecido, ou seja, a pressão alcançada ao começar a formação do jorro. O valor da queda de pressão máxima representa a energia necessária para que o fluido rompa a estrutura do leito compacto, e forme assim, o jorro interno (CUNHA, 2008). Este valor aumenta com a altura do leito e não foi observada uma influência da abertura de entrada de fluido na base sobre este parâmetro. Além disso, a queda de pressão máxima varia com o diâmetro e a densidade das partículas (DOGAN et al., 2000).

A queda de pressão de jorro estável, representada pelo ponto D', é a queda de pressão de jorro mínima alcançada durante o funcionamento estável do leito e depende das dimensões do leito e das propriedades das partículas.

A velocidade mínima de jorro é o valor mínimo da velocidade de ar necessário para a existência de um jorro estável, isto é, a menor velocidade na qual o fluido é capaz de romper a estrutura do leito de sólidos na região central, e formar o jorro, a uma pressão constante. O seu valor é obtido pelo decréscimo de vazão de ar até o ponto de colapso do jorro (CUNHA, 2008).

A velocidade do fluido é responsável pela manutenção do jorro, pela troca térmica durante a secagem e seu valor ideal é aquele próximo à velocidade mínima de jorro (MUSSI; PEREIRA, 2015). O conhecimento da velocidade mínima de jorro é importante para a determinação de outros parâmetros como tempo de residência e movimento de sólidos no interior do leito (TELLABIDE et al., 2020).

3.4.5 Secagem de resíduos agroindustriais em leito de jorro

O leito de jorro é um equipamento que permite realizar a secagem de alimentos com condições que propiciam uma maior preservação de compostos termicamente sensíveis, com menor custo e maior facilidade de operação quando comparado com outras técnicas, por exemplo, a liofilização, técnica baseada na sublimação da água, que apresenta excelentes resultados na secagem de alimentos, sem a degradação de compostos termossensíveis (BORTOLOTTI, 2012; MEDEIROS et al., 2001; MUSSI e PEREIRA, 2015).

Há trabalhos na literatura que reportam a aplicação do leito de jorro na secagem de resíduos agroindustriais. Silva (2007) estudou a secagem do resíduo sólido industrial do processamento de suco de frutas cítricas, como o limão siciliano, em leito fixo e em leito de jorro. O autor realizou análises de caracterização do resíduo e investigou a cinética de secagem do material nos dois tipos de leitos. Foram realizados testes de secagem do resíduo com três diferentes teores de umidade. Para se obter valores de umidade abaixo da umidade do resíduo *in natura*, foi realizada uma pré-secagem no leito fixo. Devido à coesividade do material, ocorreram aglomerados e, conseqüentemente, caminhos preferenciais para o escoamento de ar. Para tentar contornar esse problema, foram adicionados materiais inertes que, embora tenham auxiliado na formação do jorro, geraram uma dificuldade ao final para separação do resíduo do material inerte. Em suma, os autores optaram por não utilizar o inerte e realizaram a secagem com umidade de 40% em b.u.

Souza Júnior (2012) estudou a secagem em leito de jorro de resíduo do processamento de acerola com adição de maltodextrina e água, formando-se uma suspensão e realizou uma comparação com a secagem do resíduo em *spray dryer*. Para caracterização do resíduo, foram realizadas análises de umidade e de teor de ácido ascórbico. Com relação à estabilidade do ácido ascórbico, componente de maior interesse no resíduo de acerola, obteve-se uma perda, na secagem em leito de jorro, em porcentagem, inferior à gerada pela secagem por *spray dryer*. Entretanto, apesar das perdas, o resíduo seco ainda apresentou uma elevada concentração de ácido ascórbico.

Bortolotti (2013) caracterizou uma mistura de resíduo de acerola e soja e investigou a fluidodinâmica da mistura em leito de jorro, para diferentes alturas de leito estático e diferentes proporções acerola/soja, além de analisar o efeito da secagem no teor de compostos bioativos do resíduo de acerola. Foi observado que com o aumento na proporção de resíduo de acerola na mistura, houve um aumento da porosidade *bulk*, e do ângulo de repouso, o que indicaria uma

alta coesividade do material, que poderia dificultar a fluidização das partículas no leito. Além disso, foi comparado o teor de compostos bioativos na acerola *in natura* e em seu resíduo, e, embora a concentração desses compostos no resíduo seja inferior ao encontrado na fruta, foi verificado que ainda há quantidades consideráveis de compostos bioativos no resíduo. A conservação do ácido ascórbico, após a secagem, se mostrou maior ao se utilizar uma fração mássica de 0,4 de resíduo de acerola. Com relação aos fenólicos e flavonóides, até certo tempo de secagem, foi observado um aumento dos teores, seguido de redução, mas, ao final da secagem em leito de jorro, os teores dos compostos bioativos foram maiores que os iniciais.

Mussi (2015) estudou a fluidodinâmica do resíduo de jambolão em leito de jorro. Foi feita uma análise da fluidodinâmica do leito para obtenção da curva característica do leito. Nos ensaios de secagem foi observado que, para baixas velocidades de ar, as partículas de resíduo úmido apresentaram uma pequena elevação no leito, mantendo-se um leito fixo, com mínima fluidização na parte inferior próxima à entrada do fluido. As partículas da região anular ficaram empacotadas pela saturação da umidade ambiente e coesividade do material úmido, não apresentando fluidização, melhorando esse comportamento ao se aumentar a velocidade do ar.

Cunha (2015) estudou a secagem de uma mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro. Como a mistura pode apresentar dificuldade de fluidização em altas frações do resíduo, foram realizados pré-tratamentos com ultrassom em meio aquoso e alcoólico para verificar se ocorreria melhora na fluidização. Além disso, foi realizado também um pré-tratamento com pulverização de etanol. O uso de ultrassom foi favorável para a secagem em leito de jorro, mas ocorreu maior degradação de compostos bioativos. Com relação aos teores de fenólicos, houve redução em todos os tratamentos, e em relação aos teores de Vitamina C e Flavonóides, houve aumento na secagem em leito de jorro.

Capítulo 4 Materiais e métodos

4.1 Matéria prima

O resíduo do despulpamento de acerola foi recolhido em uma agroindústria na cidade de Perdões/MG. Conforme observado na Figura 4.1, o resíduo do despulpamento de acerola é composto majoritariamente pelas sementes do fruto, mas também possui, em menor proporção, polpa e casca.

Figura 4.1 – Resíduo do despulpamento de acerola.



Fonte: Do autor (2022).

4.2 Caracterização do resíduo de despulpamento da acerola

As caracterizações do resíduo de acerola foram realizadas no Laboratório de Pós Colheita de Frutas e Hortaliças e no Laboratório de Processos de Separação Mecânica (LPSM), ambos da Universidade Federal de Lavras. Foram realizadas análises de compostos bioativos e a caracterização do resíduo, *in natura* e seco em estufa por 24h a 105°C, através da medição das seguintes propriedades: umidade, diâmetro médio, esfericidade, densidade aparente= peso de mil sementes. O meio poroso foi caracterizado a partir da obtenção da densidade *bulk* e *bulk* compactada, porosidade *bulk* e ângulo de repouso. Os procedimentos experimentais serão descritos a seguir.

4.2.1 – Caracterização das partículas

4.2.1.1 Diâmetro médio

A determinação do diâmetro médio foi realizada através das medições das dimensões geométricas das sementes de acerola, correspondentes a comprimento, altura e espessura, visto que a semente é o maior constituinte do resíduo do despolpamento da fruta. Foi utilizado um paquímetro digital da marca *Caliper Worker*, com faixa de medição de 0 a 150 mm, e erro de 0,01 mm, para determinação das dimensões do material. As medições foram realizadas para 60 sementes e a medição foi realizada em triplicata.

4.2.1.2 Densidade aparente

A determinação da densidade aparente foi realizada por picnometria líquida, utilizando picnômetros de 25 mL, água destilada e uma balança analítica da marca Marte, modelo AD 2000 com precisão de 0,001 g. Para isso, foram obtidos os valores de massa do picnômetro, massa do picnômetro + amostra, massa do picnômetro + amostra + água e massa do picnômetro + água. Após a obtenção desses valores, a densidade aparente do material foi calculada a partir das Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 (CREMASCO, 2014).

$$V_{pic} = \frac{m_{pic+água} - m_{pic}}{\rho_{água}} \quad (4.1)$$

$$V_{água} = \frac{m_{pic+amostra+água} - m_{pic+amostra}}{\rho_{água}} \quad (4.2)$$

$$V_{amostra} = V_{pic} - V_{água} \quad (4.3)$$

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{pic+amostra} - m_{pic}}{V_{amostra}} \quad (4.4)$$

onde: V_{pic} é o volume do picnômetro, $V_{água}$ é o volume de água, $V_{amostra}$ é o volume da amostra, $m_{pic+água}$ é a massa do picnômetro e da água, m_{pic} é a massa do picnômetro, $m_{pic+água+amostra}$ é a massa do picnômetro, da água e da amostra, $\rho_{água}$ é a densidade da água e $\rho_{amostra}$ é a densidade do material.

4.2.1.3 Esfericidade

A esfericidade é definida com base na proximidade de formato do material com o de uma esfera (MOHSENIN, 1986). A esfericidade do material foi calculada com base nas propriedades isométricas de uma esfera, conforme Mohsenin (1986), de acordo com a Equação 4.5.

$$\phi = \frac{(x.y.z)^{1/3}}{x} \quad (4.5)$$

Em que: x, y e z são as dimensões geométricas das sementes que correspondem ao seu comprimento, largura e espessura, respectivamente, as quais foram medidas com o uso de um paquímetro digital da marca *Caliper Worker*, com faixa de medição de 0 a 150 mm, e erro de 0,01 mm. Foram realizadas medições em triplicata para 60 sementes de acerola.

4.2.1.4 Peso de 1000 sementes

O peso de 1000 sementes (PMS) foi obtido para o resíduo do despulpamento de acerola *in natura* e seco. Para obtenção da massa da amostra, foram pesadas 100 sementes, com o uso de uma balança analítica da marca Marte, modelo AD 2000 com precisão de 0,001 g. Para ambos os casos, foi utilizado a Equação 4.6.

$$PMS = \frac{m_{amostra} \cdot 1000}{n_{amostra}} \quad (4.6)$$

Onde: $m_{amostra}$ é a massa da amostra e $n_{amostra}$ é o número de sementes que foram utilizadas.

4.2.1.5 Umidade

A umidade de um sólido é definida como a quantidade de água presente no sólido e pode ser expressa em base úmida (b.u.) ou em base seca (b.s.). A umidade em base úmida (Equação 4.7) representa a relação entre a massa de água contida no sólido e a massa total do sólido, e a umidade em base seca (Equação 4.8) representa a relação entre a massa de água contida no sólido e a massa do sólido seco. Para realização das análises foi utilizada balança analítica da marca Marte, modelo AD 2000 com precisão de 0,001 g.

$$U_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \cdot 100 = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{sólidos}}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

$$U_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos}}} \cdot 100 \quad (4.8)$$

onde: U_{bu} é a umidade em base úmida e U_{bs} é a umidade em base seca.

A umidade das sementes foi determinada utilizando-se o método padrão em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas. Além disso, determinou-se a umidade do resíduo ao longo do tempo de secagem em estufa para obtenção da cinética de secagem. O procedimento foi realizado até que o peso da amostra não alterasse mais com o tempo e o valor final da massa das sementes foi pesado com 24 h. Esse procedimento foi realizado em triplicata.

4.2.3 – Caracterização do meio poroso

4.2.3.1 – Densidade *bulk* e *bulk* compactada

Determinou-se a densidade *bulk* depositando a uma altura fixa o resíduo de acerola em uma proveta, de forma a completar o volume de 100 mL. Em seguida, foi medida a massa desse volume de material. O procedimento adotado para determinação da densidade *bulk* compactada foi semelhante, e o seguinte: após a deposição do material dentro da proveta de 100 mL, foram realizadas dez movimentações mecânicas para a compactação do material, elevando-se a proveta até a barra horizontal do suporte e soltando-a em seguida, o que provoca sua queda até a base do mesmo. As medições foram realizadas em triplicata. Tal procedimento foi realizado utilizando o dispositivo apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Aparato utilizado para compactação do material.



Fonte: Do autor (2022).

Ambos os valores de densidade (*bulk* e *bulk* compactada) foram calculados a partir da equação 4.9.

$$\rho_b = \rho_{bc} = \frac{m_{material}}{V_{material}} \quad (4.9)$$

Em que: $m_{material}$ é a massa do resíduo de acerola, $V_{material}$ é o volume ocupado por ele, ρ_b é a densidade *bulk* e ρ_{bc} é a densidade *bulk* compactada.

4.2.3.2 Porosidade *bulk*

A porosidade do meio poroso se refere aos espaços vazios entre as sementes. Para determinação da porosidade *bulk* foram utilizados os volumes calculados a partir das massas. Inicialmente, mediu-se a massa de sementes que ocupava um volume de 50 mL de uma proveta. Através da massa e da densidade aparente das sementes determinada anteriormente, foi possível calcular o volume do material. Após isso, a mesma proveta, vazia, foi preenchida com água e sua massa foi medida. De posse da massa da água e do valor da densidade da água na temperatura medida durante a realização das medições, foi possível calcular o volume de água. A partir desses dados, foi possível calcular a porosidade *bulk* através da equação 4.10:

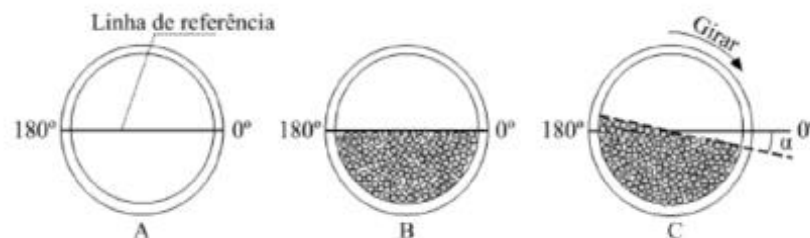
$$\varepsilon_{bulk} = \frac{V_{vazio}}{V_{total}} = \frac{V_{\acute{a}gua} - V_{material}}{V_{\acute{a}gua}} \quad (4.10)$$

Onde: ε_{bulk} é a porosidade do leito, V_{vazio} é o volume dos interstícios ou espaços vazios e V_{total} é o volume total (volume dos interstícios mais o volume das sementes), $V_{\acute{a}gua}$ é o volume da água e $V_{material}$ o volume do material.

4.2.3.3 Ângulo de repouso e Índice de Hausner

O ângulo de repouso de um material é definido como o ângulo máximo formado pelo material com relação a horizontal e de acordo com Bortolotti (2013) é influenciado pela forma, tamanho, umidade e constituição externa do material. Este parâmetro auxilia no entendimento do comportamento fluidodinâmico e de escoabilidade das partículas no interior do leito de jorro. Para sua medição, foi utilizado o método do tambor rotativo. As sementes de acerola *in natura* foram adicionadas a um tambor, de 24 cm de diâmetro e 31 cm de comprimento, e homogeneizadas, e em seguida, o tambor foi girado cinco vezes para que fosse realizada a leitura do ângulo de inclinação com a horizontal formado ao deslizamento da primeira camada de partículas, conforme ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Ângulo de repouso dinâmico.



Fonte: Bortolotti (2012).

Foram realizadas dez medições e segundo o procedimento adotado por Do Nascimento (2014), o material foi classificado de acordo com o grau de escoabilidade recomendado por Jong, Hoffman e Finkers (1999), conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Escoabilidade de sólidos em função do ângulo de repouso.

| Ângulo de repouso (°) | Escoabilidade |
|-----------------------|-------------------|
| >60 | Sem fluidez |
| <60 | Coesivo |
| 45 - 60 | Fluidez regular |
| 30 - 45 | Boa fluidez |
| 10-30 | Excelente fluidez |
| <10 | Aerado |

Fonte: Adaptada de Jong, Hoffman e Finkers (1999).

Além disso, foi calculado o índice de Hausner (Equação 4.11), que permite descrever o grau de empacotamento e a escoabilidade de um material particulado (MILHOMEM e LUZ, 2016).

$$H = \frac{\rho_{bc}}{\rho_b} \quad (4.11)$$

Onde: H é o índice de Hausner, ρ_b é a densidade bulk e ρ_{bc} é a densidade *bulk* compactada.

4.2.4 – Determinação dos compostos bioativos

Foi realizada a quantificação do teor de vitamina C e da atividade antioxidante pela porcentagem de captura do radical livre DPPH, para o resíduo *in natura*, seco em estufa e seco em leito de jorro, para determinar a influência do processo de secagem no comportamento desses compostos. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Pós-colheita de frutas e hortaliças da Universidade Federal de Lavras (DCA/UFLA).

4.2.4.1 Determinação do conteúdo de vitamina C

O ácido ascórbico, ou vitamina C, é encontrado naturalmente em frutas, vegetais e em menor teor nos tecidos animais e produtos derivados (DAMODARAM; PARKIN, 2019). A vitamina C é um forte agente redutor e se oxida com facilidade. A sua degradação pode ser influenciada por diversos fatores como luz, oxigênio, catalisadores metálicos, temperatura, umidade ou atividade de água e pH, possuindo oxidação mais rápida em meio alcalino e

razoável estabilidade em soluções levemente ácidas (HOEHNE; MARMITT, 2020). A determinação do conteúdo de ácido ascórbico da semente de acerola foi realizada pelo método oficial do Instituto Adolfo Lutz (ODAIR ZENEBO. NEUS SADOCCO PASCUET. PAULO TIGLEA, 2008).

Para determinação do conteúdo de vitamina C, foi feita a extração, em ácido oxálico (0,5%), do ácido ascórbico presente nas amostras, pesando 5g de material para cada 45mL da solução de ácido oxálico. Em um tubo de ensaio foi adicionado 1mL do extrato, 3mL de ácido oxálico 0,5%, três gotas de DFI (2,6-diclorofenol-indonefol) 0,25%, 1mL de hidrazina (2,4-dinitrofenilhidrazina) 2% e 1 gota de tioureia 10%. O tubo com os reagentes foi levado ao banho fervente por 10 minutos e logo após, foi adicionado 5mL de ácido sulfúrico 85%. Por fim, foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 520 nm. A curva padrão foi feita com uma solução de ácido ascórbico.

4.2.4.2 Atividade antioxidante pela captura do radical livre DPPH

O DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) é um radical livre utilizado para a determinação da atividade antioxidante. A exposição dos compostos bioativos dos alimentos a esse radical livre consegue quantificar o quão eficiente a amostra é em capturar radicais livres. Para a determinação da atividade antioxidante do resíduo de acerola foi utilizada, com adaptações, a metodologia recomendada pela Embrapa (RUFINO et al., 2007).

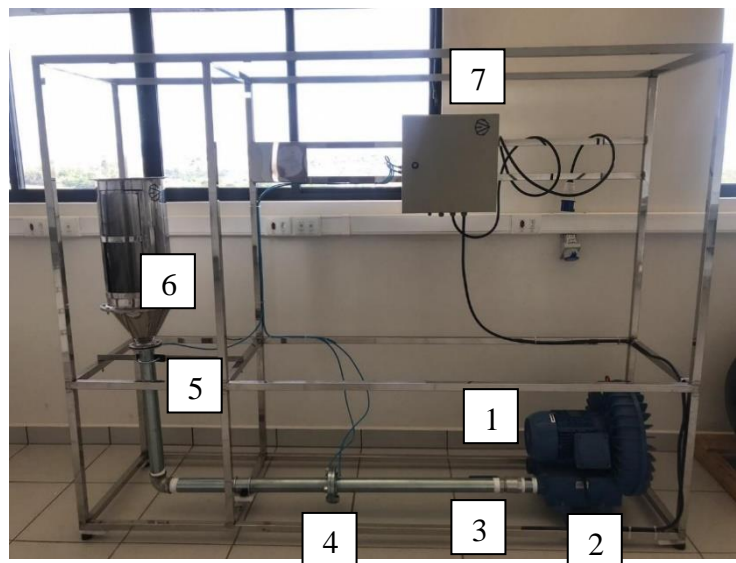
Para sua determinação foi feita a extração, em água destilada, dos compostos antioxidantes presentes nas amostras, pesando 5g de material para cada 45mL de água destilada. Em sequência, extratos foram pipetados, juntamente com a solução do DPPH, em microplacas de 100 µL por poço. Após esse processo, o extrato em contato com o radical livre DPPH foi deixado no escuro por 60 minutos, para ocorrência da reação. Ao final foi realizada a leitura, em 515 nm, em um espectrofotômetro do tipo ELISA. Em uma das placas foi realizada a leitura apenas da solução de DPPH e a partir desse dado, foi calculada a porcentagem do sequestro do radical livre DPPH.

4.3 Unidade experimental

Os testes experimentais foram realizados em uma unidade de leito de Jorro localizada no Laboratório de Processos de Separação Mecânica, no prédio das Engenharias ABI, da Universidade Federal de Lavras. Na Figura 4.4 é apresentada uma fotografia da unidade.

O leito de jorro (6) é construído em aço inoxidável e consiste em uma coluna cilíndrica com uma base cônica de 60° e com diâmetro e altura de 0,256 m e 0,508 m, respectivamente, e uma parte com geometria de tronco de cone com diâmetro da base menor e altura, respectivamente, de 0,050 m e 0,176 m. A coluna vem equipada com um visor transparente que permite observar o comportamento das partículas durante o experimento. O ar da secagem é fornecido por um soprador de 7,5 CV de potência (2) e aquecido através de um conjunto de resistências (1). A unidade consta de uma placa de orifício, para medição da velocidade do ar de secagem (4) e sensores para aferição da pressão (4 e 5). Além disso, há uma válvula do tipo gaveta (3); inversor de frequência e *software* com interface para aquisição de dados (7).

Figura 4.4 – Unidade de leito de jorro (LPSM/UFLA).



Fonte: Do autor (2020).

4.4 Metodologia experimental

4.4.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

Testes fluidodinâmicos preliminares foram realizados com o resíduo de acerola *in natura* no leito de jorro e foi constatada, visualmente, a não ocorrência de fluidização do material. Por outro lado, com o resíduo de acerola seco notou-se uma fluidização intensa. A partir dessas observações, optou-se por trabalhar com uma mistura contendo em sua composição resíduo de acerola *in natura* e resíduo de acerola seco em estufa a 105°C. O resíduo seco atuaria como material de apoio auxiliando na movimentação das partículas no leito e na operação de secagem. Uma das vantagens da utilização do mesmo resíduo como material de suporte, é que não haveria dificuldade na separação dos materiais ao final do processo, e seria evitada uma possível contaminação do resíduo, o que poderia eventualmente ocorrer com o uso de outro tipo de partícula de apoio. É importante destacar que optou-se por utilizar como material inerte a próprio resíduo previamente seco em estufa pelo fato de se ter uma quantidade abundante do resíduo disponível.

Portanto, foi investigada a fluidodinâmica da mistura de resíduo de acerola *in natura* e seco. A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro foi feita a partir da obtenção da curva característica de queda de pressão *versus* velocidade do ar de secagem (de 0 a 40 m/s) para a mistura de resíduo de acerola. A partir da curva característica foi possível determinar os principais parâmetros fluidodinâmicos do leito, velocidade mínima de jorro, queda de pressão de jorro estável e queda de pressão máxima. O processo iniciou-se com a adição de uma determinada massa da mistura de resíduo de acerola. Logo em seguida, ar foi injetado pelo orifício de entrada do leito, no menor valor de velocidade possível, medida através de uma placa de orifício. Para cada valor de velocidade foi determinado o valor correspondente da queda de pressão do leito com o auxílio do *software* de aquisição de dados.

A vazão de ar foi aumentada gradativamente até a capacidade máxima do soprador, quando então, iniciou-se o procedimento inverso, isto é, diminuiu-se gradualmente a velocidade de ar e obteve-se o valor correspondente de queda de pressão. Um monitoramento visual do comportamento das partículas no interior do leito foi também realizado.

4.4.2 Secagem em leito de jorro

Foram estudadas as seguintes variáveis operacionais durante o processo de secagem da mistura de resíduo de acerola *in natura* e seco em leito de jorro: velocidade do ar, temperatura do ar na entrada do leito e fração volumétrica de resíduo de acerola *in natura*. A carga do leito foi fixada em três litros, correspondente ao preenchimento da parte cônica. A partir da curva característica e da observação da estabilidade do escoamento, foram selecionadas as velocidades a serem utilizadas nos ensaios de secagem (28 e 36 m/s). Foram selecionados dois valores de temperatura média de entrada de ar, aproximadamente 40°C (temperatura obtida no sistema com as resistências desligadas) e 60°C. A partir das análises de escoabilidade das propriedades das misturas, foram escolhidas duas frações em massa de resíduo *in natura* (20% e 30%). As condições operacionais de temperatura e velocidade do ar, e fração de resíduo *in natura*, adotadas durante os ensaios de secagem seguiram um planejamento experimental 2^k , apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Planejamento dos experimentos de secagem em leito de jorro.

| Experimento | % de amostra <i>in natura</i> | Velocidade (m/s) | Temperatura (°C) |
|--------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 20 (-1) | 28 (-1) | 40 (-1) |
| 2 | 20 (-1) | 36 (+1) | 40 (-1) |
| 3 | 20 (-1) | 28 (-1) | 60 (+1) |
| 4 | 20 (-1) | 36 (+1) | 60 (+1) |
| 5 | 30 (+1) | 28 (-1) | 40 (-1) |
| 6 | 30 (+1) | 36 (+1) | 40 (-1) |
| 7 | 30 (+1) | 28 (-1) | 60 (+1) |
| 8 | 30 (+1) | 36 (+1) | 60 (+1) |

Fonte: Do autor (2022).

Conforme mostrado na Tabela 4.2, foi desenvolvido um planejamento fatorial 2^3 , isto é, três níveis e dois fatores para cada nível, totalizando oito experimentos.

Os ensaios de secagem da mistura de resíduo foram iniciados com o fornecimento de ar ao equipamento vazio, isto é, sem a adição do resíduo. O ar era aquecido pelo conjunto de resistências até que a temperatura atingisse o valor desejado (no caso dos experimentos realizados na temperatura de 60°C). Uma vez atingida a temperatura desejada, o fornecimento

de ar era interrompido e o equipamento alimentado com uma determinada carga de mistura de resíduo previamente medida e com sua umidade inicial determinada. Em seguida, era ajustada a vazão do ar de secagem para o valor desejado e feita a contagem do tempo de secagem, que foi fixado em 15 minutos. Uma vez atingido o tempo estabelecido, a alimentação de ar era desligada, o resíduo era removido do leito e três amostras de sementes eram pesadas e levadas a estufa para secagem a 105 °C por 24 h.

Os dados experimentais obtidos foram analisados por métodos estatísticos para quantificar os efeitos das variáveis independentes.

Capítulo 5 Resultados e discussão

5.1 – Caracterização do resíduo do despulpamento de acerola

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das propriedades físicas medidas para o resíduo de acerola *in natura* e seco (após secagem de 24 h na estufa a 105 °C): diâmetro médio, esfericidade, densidade aparente, e peso de 1000 sementes. Como o resíduo do despulpamento de acerola é composto basicamente por sementes, em certas ocasiões será adotado o termo para a discussão dos resultados de caracterização física.

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização do resíduo de acerola *in natura* e seco.

| Parâmetro | <i>In natura</i> | Seco |
|---|-------------------------|----------------------|
| Diâmetro médio (mm) | 8,01 (\pm 1,84) | 8,13 (\pm 1,93) |
| Densidade aparente (kg/m ³) | 910,93 (\pm 1,15) | 315,60 (\pm 3,02) |
| Esfericidade | 0,92 (\pm 0,07) | 0,92 (\pm 0,08) |
| Peso de mil sementes (g) | 237,54 (\pm 16,94) | 43,97 (\pm 1,89) |
| Umidade (% b.u.) | 88,23 (\pm 0,46) | |

Fonte: Do autor (2022).

No que diz respeito ao diâmetro médio e à esfericidade, ambos os parâmetros apresentaram valores próximos para o resíduo *in natura* e após seco. Com esse resultado é possível inferir que o tamanho e forma do material não sofreram alterações consideráveis após o processo de secagem. Isso contrapõe o esperado, que seria a redução de tamanho das partículas que compõem o resíduo após a remoção da água, porém, além dos resultados apresentados, foi observado visualmente que as sementes não sofreram alteração de tamanho após secas, conforme apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Resíduo de acerola (a) *in natura* e (b) seco.



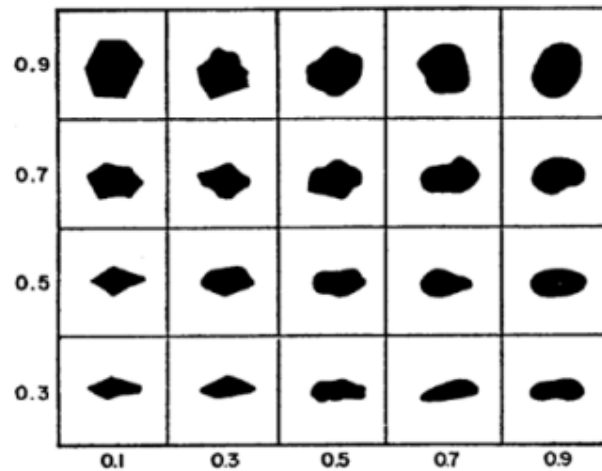
(a)

(b)

Fonte: Do autor (2022).

Pode-se dizer também que as sementes possuem considerável esfericidade tanto *in natura* quanto secas, uma vez que seus valores são próximos de 1. É importante notar que o valor de esfericidade encontrado para as sementes de acerola é próximo de 0,9. Então, ao se analisar a escala de Krumbein (Milhomem e Luz, 2016), utilizada para determinação visual da esfericidade de partículas, onde a partir da observação visual (grau de arredondamento) é possível obter a esfericidade do material. É possível inferir que a semente de acerola, predominante no resíduo de seu despulpamento, a observação do grau de arredondamento nos permite inferir que sua esfericidade é de 0,9. Tal análise é condizente com o valor encontrado no presente trabalho.

Figura 5.2 – Escala de Krumbein (eixo y: esfericidade; eixo x: grau de arredondamento).



Fonte: Milhomem e Luz (2016).

O valor do diâmetro médio encontrado nesse trabalho é próximo ao valor de $7,83 (\pm 0,13)$ mm reportado por Bortolotti et al. (2013), e também se assemelha ao resultado de $7,05 (\pm 0,07)$ mm, encontrado por Cunha (2015), para o resíduo do despulpamento de acerola *in natura*. Já com relação à esfericidade, o valor encontrado nesse trabalho é relativamente distante do valor de $0,68 (\pm 0,2)$ reportado pelos autores citados anteriormente. Essa diferença poderia ser atribuída às diferentes metodologias empregadas. No presente trabalho foi utilizado um paquímetro para realização das medições, enquanto que, no trabalho de Bortolotti et al. (2013) foi utilizado um analisador foto-óptico de partículas.

Para o resíduo *in natura* o valor da densidade aparente é inferior, porém, bem próximo ao da água, em função do alto teor de umidade do material (88,23 % b.u.), o que explicaria a sua redução drástica após a secagem em estufa. A partir desse resultado, nota-se o quanto a densidade aparente é influenciada pelo processo de secagem, uma vez que o seu valor reduz quase três vezes após a secagem. Bortolotti (2012) encontrou para o resíduo de acerola *in natura*, o valor de densidade de $677,47 (\pm 0,45)$ kg/m³, valor distante do encontrado no presente trabalho. Essa discrepância poderia ser atribuída à metodologia empregada para a medição, uma vez que os autores utilizaram hexano ao invés de água ou também a uma possível variação nas características do material, em decorrência das diferenças de condições climáticas de realização dos experimentos e de armazenamento do material. Além disso, por se tratar de um material obtido da indústria, o equipamento utilizado para o despulpamento pode influenciar consideravelmente nas propriedades físicas do resíduo.

A partir do resultado do peso de mil sementes, é possível perceber que há uma diminuição considerável do seu valor para o resíduo seco. Esse resultado já era esperado, uma vez que o processo de secagem promove a remoção da água do material reduzindo, conseqüentemente, o seu peso, além disso, o valor da densidade aparente para o material seco foi significativamente menor, o que salienta a coerência do resultado encontrado.

O valor de umidade do resíduo *in natura*, de 88,23 ($\pm 0,46$) % b.u. sugere que o alto teor de água poderia dificultar a sua fluidização no interior do leito de jorro. O resultado obtido de umidade se mostrou próximo ao encontrado por Alves (2019), cujo valor encontrado foi de 89,65 ($\pm 0,12$) % b.u..

5.2 – Caracterização do meio poroso

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados das propriedades físicas medidas para o meio poroso: densidade *bulk*, densidade *bulk* compactada, porosidade *bulk* e ângulo de repouso.

Tabela 5.2 – Resultados da caracterização do meio poroso para o resíduo *in natura* e seco.

| Parâmetros | <i>In natura</i> | Seco |
|---|-----------------------|----------------------|
| Densidade <i>bulk</i> (kg/m ³) | 401,17 ($\pm 7,43$) | 83,69 ($\pm 2,47$) |
| Densidade <i>bulk</i> compactada (kg/m ³) | 567,69 ($\pm 4,22$) | 88,10 ($\pm 2,78$) |
| Porosidade <i>bulk</i> | 0,60 ($\pm 0,01$) | 0,73 ($\pm 0,00$) |
| Ângulo de repouso (°) | 56 (± 1) | 31 ($\pm 0,8$) |

Fonte: Do autor.

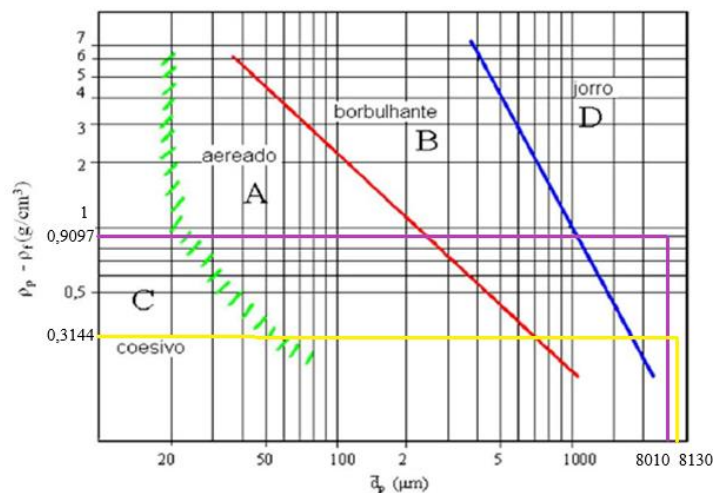
No que diz respeito à densidade *bulk* e *bulk* compactada, foram observados valores superiores para o resíduo *in natura*, o que se explicaria pelo maior teor de água do resíduo nessa condição, o que tornaria o leito mais denso. Além disso, é perceptível que a compactação não exerce influência de forma expressiva na densidade *bulk* do resíduo após a secagem, aumento de 42% para o resíduo *in natura* e de 5% no resíduo seco. No entanto, observa-se uma maior influência da compactação na densidade *bulk* para o material *in natura*, sugerindo que a semente *in natura* poderá oferecer uma maior resistência ao escoamento do fluido se comparado ao material seco, em função da sua compactação.

No que tange à porosidade *bulk*, valores superiores foram observados para o resíduo seco, se comparado aos valores observados para o resíduo *in natura*, conforme esperado. Com

uma porosidade mais baixa, haveria menor possibilidade de contato entre o ar e o material, oferecendo maior resistência à passagem do ar, o que poderia dificultar a fluidização do resíduo *in natura*.

Com relação à fluidização do material, foi possível classificar o resíduo de acerola de acordo com o Diagrama de Geldart, que fornece a relação entre a diferença de densidade da partícula e do fluido e o diâmetro da partícula. De acordo com a Figura 5.3, pode-se classificar o resíduo de acerola, tanto *in natura* quanto seco, como pertencente ao grupo D. Segundo Dias (2015), esse grupo é composto por partículas jorráveis grandes e/ou muito densas, geralmente compridas, como por exemplo grãos. A formação de canais preferenciais é característica para este tipo de sólidos e a fluidização é considerada instável e dificultada por causa da forma irregular e tamanho das partículas.

Figura 5.3 – Diagrama de Geldart (as leituras no gráfico das sementes *in natura* apresentam coloração lilás e após secas apresentam coloração amarela).



Fonte: Do Nascimento (2014).

Foi calculado também o índice de Hausner (H) para o resíduo de acerola, com base nos valores de ρ_{bc} e ρ_b , sendo obtidos os seguintes resultados: $H_{in\ natura} = 1,41$ e $H_{seco} = 1,04$. Esse parâmetro diz respeito à fluidez do material, sendo que materiais particulados, com $H < 1,2$, possuem boa fluidez e os que possuem $H > 1,2$ não apresentam boa fluidez. Sendo assim, o resíduo do despulpamento de acerola apresenta boa fluidez quando seco e pouca fluidez quando úmido. Com base na análise do Diagrama de Geldart e no índice de Hausner, tem-se que o resíduo de acerola *in natura* não apresenta boa fluidez, condição que não favoreceria a formação de um jorro estável no leito de jorro. Diante destas análises, foram realizados testes preliminares

com o resíduo de acerola *in natura* no leito de jorro, nos quais foi constatada a dificuldade de fluidização do material.

De acordo com a Tabela 4.1, e os resultados encontrados para o ângulo de repouso (Tabela 5.2), o resíduo do despulpamento de acerola *in natura* apresenta fluidez regular, $56^\circ (\pm 1)$, (faixa de 45° - 60°), mas se encontra próximo de coesivo, ou seja, não apresenta boa fluidização. Já o resíduo seco apresenta boa fluidez, $31^\circ (\pm 0,8)$ (faixa de 30° - 45°). O ângulo de repouso encontrado para o resíduo *in natura* é semelhante ao valor de $52,6^\circ (\pm 0,38)$, encontrado por Cunha (2015), resultado que indica a dificuldade de fluidização do material. Por esse motivo, em vários trabalhos encontrados na literatura sobre secagem do resíduo do despulpamento de acerola em leito de jorro, foi utilizado um material inerte de suporte para facilitar a fluidização.

5.3 Densidade e ângulo de repouso das misturas de resíduo de acerola *in natura* e seco.

Testes fluidodinâmicos preliminares do resíduo de acerola *in natura* no leito de jorro indicaram a não ocorrência de fluidização do material, o que poderia ser explicado pela alta umidade e densidade do resíduo, comportamento também notado por Bortolotti (2012). Por outro lado, com o resíduo de acerola seco notou-se uma fluidização intensa, o que pode ser atribuído a sua baixa densidade e umidade. Com isso, optou-se por realizar os ensaios fluidodinâmicos e de secagem com misturas de resíduo de acerola *in natura* e seco. O resíduo seco atuaria como material inerte, auxiliando na fluidização das partículas no leito.

Diante do exposto, foi realizada a caracterização de misturas de resíduo de acerola com diferentes composições de resíduo *in natura* e seco, com o intuito de selecionar aquela mistura que favoreceria a fluidização do material no leito e seria mais adequada para a realização dos ensaios de secagem.

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores de densidade e ângulo de repouso medidos para quatro misturas, com 10%, 20%, 30% e 40%, em volume, de resíduo de acerola *in natura*, respectivamente.

Tabela 5.3 – Densidade e ângulo de repouso para misturas com diferentes porcentagens de resíduo *in natura*.

| Mistura | % de resíduo <i>in natura</i> na mistura | Densidade (kg/m ³) | Ângulo de repouso (°) |
|---------|---|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 548,97 (± 54,78) | 36 (± 1) |
| 2 | 20 | 649,52 (± 90,00) | 41,3 (± 1,15) |
| 3 | 30 | 680,48 (± 30,97) | 44,6 (± 0,57) |
| 4 | 40 | 697,72 (± 65,31) | 51 (± 0,57) |

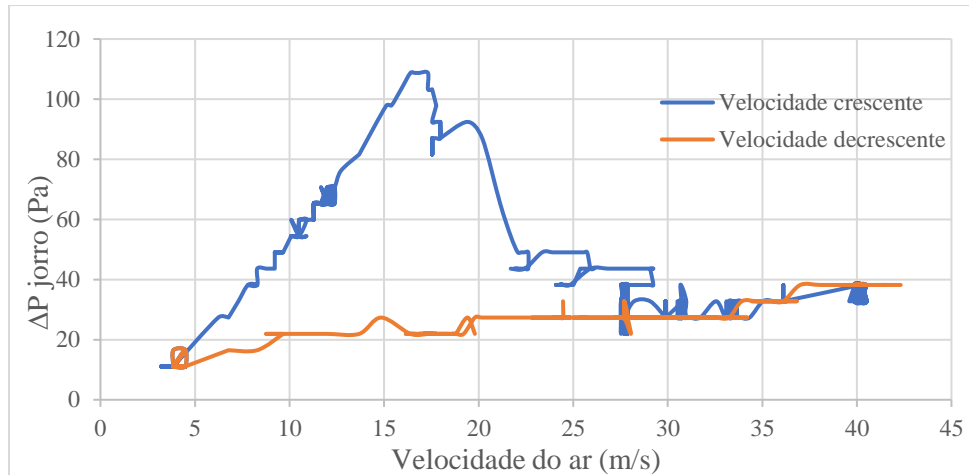
Fonte: Do autor.

A partir dos resultados da Tabela 5.3 nota-se que, conforme aumenta a quantidade de resíduo *in natura* (úmido) e por consequência, diminui a quantidade de material seco, a densidade e o ângulo de repouso da mistura aumentam. Quanto maior a densidade da mistura, mais difícil será para o ar atravessar as partículas e romper o jorro, ou seja, maior a possibilidade de não ocorrência de fluidização. De acordo com Jong, Hoffmann e Finkers (1999), o valor do ângulo de repouso medido para as misturas 1, 2 e 3 (com 10%, 20% e 30% de resíduo *in natura*, respectivamente) indicam boa fluidez e para a mistura 4 (com 40% de resíduo *in natura*) indica baixa fluidez. Assim, pode-se dizer que, a mistura que favoreceria mais a fluidização do material no leito seria a que contém 10% de resíduo *in natura* e 90% de resíduo seco, mas como se trata de uma fração muito pequena de material, para os ensaios de secagem forem escolhidas as misturas 2 e 3, com 20% e 30% de resíduo *in natura*.

5.4 Curva característica da mistura de resíduo de acerola *in natura* e seco.

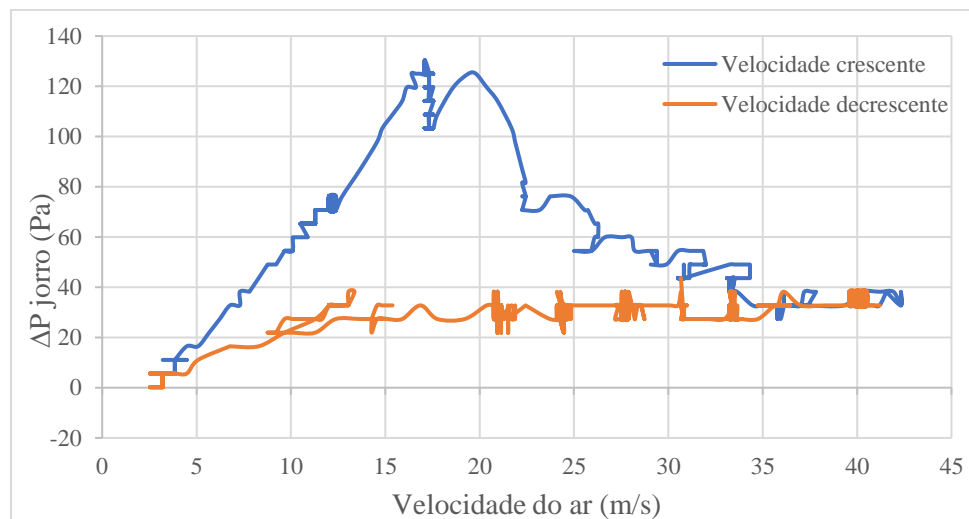
Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentadas as curvas características do leito de jorro operando com as duas misturas de resíduo de acerola selecionadas para condução dos ensaios de secagem (20% e 30% de resíduo *in natura*, respectivamente). Essas curvas são a representação do comportamento da queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de secagem. A velocidade de ar variou entre 0 m/s e aproximadamente 40 m/s.

Figura 5.4 – Curva característica da mistura de resíduo de acerola em leito de jorro, contendo 20% de resíduo *in natura*.



Fonte: Do autor.

Figura 5.5 – Curva característica da mistura de resíduo de acerola em leito de jorro, contendo 30% de resíduo *in natura*.



Fonte: Do autor.

As curvas fluidodinâmicas das Figuras 5.5 e 5.6 apresentam um comportamento similar de acordo com o padrão típico de um leito de jorro. Inicialmente, para a curva de velocidade crescente, pode-se observar que, a queda de pressão aumenta conforme aumenta a velocidade de ar, até o ponto de queda de pressão máxima. A partir desse ponto, o ar percola os espaços vazios no interior do interior, sem fluidizar as partículas. À medida que a velocidade do ar aumenta, a queda de pressão diminui e tende a estabilizar em um valor constante, pois nessa etapa já se iniciou o movimento das partículas e o leito oferece uma menor resistência ao

escoamento do fluido. Primeiramente, uma cavidade compactada é formada, com o aumento da velocidade de ar, ocorre a expansão do jorro interno até que ele rompe a superfície do leito. Nesse momento, há uma diminuição drástica da queda de pressão. O leito se torna móvel e a condição de jorro contínuo é estabelecida.

É importante destacar que, além da identificação dos regimes de escoamento no leito e a compreensão da transição de leito estático para jorro estável a partir das curvas características foi possível também identificar os regimes e a sua transição a partir da observação visual do leito durante os experimentos.

Pela curva fluidodinâmica da Figura 5.5, é possível constatar que a queda de pressão máxima de jorro está em torno de 108 Pa, enquanto a queda de pressão de jorro estável é de cerca de 40 Pa. Já a velocidade mínima de jorro tem um valor de cerca de 25 m/s, ponto onde a pressão não sofre mais variação. Os valores de queda de pressão de jorro estável e velocidade mínima de jorro representam a exigência mínima das condições de operação na qual o jorro ainda existe.

A partir da curva fluidodinâmica apresentada na Figura 5.6, foram determinados os seguintes valores para os parâmetros fluidodinâmicos: queda de pressão máxima de jorro em torno de 130 Pa, queda de pressão de jorro estável cerca de 40 Pa e velocidade mínima de jorro em torno de 30 m/s, ponto onde a queda de pressão para de variar.

Na Figura 5.6, é possível observar que a curva característica para a mistura que contém a maior quantidade de material úmido (30% de semente *in natura*) apresenta uma maior queda de pressão máxima de jorro se comparada com a mistura que contém a menor quantidade de material úmido (Figura 5.5). Esse resultado indica que quanto maior a quantidade de material úmido na mistura, maior a energia necessária para que o jorro rompa a estrutura do leito compactado e forme o jorro estável, isto, é maior dificuldade de fluidização, condição que já havia sido identificada a partir dos resultados de caracterização do leito poroso. Tal resultado também foi observado por Bortolotti (2012), para as misturas do resíduo do despolpamento de acerola e soja, quanto maior a quantidade de resíduo de acerola *in natura* na mistura, maior a queda de pressão máxima de jorro.

5.5 Secagem da mistura de resíduo de acerola *in natura* e seco em leito de jorro

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de umidade %(b.u.) para o resíduo do despulpamento de acerola *in natura* e para as misturas, antes e após a secagem em leito de jorro bem como a porcentagem de redução da umidade do resíduo *in natura* para a mistura seca em leito de jorro.

Tabela 5.4 – Umidade em base úmida para o resíduo de despulpamento de acerola.

| | Exp1 | Exp2 | Exp3 | Exp4 | Exp5 | Exp6 | Exp7 | Exp8 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % de resíduo <i>in natura</i> | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Velocidade do ar de secagem (m/s) | 28 | 36 | 28 | 36 | 28 | 36 | 28 | 36 |
| Temperatura (°C) | 40 | 40 | 60 | 60 | 40 | 40 | 60 | 60 |
| Umidade do resíduo <i>in natura</i> (% b.u.) | 80,51 | 79,36 | 78,71 | 76,62 | 81,76 | 80,07 | 78,91 | 78,94 |
| Umidade da mistura de resíduo <i>in natura</i> e seco(% b.u.) | 42,41 | 35,22 | 36,58 | 38,03 | 47,27 | 52,28 | 49,81 | 53,10 |
| Umidade da mistura de resíduo seco (% b.u.) | 29,15 | 22,75 | 14,75 | 14,23 | 38,91 | 32,02 | 29,13 | 29,00 |
| % de redução de umidade após secagem em leito de jorro | 31,26 | 35,41 | 59,67 | 62,59 | 7,68 | 38,74 | 41,52 | 45,38 |

Fonte: Do autor.

A partir dos dados da Tabela 5.4, é possível inferir que para as condições em que havia uma maior quantidade de resíduo *in natura* (Experimentos 5 a 8), houve uma menor redução porcentual de umidade em geral, enquanto para os experimentos com menor quantidade de resíduo *in natura* (Experimentos 1 a 4), a redução de umidade foi maior. Entretanto, ao se comparar o Experimento 2 com o Experimento 6, que ocorreram nas mesmas condições de velocidade de ar e temperatura, porém, com porcentagens diferentes de resíduo *in natura*, o Experimento 6, embora com maior concentração, obteve maior redução de umidade.

Nos Experimentos 3 e 4, foi observada uma redução de aproximadamente 60% de umidade, com a umidade final ficando abaixo de 15%, condição favorável para armazenamento de produtos secos. Tal resultado indica que para essas condições, temperatura de 60°C e 20% de resíduo *in natura*, apenas quinze minutos no secador do tipo leito de jorro, já seria suficiente para alcançar uma secagem satisfatória do resíduo do despulpamento de acerola.

Com relação à temperatura do ar de secagem, o parâmetro influenciou consideravelmente a eficiência da secagem, já que os experimentos com aquecimento (Experimentos 3, 4, 7 e 8) apresentaram melhores resultados, no que diz respeito a % de redução de umidade, quando comparados com que os experimentos sem aquecimento (Experimentos 1, 2, 5 e 6).

É possível notar também que a velocidade do ar de secagem favoreceu o processo, sendo que os experimentos com menor velocidade (Experimentos 1, 3, 5 e 7 apresentaram menor porcentagem de redução de umidade.

O *Software Statistica 7* foi utilizado para analisar os dados e determinar a influência das variáveis, porcentagem de resíduo *in natura* (X), velocidade do ar (V) e temperatura do ar (T) sobre a resposta, umidade final, (U_f). O resultado do planejamento dos ensaios de secagem em leite de jorro é apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 –Planejamento fatorial 2^3 dos ensaios de secagem.

| Experimento | % de resíduo <i>in natura</i> (X) | Velocidade (m/s) (V) | Temperatura (°C) (T) | Umidade Final (% b.u.) (U_f) |
|--------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | -1 (20) | -1 (28) | -1 (40) | 29,15 |
| 2 | -1 (20) | 1 (36) | -1 (40) | 22,75 |
| 3 | -1 (20) | -1 (28) | 1 (60) | 14,75 |
| 4 | -1 (20) | 1 (36) | 1 (60) | 14,23 |
| 5 | 1 (30) | -1 (28) | -1 (40) | 38,91 |
| 6 | 1 (30) | 1 (36) | -1 (40) | 32,02 |
| 7 | 1 (30) | -1 (28) | 1 (60) | 29,13 |
| 8 | 1 (30) | 1 (36) | 1 (60) | 29,00 |

Fonte: Do autor.

Para o estudo da influência das variáveis da Tabela 5.5 foi realizada uma regressão múltipla, com nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95%. O coeficiente de regressão (R^2) foi de 0,9998 e os resultados obtidos na análise estatística, apenas com os efeitos significativos ($p < 0,05$), estão dispostos na Tabela 5.6.

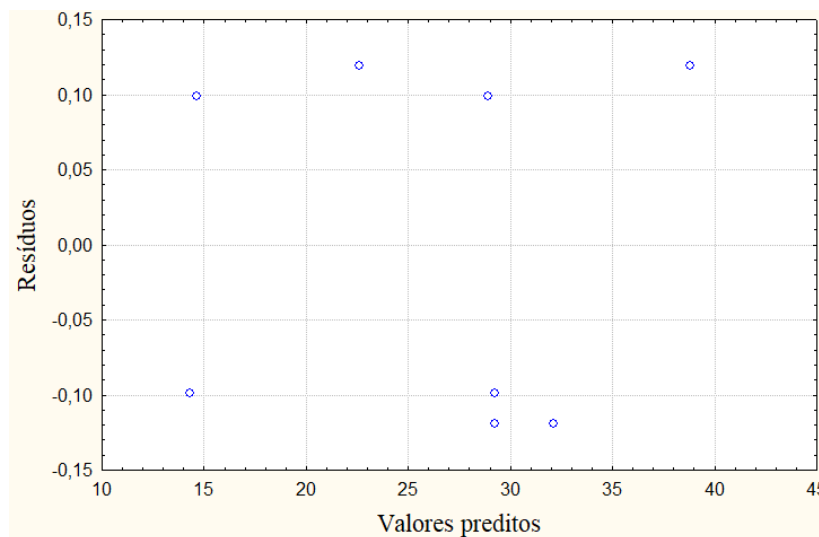
Tabela 5.6 – Resultados da regressão para a umidade final.

| Variável | Coefficiente | Nível de significância (<i>p</i>) |
|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Constante | 26,242 | 0,000009 |
| % de resíduo <i>in natura</i> (X) | 12,045 | 0,000166 |
| Velocidade (V) | -3,486 | 0,001970 |
| Temperatura (T) | -8,931 | 0,000301 |
| X x T | 2,529 | 0,003735 |
| V x T | 3,158 | 0,002400 |

Fonte: Do autor.

Na Figura 5.7, tem-se a distribuição de frequências para o resíduo, e como não há nenhum tipo de padrão, é possível inferir que os dados seguem uma distribuição normal.

Figura 5.6 – Distribuição de resíduos para a umidade final.



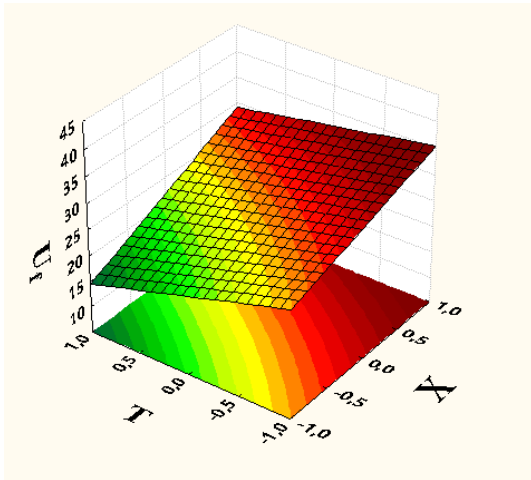
Fonte: Do autor.

Com a eliminação de todos os parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi obtida uma equação preditiva (Eq. 5.1) para a umidade final (U_f) em função da % de resíduo *in natura* (X), da velocidade (V) e temperatura (T) do ar de secagem.

$$U_f(\%) = 26,242 + 12,045X - 3,486V - 8,931T + 2,529X.T + 3,158V.T \quad (5.1)$$

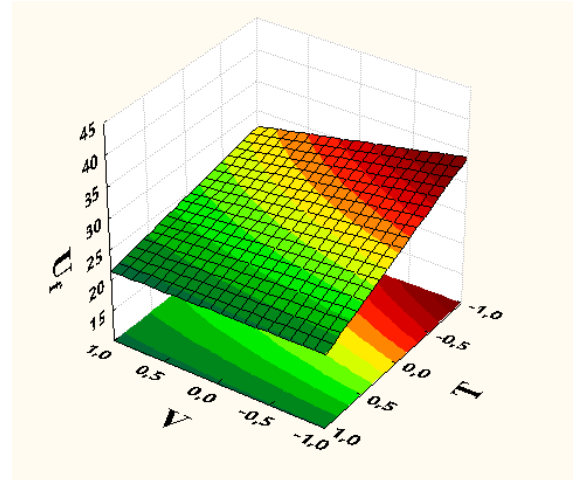
A análise estatística fornece também as superfícies de resposta para as correlações entre as variáveis independentes e a variável dependente, no caso a umidade em base úmida final, conforme ilustram as Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Figura 5.7 – Superfície de resposta para as variáveis X e T, com V=0.



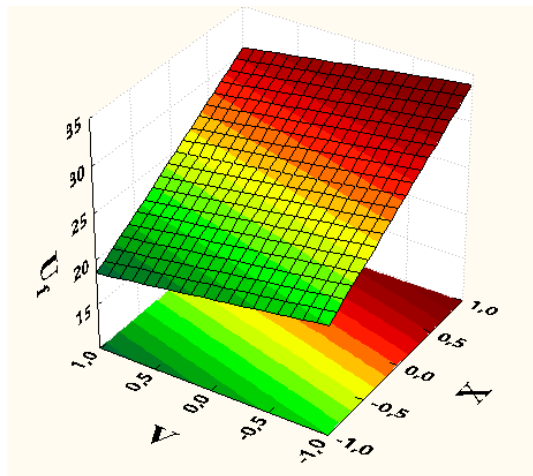
Fonte: Do autor.

Figura 5.8 – Superfície de resposta para as variáveis V e T, com X=0.



Fonte: Do autor.

Figura 5.9 – Superfície de resposta para as variáveis V e X, com T=0.



Fonte: Do autor.

Através da análise do modelo e das Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, é possível perceber que, quanto maior a variável X (fração de sementes in natura), maior a U_f , o que faz sentido, já que, quanto maior a umidade inicial da mistura no leito, maior será também a umidade final, considerando o mesmo intervalo de tempo de operação do leito de jorro. No que diz respeito à

velocidade (V) e temperatura (T) do ar de secagem, quanto maiores os seus valores, menor será a umidade final, conforme esperado. Com base nisso, a condição ótima seria a do Experimento 4 ($X = 20\%$, $V = 36 \text{ m/s}$ e $T = 60^\circ\text{C}$) que apresentou, inclusive, o menor valor de umidade final, se comparado com os outros experimentos. Porém, é necessário pensar por outra ótica, já que a quantidade de resíduo in natura que é adicionado ao leito é menor, o que pode causar ineficiência, pela necessidade de várias bateladas para se conseguir secar uma quantidade considerável de material.

5.6 Compostos bioativos

Para investigar o comportamento dos compostos bioativos, foram analisadas amostras do resíduo do despolpamento de acerola *in natura*, seco em estufa e após a secagem em leito de jorro. Para este último, foram escolhidas duas condições do planejamento experimental, a considerada mais favorável (Experimento 4) e a menos favorável (Experimento 5) à secagem. Os resultados das análises dos compostos bioativos são reportados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados das análises de compostos bioativos.

| Resíduo | Vitamina C (mg de ác. Ascórbico/100g) | DPPH (% de sequestro do radical livre) |
|----------------------------------|--|---|
| <i>in natura</i> | 76,76 ($\pm 5,73$) ^a | 87,88($\pm 0,44$) ^d |
| seco em estufa | 9,37 ($\pm 1,08$) ^b | 66,01($\pm 8,19$) ^e |
| seco em leito (exp4) | 45,57 ($\pm 5,90$) ^c | 85,31 ($\pm 4,63$) ^d |
| seco em leito (exp5) | 48,30 ($\pm 4,00$) ^c | 70,33 ($\pm 2,72$) ^e |

Fonte: Do autor.

A partir dos dados da Tabela 5.7, é possível perceber, em relação ao teor de vitamina C, que o resíduo do despolpamento de acerola possui valor abaixo do encontrado na polpa de acerola, mas ainda assim possui uma quantidade considerável desse nutriente. Além disso, o resíduo possui considerável atividade antioxidante, principalmente quando seco em leito de jorro, resultado que pode ser observado a partir da porcentagem de sequestro do radical livre DPPH.

O teor de vitamina C para o resíduo do despolpamento de acerola *in natura*, encontrado na literatura, é bastante variável, possivelmente em função da proporção de polpa residual, que depende da eficiência do equipamento utilizado para o despolpamento, já que a polpa possui maior teor de ácido ascórbico que a semente. Além disso, o tempo de exposição às condições do ambiente durante o transporte e armazenamento, podem favorecer a degradação da vitamina C. É importante destacar que o valor de Vitamina C encontrado no presente trabalho para o resíduo *in natura*, é inferior ao reportado por Tedesco (2018) e semelhante ao encontrado por Bortolotti (2012).

Foi realizada uma análise de variância, seguida do Teste de Tukey, para as três condições de secagem apresentadas na Tabela 5.7, com intervalo de confiança de 95%. O resultado do teste está representado na referida tabela, onde médias que possuem a mesma letra não se diferem estatisticamente, enquanto médias que possuem letra diferente possuem diferença significativa.

Para a vitamina C, houve diferença significativa entre a amostra *in natura* e todos os tratamentos e também entre os tratamentos, o que indica que a disponibilidade desse composto depende consideravelmente das condições de secagem. Em relação ao sequestro do radical livre DPPH, o seu valor foi maior para o resíduo *in natura* seguido do material seco em leito de jorro com as condições do experimento 4, enquanto não houve diferença significativa entre a secagem em estufa e a secagem em leito com as condições do experimento 5, condições que apresentaram menor atividade antioxidante.

Foi observada uma redução da concentração de vitamina C no material seco em leito de jorro (para ambas as condições) quando comparada com a concentração presente no resíduo *in natura*, no entanto, quando se compara com o material seco em estufa, o valor de vitamina C após a secagem no leito é mais elevado. Tal resultado era esperado já que a vitamina C é um composto termossensível. Esse resultado não se assemelha ao encontrado por Cunha (2015) e por Bortolotti (2012), que observaram um aumento na concentração de vitamina C durante a secagem em leito de jorro, com conseqüente diminuição. No presente trabalho os resultados foram calculados em base seca, o que pode explicar a diferença de comportamento observado.

Já em relação à secagem em estufa, como a vitamina C é considerada volátil e instável a altas temperaturas, a condição severa de secagem, 105°C, por 24h, provavelmente causou a degradação. Esses resultados indicam que a secagem em leito de jorro se mostra como uma técnica promissora na conservação dos compostos bioativos, por se tratar de uma técnica que não demanda grandes tempos de operação, proporcionando, conseqüentemente, uma maior quantidade de vitamina C no produto seco.

No que tange ao sequestro do radical livre DPPH, dentre as duas condições de secagem analisadas, as condições do experimento 4 (maior temperatura e velocidade do ar) levam à obtenção de uma menor umidade final do resíduo em um mesmo intervalo de tempo, o que favorece a conservação dos compostos bioativos.

Os resultados obtidos indicam que ocorreu uma redução no teor de compostos bioativos na secagem em leito de jorro, medidos pela redução no teor de vitamina C e também da porcentagem de captura do radical livre DPPH, realizada pelos compostos bioativos, como

flavonóides, fenólicos e a própria vitamina C. Entretanto, tal cenário aponta o experimento 4 (20% de resíduo *in natura*, velocidade de 36 m/s e temperatura de 60 °C) como o mais eficiente na obtenção de um resíduo com menor valor de umidade final, bem como uma maior disponibilidade de compostos bioativos, quesito em que não se difere estatisticamente do experimento 5.

Capítulo 6 Conclusões

No presente trabalho foi investigada a secagem de resíduo do despoldamento de acerola em leito de jorro. Para isso foi feita a caracterização das partículas e do meio poroso, foi estudada a fluidodinâmica do leito a partir da obtenção da curva característica e foram realizados experimentos de secagem em leito de jorro. Além disso, para se avaliar a qualidade funcional do resíduo, foi analisado o comportamento dos compostos bioativos no resíduo através da quantificação do teor de vitamina C e pela porcentagem de sequestro do radical livre DPPH.

O resíduo de acerola *in natura* apresentou dificuldade de fluidização, o que poderia ser explicado pela sua alta densidade *bulk*, alto ângulo de repouso e baixa porosidade *bulk*. Para resolução desse problema, foi utilizada uma mistura entre o resíduo de acerola *in natura* e seco em estufa, que por sua vez, apresentou excelente fluidização. O resíduo seco se mostrou um bom inerte para a secagem do resíduo de acerola em leito de jorro, e ao se tratar do mesmo material, não houve a necessidade de separação do material após a operação de secagem.

A curva característica do leito de jorro foi obtida experimentalmente para a mistura de resíduo de acerola *in natura* e seco, e apresentou um comportamento coerente com o padrão típico de um leito de jorro, permitindo assim, a fácil identificação dos regimes de escoamento e dos parâmetros fluidodinâmicos de maior relevância.

Os ensaios de secagem indicaram que as variáveis: porcentagem de resíduo *in natura*, velocidade e temperatura do ar de secagem influenciam na operação. Foi observado que, quanto menor a porcentagem do resíduo *in natura* na mistura e quanto maior a velocidade e temperatura do ar de secagem, menores valores de umidade final no resíduo são obtidos. Sendo que a melhor condição de secagem foi o experimento com 20% de material úmido, velocidade do ar de secagem de 36 m/s e temperatura de 60°C. Uma análise de regressão múltipla foi utilizada para quantificar a influência das variáveis sobre a resposta (umidade final). Um quadrado do coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,9998 indica que o modelo se ajusta de maneira satisfatória aos dados experimentais. Melhores condições de secagem são obtidas para valores mais altos de temperatura e de velocidade do ar, bem como para porcentagens menores de material úmido na mistura. Foi possível alcançar valores de umidade final abaixo de 15%, valor adequado para conservação do material, com apenas quinze minutos de secagem, em leito de jorro.

A secagem em leito de jorro reduziu o teor de vitamina C e a atividade antioxidante do resíduo do despolpamento de acerola, o que poderia ser explicado em razão da baixa estabilidade dos compostos bioativos.

Por fim, é possível concluir que o leito de jorro se mostrou eficaz na secagem de resíduo de despolpamento de acerola e na conservação de seus compostos bioativos, operando em períodos curtos e com baixas temperaturas de ar, resultados que tornam a técnica promissora para secagem de produtos alimentícios.

REFERÊNCIAS

- ALTINO, H. O. N. Secagem em leito fixo de materiais granulares com diferentes esfericidades. p. 73, 2019.
- ALVES, A. S. S. Obtenção e classificação físico-química da farinha do resíduo da acerola. **Dissertação de mestrado**, 2019.
- BORTOLOTTI, C. T. Estudo Experimental da Fluidodinâmica de uma Mistura de Resíduo de Acerola e Soja em Leito de Jorro. 2012.
- BORTOLOTTI, C. T. ET AL. Hydrodynamic study of a mixture of West Indian Cherry Residue and Soybean Grains in a spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 91, p. 1871–1880, 2013.
- CARVALHO, D. DE et al. Análise e Determinação da Umidade de Equilíbrio Higroscópico de Grãos e da Farinha de Trigo na Temperatura de 50 °C. **Anais da Conferência de Pós Colheita**, p. 835–839, 2022.
- CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Embrapa Cerrados**, p. 51, 2010.
- CHANG, S. K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Superfruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health effects – A comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 1–25, 2018.
- CONCEIÇÃO FILHO, R. S. Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes em leito de jorro. 1997.
- COSTA, L.; L., S.; MELLO, G. **Cozinha sustentável e aproveitamento integral dos alimentos. O dia em que a aula de ciências acontece na cozinha**. Anais do IV Congresso nacional de educação. **Anais...2017**
- CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**BlucherSão PauloEditora Blucher, , 2014.
- CRUZ, R. G. DA et al. Comparison of the antioxidante property of acerola extracts with synthetic antioxidants usin na in vivo method with yeasts. **Food Chemistry**, v. 277, p. 698–705, 2019.
- CUNHA, R. N. DA. Desidratação de Resíduo de Acerola em Leito de Jorro : Efeitos de Pré-Tratamentos e Fluidodinâmica. p. 205, 2015.
- CUNHA, F. G. E. Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro. 2008. 92 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. 2008.
- DAMODARAM, S.; PARKIN, K. L. **Química de Alimentos de Fennema**. Porto Alegre: Artmed, 2019.

DIAS, G. E. L. Análise da secagem convectiva de resíduo proveniente da fabricação de vinho. p. 93, 2018.

DO NASCIMENTO, L. D. Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro. 2014. 141 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2014. 2014.

DOGAN, O. M. et al. Hydrodynamics and stability of slot-rectangular spouted beds. Part I: Thin bed. **Chemical Engineering Communications**, v. 181, p. 225–242, 2000.

DUARTE, C. R. Estudo Experimental E De Simulação Da Fluidodinâmica E Recobrimento Em Leito De Jorro. 2006. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. 2006.

EMBRAPA. **Grandes contribuições para a agricultura brasileira: Agroindústria.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/grandes-contribuicoes-para-a-agricultura-brasileira/agroindustria>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

FOUST, A. S. et al. **Principles of Unit Operations.** 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1980.

GONÇALVES, B. F. RECOBRIMENTO DE SEMENTES DE SOJA (*GlycinemaxL.*) EM LEITO DE JORRO UTILIZANDO SUSPENSÃO DE NATUREZA POLIMÉRICA CONTENDO EXTRATO DA FOLHA DE OLIVEIRA (*OleaeuropaeaL.*). **Trabalho de conclusão de curso**, 2019.

GOULA, A. M.; LAZARIDES, H. N. Integrated processes can turn industrial food waste into valuable food by-products and/or ingredients: The cases of olive mill and pomegranate wastes. **Journal of Food Engineering**, v. 167, p. 45–50, 2015.

HACHMANN AIOLFI, A.; BASSO, C. Preparações Elaboradas Com Aproveitamento Integral Dos Alimentos 1 Dishes Prepared With Integral Use of Food. n. 1, p. 109–114, 2013.

HOEHNE, L.; MARMITT, L. G. Métodos Para a Determinação De Vitamina C Em Diferentes Amostras. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 11, n. 4, p. 36–55, 2020.

IBGE. **Censo Agro.** Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=0&tema=76215>.

JONG, J. A. H.; HOFFMAN, A. C.; FINKERS, H. J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. **Faculty of Science and Engineering**, 1999.

JÚNIOR, F. E. DE S. Secagem Do Resíduo Industrial Da Acerola Em Leito De Jorro: Estudos Fluidodinâmicos E Análise Do Desempenho Do Secador. p. 125, 2012.

LAGO, R. C. Frutos Do Cerrado Como Agregadores De Valor. p. 154, 2018.

LOURENÇO, R. DE O. Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro. 2006. 115 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. 2006.

MARRETO, R. N. Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina (Tese de doutorado). **USP**, 2006.

MARTINS, V.; LUIZ, P.; VIOTTO, A. ESTUDO DA SECAGEM EM LEITO FIXO E DE JORRO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSAMENTO DE SUÇO. 2007.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press Inc., 1974.

MEDEIROS, M. DE F. D. DE et al. Escoabilidade de leitos de partículas inertes com polpa de frutas tropicais: efeitos na secagem em leito de jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 475–480, 2001.

MESQUITA, P. C.; VIGOA, Y. G. La acerola. Fruta marginada de América com alto conteúdo de ácido ascórbico. **Alimentaria**, v. 37, p. 113–126, 2000.

MILHOMEM, F. O.; LUZ, J. A. M. Experimentos Simples Para Estudo De Graneis. **Holos**, v. 3, p. 114, 2016.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. [s.l.] New York: Gordon and Breach Publishers., 1986.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. [s.l.] CRC Press, 2014.

MUSSI, L. P.; PEREIRA, N. R. Estudo Fluidodinâmico E Avaliação Da Secagem Do Residuo De Jambolão Em Leito De Jorro. n. October, p. 1489–1496, 2015.

NASCIMENTO, L. D. Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de sementes de painço em leito de jorro (Dissertação de mestrado). **UFPA**, 2014.

NÓBREGA, E. M. M. DE A. SECAGEM DO RESÍDUO DE ACEROLA (Malphigia DO IMPACTO SOBRE O PRODUTO FINAL . SECAGEM DO RESÍDUO DE ACEROLA (Malphigia DO IMPACTO SOBRE O PRODUTO FINAL . p. 102, 2012.

ODAIR ZENEBON. NEUS SADOCCO PASCUET. PAULO TIGLEA. Métodos físicos-químicos para análise de Alimentos. **Instituto Adholfo Lutz**, p. 1020, 2008.

PEREIRA, J. S. G. Aproveitamento de resíduos alimentares para geração de produto gourmetizado (Dissertação de mestrado). **UFPB**, 2018.

RATTI, C. **Advances in Food Dehydration. Contemporary Food Engineering Series**. [s.l.] CRC Press, 2009.

RITZINGER, R.; RITZINGER, C. H. S. P. Acerola: aspectos gerais da cultura. **Cultivo Tropical de fruteiras**, v. 32, n. 264, p. 17–25, 2011.

ROCHA, S. C. S. et al. Drying of tropical fruit pulps: Spouted bed process optimization as a function of pulp composition. **Drying Technology**, v. 29, n. 13, p. 1587–1599, 2011.

RUFINO, M. DO S. M. et al. Embrapa - Cot_127. **Embrapa**, p. 0–3, 2007.

SANTANA, E. B. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO E DA SECAGEM DE SEMENTES DE LINHAÇA (*Linum usitatissimum* L.) EM LEITO DE JORRO. 2011.

SEBRAE. **O cultivo e o mercado da acerola**. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-acerola,db7b9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>.

SILVA, D. A. Utilização da farinha de resíduos de acerola e umbu cajá na produção de bolo tipo cupcake. p. 1–14, 2017.

SILVEIRA, G. C. D.; ROSSI, M. F. M.; PECHE, P. M. **Acerola: detalhes do cultivo no Brasil**. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/acerola-detalhes-do-cultivo-no-brasil/>>.

SOARES, E. DE S. R. Caracterização nutricional de resíduos agroindustriais da goiaba para frangos de corte. (Dissertação de mestrado). **UFRPE**, p. 110, 2017.

SOUSA, M. S. B. et al. Nutritional characterization and antioxidant compounds in pulp residues of tropical fruits. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 554–559, 2011.

SOUSA, R. C. Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional. **UFSCar**, 2017.

SPREUTELS, L. et al. Conical spouted bed drying of Baker's yeast: Experimentation and multi-modeling. **Food Research International**, v. 62, p. 137–150, 2014.

STORCK, C. R. et al. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Ciência Rural**, v. 43, p. 537–543, 2013.

TADINI, C. C. et al. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

TADINI, C. C. et al. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

TEDESCO, M. P. Filmes de desintegração oral produzidos por tape casting – perspectiva para veiculação de compostos ativos extraídos do resíduo industrial de acerola (Tese de doutorado). **USP**, p. 108, 2018.

TELLABIDE, M. et al. Minimum spouting velocity of fine particles in fountain confined conical spouted beds. **Powder Technology**, v. 374, p. 597–608, 2020.

UNICAMP, N. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. [s.l: s.n.].