

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Engenharia Agrícola



CAROLINA MARIA SANCHEZ SAENZ

SECAGEM CONTÍNUA DE RAÍZES DE CHICÓRIA COM APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA EM UM SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

CAMPINAS 2014

ii

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Engenharia Agrícola

CAROLINA MARIA SANCHEZ SAENZ

SECAGEM CONTÍNUA DE RAÍZES DE CHICÓRIA COM APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA EM UM SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

Orientador: Prof. Dr. RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA

Coorientador: Prof. Dr. KIL JIN PARK

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA CAROLINA MARIA SÁNCHEZ SÁENZ, E ORIENTADA PELO PROF. DR. RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA.

Assinatura do Ørientador

CAMPINAS 2014

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Sa55s	Sánchez Sáenz, Carolina Maria, 1978- Secagem contínua de raízes de chicória com aplicação de radiação infravermelha em um secador agitador/misturador / Carolina Maria Sánchez Sáenz. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.
	Orientador: Rafael Augustus de Oliveira. Coorientador: Kil Jin Park. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.
	 Secagem convectiva. 2. Inulina. 3. Consumo energético. 4. Temperatura de transição vítrea. 5. Radiação infravermelha. I. Oliveira, Rafael Augustus de,1979 II. Park, Kil Jin,1950 III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Continuous drying of chicory roots with application of infrared radiation in an agitator/mixer dryer

Palavras-chave em inglês: Convective drying Inulin Energetic consumption Glass transition temperature Infrared radiation Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola Banca examinadora: Rafael Augustus de Oliveira [Orientador] Regina Isabel Nogueira Vânia Regina Nicoletti Telis Osvaldir Pereira Taranto João Domingos Biagi Data de defesa: 30-05-2014 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Carolina Maria Sanchez Saenz,** aprovada pela Comissão Julgadora em 30 de maio de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira - Presidente e Orientador Feagri/Unicamp U 0 Dra. Regina Isabel Nogueira - Membro Titular **Embrapa/CTAA** Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis – Membro Titular Ibilce/Unesp Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto - Membro Titular FEQ/Unicamp Prof. Dr. João Domingos Biagi - Membro Titular Feagri/Unicamp

RESUMO

As pesquisas atuais em secagem de alimentos levam em consideração a qualidade do produto e a eficiência energética do processo, já que este processo consome cerca de 20-25% da energia utilizada pelo processamento na indústria de alimentos. Isto faz com que sejam exploradas novas técnicas e combinações de métodos de secagem e avaliação da intermitência do processo. Assim, realizou-se mais um estudo com o secador agitador/misturador (patente PI 0506639-5), iniciando pela adequação das pás do eixo misturador e adaptação do sistema de controle de velocidade e aquecimento do ar. O tempo de residência foi determinado considerando a rotação do eixo das pás e a rotação do eixo de alimentação do secador. Foi avaliada a influência dos parâmetros de secagem sobre o processo, de modo que foi possível determinar as melhores condições de pré-secagem HTST (High Temperature and Short Time) combinada com a secagem convectiva contínua com aplicação de radiação infravermelha, para obtenção de um produto de qualidade e com baixa demanda de energia elétrica no processo. Foi feito também o estudo da influência desses processos nas propriedades físicas e mecânicas de raízes de chicória. A redução da demanda de energia elétrica foi obtida considerando a intermitência da aplicação de radiação infravermelha. Os testes e análises realizados nestas condições resultaram em uma série de dados que garantem que a combinação de métodos de secagem e de técnicas de intermitência são eficientes energeticamente e resultam em um produto de boa qualidade.

Palavras-chave: cinética de secagem, métodos de secagem, HTST, propriedades físicas e mecânicas, concentração de inulina, consumo energético.

ABSTRACT

In recent research works, food drying takes into account product quality and energy efficiency of process, since drying process consumes about 20-25 % of the energy used by the food processing industry. This fact indicates that new techniques combining drying methods and intermittency of the process must be evaluated. Thus, a study with the agitator / mixer dryer (patent PI 0506639-5) was performed, beginning with the mixer blades adequacy and velocity control and air heating systems adaptation. Residence time distribution determination has been conducted, considering rotation of blades and feed rotation of dryer. The influence of dying parameters on the process was evaluated, so that it was possible to determine the best conditions of HTST (High Temperature and Short Time) drying combined with the continuous drying with infrared radiation application, to obtain a good quality dried product and electric energy efficiency of the process. The study of the influence of these processes on the physical and mechanical properties of chicory roots was also done. Finally, the electric energy efficiency was obtained considering the intermittency of infrared radiation application. The experimental runs and analyses under these conditions have generated data which ensure that the combination of drying methods and intermittency techniques are energy efficient and result in a good quality product.

Keywords: drying kinetics, drying methods, HTST, physical and mechanical properties, inulin concentration, energy consumption.

LISTA DE FIGURAS	xxiii
LISTA DE TABELAS	xxxi
LISTA DE SIMBOLOS	xxxvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 SECAGEM	5
2.1.1 Tipos de secadores	6
2.1.2 Distribuição de tempo de residência - DTR	9
2.1.3 Cinética de Secagem e Modelagem Matemática	14
2.1.4 Secagem por radiação infravermelha	17
2.1.5 Secagem com pulso HTST combinada com secagem convectiva	
2.2 CHICÓRIA	24
2.3 INULINA	26
2.3.1. Estrutura química	
2.3.2 Processos de obtenção de inulina	
2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PRODUTOS AGRÍCOLAS	27
2.4.1. Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, p	orosidade e
encolhimento	27
2.4.2. Atividade de água	
2.4.3 Microestrutura de partículas	
2.4.4. Capacidade de Reidratação	
2.4.5 Textura	
2.5 ISOTERMAS DE SORÇÃO	35
2.6 TRANSIÇÕES DE FASE	37
2.7 CONSUMO ENERGÉTICO	40
3. METODOLOGIA	43

SUMÁRIO

3.1 MATERIAL	43
3.1.1 Matéria – prima	
3.1.2 Equipamentos para secagem	45
3.1.2.1 Secador convectivo	45
3.1.2.2 Secador agitador/misturador	45
3.1.2.3 Adequação das pás do eixo agitador do secador contínuo	
3.2 MÉTODOS	50
3.2.1 Pré-Secagem com HTST	50
3.2.2 Secagem contínua com o secador agitador/misturador	51
3.2.2.1 Distribuição do tempo de residência - DTR	51
3.2.2.2 Secagem contínua de raízes de chicória (secador convectivo com apli	cação de
radiação infravermelha)	52
3.2.3 Avaliação do produto	53
3.2.3.1 Teor de água	53
3.2.3.2 Atividade de água (a _w)	54
3.2.3.3 Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, poro	sidade e
encolhimento	54
3.2.3.4 Mudanças estruturais	55
3.2.3.4.1 Cinética de reidratação	55
3.2.3.4.2 Textura	56
3.2.3.5 Análise de imagens	57
3.2.3.6 Determinação das condições de armazenamento	58
3.2.3.6.1 Isotermas de sorção	58
3.2.3.6.2 Temperatura de Transição Vítrea (Tg)	59
3.2.3.7 Extração da inulina	60
3.2.3.8 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE)	60
3.2.4 Demanda de energia elétrica	61

3.2.5 Planejamento experimental e análise estatística	61
3.2.5.1 Planejamento experimental de pré-secagem com HTST	61
3.2.5.2 Planejamento experimental da secagem convectiva com aplicação de ra	adiação
infravermelha	63
3.2.5.3 Análise dos dados	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 PROCESSO DE PRÉ-SECAGEM COM HTST DE RAÍZES DE CHICÓRIA	67
4.1.1. Teor de água e concentração de sólidos solúveis	67
4.1.2 Textura	72
4.1.3 Demanda de energia elétrica	82
4.1.4 Otimização e validação da pré-secagem HTST das raízes de chicória	
4.2 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DTR	85
4.3 SECAGEM CONTÍNUA DE RAÍZES DE CHICÓRIA (SECADOR CONVECTIV	о сом
APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA)	88
4.3.1. Teor de água e atividade de água	
4.3.2. Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, poros	idade e
encolhimento das raízes de chicória	95
4.3.3. Cinética de reidratação	103
4.3.4. Textura	116
4.3.5. Análise de imagens	122
4.3.6. Extração de inulina	124
4.3.7. Demanda de energia elétrica	127
4.3.8. Condições ótimas do processo de secagem	131
4.3.8.1 Taxa de secagem	131
4.3.8.2 Teor de água e atividade de água	132
4.3.8.3 Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, poros	idade e
encolhimento	132
4.3.8.4 Cinética da reidratação	133
4.3.8.5 Textura	135

4.3.8.6 Análise de imagens - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	137
4.3.8.7 Extração de inulina	137
4.3.8.8 Isotermas de sorção	138
4.3.8.9 Temperatura de transição Vítrea	141
4.3.8.10 Demanda de energia elétrica	142
5. CONCLUSÕES	143
6. REFERÊNCIAS	145
7. APÊNDICE	159
7.1 Apêndice A. Curvas de determinação de tempo de residência DTR	
7.2 APÊNDICE B. Curvas da taxa secagem de raízes de chicória	
7.3 APÊNDICE C. Curvas de cinética de reidratação de raízes de chicória secas em três	
diferentes temperaturas de processo (25, 60 e 98 °C), baseadas no planejamento	
experimental fatorial 2 ³	

Ganhando....a longo prazo

Eu me acho um pouco diferente do impaciente mundo 'Instantâneo' que me cerca. Nosso mundo quer tudo – e com frequência *tem* tudo- agora. Cartões de crédito instantâneos, refeições instantâneas, divertimentos rápidos. Mas, quando reflito, não vejo o 'instantâneo' como um dos alvos de Deus. Lucros a longo prazo, na economia divina, derrotam sempre o instantâneo. Eu me sinto grata porque Deus geralmente não me faz esperar Demais para experimentar o que ele díz que vai fazer. Tenho Certeza de que ele tem consciência de minha impaciência! Mas Estou pensando atualmente mais nas promessas para o futuro, que são *tão maiores*!

Preciso de equilíbrio e sabedoría entre o aquí e o agora e o futuro eterno, entre orar pelo cumprimento das promessas a curto prazo e manter meu coração, meus pensamentos e desejos enraizados nas promessas dívinas a longo prazo.

Aquí eu vejo apenas o cumprimento a curto prazo. Mas quando as promessas a longo prazo forem uma realidade em vez de uma esperança, tenho certeza de que os cumprimentos a curto prazo, que agora me dão alegría, vão se desvanecer na *insignificância*.

Carole Mayhall

A DEUS,

pela saúde, amor e presença em minha vida,

OFEREÇO

A mi madre Carmencita, por su amor, dedicación y confianza. A mi hermano Andrés y mis sobrinos Pipe y Alejo. Los amo.

DEDICO

Agradecimentos

Se você leu até aqui, presumo que vai gostar da tese. Eu adoraria ficar com todo o mérito por ela, mas isso estaria errado. Todo o mérito é para DEUS. Estou aqui novamente vendo este trabalho de pesquisa quase concluído e assim, gostaria de apontar as pessoas que, com seu tempo, conhecimento, talento e/ou paciência, me ajudaram a criar uma tese muito melhor do que o que eu poderia ter escrito sozinha.

Muito obrigada à UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA que me deu o apoio e confiança aprovando a comissão de estudos para me formar como Doutora. À FEAGRI da UNICAMP por se arriscar de novo em trazer uma colombiana com muita vontade de aprender e conhecer um tema novo. Obrigada BRASIL, por abrir suas portas. Todas as coisas que aprendi, levo-as no meu coração e sei que permitiram mudar aspectos pessoais e principalmente profissionais.

Agradeço a todos que me ajudaram, desde as primeiras fases do projeto, iniciado com o incentivo dos meus orientadores, o Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira (Rafita) e o Prof. Dr. Kil Jin Park, que nunca se cansaram das minhas longas discussões sobre o estilo e o conteúdo de praticamente todas as frases – ou o mais provável é que tenham sido educados demais para se queixar disso. Que legal estudar os temas referentes à secagem que ainda na Colômbia não é muito pesquisado, especialmente a secagem de chicória. "Essa chicória que nem sabia da sua existência.... Que trabalho". E é mesmo! Durante o manejo de aproximadamente 100kg de raízes de chicória, a adequação dos equipamentos de secagem e as eternas horas do processo de secagem, aprendi um pouco mais a enfrentar e persistir em trabalhos árduos. Graças às pessoas das equipes do campo experimental e da oficina da FEAGRI, das quais ouvi "causos" e histórias de suas vidas, que apesar de serem de diversas equipes e de lugares diferentes, traziam consigo um mesmo código: a luta pela vida, com as dificuldades, as alegrias, a rotina e a dedicação daquele momento.

Sou muito grata também a toda equipe técnica dos laboratórios de pós- colheita, propriedades físicas e instrumentação e controle da FEAGRI e do laboratório de cromatografia da Faculdade de Engenharia de Alimentos e o laboratório de recursos analíticos e de calibração – LRAC da Faculdade de Engenharia Química, que forneceram parte da infra-estrutura, equipamentos e conhecimentos necessários para as análises das raízes de chicória.

No transcorrer dos trabalhos, apareceram diversas dificuldades que outros profissionais me ajudaram a contornar e me incentivaram constantemente. Essas pessoas foram uma incessante fonte de estímulo e comentários construtivos. Meus amigos que sempre me deram apoio e, quando invocados, também realizaram um ou dois milagres... Também devo agradecer aos colegas que, com eles, cultivaram este trabalho e me ajudaram a moldar o texto, e cujos esforços incansáveis fizeram com que este trabalho chegasse até você.

Pelo lado técnico, as pessoas que me inspiraram com muitos debates e discussões divertidas e empolgantes e deram opiniões de valor incalculável ao lerem o manuscrito (provas de laboratório, trabalho em campo, programação, entre outros), ou aplicando seus consideráveis conhecimentos sobre os diversos temas. Aos que me receberam em seus laboratórios ou salas e me apresentaram os incríveis avanços nos temas que enchem estas páginas. Muitos outros amigos e colegas leram capítulos, às vezes mais de um rascunho; outros forneceram sugestões ou informações úteis.

Ainda hoje, aos professores da FEAGRI com os quais tive aula. Essa aprendizagem foi essencial para o entendimento e compreensão de temas desconhecidos e melhoria da minha formação. Quero poder levar ao meu País parte desses conhecimentos. À UNAL, FAPESP, CAPES e FEAGRI por fornecer recursos econômicos que permitiram o desenvolvimento do projeto, minha participação em congressos e no dia a dia na Faculdade e Brasil. Ao CNPq, pelas bolsas de iniciação científica dos alunos de graduação.

Profundos agradecimentos à minha família da qual roubei tempo, de todos eles, para poder aperfeiçoar, ou ao menos rever obsessivamente, esta tese. Meus amigos de IPN, UNAL, CONFRA, ALVO DA MOCIDADE, C.S.I. NA TRILHA E ZÍPER NA BOCA, que acompanharam, oraram e torceram pelo êxito desta minha caminhada, impulsionando-me em todos os momentos, agradeço. Este trabalho também é um fruto de todos eles.

XX

Como diz na minha dissertação de mestrado, a outras pessoas que, direta ou indiretamente, participaram desta criação e que não estão aqui citadas, agradeço muito pelas ideias que ajudaram a construir. Ao final da fase de redação da tese, fiz novos amigos, que me acolheram como sendo "de casa" e proporcionaram-me um ambiente inspirador para o pensamento. Todas estas pessoas ajudaram-me a transformar desafios em conquistas. É como se o fio da história de cada um formasse, lentamente, uma grande teia que, por sua vez, é apenas mais um fio que tece a história do conhecimento.

A todos,

muito obrigada.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Curva E de distribuição do tempo de residência (DTR) 10
FIGURA 2.2. Sinal típico de saída (curva F) como resposta a um sinal de entrada em degrau.
FIGURA 2.3. Sinal típico de saída (curva C) como resposta a um sinal de entrada de um
pulso ideal
FIGURA 2.4. Velocidade relativa de reações em função da atividade de água
FIGURA 2.5. Histerese das isotermas de sorção
FIGURA 2.6. Estados em que podem encontrar-se os constituintes mais importantes dos
alimentos sólidos em função da temperatura
FIGURA 2.7. Esquema dos termogramas obtidos pelos diferentes métodos
termogravimétricos (a) isotérmico, (b) semi-isotérmico, (c) dinâmico
FIGURA 3.1. Croqui da área experimental da FEAGRI onde foi cultivada a chicória
FIGURA 3.2. Processamento das raízes de chicória. (A): semente; (B): germinação nos
tubetes; (C): disposição no campo experimental; (D): raízes de chicória após a colheita; (E):
raízes após cortadas no picador; (F): raízes cortadas em cubo e disponibilizadas em saco
plástico pra congelamento
FIGURA 3.3. Desenho esquemático do secador convectivo
FIGURA 3.4. Fotografia do secador agitador/misturador
FIGURA 3.5. Sistema de ventilação e aquecimento do ar de secagem antigo (direita) e
adequado (esquerda)
FIGURA 3.6. Material no leito de secagem após ensaio
FIGURA 3.7. Esboço do prolongador planejado para acoplar nas pás rotativas
FIGURA 3.8. Material no leito de secagem após ensaio com os prolongadores desenvolvidos.
FIGURA 3.9. Disposição dos prolongadores nas pás do eixo agitador
FIGURA 3.10. Disposição das amostras na bandeja de pré-secagem com HTST 51
FIGURA 4.1. Superfícies de resposta e curvas de contorno para o teor de água em função da
temperatura e o tempo de secagem para amostras in natura (a) e (b) e para as amostras
congeladas (c) e (d)71

FIGURA 4.2. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras <i>in natura</i>
FIGURA 4.3. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras congeladas 73
FIGURA 4.4. Superfícies de resposta e curvas de contorno para o módulo de elasticidade YM
(MPa) em função da temperatura e o tempo de secagem para amostras in natura (a) e (b) e
para as amostras congeladas (c) e (d)76
FIGURA 4.5. Superfícies de resposta e curvas de contorno para a demanda total de energia.
FIGURA 4.6. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 1
FIGURA 4.7. Superfícies de resposta e curvas de contorno para a DTR
FIGURA 4.8. Curva do teor de água em função do tempo de secagem e taxa da secagem em
função do teor de água para o ensaio 1 de secagem
FIGURA 4.9. Superfícies de resposta e curvas de contorno para densidade real (p _r)101
FIGURA 4.10. Superfícies de resposta e curvas de contorno para densidade da matriz sólida
(ρ _{ms})102
FIGURA 4.11. Curvas da cinética de reidratação das raízes de chicória seca para o ensaio 1
do planejamento experimental. A) temperatura 25 °C. B) temperatura 60 °C. C) temperatura
98 °C
FIGURA 4.12. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de
chicória secas – pontos fatoriais116
FIGURA 4.13. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de
chicória secas – pontos axiais
FIGURA 4.14. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de
chicória secas – pontos centrais118
FIGURA 4.15. Microscopia de Luz de amostras <i>in natura</i> de raiz de chicória122
FIGURA 4.16. Microscopia de Luz de amostras de raiz de chicória seca. (A)- tratamento 11 e
(B) tratamento 12
FIGURA 4.17. Imagens MEV das amostras de raiz de chicória seca. Direita - tratamento 11 e
esquerda - tratamento 12123
FIGURA 4.18. Superfícies de resposta e curvas de contorno para a demanda total de
energia
FIGURA 4. 19. Curvas da taxa de secagem com intermitência (2-1) na aplicação da radiação

infravermelha no processo de secagem. Ensaio OT-1 ótimo132
FIGURA 4.20. Curvas da cinética de reidratação das raízes de chicória seca para o ensaio OT-
1. A) temperatura 25 °C. B) temperatura 60 °C. C) temperatura 98 °C
FIGURA 4.21. Resultado médio dos ensaios de compressão para o ponto ótimo da secagem
de raiz de chicória secas136
FIGURA 4.22. MEV para a superfície das amostras do ponto OT-1 ótimo137
FIGURA 4.23. Isotermas de sorção das raízes de chicória experimental e preditas pelos
modelos para o ensaio OT-1 ótimo140
FIGURA 4.24. Isotermas de sorção das raízes de chicória experimental e preditas pelos
modelos para as amostras <i>in natura</i> 140
FIGURA 4.25. Termograma obtido para a amostra de raiz de chicória para o ensaio OT-1.
FIGURA A.1. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 2159
FIGURA A.2. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 3159
FIGURA A.3. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 4160
FIGURA A.4. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 5160
FIGURA A.5. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 6
FIGURA A.6. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 7161
FIGURA A.7. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 8162
FIGURA A.8. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 9162
FIGURA A.9. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 10 163
FIGURA A.10. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 11163
FIGURA B. 1. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 2
FIGURA B. 2. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 3
FIGURA B. 3. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 4
FIGURA B. 4. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 5
FIGURA B. 5. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 6
FIGURA B. 6. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 7
FIGURA B. 7. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 8
FIGURA B. 8. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 9
FIGURA B. 9. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 10166

FIGURA B. 10. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 11	166
FIGURA B. 11. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 12	166
FIGURA B. 12. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 13	167
FIGURA B. 13. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 14	167
FIGURA B. 14. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 15	167
FIGURA B. 15. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 16	167
FIGURA B. 16. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 17	168
FIGURA C. 1. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 2 –
temperatura 25°C	169
FIGURA C. 2. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 2 –
temperatura 60°C	169
FIGURA C. 3. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 2 –
temperatura 98°C	169
FIGURA C. 4. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 3 –
temperatura 25°C	170
FIGURA C. 5. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 3 –
temperatura 60°C	170
FIGURA C. 6. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 3 –
temperatura 98°C	170
FIGURA C. 7. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 4 -
temperatura 25°C	171
FIGURA C. 8. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 4 –
temperatura 60°C	171
FIGURA C. 9. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	io 4 -
temperatura 98°C	171
FIGURA C. 10. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	aio 5 -
temperatura 25°C	172
FIGURA C. 11. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	aio 5 -
temperatura 60°C	172
FIGURA C. 12. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensa	nio 5 –
temperatura 98°C	172

FIGURA C. 13. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 14. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 –
temperatura 60°C173
FIGURA C. 15. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 –
temperatura 98°C
FIGURA C. 16. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 -
temperatura 25°C174
FIGURA C. 17. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 –
temperatura 60°C
FIGURA C. 18. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 –
temperatura 98°C
FIGURA C. 19. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 –
temperatura 25°C
FIGURA C. 20. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 –
temperatura 60°C
FIGURA C. 21. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 –
temperatura 98°C
FIGURA C. 22. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 –
temperatura 25°C
FIGURA C. 23. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 –
temperatura 60°C
FIGURA C. 24. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 –
temperatura 98°C
FIGURA C. 25. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 10 –
temperatura 25°C 177
FIGURA C. 26. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 10 -
temperatura 60° C
FIGURA C 27 Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicéria seca - ensaio 10 -
temperatura 98°
FICIIRA C 28 Curves de cinético de reidrotocão do roiz de chicério soco - oncoio 11
ritoria 6. 20. Guivas de cinedica de returadação de raiz de cincorta seca - elisalo 11 -

temperatura 25°C
FIGURA C. 29. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 11 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 30. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 11 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 31. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 32. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 33. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 34. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 35. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 36. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 37. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 38. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 39. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 40. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 41. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 42. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 43. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 -
temperatura 25°C

FIGURA C. 44. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 45. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 -
temperatura 98°C
FIGURA C. 46. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 -
temperatura 25°C
FIGURA C. 47. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 -
temperatura 60°C
FIGURA C. 48. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 -
temperatura 98°C

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1. Modelos para ajustes de isotermas de sorção
Tabela 3.1. Definição dos níveis das variáveis independentes da DTR
Tabela 3.2. Modelos utilizados na descrição da cinética de reidratação de raízes de chicória
seca
Tabela 3.3 Valores das ampliações e magnitudes empregadas na análise de MEV para a
superfície e a fratura das amostras de raiz de chicória seca
Tabela 3.4. Valores de a $_{ m w}$ relacionados às soluções salinas saturadas a 25 °C
Tabela 3.5. Definição dos níveis das variáveis independentes da pré-secagem com HTST 62
Tabela 3.6. Ensaios para o planejamento experimental, variando os parâmetros
temperatura e tempo nos experimentos da pré-secagem com HTST
Tabela 3.7. Definição dos níveis das variáveis independentes da secagem convectiva com
radiação infravermelha
Tabela 3.8 Ensaios para o planejamento experimental, variando os parâmetros velocidade
do ar (VA), temperatura do ar (T) e rotação do eixo das pás (RP) nos experimentos da
secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha
Tabela 4.1. Resultados do teor de água (U_{bs}) e concentração de sólidos solúveis (SS) das
amostras <i>in natura</i> e congeladas no processo de pré-secagem com HTST
Tabela 4.2. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas teor de água
e concentração de sólidos solúveis69
Tabela 4.3. Análise de variância para a resposta teor de água (U $_{ m bs}$)
Tabela 4.4. Resultados do módulo de elasticidade (YM) das amostras <i>in natura</i> e congeladas.
Tabela 4.5. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta módulo de
elasticidade YM (MPa)74
Tabela 4.6. Análise de variância para a resposta módulo de elasticidade YM (MPa)
Tabela 4.7. Resultados da análise de textura para as respostas força máxima $F_{máx}$ (N),
Tensão máxima T _{máx} (MPa) e Rigidez R (N m ⁻¹) das amostras <i>in natura</i> e congeladas
Tabela 4.8. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas Força
máxima F _{máx} (N), Tensão máxima T _{máx} (MPa) e Rigidez R (N m ⁻¹) das amostras <i>in natura</i> 78

Tabela 4.9. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas Força máxima $F_{máx}$ (N), Tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e Rigidez R (N m⁻¹) das amostras congeladas.

Tabela 4.10. Análise de variância para as respostas Força máxima F _{máx} (N), Tensão máxima
T _{máx} (MPa) e Rigidez R (N m ⁻¹) das amostras <i>in natura</i> 80
Tabela 4.11. Análise de variância para as respostas Força máxima F _{máx} (N), Tensão máxima
T _{máx} (MPa) e Rigidez R (N m ⁻¹) das amostras congeladas
Tabela 4.12. Resultados da secagem com HTST na resposta demanda da energia elétrica EA
(kWh)
Tabela 4.13. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta demanda de
energia elétrica EA (kWh) da pré-secagem HTST
Tabela 4.14. Análise de variância para a resposta demanda de energia elétrica - EA (kWh)
da secagem HTST
Tabela 4.15: Resultado da validação das condições ótimas obtidas para a secagem HTST de
raízes de chicória
Tabela 4.16. Resultados da determinação do tempo de residência (DTR) das raízes de
chicória no secador contínuo
Tabela 4.17. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta DTR
Tabela 4.18. Análise de variância para a resposta DTR
Tabela 4.19. Definição dos tempos da aplicação da radiação infravermelha na secagem 89
Tabela 4.20. Resultados da taxa de secagem média do processo de secagem contínuo 90
Tabela 4.21. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta taxa de
secagem média das amostras de raiz de chicória
Tabela 4.22. Resultados do teor de água (U_{bs}) e atividade de água (a_w) das amostras de raiz
de chicória
Tabela 4.23. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas teor de
água e atividade de água
Tabela 4.24. Análise de variância ANOVA para a resposta atividade de água das amostras de
raiz de chicória
Tabela 4.25. Resultados da densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da
matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e

encolhimento (S _b) das raízes de chicória <i>in natura</i> e secas
Tabela 4.26. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas densidade
aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r) e densidade da matriz sólida (ρ_{ms})
Tabela 4.27. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas porosidade
das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (Sb)
Tabela 4.28. Análise de variância para as respostas densidade real (ρ_r), densidade da matriz
sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms})100
Tabela 4.29. Resultados da razão de reidratação (RR) para cada uma das temperaturas (25,
60 e 98°C) das raízes de chicória secas103
Tabela 4.30. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta razão de
reidratação para cada uma das temperaturas trabalhadas105
Tabela 4.31. Análise de variância para a resposta razão de reidratação para as temperaturas
de 25 e 98 °C das amostras se raiz de chicória seca106
Tabela 4.32. Constantes dos modelos, R2 e DRM da cinética de reidratação na temperatura
de 25 °C109
Tabela 4.33. Constantes dos modelos, R ² e DRM da cinética de reidratação na temperatura
de 60 °C110
Tabela 4.34. Constantes dos modelos, R ² e DRM da cinética de reidratação na temperatura
de 98 °C111
Tabela 4.35. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta D_{ef} do modelo
de Fick nas três temperaturas avaliadas113
Tabela 4.36. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta K_3 do modelo
de primeira ordem nas três temperaturas avaliadas114
Tabela 4.37. Análise de variância para as respostas D_{ef} do modelo de Fick e K_3 do modelo de
primeira ordem nas temperaturas de 60 e 98 °C115
Tabela 4.38. Resultados do módulo de elasticidade YM (MPa), força máxima $F_{máx}$ (N), tensão
máxima T _{máx} (MPa) e rigidez R (N m ⁻¹) das raízes de chicória secas119
Tabela 4.39. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas módulo de
elasticidade YM (MPa) e força máxima F _{máx} (N)120
Tabela 4.40. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas tensão
máxima T _{máx} (MPa) e rigidez R (N m ⁻¹)121

Tabela 4.41. Análise de variância para as respostas módulo de elasticidade YM (MPa), das Tabela 4.42. Resultados da concentração de sólidos solúveis – SS (kg kg⁻¹), inulina – INU (g_{INU} g_{MS}⁻¹), glucose - GLU (g_{GLU} g_{MS}⁻¹) e frutose-FRU (g_{FRU} g_{MS}⁻¹) das raízes de chicória secas. Tabela 4.43. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas Tabela 4.44. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas concentração de glucose - GLU e frutose – FRU......127 Tabela 4.45. Valores de energia dos componentes elétricos medidos no processo de secagem de raízes de chicória......128 Tabela 4.46. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta demanda de Tabela 4.47. Análise de variância para a resposta demanda de energia elétrica - EA das Tabela 4.48. Taxas média de secagem dos ensaios avaliando diferentes ciclos da aplicação da radiação infravermelha (intermitência)......131 Tabela 4.49. Resultados da densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e Tabela 4.50. Resultados da razão de reidratação (RR) para cada uma das temperaturas trabalhadas (25, 60 e 98°C) das raízes de chicória secas......133 Tabela 4.51. Constantes dos modelos, R² e DRM da cinética de reidratação do ponto OT-1 Tabela 4.52. Resultados do módulo de elasticidade YM (MPa), força máxima F_{máx} (N), tensão máxima T_{máx} (MPa) e rigidez R (N m⁻¹) das raízes de chicória secas do ponto OT -1 ótimo. Tabela 4.53. Resultados da concentração de sólidos solúveis – SS (kg kg⁻¹) e análise (CLAE) da concentração de inulina - INU (g_{INU} g_{MS}-1), glucose - GLU (g_{GLU} g_{MS}-1) e frutose - FRU (g_{FRU} Tabela 4.54. Valores experimentais de teor de água de equilíbrio a 25 °C, para as amostras

de raiz de chicória <i>in natura</i> e ponto ótimo (OT-1) da secagem	138
Tabela 4.55 - Parâmetros de ajuste das isotermas das raízes de chicória in naturo	a e os
pontos ótimos	139
Tabela 4.56. Valores dos componentes elétricos medidos no processo de secagem de	raízes
de chicória	142
LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo Descrição

Unidade

a, b	Constantes do modelo de Page	-
a _w	Atividade de água	-
А	Rotação da rosca-sem-fim de alimentação	rpm
ANOVA	Análise de Variância	-
A,B	Constantes do modelo de Oswin	-
BET	BRUNAUER, EMMETT e TELLER	-
С	Concentração de traçador	g g ⁻¹
C ₀	Concentração inicial de traçador	g g ⁻¹
CFB	Centrifugal Fluidized Bed	-
CEPS	Continuos Explosion Puffing Systems	-
CLAE	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência	-
D	Constante modelo LANGMUIR	-
D_{ef}	Difusividade efetiva	m ² s ⁻¹
DCCR	Desenho Central Composto Rotacional	-
DRM	Módulo do Desvio Relativo Médio	-
DSC	Differential Scanning Calorimetry	-
DTR	Distribuição do tempo de residência	-
dX/dt	Taxa de secagem	$kg_{H20} kg_{MS}$ -1
Е	Curva de DTR	-
EA	Demanda total de energia	kWh
F, h	Constantes modelo BET	-
FAPESP	Fundação de Amparo À Pesquisa do Estado de São Paulo	-
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola	-
FEQ	Faculdade de Engenharia Química	-
F _{cal}	Teste F calculado	-
$F_{máx}$	Força máxima de compressão uniaxial	Ν
FOS	Fruto-oligossacarídeo	-
FRU	Conteúdo de frutose	gfru gms ⁻¹

F_{tab}	Teste F Tabelado	-	
GAB	GUGGHENHEIM, ANDERSON e de BOER		
GFn	Estrutura química da inulina, n = número de moléculas de frutose -		
GLU	Conteúdo de glucose g _{GLU} g _{MS} -1		
g мs	Gramas de matéria seca	g	
HTFB	High Temperature Fluidized Bed	-	
HTST	High Temperature and Short Time	-	
INU	Conteúdo de inulina	ginu gms ⁻¹	
J, m	Constantes do modelo HENDERSON	-	
k1, k2	Constantes da equação de Peleg	-	
k ₃	Constante do modelo de primeira ordem	-	
К	Fator de proporcionalidade (constante de secagem)	-	
L	Dimensão característica (meia espessura da placa)	m	
L	Coeficiente de regressão representativo do efeito linear	-	
LRAC	Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração	-	
ma	Massa da amostra	g	
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	-	
MC(t)	Quantidade de água no instante t	$g g_{MS}^{-1}$	
MC_0	Quantidade de água no início	g g _{мs} -1	
MSR	Metodologia de superfície de resposta	-	
m _{tr}	Massa de traçador em um instante	kg	
m _{trtot}	Massa total de traçador	kg	
MS	Massa de matéria seca	g	
n	Número de termos	-	
n	Parâmetro do modelo	-	
OBS	Valor observado experimentalmente	-	
PRED	Valor Predito	-	
Q,L,	Constantes do modelo GAB	-	
Q	Área da curva C	-	
Q	Coeficiente de regressão representativo do efeito quadrático	-	
R	Rigidez	N m ⁻¹	

Rotação do Eixo das Pás Agitadoras	rpm
Razão de Reidratação	adimensional
Encolhimento	adimensional
São Paulo	-
Concentração de sólidos solúveis	kg kg ⁻¹
Tempo	S
Tempo de residência médio	S
Temperatura do ar de secagem	°C
Temperatura de ebulição	°C
Temperatura de transição vítrea	°C
Análise termogravimétrica	°C
Temperatura de fusão	°C
Tensão máxima	MPa
Distribuição de Fisher	-
Teor de água em base seca	kg kg ⁻¹
Universidade Estadual de Campinas	-
Volume da amostra	cm ³
Velocidade do ar	m s ⁻¹
Volume aparente inicial	cm ³
Volume do tolueno	cm ³
Massa da amostra reidratada	g
Massa da amostra seca	g
Teor de água média no tempo (t)	kg kg-1
Teor de água de equilíbrio	kg kg-1
Teor de água inicial	kg kg-1
Teor de água na monocamada molecular	kg kg-1
Teor de água da amostra reidratada	kg kg-1
Teor de água da amostra seca	kg kg-1
Teor de água adimensional	-
Razão de umidade do produto	adimensional
Módulo de elasticidade ou módulo de Young	МРа
	Rotação do Eixo das Pás AgitadorasRazão de ReidrataçãoEncolhimentoSão PauloConcentração de sólidos solúveisTempoTempo de residência médioTemperatura do ar de secagemTemperatura de ebuliçãoTemperatura de transição vítreaAnálise termogravimétricaTeno de fisherTeor de água em base secaUniversidade Estadual de CampinasVolume da amostraVolume do toluenoMassa da amostra reidratadaMassa da amostra secaTeor de água média no tempo (t)Teor de água na monocamada molecularTeor de água da amostra secaTeor de água adimensionalRazão de umidade do produtoMódulo de elasticidade ou módulo de Young

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Absortividade	-
3	Emissividade	-
γ	Refletividade	-
τ	Transmissividade	-
ρ _a	Densidade aparente	g cm ⁻³
ρ _{ms}	Densidade da matriz sólida	g cm ⁻³
ρ _r	Densidade real	g cm ⁻³
Ems	Porosidade da matriz sólida	adimensional
ε _p	Porosidade das partículas	adimensional

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a segurança alimentar e a qualidade dos alimentos faz com que sejam buscadas técnicas de conservação na cadeia de produção alimentar. Ao permitir a qualidade final dos produtos, garante-se as características intrínsecas esperadas pelo consumidor e por sua vez espera-se reduzir custos de falhas e de perdas. É assim que a secagem de produtos agropecuários vem-se fortalecendo. Essa busca é essencial, já que o comportamento do consumidor, ao ter facilidade de acesso às informações, tende a ser cada dia mais exigente em relação aos produtos que consome, especialmente quanto aos efeitos dos alimentos para a sua saúde. Outro fator é a crescente demanda das indústrias que produzem alimentos chamados de instantâneos (prontos e semi-prontos) e *light* ou *no fat* que utilizam alimentos secos e com baixos teores de gordura como matéria-prima. Esta indústria vem crescendo no mundo inteiro e apresenta um enorme potencial a ser explorado no Brasil. A facilidade de manuseio e de armazenagem dos produtos secos também é um importante fator no atual mundo globalizado.

A secagem é uma das operações unitárias mais importantes da engenharia de processos e, por isso, na maioria das técnicas industriais existe pelo menos uma etapa de secagem. Atualmente há muitos equipamentos e métodos utilizados na secagem de alimentos e nas últimas décadas esforços consideráveis tem sido feitos para compreender algumas mudanças químicas e bioquímicas que ocorrem durante a secagem, sendo desenvolvidos métodos para a prevenção de perdas de qualidade indesejáveis. Da mesma forma, tem sido exploradas novas técnicas de combinação de métodos de secagem considerando a qualidade do produto e a eficiência energética do processo. Sendo assim, a secagem acrescenta valor aos alimentos processados quando são conservadas suas propriedades e características.

No caso da cultura da chicória, suas raízes são altamente perecíveis e, para permitir um maior tempo de vida útil, a secagem é utilizada permitindo maior disponibilidade desta matéria-prima para o processamento industrial, aumentando o

valor agregado desta cultura e diminuindo os desperdícios, já que estas raízes tem um importante valor econômico ao ser uma fonte de inulina.

A inulina é um carboidrato de reserva naturalmente presente em diversos produtos vegetais, formado por uma cadeia de moléculas de frutose e uma molécula de glicose terminal. Dentre os vegetais que contêm inulina, as raízes de chicória (*Cichorium intybus* L.) se destacam para sua produção em escala industrial. A inulina tem propriedades que a tornam capaz de substituir o açúcar ou a gordura, com a vantagem de não resultar em incremento calórico. Devido a tais fatores, a inulina passou a ser aplicada como ingrediente em uma série de alimentos com teores reduzidos ou isentos de açúcares ou gorduras, tais como chocolates, sorvetes e iogurtes, entre outros.

Uma outra característica importante da inulina está associada às suas propriedades nutricionais. A inulina atua no sistema digestivo de maneira similar às fibras dietéticas, contribuindo para o incremento dos benefícios das bifidobactérias e, consequentemente, para a melhoria das condições de todo o sistema gastrointestinal. Devido a essas propriedades, as indústrias alimentícia e farmacêutica têm encontrado aplicações da inulina na produção de alimentos funcionais, compostos nutritivos e medicamentos.

Apesar da produção e a aplicação da inulina já serem muito difundidas em alguns países, no Brasil o seu uso ainda é muito restrito. Por se tratar de um produto que não é produzido no mercado nacional, a inulina precisa ser importada, o que a torna um ingrediente caro e dificulta sua aplicação. Para tornar o seu uso mais acessível às indústrias locais, são necessários estudos sobre o processo de produção de inulina no Brasil, visando à obtenção de um produto de qualidade.

Neste projeto financiado pela FAPESP, pretendeu-se, então, adequar um secador agitador/misturador para submeter as raízes de chicória a um processo otimizado de secagem com HTST (*high temperature and short time*) seguido de uma secagem contínua com aplicação de radiação infravermelha, avaliando os efeitos destes processos na qualidade do produto e na obtenção da inulina.

Hipótese

A secagem com HTST combinada com a secagem contínua convectiva com aplicação intermitente da radiação infravermelha é mais eficiente energeticamente e mantém as características físicas das raízes de chicória e a concentração de inulina, quando comparada à secagem com HTST seguida da secagem contínua convectiva com aplicação constante da radiação infravermelha.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 **Objetivo Geral**

Avaliar o processo de pré-secagem com HTST seguida da secagem convectiva contínua com complementação de energia por radiação infravermelha de material biológico considerando aspectos operacionais, energéticos e de qualidade do produto final.

1.1.2 Objetivos Específicos

- No secador agitador/misturador, adequar as pás do eixo misturador para permitir melhor movimentação do produto no sistema contínuo. Adaptar o sistema de controle de velocidade e aquecimento do ar; o sistema elétrico e o sistema de medição de energia consumida.
- Realizar testes preliminares de funcionamento e ajustes operacionais do secador agitador/misturador, já modificado.
- ◻ Determinar o tempo de residência das raízes de chicória no secador agitador/misturador.
- Secagem com HTST com o produto in natura e congelado.
- Secagem com HTST seguida da secagem contínua convectiva, com aplicação de radiação infravermelha constante e intermitente.
- Avaliação das características físicas, de textura e microestrutura das raízes de chicória ao final de cada processo;

- ◻ Analisar a demanda de energia elétrica no processo de secagem e fazer comparação entre as configurações.
- Verificar a influência da secagem com HTST e da secagem contínua na concentração de inulina com base na determinação de sólidos solúveis e análise cromatográfica;
- Determinar o comportamento das raízes de chicória secas através da razão de reidratação, temperatura de transição vítrea e as isotermas de sorção.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SECAGEM

Vários processos tecnológicos com fins de preservar alimentos têm sido explorados e em desenvolvimento para melhorar a eficiência e eficácia em escala industrial. Os métodos mais antigos e que ainda são utilizados incluem secagem, preservação química e refrigeração/congelamento. Esses processos têm como objetivo comum, estender a vida de prateleira dos alimentos para permitir um armazenamento, processamento e uma distribuição adequados. Como uma das principais limitações da vida de prateleira é decorrente da atividade de microrganismos, esses processos são desenvolvidos para eliminar o dano microbiológico, ou, pelo menos, controlar e/ou evitar atividades bacterianas e de outros microrganismos que sejam potencialmente prejudiciais à saúde humana; isso é feito através da diminuição da água disponível no alimento (CUNNINGHAM, 1982; TOLEDO, 1991).

A secagem é uma das operações unitárias mais importantes da engenharia de processos e, por isso, na maioria das técnicas industriais existe pelo menos uma etapa de secagem. Kajiyama e Park (2008) descrevem a secagem como uma operação unitária de retirada de água de um produto por evaporação ou sublimação, mediante aplicação de calor sob condições controladas, tendo como finalidade conservar alimentos através da diminuição da atividade de água do mesmo. Esta atividade de água (a_w) deve ficar numa faixa na qual não ocorra o crescimento e desenvolvimento de microrganismos, a atividade enzimática seja reduzida e não ocorram reações químicas e deteriorativas indesejáveis (TOLEDO, 1991; BRENNAN, 1994).

Os métodos de aplicação de calor das operações de secagem podem ser realizados pela passagem forçada de ar aquecido (convecção) através do produto, condução indireta do calor por meio de uma superfície metálica, utilização de infravermelho ou micro-ondas. A modelagem e otimização da secagem convectiva requer a compreensão dos mecanismos de transporte de água no interior dos alimentos e na interface entre a superfície do alimento e o ar de secagem. A transferência de energia (calor) depende principalmente da temperatura do ar e do alimento, do fluxo do ar de secagem e da área

exposta do alimento. A transferência interna de água é regida pela natureza do alimento, incluindo sua composição e estrutura, temperatura, pressão e, especialmente, do seu teor de água. A transferência de água na interface alimento/ar de secagem, por sua vez, depende da atividade de água na superfície, umidade relativa do ar, fluxo do ar, área exposta do alimento e pressão (CARRÍN e CAPRISTE, 2009).

A eficiência da secagem de produtos biológicos está relacionada com a qualidade do produto final. Espera-se que ao final do processo, o teor de água seja uniforme e adequado às condições de armazenamento, com baixa porcentagem de perda de material e conservação das características sensoriais e nutricionais (PARK et al., 2007).

Quanto às características nutricionais, o alimento perde seu teor de água, o que resulta em um aumento da concentração de compostos na massa restante. Proteínas, gorduras e carboidratos estão contidos no produto seco em maior quantidade por unidade de peso. Porém, há perda de vitaminas, pois aquelas solúveis em água são parcialmente oxidadas (DESROSIER e DESROSIER , 1997; BLASCO et al., 2004).

Aguilera et al. (2003) relatam que a secagem de alimentos deve ser vista, não somente como uma operação unitária, mas também como um processo com potencial para geração de estruturas únicas, mesmo que sejam derivadas da mesma matériaprima. Ela oferece propriedades que não são comparadas a nenhuma outra tecnologia de conservação, como por exemplo, ótima estabilidade a temperatura ambiente, conveniência, versatilidade do produto e redução de custos de transporte e armazenamento.

2.1.1 Tipos de secadores

A classificação de secadores industriais é bastante complexa devido a gama de equipamentos que estão disponíveis, além do grande número de variáveis a serem consideradas. De acordo com Strumillo e Kudra (1986), essas variáveis podem ser divididas tendo em conta a pressão no secador, o método de operação, o método de suprir o calor, o tipo de agente de secagem, a direção do fluxo de calor, o método do fluxo do agente de secagem, o método do carregamento da umidade, a forma do material úmido e a escala de operação ou a construção do secador.

Os principais tipos de secadores baseados no regime hidrodinâmico são com leito estacionário, com leito móvel e com leito de queda livre. Secadores com regime hidrodinâmico ativo são aqueles, nos quais a agitação do leito ou das partículas é causada por uma força hidrodinâmica exercida sobre as partículas por uma corrente de ar com uma velocidade apropriada. Exemplos destes secadores são com leito fluidizado, com leito agitado e com leito escoante (PARK et al., 2007).

Segundo Keey (1978), não apenas é necessário o conhecimento do comportamento dos secadores e sua adequação nos processos, mas também é necessário conhecer certas características do produto a ser seco. Dionello et al. (2009) destacam na sua pesquisa, que as características de secagem de qualquer produto biológico, incluindo a avaliação dos modelos matemáticos que melhor descrevem o processo, são importantes na seleção e desenvolvimento de equipamentos e no cálculo dos custos de operação. Deste modo, a utilização de secadores em escala pequena ou laboratorial é sempre uma boa alternativa para a escolha final do secador industrial, pois esses possibilitam a determinação das características de secagem do material, que são requeridas para predizer o modo como a matéria prima irá secar em escala industrial (KEEY, 1978).

Os secadores de fluxo contínuo se subdividem em vários grupos de acordo com o modelo de escoamento e do comportamento do sólido/fluido, tais como: secadores de fluxo concorrente, secadores de fluxo contracorrente, secadores de fluxo cruzado, secadores em cascata e secadores com promotores de mistura, secadores agitados, secadores vibrados, secadores fluidizados, entre outros (GODOI, 1996).

Em secadores de fluxo concorrente, ar e produto fluem na mesma direção ao longo do secador. Segundo Walker e Bakker-Arkema (1978), os secadores de fluxo de corrente paralela parecem ter as melhores condições para realizar a secagem com altas temperaturas, sem causar danos aos produtos.

Em secadores de fluxo contracorrente, o ar e o produto fluem em sentido contrário ao longo do secador. Segundo Nellist (1982), em um secador de fluxo contracorrente, operando em equilíbrio, o produto deixaria o secador à mesma temperatura do ar de entrada. A sua aplicação é limitada pela sensibilidade de alguns

materiais biológicos a altas temperaturas. Assim, na indústria, o mesmo é mais utilizado como resfriador ao invés de secador.

Os secadores de fluxo cruzado caracterizam-se pela passagem do ar perpendicularmente a uma camada de produto, os quais se movem entre chapas perfuradas. Estes secadores são mais populares pela simplicidade de construção e baixo custo (STEVENS e THOMPSON, 1976). Sua maior desvantagem é a falta de uniformidade no processo de secagem.

Os modos de escoamento encontram-se tanto em secadores para materiais perecíveis como para deterioráveis. Secadores de esteira perfurada com circulação de ar cruzado são utilizados em situações em que é desejável que a fonte de calor não entre em contato direto com o material.

Nos secadores convectivos de esteira com fluxo de ar paralelo, o calor é fornecido por queimadores abaixo da esteira. Os gases, movidos por ventiladores, aquecem o material por contato direto. Este secador funciona, pela combinação da convecção dos gases e por condução na esteira. Secadores de bandeja operam com fluxo paralelo e têm uso para materiais que exigem condições de secagem controladas. Secadores de bandeja perfurada operam com fluxo cruzado ou paralelo e têm um custo inferior aos de esteira perfurada. Secadores tipo tambor são cilindros rotativos internamente aquecidos. Por condução, secam filmes, lamas ou soluções líquidas. Secadores rotativos são aplicáveis na secagem de materiais granulares, sólidos fibrosos e pastas compactas. O secador rotativo indireto opera em fluxo de ar paralelo e é um dos secadores contínuos mais utilizados no mercado. O secador rotativo pode ser entendido como um tipo de secador em cascata. O material que gira no interior do cilindro cai formando pequenas cascatas de material no interior do cilindro (NONHEBEL e MOSS, 1971).

Não há distinção significativa entre os modos de operação dos secadores contínuos para materiais deterioráveis e não deterioráveis exceto pelas dimensões e adequação do equipamento ao produto e/ou processo. Portanto, é interessante o desenvolvimento de um equipamento e um processo de secagem que mantenha a qualidade do produto através do dimensionamento adequado e de um processo que empregue simultaneamente a transferência de calor, massa e quantidade de movimento.

Além disso, existe a possibilidade de obtenção de inúmeras vantagens quando se alia o efeito mecânico da agitação do leito do secador com a ação pneumática do ar secante. Para tanto, uma alternativa possível é a utilização de um secador que possibilite a movimentação do sólido no leito da secagem (secador agitador/misturador, patente PI 0506639-5 (UNIVERSIDADE..., 2005)).

2.1.2 Distribuição de tempo de residência - DTR

Conhecendo as velocidades do sólido dentro do secador em estudo, é possível predizer o seu comportamento no interior do equipamento. Embora essa forma de análise seja impraticável devido às dificuldades experimentais, em muitos casos não é necessário o conhecimento completo do escoamento do sólido, mas somente por quanto tempo as partículas individuais permanecem no leito ou, mais precisamente, qual é a distribuição dos tempos de residência do sólido. Tal informação pode ser determinada por um método de pesquisa amplamente usado: o teste do estímulo e resposta (LEVENSPIEL, 1974).

O tempo de residência depende das propriedades mecânicas das partículas, da intensidade de transporte e dos parâmetros geométricos do equipamento (SZALAY et al., 1995). Sólidos percorrendo caminhos diferentes no secador podem ter tempos diferentes para passarem através do leito. A distribuição desses tempos para o sólido que deixa o secador é chamada distribuição de idade de saída, curva E, ou a distribuição do tempo de residência (DTR) do sólido.

É conveniente representar a DTR de tal maneira que a área sob a curva seja unitária, isto é:

$$\int_{0}^{\infty} Edt = 1 \tag{2.1}$$

Este procedimento é chamado normalização da distribuição. A Figura 2.1 mostra a distribuição de forma normalizada:



Fonte: LEVENSPIEL (1974)

FIGURA 2.1. Curva E de distribuição do tempo de residência (DTR).

Para determinar a curva, utiliza-se técnicas experimentais de estímulo e resposta: perturba-se o sistema e verifica-se como ele responde ao estímulo. Uma análise da resposta dá a informação desejada sobre o sistema. No presente caso, o estímulo é uma entrada de traçador no escoamento de sólidos que entra no leito, enquanto a resposta é um registro de tempo necessário para que o traçador deixe o recipiente. Qualquer material que possa ser detectado e que não perturbe o escoamento pode ser usado como traçador. Qualquer tipo de sinal de entrada pode ser usado: casual, periódico, em degrau ou pulsante.

Fornecendo à entrada um sinal de traçador em degrau, e sendo a concentração inicial C_0 e a concentração em qualquer instante C, o registro da concentração do traçador na corrente de saída medida como C/C₀ em função do tempo é chamada de curva F (Figura 2.2). Essa curva é a fração acumulada de sólidos que passou pelo secador a um dado tempo t (KEEY, 1972).



Fonte: LEVENSPIEL (1974)

FIGURA 2.2. Sinal típico de saída (curva F) como resposta a um sinal de entrada em degrau.

A curva normalizada da resposta da entrada de um sinal pulsante de um traçador em degrau é chamada de curva C e tem as seguintes propriedades (Figura 2.3):



Fonte: LEVENSPIEL (1974)

FIGURA 2.3. Sinal típico de saída (curva C) como resposta a um sinal de entrada de um pulso ideal.

Como essa curva C registra o DTR para um dado lote particular de sólidos que entra no secador, ela também pode ser a DTR para qualquer outro lote (regime permanente). Assim sendo:

$$C = E \tag{2.2}$$

A distribuição de idade de um material de saída é definida em termos da fração mássica apresentada no instante entre t e t+dt. Como F é a função acumulada para um tempo t, então (LEVENSPIEL, 1974):

$$F(t) = \int_{0}^{t} E(t)dt \qquad (2.3)$$

ou ainda diferenciando:

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$
(2.4)

Finalmente, o tempo de residência médio (t) é definido como sendo:

 $(Tempo de residência médio) = \frac{(Fluxo de massa do material)}{(Fração do material retido)}$

ou:

$$\bar{t} = \int_{0}^{\infty} tE(t)dt \cong \sum t_{i}E_{i}\Delta t \qquad (2.5)$$

O tempo de residência dá uma medida do total do material retido no secador e o adimensional de tempo $\theta = t/\bar{t}$ é um índice para comparar o trânsito de partículas individuais. Quando se dispõe de dados discretizados, o valor médio da distribuição de uma curva C *versus* t, é dado por:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty tCdt}{\int_0^\infty Cdt} \cong \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{C_i \Delta t_i}$$
(2.6)

A variância dá uma ideia da dispersão da distribuição, e pode ser definida como:

$$\sigma^{2} = \frac{\int_{0}^{\infty} (t-\bar{t})^{2} C dt}{\int_{0}^{\infty} C dt} = \frac{\int_{0}^{\infty} t^{2} C dt}{\int_{0}^{\infty} C dt} - \bar{t}^{2} \cong \frac{\sum (t_{i}-\bar{t})^{2} C_{i} \Delta t_{i}}{\sum C_{i} \Delta t_{i}} = \frac{\sum t_{i}^{2} C_{i} \Delta t_{i}}{\sum C_{i} \Delta t_{i}} - \bar{t}^{2}$$
(2.7)

E em uma curva E versus t:

$$\sigma^{2} = \int_{0}^{\infty} (t - \bar{t})^{2} E dt = \int_{0}^{\infty} t^{2} E dt - \bar{t}^{2} \cong \sum t_{i}^{2} E_{1} \Delta t_{i} - \bar{t}^{2}$$
(2.8)

Os produtos agropecuários preservam melhor seu aspecto e seus nutrientes se a secagem foi efetuada com um menor tempo de residência do produto no secador. Para o estudo do processo de secagem contínuo, visando obter o tempo ideal total de secagem (tempo de residência no secador), os parâmetros básicos a serem considerados são (UNIVERSIDADE..., 2005):

- ✓ Temperatura: as temperaturas de secagem têm efeito significativo sobre a qualidade do produto. Sob temperaturas elevadas do ar de secagem, pode-se provocar danos físicos (quebras e trincas), descoloração, redução na qualidade de seus componentes (por exemplo: vitaminas, corantes, amido, óleo e proteína, etc).
- Umidade relativa: para efetuar a secagem é necessário que a pressão de vapor do ar de secagem seja inferior à pressão de vapor do produto. No caso da água, a umidade relativa do ar de secagem deve ser inferior àquela em que o material está em equilíbrio.
- ✓ Coeficientes de transferência: a transferência de calor e massa durante a secagem é determinada pelos coeficientes destas transferências que dependem da velocidade e da direção do escoamento do ar, grau de agitação/mistura do sólido, semi-sólido e líquidos, temperaturas, umidade relativa, pressão e razão do sólido/ar.
- Teor de água inicial e final: o teor de água do produto, além de permitir o estudo do processo de secagem, é um fator importante para a seleção da temperatura conjugada ao tempo de secagem.
- ✓ Teor de água de equilíbrio: todo material tem suas características específicas de ceder o seu líquido volátil. Esta propriedade de ceder ou absorver umidade pelo ambiente de secagem é determinada para uma mesma temperatura. Nos produtos biológicos a água contida, teor de água no material, tende a entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Tal fenômeno ocorre devido à relação entre a pressão de vapor de água do produto e a pressão parcial de vapor de água no ar ambiente. Se a pressão de vapor do produto for menor que a presente no ar, o produto tende a absorver água (adsorção); em situação inversa, o produto cederá para o ar (dessorção).

Em estudo realizado por Waje et al. (2007) sobre a distribuição do tempo de

residência (DTR) em um secador transportador em escala piloto, os autores indicam que o conhecimento da DTR fornece informações úteis em desenho, escala, controle e identificação das características do fluxo e da mistura de um secador contínuo. Um estudo experimental da DTR em escala piloto de um secador de leito vibro-fluidizado contínuo foi conduzido por Han et al. (1991). A distribuição do tempo de residência para o trigo foi estudada utilizando tinta como traçador. O marcador foi injetado na corrente de alimentação durante a operação de estado estacionário. A conclusão do estudo foi que as variáveis que afetam a DTR foram a intensidade da vibração, o fluxo de massa de ar, a vazão de alimentação dos grãos, altura do leito, e tamanho de partícula.

Rhodes et al. (1991) descreveram o processamento do tratamento de dados para determinar o DTR, quando um traçador é usado em um leito fluidizado circulante. Eles pesquisaram possíveis formas de descrever os fenômenos de mistura usando um modelo unidimensional de dispersão. Brod et al. (2004) determinou o DTR num secador vibrofluidizado utilizando o método do estímulo e resposta.

2.1.3 Cinética de Secagem e Modelagem Matemática

Os métodos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente, dependendo do período de secagem considerado. No período de taxa constante de secagem, as transferências de calor e de massa na interface ar-produto governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, enquanto que no período de taxa decrescente, as transferências internas são limitantes (ALONSO, 2001).

O período de taxa constante ocorre no início da secagem com remoção de água não ligada, ou seja, a taxa de evaporação não é dependente da matriz sólida. A taxa de secagem é determinada pelas condições externas ao produto, como a temperatura, velocidade e pressão de vapor do ar e envolve a difusão de vapor de água da superfície do material através de uma camada limite para o meio de secagem. Esse período ocorre até que a água do interior não esteja disponível na superfície do alimento. Park (1987) relata que para o período de taxa constante, as considerações termodinâmicas de evaporação da água na linha de saturação de bulbo úmido são suficientes para predizer a taxa, uma vez que se trata da evaporação de água livre. Em seguida inicia-se o período de taxa decrescente, caracterizado pela redução da taxa de secagem com o tempo, devido à redução da pressão de vapor de água na superfície de secagem; e pela resistência interna à transferência de água ser o controle do processo. Neste período a água se move do centro para a superfície do produto por evaporação e a pequena taxa de secagem pode levar um tempo consideravelmente longo para atingir, assintoticamente o teor de água de equilíbrio (OKOS et al., 2007; CARRÍN e CAPRISTE, 2009). O ponto entre o período de taxa constante e o período de taxa decrescente é denominado por muitos autores como teor de água crítica (KEEY, 1978; OKOS et al., 2007; CARRÍN e CAPRISTE, 2009), entretanto, Keey (1978) ressalta que é conveniente considerá-lo como ponto de inflexão, pois o mesmo não é uma propriedade física do material e varia em função das condições operacionais da secagem.

A taxa de secagem do produto biológico depende das propriedades do mesmo, como por exemplo, densidade, tamanho e teor de água inicial e de equilíbrio sob as condições do processo (SHARMA et al., 2000). Outro fator importante que incide na taxa e no tempo de secagem é a textura do material ao ser seco, incluindo-se a porosidade do mesmo (LUSAS e ROONEY, 2001).

Para expressar a cinética de secagem muitos autores utilizaram a modelagem matemática como ferramenta. No início, esses modelos matemáticos foram usados para representar os sistemas lineares e considerados suficientes apesar de não conseguirem reproduzir o comportamento dinâmico não-linear dos sistemas sob investigação. A maior parte da teoria e dos procedimentos adotados para projetar controladores para tais sistemas eram baseados nestes modelos lineares (COELHO et al., 2002).

Com o avanço tecnológico e industrial, o interesse pela modelagem não-linear e o desenvolvimento de ferramentas matemáticas para entender melhor o comportamento dos fenômenos não-lineares cresceram significativamente, uma vez que as técnicas existentes para modelos lineares não conseguem reproduzir toda a gama de comportamentos dinâmicos dos sistemas reais (COELHO et al., 2002).

Segundo Çengel (2009), a lei de Fick de difusão proposta em 1855 é a relação linear entre a taxa de difusão e gradiente de concentração, isto é, a taxa de difusão de

massa de uma espécie química em um meio estacionário em uma determinada direção é proporcional ao gradiente de concentração local nessa direção.

Crank (1975) apresentou uma solução analítica para a Lei de Fick, considerando a distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica, para uma placa plana infinita (Equação 2.9):

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} exp\left[-(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2}\right]$$
(2.9)

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste de valores experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material. Assim, convenciona-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA, 2009).

Para as condições em que o tempo de secagem é longo e o adimensional de umidade é inferior a 0,6, os termos da Equação 2.10 correspondentes a i > 1 são desprezíveis (Uddin et al., 1990), então a equação (2.9) passa a ser:

$$ln\left(\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e}\right) = ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}$$
(2.10)

Uma importante correlação na secagem de alimentos estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre. A equação 2.11 descreve esta correlação, onde o fator de proporcionalidade K é denominado de constante de secagem.

$$\frac{dX}{dT} = -K(X - X_e) \tag{2.11}$$

A equação exponencial conhecida como Modelo de Page (1949), é frequentemente utilizada no estudo de secagem de produtos agrícolas, por apresentar melhor ajustes experimentais:

$$\left[\frac{(X-X_e)}{(X_0-X_e)}\right] = \exp(-Kt^n) \tag{2.12}$$

Durante a modelagem e a simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, diversos trabalhos correlacionaram satisfatoriamente os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente a temperatura, a umidade relativa e a vazão do ar (MADAMBA et al., 1996; AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999; OZDEMIR e DERVES, 1999; AZZOUZ et al., 2002; KROKIDA et al., 2003; KROKIDA et al., 2004; MOHAPATRA e RAO, 2005).

Heinrich et al. (2002) apresentaram um modelo para ser empregado no processo de secagem em leito fluidizado no qual as bases de observação eram os perfis de temperatura do material e o balanço energético. A modelagem diferencia três intervalos: fase de condensação, 1° e 2° período de secagem. Os resultados foram comentados e o modelo teórico proposto foi descrito como suficiente para representar os dados de secagem.

Oliveira et al. (2006) determinaram a difusividade efetiva de raiz de chicória para cada uma das combinações das variáveis independentes temperatura (42,5 – 112,8 °C) e velocidade do ar (0,35 – 1,41 m s⁻¹), ajustando a Segunda Lei de Fick e o modelo de Page aos resultados. A difusividade efetiva variou de 3,51 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹ até 10,36 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, e a melhor condição de secagem obtida foi a que utilizou a maior temperatura de ar de secagem.

2.1.4 Secagem por radiação infravermelha

O uso de secagem artificial na preservação de produtos agrícolas tem se expandido, criando a necessidade da utilização de métodos mais rápidos e reduzindo a quantidade de energia requerida nesse processo. A secagem através da radiação infravermelha é um método que apresenta menor perda de energia quando comparado com a secagem com ar quente, já que a energia em onda eletromagnética é absorvida diretamente pelo produto (MONGPRANEET et al., 2002). Isso ocorre, pois o material é aquecido rapidamente e de maneira uniforme, já que a energia da radiação infravermelha é transferida ao produto sem aquecer o ar circundante (SWASDISEVI et al., 2007).

A secagem por infravermelho cresceu com o uso em produtos vegetais e produtos marinhos. Em secagem de vegetais, é importante a atenção dada à descoloração e à retenção de nutrientes, assim como a eficiência de secagem (SAKAI e MAO, 2006). Perda de componentes voláteis e mudanças químicas de carotenoides e outros compostos, por exemplo, são causadas pela oxidação e calor durante a secagem. Assim, a secagem por infravermelho pode ser satisfatória para produtos que têm um valor econômico alto devido às suas características nutricionais.

De acordo com Yamazaki et al. (1992), algumas das vantagens da utilização da radiação infravermelha quando comparada com a secagem convencional são: alta taxa de secagem (poupando energia) e distribuição uniforme de temperatura possibilitando uma melhor qualidade do produto após a secagem.

Segundo Dostie et al. (1989), resultados experimentais mostram que o tempo de secagem utilizando a radiação intermitente e convecção contínua, quando comparado com somente secagem convectiva, é de duas a duas vezes e meia menor, mantendo-se uma boa superfície de contato e alta eficiência energética.

A radiação é o modo pelo qual energia (calor) é transferida de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa sem que haja entre tais superfícies um meio interveniente. Este tipo de transferência de calor não necessita de meio material para ocorrer, ou seja, a energia pode percorrer inclusive nos espaços em que há somente vácuo entre os corpos. A energia transferida desta maneira é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas. Portanto, a radiação térmica é um fenômeno ondulatório semelhante às ondas de rádio, luz visível, raios-X, raios-gama etc., diferindo apenas no comprimento de onda.

Todos os corpos quentes (que apresentam temperaturas maiores que zero absoluto) emitem energia radiante, das quais os comprimentos de onda sobrepõem sensivelmente o espectro visível da radiação eletromagnética. Para todos os materiais, a radiação térmica ocorre em uma banda de comprimento de onda entre 0,2 µm e 800 µm,

sendo que os menores comprimentos de onda correspondem às maiores temperaturas de superfície (KEEY, 1972).

A radiação que incide em uma superfície pode ser absorvida, refletida e transmitida. As frações incidentes de energia que são distribuídas destas maneiras são representadas respectivamente pela absortividade (α), refletividade (γ) e transmissividade (τ), sendo que a soma destes valores indica a relativa totalidade de energia incidente, ou seja:

$$\alpha + \gamma + \tau = 1 \tag{2.13}$$

Emissividade (ε), absortividade (α), refletividade (γ) e transmissividade (τ) são as quatro propriedades irradiantes indispensáveis de um material. As magnitudes relativas de α , γ e τ dependem não só do material, sua espessura e acabamento da superfície, mas também do comprimento de onda da radiação aplicada (KREITH, 1969).

Embora a radiação faça parte do fornecimento de calor a um material úmido em um secador convectivo, o uso da radiação como a principal fonte de calor é limitada. Desta maneira, o calor só penetra superficialmente, exceto em certos comprimentos de onda, e irregularmente, a menos que o material seja uniforme (KEEY, 1972).

Das ondas eletromagnéticas, as que se transformam mais facilmente em calor, quando absorvidas pelo receptor, são as infravermelhas, também chamadas ondas de calor. A faixa infravermelha inteira é dividida tipicamente em regiões do infravermelho próximo (0,75 a 3 μ m), infravermelho médio (3 a 25 μ m) e infravermelho distante (25 a 1000 μ m) (DATTA e ALMEIDA, 2005).

Propriedades irradiantes de produtos alimentícios dependem do comprimento de onda da radiação incidente no produto que, por sua vez, depende das características de emissão da fonte da radiação. Assim, é importante conhecer as características das fontes comuns (emissores) usadas para radiação térmica, assim como as propriedades do material (RATTI e MUJUMDAR, 1995). Uma vez que produtos alimentícios submetidos à secagem geralmente contêm grande quantidade de água, a absorção da energia infravermelha pela água é uma variável importante, que afeta a cinética de secagem. Em comprimento de onda curto, a radiação infravermelha é transmitida pela água, enquanto que em comprimento de onda longa essa energia é absorvida na superfície. Dessa forma, operações de secagem em camada delgada apresentam maior eficiência em comprimento de onda longo, enquanto secagem em camada espessa obtém melhor resultado em comprimento de onda curto (NOWAK e LEWICKI, 2004). Keey (1972) afirma, entretanto, que comprimento de onda curto corresponde à maior temperatura na superfície.

Unidades de aquecimento por radiação infravermelha são efetivas para aquecimento localizado. Os aquecedores radiantes transferem energia diretamente para os objetos sólidos. Pouca energia é perdida durante a transferência, devido à baixa absorção de calor radiante pelo ar. Uma grande vantagem para conservação de energia e controle operacional é que os aquecedores infravermelhos se tornam efetivos em pouco tempo, facilitando a aplicação do calor em momentos específicos e intermitentes, se necessário. Aquecedores infravermelhos devem operar em tensões específicas na entrada. Uma pequena redução na entrada causa uma grande diminuição na radiação emitida devido à dependência em quarta potência da temperatura do emissor na energia transferida.

Embora a radiação infravermelha apresente todas as vantagens citadas, também existem limitações. As principais estão relacionadas à pequena penetração no material e ao aquecimento desuniforme (KEEY, 1972; NINDO e MWITHIGA, 2011).

2.1.5 Secagem com pulso HTST combinada com secagem convectiva

Segundo Mujumdar (2007), o setor de pesquisa e desenvolvimento em secagem de sólidos e líquidos tem crescido continuamente durante as últimas três décadas. A intensidade de energia nas operações industriais tem sido a razão principal seguindo a crise de energia dos anos 1970. Se os custos de energia são as guias das inovações em secagem devido às situações globais envolvendo fornecimento de óleo e gás, então haverá maiores pressões em relação ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes em termos de energia, e mesmo no uso de fontes renováveis nas indústrias de operação de secagem. Novos produtos, processos, maiores taxas de produção, regulamentações ambientais mais severas, preocupações mais fortes com a segurança, entre outros fatores, frequentemente demandam melhores performances a menores custos comparados aos secadores tradicionais. Essa necessidade levou a algumas inovações nas tecnologias de secagem.

Para diminuir o consumo de energia, têm sido feitos consideráveis esforços tais como a incorporação de operações múltiplas, aplicação de métodos de aquecimento de alta frequência como micro-ondas para auxiliar na secagem e, combinação de técnicas para melhorar a eficiência. Modos de operação de secagem tais como *Centrifugal Fluidized Bed* (CFB), *Continuos Explosion Puffing Systems* (CEPS), *High Temperature Short Time* (HTST), secagem pneumática e *High Temperature Fluidized Bed* (HTFB) têm contribuído significativamente nesse sentido (JAYAMARAN e DAS GUPTA, 1982).

A condição de secagem HTST (alta temperatura e curto tempo) constitui uma inovação na área de secagem que tem como principal objetivo a redução no tempo total de secagem e, portanto, no custo energético. Ela é normalmente usada em combinação com outros modos de operação, por exemplo, aplicada seguida da secagem a ar quente utilizando-se uma temperatura convencional, entre 50 e 70 °C, que varia conforme a matéria-prima. Durante o período de alta temperatura, observa-se a ocorrência do *thermal puffing*. Há poucos estudos que reportam a aplicação dessa técnica, sendo ainda objeto de pesquisas mais profundas. O efeito do *puffing* promove o aumento do volume de um sólido a partir da expansão ou liberação de um gás (ou vapor) em seu interior, de maneira a criar uma estrutura celular forte ou propiciar a expansão ou ruptura de uma estrutura já existente (PAYNE et al., 1989).

No seu trabalho, Luccas (1996) obteve *puffing* em banana prata em secador fluidizado operando entre 130 e 150 °C, de 6 min a 15 min, com ar quente a 10 m s⁻¹, seguido de uma secagem convencional em secador de bandejas a 70 °C por 5,5 horas e 1,5 m s⁻¹. O autor utilizou imersão prévia em solução de amido gelatinizado, o qual foi responsável pela formação de uma barreira à migração da água interior, de maneira que esta pudesse sofrer mudança de fase com o aumento da temperatura e, assim, promover a expansão e o aumento da porosidade. As condições ótimas encontradas pelo autor foram pulso HTST a 130 °C por 12 min seguido de uma secagem posterior a 70 °C por 5,5 horas. O produto final apresentou baixo teor de água, alto índice de reidratação, cor atraente, baixa densidade e crocância. Houve expansão do volume, devido ao aumento da pressão interna, e a formação de uma estrutura porosa (efeito do *puffing*).

Visando reproduzir os resultados encontrados por Luccas (1996), Cardoso (1998) estudou o processo de secagem de banana-prata em leito vibro-fluidizado utilizando um pré-tratamento das amostras em soluções infiltrantes, de modo a fortalecer a estrutura celular, aliado a um pulso de pré-secagem HTST nas temperaturas de 130 e 150 °C e tempos de 13 e 8 minutos, respectivamente. Após o pulso HTST o produto passou para uma secagem convencional a 70 °C com velocidade do ar de 3 m s⁻¹. A autora verificou que ambas condições de pulso HTST promoveram a formação de uma estrutura porosa, o que resultou num produto com boa expansão e alta capacidade de absorção de água.

Nas pesquisas desenvolvidas por Varnalis et al. (2001a,b) foram estudados o mecanismo de secagem de cubos de batata submetidos a um pulso HTST em leito fluidizado (200 °C por 50 s) seguido de uma secagem convencional (ar quente) a 90 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m s⁻¹. Os autores avaliaram a influência do branqueamento (feito em água em ebulição) e das condições de secagem no volume dos cubos expandidos e na formação de uma camada parcialmente seca na superfície dos mesmos, necessária para promover a expansão (*puffing*). Através de testes de penetração (que fornece dados da força necessária para penetrar na amostra), os autores verificaram que o branqueamento aumenta a plasticidade dos cubos permitindo que eles expandam enquanto ocorre o *puffing*, enquanto que a secagem leva a uma estrutura mais rígida. Além disso, o branqueamento poderia ter outro efeito no *puffing*, resultando num decréscimo da permeabilidade do vapor da camada parcialmente seca das amostras, provavelmente devido à gelatinização do amido. Isso levaria a um aumento no volume dos cubos porque o vapor não consegue escapar. Portanto, os autores concluíram que o *puffing* é regulado tanto pela formação dessa camada parcialmente seca, quanto pela rigidez da estrutura.

Foi estudado o processo de secagem de banana nanica por Hofsetz (2003) utilizando um pulso HTST seguido de uma secagem convencional a 70°C de maneira a encontrar uma condição de secagem que fornecesse um produto crocante. As condições do pulso HTST basearam-se no trabalho de Luccas (1996) e variaram de 130 a 150°C, com o tempo de 9 a 15 min, com velocidade do ar de secagem igual a 3 m s⁻¹. A característica de crocância foi analisada através de medidas sensoriais (teste de aceitação) e instrumentais (curvas força deformação). A autora obteve banana crocante para as temperaturas e tempos de pulso HTST mais elevados (150 e 140 °C, 15 min e 12 min, respectivamente). O produto final, seco e crocante, apresentou boas características de reidratação, um indicativo da formação de uma estrutura altamente porosa, fator comprovado através da boa aceitação do produto final em termos sensoriais, o que foi confirmado pelas medidas instrumentais. Os resultados mostraram uma direta relação entre as duas análises: as amostras que apresentaram maior nota de aceitação sensorial (em relação à crocância) foram as amostras que apresentaram uma menor amplitude de força (menor força para fraturar) e apresentaram um maior número de picos de ruptura nas curvas força-deformação, característicos de alimentos crocantes.

O estudo do efeito de um pré-tratamento por secagem HTST em leito fluidizado no processo de secagem convencional de fatias de batata doce *in natura* foi desenvolvido por Antonio (2006). As condições do leito fluidizado foram temperatura do ar de secagem variando de 110 a 160 °C, tempo de processo de 5 a 25 min e uma velocidade do ar de secagem de 15 m s⁻¹ na etapa HTST. A secagem convectiva das amostras foi realizada em secador de leito fixo com duas temperaturas do ar de secagem (50 e 70 °C) e velocidade de 1,5 m s⁻¹. A autora obteve como melhor resultado as condições de 160 °C por 22 min (pulso HTST) e 70 °C por 20 min (secagem convectiva), com o produto final apresentando um maior aumento de volume (efeito do *puffing*), uma estrutura altamente porosa, boa capacidade de reidratação e um bom nível de aceitação sensorial pelos consumidores em relação ao aroma, sabor e textura.

O efeito de pré-tratamentos na secagem convencional de maçãs utilizando um secador de bandejas foi estudado por Schultz et al. (2007). Os pré-tratamentos utilizados foram imersão das amostras em solução de amido a 2%, um pulso HTST (de 120 a 140°C) por 30 minutos e, por fim, a combinação desses dois fatores. Dos pré-tratamentos estudados, os autores verificaram que o pulso HTST acelerou a secagem e adicionou um período de secagem decrescente. O pré-tratamento com amido aumentou a resistência à transferência de calor e massa, o que levou a um aumento do tempo de secagem. Segundo os autores, isso aconteceu devido à rápida secagem na superfície externa

formada pelo amido (superfície das amostras), que resultou numa camada rígida e pouco permeável à transferência de massa durante a secagem.

Foram desenvolvidos *snacks* de batata através da secagem HTST no trabalho de Nath et al. (2007). Eles pesquisaram os efeitos da temperatura de *puffing* (175-275 °C), o tempo de *puffing* (15-75 s), a umidade inicial (30-40 %) e a velocidade do ar (2,4-4,8 ms⁻¹) sobre atributos de qualidade tais como a razão de expansão, dureza, perda de ácido ascórbico e aceitação geral do produto final. O objetivo do trabalho foi otimizar os parâmetros do processo HTST para o desenvolvimento de *snack* de batata, através da metodologia de superfície de resposta. As qualidades do produto otimizado, em termos de razão de expansão (4,7 vezes), dureza (1120,83 g) e perda de ácido ascórbico (17,53 % em base seca), foram obtidas a uma temperatura de ar de 235,5 °C, tempo de retenção de 51,11 s, teor de água inicial de 36,74 % e velocidade do ar de 3,99 m s⁻¹. Os valores preditos pelos modelos desenvolvidos foram próximos aos valores obtidos experimentalmente.

Oliveira (2007) avaliou a influência da composição química da banana nanica sobre as características de crocância e cor do produto final, através de secagem utilizando a etapa HTST a 150 °C. O indicador do ponto final do processo foi a atividade de agua (a_w) da banana crocante inferior a 0,3. A operação de secagem que produziu a banana crocante de melhor qualidade foi composta pela seguinte sequência de etapas: HTST (150°C por 18 min) + redução gradual de temperatura (50 min) + secagem a 70 °C. O tempo total dessa operação até que o produto final atingisse a_w<0,3 variou de 7-9 h, e os valores obtidos para a_w final foram entre 0,18 e 0,29.

2.2 CHICÓRIA

Na classificação da chicória (*Cichorium intybus* L.), ela é colocada como membro da *Asteraceae* (*Compositae*). O gênero contém sete espécies nativas da Europa, do Mediterrâneo e Etiópia (MABBERLEY, 1997). Escarola (*C. endivia* L.) é uma espécie cultivada para produção de folhas. Alzugaray e Alzugaray (1983) descrevem a chicória; também conhecida por almeirão, chicória amarga ou escarola; como uma planta vivaz e de altura média. Suas folhas são lanceoladas e dentadas, seus talos pubescentes e suas flores apresentam uma cor azul viva.

A chicória provavelmente foi trazida em cultivo no Mediterrâneo. Os europeus desenvolveram as raízes de chicória de tamanho uniforme, forma e tempo de maturação que são usadas como um aditivo substituinte de bebidas (DAVIDSON, 1999). Desde o final do século XVIII, o "café chicória" tem sido preparado em escala industrial, sendo bastante consumido na Europa (VAN LOO et al., 1995). As variedades cultiváveis de chicória se adaptam bem ao clima temperado ou frio. Em nossa região, podem ser plantadas durante o ano todo, porém, desenvolvem-se melhor no inverno. As plantas são colhidas no outono e na primavera (ALZUGARAY e ALZUGARAY, 1983; GALVÃO, 1995).

O estudo agrotecnológico da espécie *Cichorium intybus* L. verificou que, nas condições climáticas da região de Campinas - SP, a chicória pode ser cultivada tanto na primavera quanto no outono. Entretanto, a produtividade (kg m⁻²) se mostrou maior na safra de outono (FIGUEIRA, 2000).

A chicória tem sido utilizada como alimento por humanos desde os primórdios. Os egípcios antigos (4000 a.C.), os gregos (450 a.C.) e os romanos utilizavam a chicória como alimento, sendo consumida crua, cozida ou torrada. Também era considerada como remédio contra diversos males (VAN LOO et al., 1995). As folhas de chicória podem ser consumidas como hortaliças de folhas verdes ou ainda como hortaliças mais finas, produzidas a partir dos seus brotos (endívia) (FIGUEIRA, 2000).

Na medicina caseira, as folhas de chicória são aplicadas como estimulantes da secreção gástrica e como redutores da taxa de glicose do sangue (GALVÃO, 1995). Em experimentos médicos, extrato da raiz foi usado para baixar os níveis de triglicérides e os de colesterol em ratos (KAUR et al., 1989; UBEROI, 1991). A atividade hepato-protetora também tem sido associada com chicória (GILANI et al., 1993).

O látex da raiz seca de chicória é conhecido por apresentar propriedades tônicas, depurativas, diuréticas e laxantes (GALVÃO, 1995). As raízes de chicória apresentam sabor particularmente amargo, provocado pela presença de um carboidrato de reserva chamado inulina. A inulina foi identificada como um ingrediente capaz de substituir a gordura ou o açúcar, com baixa contribuição calórica (ROBERFROID et al., 1993; APPLIED TECHNOLOGY, 1993), passando a ser empregada como ingrediente na produção de alimentos conhecidos no mercado como *light, no fat* ou *low fat*. Por atuar

junto ao organismo de maneira similar às fibras dietéticas, a inulina, presente nas raízes de chicória, pode ainda ser utilizada na produção de alimentos funcionais. Atualmente não existe uma produção comercial das raízes como uma fonte de inulina no Brasil, onde a chicória é cultivada apenas para a produção de folhas (PARK et al., 2007).

2.3 INULINA

2.3.1. Estrutura química

A inulina é um carboidrato pertencente ao grupo de polissacarídeos chamados frutanas, composto por uma cadeia principal de unidades de frutose, unidas por ligações β -(2,1)-frutofuranosídicas, com uma unidade de glucose terminal. Sua fórmula pode ser descrita como GFn, onde G representa a molécula de glucose, F a molécula de frutose e n o número de unidades de frutose (SILVA, 1996; VAN LOO et al., 1995; ROBINSON, 1995).

Os fruto-oligossacarídeos (FOS) são definidos como polímeros de D-frutose, terminando com uma molécula de glicose, de forma que a inulina pode ser classificada como um fruto-oligossacarídeo (SILVA, 1996).

O teor de inulina nas raízes de chicória, bem como o grau de polimerização dos mesmos, é variável com uma série de fatores, tais como: época de plantio, época de colheita, espaçamento entre plantas, período de armazenagem, dentre outros. A inulina extraída de raízes de chicória é uma mistura de oligômeros com diferentes graus de polimerização, comum comprimento médio de cadeia de aproximadamente nove.

2.3.2 Processos de obtenção de inulina

De acordo com Laurenzo et al. (1999), os métodos convencionalmente utilizados para extrair inulina de produtos vegetais, incluem as seguintes etapas: lavagem dos tubérculos; fatiamento ou moagem dos tubérculos; extração de inulina com água; tratamento do extrato com dióxido de carbono e cal; filtragem e recuperação da inulina por precipitação ou evaporação.

O estudo feito por Van Loo et al. (1995) sobre a presença de inulina em produtos vegetais que fazem parte da dieta do oeste europeu, utilizaram a extração por difusão em água quente. Com a finalidade de prevenir contra a hidrólise por enzimas vegetais

liberadas durante o processo de extração, água destilada fervente foi adicionada a uma amostra de produto vegetal macerada, na proporção mínima de 1:5 (amostra:água). A extração foi realizada em banho-maria a 75 °C durante 1 hora, sob agitação constante.

Para se adicionar inulina em produtos alimentícios, geralmente há um tratamento ou purificação desta inulina. Uma razão para a purificação ou tratamento é que um sabor amargo é creditado às plantas que são fonte de extração da inulina, resultando em problemas de palatibilidade destes produtos. Na chicória, acredita-se que este sabor seja proveniente das altas concentrações de sesquiterpeno e lactonas. Também se acredita que um controle mais exato das quantidades adicionadas pode ser obtido com o produto puro. Vários procedimentos para purificação da inulina têm sido relatados. Geralmente, incluem as etapas de colheita e corte, de extração e de hidrólise com ácidos ou enzimas (ANANTHARAMAN et al., 1999).

O processo para obtenção de um concentrado de inulina utilizando a técnica de abaixamento de temperatura e posterior separação física foi proposto por PARK et al. (2000). No processo, as raízes de chicória são lavadas, descascadas e picadas. Em seguida, as raízes sofrem o processo de extração. O extrato obtido é então filtrado e posteriormente concentrado. O extrato concentrado é levado a uma câmara de congelamento (temperaturas entre –8 e –50 °C), onde ocorre decantação dos fruto-oligossacarídeos de inulina pelo abaixamento de temperatura. Após descongelamento dos extratos, é feita a separação física entre as fases sobrenadante (líquida) e precipitada (semelhante a um creme), obtidas pelo abaixamento de temperatura do extrato.

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

2.4.1. Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, porosidade e encolhimento.

A porosidade é normalmente definida como a razão entre o volume do poro (ou dos espaços vazios) e o volume da amostra (massa sólida da amostra por unidade de volume). Mas esta determinação não é uma tarefa simples, uma vez que depende do conhecimento do volume real da matriz do sólido úmido, parâmetro de difícil determinação experimental (SERENO et al., 2007). A maior causa de erro na medida ocorre quando a amostra apresenta algum conteúdo de gases ou vapores, o que ocasiona

uma variação em seu volume ou densidade. Para evitar que isso aconteça, a amostra deve estar completamente seca. Desse modo, os gases atmosféricos e os vapores ainda existentes nos espaços vazios da amostra devem ser removidos através de uma secagem prévia, pois poderão interferir nos resultados da análise (WEBB e ORR, 1997).

Uma das maneiras de se determinar a porosidade é através do uso de picnômetros a hélio (KROKIDA e MAROULIS, 1997), picnômetro de mercúrio (KARATHANOS et al., 1993) ou medida de volume de amostras moídas (NIETO et al., 2004).

A porosidade é uma das principais características para determinar a qualidade de um alimento seco. Esta desempenha um papel importante na reidratação de materiais secos, seu manuseio e aspectos relativos à embalagem. A extensão do encolhimento influencia as mudanças resultantes da porosidade durante a secagem. Alterações no encolhimento e porosidade durante a secagem a ar de frutas e vegetais foram pesquisadas por Lozano et al. (1980, 1983). Na pesquisa feita por Lozano et al. (1980), foi demonstrado no tecido da maçã que tanto o encolhimento global da amostra quanto o encolhimento celular influem no aumento da porosidade com a redução do teor de água. Porosidade em frutas e legumes é aumentada durante a secagem, dependendo do teor de água inicial, composição e tamanho, bem como o tipo de secagem (SARAVACOS, 1967).

Os efeitos de métodos de secagem sobre o encolhimento e porosidade de frutas e verduras foram relatados por Krokida e Maroulis (1997) e Krokida e Philippopoulus (2005). Os autores mencionam que o encolhimento depende do método de secagem e do material. Valores próximos à unidade para materiais secos ao vácuo, convencional e micro-ondas, e valores muito menores para materiais secos com liofilização. Menos de 10% do encolhimento é normalmente esperado no produto final após o processo de liofilização em comparação com 80 a 90% quando seco ao ar (RATTI e MUJUMDAR, 2005).

Para a determinação do encolhimento tem que ser levado em conta as leis mecânicas, a tensão no material e as deformações durante a desidratação (RATTI, 1994). O encolhimento durante a secagem acontece simultaneamente com a difusão de água, podendo afetar a remoção do teor de água; desta forma, este parâmetro tem uma influência na taxa de secagem e na textura de frutas e hortaliças desidratadas (HATAMIPOUR e MOWLA, 2002). Vários estudos de modelagem do encolhimento durante a secagem têm sido feitos nos últimos anos por diversos pesquisadores: Lozano et al. (1980, 1983) desenvolveram um modelo geral para correlacionar a perda de água de frutas e hortaliças com base nas mudanças de encolhimento; Ratti (1994) propôs que as características de encolhimento de batatas, maçãs e cenouras não dependem só do teor de água, mas também das condições de operação e da geometria da amostra; Wang e Brennan (1995) relataram um grande grau de encolhimento na secagem de batatas sob temperaturas baixas do ar de secagem; Katekawa (2006) verificou que fatias de banana encolhem linearmente, mas essa dependência linear não é observada para baixos teores de água, e que tanto o endocarpo quanto o mesocarpo da fruta apresentam diferentes comportamentos em relação à transferência de massa e ao encolhimento; entre tantos outros trabalhos.

É evidente que existe uma forte relação entre o teor de água e as mudanças de encolhimento e porosidade que acontecem durante a secagem. Entretanto, a redução do volume e a característica de porosidade de um alimento nem sempre apresentam uma relação única e direta com a quantidade de água evaporada. Essas propriedades também dependem do tipo de material, das características do tecido celular e de sua estrutura, além das condições de processo (HATAMIPOUR e MOWLA, 2002).

2.4.2. Atividade de água

O teor de água de um alimento é frequentemente expressado em termos de atividade de água, que é definida como a pressão parcial de vapor de água do material dividida pela pressão de vapor da água pura, sob a mesma temperatura.

A atividade de água é uma das propriedades mais importantes para o processamento, conservação e armazenamento de alimentos. Ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e consequentemente sua disponibilidade para agir como solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (LABUZA, 1995).

Quando a atividade de água diminui, a habilidade de crescimento dos microrganismos é reduzida (Figura 2.4). Em geral, as bactérias requerem uma maior atividade de água ou teor de água para crescerem do que os fungos. No entanto, há um grande intervalo de a_w para o crescimento de todos os organismos. Entretanto, os organismos de maior importância na preservação de alimentos incluem muitos cujo crescimento pode ocorrer a níveis mais baixos de a_w. São os denominados halófilos, xerófilos e osmófilos. Os primeiros, que são geralmente bactérias, são incapazes de se desenvolver em meios sem cloreto de sódio e frequentemente exigem altos teores dessa substância para seu desenvolvimento. Os xerofílicos, normalmente bolores e leveduras, se desenvolvem mais velozmente sob condições relativamente secas. E, por fim, os osmofílicos, que são capazes de crescer em ambientes de alta pressão osmótica e geralmente se referem a leveduras tolerantes ao açúcar. Todos estes microrganismos alteram alimentos com a_w entre 0,85 e 0,60, tais como farinhas, cereais e vegetais desidratados.



Fonte: BOBBIO(1992).



De acordo com Berg (1986), a atividade de água constitui-se no único parâmetro que pode ser usado como um guia confiável para prever a degradação de alimentos ou para determinar o ponto final da secagem necessário para garantir um produto estável. Dois métodos são geralmente utilizados para a medida da atividade de água: métodos gravimétricos e manométricos (ou higrométricos). Os primeiros envolvem medidas da amostra após atingir o equilíbrio, e nos segundos, as medidas são tomadas pela atmosfera em equilíbrio com a amostra. Os métodos gravimétricos são geralmente mais precisos, mas demandam maior tempo, comparados com os manométricos.

2.4.3 Microestrutura de partículas

Além das condições do processo de secagem é importante ter em conta a qualidade do produto final. Essa qualidade pode ser avaliada estudando a microestrutura que, segundo Aguilera e Stanley (1990), é definida como a organização dos componentes de um alimento e suas interações. Ao sofrer processamento, a microestrutura do alimento é destruída e reconstruída, o que poderia ser entendido como uma série de operações de reestruturação e reorganização.

Em vários estudos, tem-se verificado que as membranas celulares são particularmente suscetíveis a danos estruturais durante o processo de secagem (SENARATNA e McKERSIE, 1986; GUIMARÃES et al., 2002). Os estudos de microscopia e análise de imagem ajudam a quantificar as mudanças da estrutura do alimento durante a secagem e podem, inclusive, melhorar a compreensão dos mecanismos e mudanças nos fatores de qualidade, principalmente aqueles relacionados à textura do alimento. Um exemplo disso é o estudo da microestrutura de alimentos porosos que resulta na habilidade de controlar processos para que promovam características sensoriais desejáveis, tais como crocância e fragilidade (AGUILERA e STANLEY, 1990). Se comparada com as medidas usuais de características geométricas, como o método de deslocamento de volume, a técnica de análise de imagem permite uma definição mais precisa do volume, superfície e/ou espessura de uma amostra de um alimento, além de fornecer informação sobre sua aparência, como a mudança de cor ao longo de um processo de secagem (AGUILERA e STANLEY, 1990).

A análise de imagem é um método não-intrusivo para medir e comparar características estruturais das imagens captadas. Pode ser feita usando tanto a imagem captada por um microscópio, quanto, no caso de alimentos com macro poros, usando a imagem captada diretamente de uma câmera fotográfica digital com lentes especiais

para esta análise (BARRET, 2002). Uma vez feita a aquisição da imagem, parte-se para a segmentação da mesma através de técnicas específicas. A imagem segmentada pode então ser representada como uma fronteira ou uma região. A representação de fronteira é adequada para análise das medidas morfológicas que podem ser rapidamente extraídas, tais como tamanho, forma, encolhimento, parâmetros geométricos. A representação por região é usada para quantificar elementos estruturais e defeitos, como bolhas, rachaduras e a formação de poros. O método pode ainda ser utilizado para determinar as mudanças de coloração que acontecem nos materiais quando submetidos à secagem. Essa informação obtida pelo microscópio é quantificada através do uso de *softwares* específicos para o processamento da imagem captada (AGUILERA et al., 2003; BROSNAN e DA-WEN, 2004).

Na microscopia eletrônica de varredura, os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários e de elétrons retro espalhados, ao passo que na microssonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios X característico, resultante do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa de elementos químicos presentes em um micro volume (GOLDSTEIN, 1992).

Na pesquisa feita por Saath et al. (2010), analisaram-se o efeito de diferentes métodos de secagem na manutenção da integridade da parede celular e da membrana plasmática de café despolpado e natural, buscando determinar as condições e o momento em que ocorrem as rupturas microscópicas.

A estabilidade é outro critério importante na preservação de alimentos. Materiais que se encontram em equilíbrio termodinâmico são estáveis, isto é, existem no estado físico determinado pelas condições de temperatura e pressão do ambiente. Entretanto, a maior parte dos materiais biológicos é composta por um grande número de componentes e eles frequentemente existem em um estado amorfo de não-equilíbrio termodinâmico. Esses materiais são geralmente metaestáveis, de modo que sofrem transições de fase e de estado em vários processos e durante a armazenagem (ROOS, 1995).
2.4.4. Capacidade de Reidratação

A reidratação é um processo complexo, no qual o produto seco entra em contato com água ou vapor e tem como objetivo restaurar as propriedades do produto fresco. Na fase inicial da reidratação, a água entra rapidamente e então a taxa decresce gradualmente até a umidade no interior do alimento alcançar o equilíbrio, quando a água preenche todos os poros e o produto ganha uma determinada porcentagem da seu teor de água inicial (LEE et al., 2006).

Foi estudada a propriedades de reidratação de cogumelos secos por Torringa et al. (2001) e observaram que os produtos pré-desidratados osmoticamente com solução de NaCl e posteriormente secos em micro-ondas apresentaram melhor reidratação que os sem pré-tratamento osmótico e os secos em ar quente.

Foram utilizados dois modelos da literatura por Bilbao-Sáinz et al. (2005) para explicar os dados observados durante a reidratação de maçãs secas e para predizer o comportamento dependente das diferentes condições de secagem convectiva combinada com micro-ondas. Os autores observaram que a equação de Peleg, (1988) descreveu bem a cinética e que para maiores potências de micro-ondas, melhor foi a capacidade de reidratação do produto seco (equação 2.14).

$$MC(t) = MC_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$
(2.14)

2.4.5 Textura

A textura é um dos principais atributos utilizado em alimentos frescos e industrializados ou processados, para avaliar a qualidade do produto e aceitabilidade. Atributos de textura também são utilizados ao longo da cadeia de valor alimentar para monitorar e controlar a qualidade, que vão desde a decisão sobre a época da colheita para avaliar os impactos do manejo pós-colheita e operações de processamento, a vida de prateleira do produto, a preferência do consumidor e aceitabilidade (CHEN e OPARA, 2013).

O manejo pós-colheita e as condições de operação, tais como a temperatura de armazenamento geralmente têm efeitos distintos sobre as propriedades de textura dos

alimentos (FARAG et al., 2009; KONOPACKA e PLOCHARSKI, 2004; LANA et al., 2005). As propriedades de textura de um alimento compõem um grupo de propriedades físicas que derivam da estrutura de elementos e estão relacionadas à deformação, desintegração e fluxo do alimento sob uma força, e são medidas objetivamente em termos de massa, tempo e distância (BOURNE, 2004).

De acordo com Clydesdale (1991), medidas quantitativas da importância relativa da textura em categorias específicas de alimentos devem ser desenvolvidas e relacionadas ao produto. Intuitivamente e, baseando-se nos dados limitados disponíveis, o autor assume que a importância da textura na avaliação da qualidade geral de um alimento irá variar dependendo do seu nível de aceitação. Quando a textura é pobre e defeituosa, seu efeito sobre a qualidade geral será bastante expressivo, especialmente em produtos crocantes.

Quanto à tolerância da textura, em alguns produtos como queijo *cottage*, ela pode ser bem grande, enquanto que com outros produtos como batata frita, essa tolerância pode ser pequena. Em geral, produtos que são valorizados pela sua crocância estão associados a uma estreita variação de tolerância na textura (SZCZESNIAK, 2002).

Wilkinson et al. (2000) realizaram testes de compressão de maçã, banana, cenoura e batata sob força constante. O efeito do teor de água sobre os parâmetros elásticos, a tensão e a deformação máxima, também foi pesquisado. A tensão máxima apresentou um mínimo quando a proporção era de 1,8 kg de água para cada kg de matéria seca, enquanto que a deformação máxima aumentou com a redução do teor de água. Então, os autores concluíram que até 1,8 kg de água/kg matéria seca, a desidratação causa um amolecimento da parede celular resultando numa redução da tensão máxima. Abaixo desse valor, ocorrem sérios danos que a aumentam, possivelmente devido às mudanças físico-químicas irreversíveis, tais como o aumento da cristalinidade.

Uma grande variedade de metodologias destrutivas e não destrutivas e instrumentos relevantes foram usados para medir a textura dos alimentos frescos e processados. Dentro dos métodos destrutivos, o teste de compressão e teste de perfuração são os mais comuns para medir as propriedades de textura. Os alimentos de teste podem ser sólidos ou semi-sólidos. Existem inúmeros instrumentos de medição de tensão disponíveis, sendo que o mais utilizado é o analisador de textura TAXT2, o qual mede a força e as propriedades de textura de produtos alimentícios através da deformação e da força necessária para alcançar a deformação (SHARMA et al., 2000).

2.5 ISOTERMAS DE SORÇÃO

As isotermas de sorção são as curvas de equilíbrio, compostas pelas umidades de equilíbrio do material correspondentes às umidades relativas ou à atividade de água para uma dada temperatura. Conhecendo as isotermas de sorção, é possível atingir um teor de água de equilíbrio para a conservação do produto, a uma temperatura e umidade relativa dada. Estas curvas de sorção são indispensáveis para determinar o teor de água final necessário para estabilizar o produto (ALONSO, 2001).

Para um produto, há uma diferença entre as isotermas de sorção quando determinadas durante a hidratação (adsorção) e quando determinadas durante a desidratação (dessorção). A esta diferença dá-se o nome de histerese (Figura 2.5).



FIGURA 2.5. Histerese das isotermas de sorção

Pela facilidade de quantificação da isoterma, existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para maioria das isotermas, os polinômios de segundo grau têm demonstrado serem suficientes. Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos, na maioria empírica, são úteis no conhecimento das características dos produtos (PARK et al., 2001) e são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1. Modelos para ajustes de isotermas de sorção.							
NOME DO MODELO	MODELO						
LANGMUIR (LANGMUIR, 1918)	$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{Da_w}{1 + Da_w}$						
BET (BRUNAUER, EMMETT e TELLER) (BRUNAUER et al., 1938)	$X_{eq} = \frac{(X_m F a_w) \left(1 - (h+1)a_w^h + ha_w^{h+1}\right)}{(1-a_w)(1+(F-1)a_w - F a_w^{h+1})}$						
GAB (GUGGHENHEIM,ANDERSON e de BOER) (PARK e NOGUEIRA, 1992)	$X_{eq} = \frac{X_m Q L a_w}{(1 - L a_w)(1 - L a_w + Q L a_w)}$						
OSWIN (CHINNAN e BEAUCHAT, 1985)	$X_{eq} = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^B$						
HENDERSON	$X_{eq} = (-\log(1 - a_w)/J)^{(1/m)}$						

No modelo de Langmuir, termodinamicamente, a posição simplista da consideração de condição de equilíbrio aplicada a água livre fornece a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Brunauer et al. (1938), ampliando o conceito de Langmuir (1918) e baseando-se na suposição que a água se adsorve na forma de camadas, observaram que a primeira camada se fixa por adsorção sobre pontos uniformemente localizados e as camadas seguintes se fixam entre si mediante pontes de hidrogênio, geraram o modelo de BET. Esta equação tem dois importantes casos especiais:

• Quando h= 1, ela fica reduzida à equação de Langmuir;

• Quando h tende a infinito, ela pode ser apresentada na forma linearizada, que é a forma mais conhecida da equação de BET.

No modelo de GAB; Gugghenheim (1966), Anderson (1946) e de Boer (1953) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação triparamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9. Neste modelo, as constantes L e Q de adsorção, são relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, num dado sítio de sorção. Park e Nogueira (1992) mostraram a conceituação do modelo de BET, chegando até a sua extensão, comumente referida como modelo de GAB. Concluíram que por apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m, L e Q) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de h estimado, o modelo de BET na sua forma original apresenta uma maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais. O modelo de Oswin baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal (CHINNAN e BEAUCHAT, 1985).

2.6 TRANSIÇÕES DE FASE

A mudança de um sólido cristalino a líquido ocorre a uma temperatura determinada, a temperatura de fusão, quando os componentes passam para o estado líquido aumentando a mobilidade das moléculas. Esse processo é conhecido como uma transição de fase de primeira ordem (MARTINEZ et al., 1998). Entretanto, a mudança de estado, característica do estado amorfo, ocorre na temperatura denominada temperatura *de transição vítrea* (Tg). A Tg envolve a transição de um estado amorfo sólido-vítreo para um estado amorfo de semi-líquido-gomoso, conhecido como estado gomoso (ROOS, 1995). No estado vítreo as moléculas apresentam um grau de imobilidade semelhante aos sólidos cristalinos, enquanto que no estado gomoso a mobilidade molecular aumenta significativamente e o material adquire propriedades mecânicas tipicamente viscoelásticas. Essa passagem do estado vítreo ao gomoso, denominada transição vítrea, constitui-se o fenômeno mais importante de uma transição de fase de segunda ordem (MARTINEZ et al., 1998). Em termos termodinâmicos, a transição vítrea é denotada por uma mudança no volume, por uma descontinuidade no coeficiente de expansão térmica e por uma descontinuidade na capacidade calorífica (SLADE e LEVINE, 1995; MARTINEZ et al., 1998). A Figura 2.6 esquematiza, sobre um hipotético eixo de temperatura, os estados mais frequentes em que podem encontrar-se os constituintes mais importantes dos alimentos sólidos (carboidratos, proteínas, água e lipídeos) e suas correspondentes transições de fase.



Fonte: Martinez et al. (1998).



A origem da abordagem da ciência dos polímeros no estudo das transições de fase data de 1950, quando Fox Jr. e Flory (1950) estudaram a transição vítrea e relacionaram a mesma às propriedades do poliestireno. Entretanto, a primeira descrição do fenômeno da T_g em alimentos e a sua importância nas interações estruturais água-alimento foi feita por White e Cakebread (1966), ao reportarem as amplas implicações do estado amorfo de não-equilíbrio, vítreo ou gomoso, aos estados de qualidade, segurança e estabilidade de armazenamento de uma série de sistemas alimentares constituídos por substâncias com efeito plasticizante. Mas foi somente na década de 1980 que houve um significativo aumento no estudo e aplicação desse conceito, quando um crescente número de publicações abordou a T_g e houve um reconhecimento de uma série de elementos-chave estudados na ciência dos polímeros e de sua relevância no comportamento de uma ampla faixa de diferentes tipos de alimentos como, por exemplo, alimentos com teor de água intermediário, baixo teor de água, congelados, a base de amido, gelatina, glúten, entre outros (SLADE et al., 1993; SLADE e LEVINE, 1995). A partir dessas pesquisas é que agora vários estudos têm ilustrado o uso da T_g e demonstrado a utilidade tecnológica dessa abordagem para entender e explicar os fundamentos relacionados à estrutura do alimento e predizer a qualidade, segurança e estabilidade dos mesmos.

A importância do conhecimento da T_g nos alimentos é justamente obter informações que permitam um processamento, embalagem e armazenamento adequados ao produto. No caso de alimentos desidratados e congelados que sejam armazenados acima de sua T_g, ocorre uma variação brusca nas suas propriedades físicas, como a perda da estrutura e firmeza (WHITE e CAKEBREAD, 1966; TELIS e SOBRAL, 2001). Assim, pelo valor da T_g, pode-se prever como será o material à temperatura ambiente, ou seja, se será vítreo ou gomoso.

Uma vez que a temperatura aumente acima da T_g, muitas das propriedades físicas dos alimentos alteram-se subitamente. Como uma transição de fase de segunda ordem, a transição vítrea não envolve calor latente, mas é detectada pela variação das propriedades dielétricas (aumento da constante dielétrica), mecânicas (mudanças nas propriedades viscoelásticas) e termodinâmicas (entalpia, aumento no volume molecular livre, aumento da capacidade calorífica, aumento do coeficiente de expansão térmico) (ROOS, 1995; ROOS et al., 1996).

Para determinar a T_g, é necessário fazer uma análise previa termogravimétrica (TGA) a qual é caracterizada pela variação da massa de uma amostra (perda ou ganho) em função da temperatura ou tempo, em um processo contínuo, resultando em uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, oxidação) (HAINES, 1995; MATOS e MACHADO, 2004).

Os métodos termogravimétricos mais utilizados são:

- Isotérmico: a massa da amostra é monitorada em função do tempo à temperatura constante (Figura 2.7a).
- Semi-isotérmico: a amostra é aquecida até a massa constante a cada série de aumento de temperatura (Figura 2.7b);
- Dinâmico ou não isotérmico: a redução da massa é registrada continuamente com o aumento da temperatura (Figura 2.7c).



Fonte: MOTHÉ e AZEVEDO (2009).

FIGURA 2.7. Esquema dos termogramas obtidos pelos diferentes métodos termogravimétricos (a) isotérmico, (b) semi-isotérmico, (c) dinâmico.

2.7 CONSUMO ENERGÉTICO

A implementação de um programa interno de conservação de energia constitui o primeiro passo para o uso racional da energia dentro de uma unidade de processamento de produtos agrícolas. Um programa bem elaborado permite otimizar o uso da energia, evitando ações isoladas e duplicação de esforços que tendem a perder o seu efeito no decorrer do tempo (REINATO et al., 2002). A operação de secagem é, sem dúvida, a que mais consome energia no processo de produção agrícola, podendo representar até 50 % de sua demanda. As operações de secagem e armazenamento, quando conduzidas corretamente e com equipamentos eficientes, contribuem significativamente para a redução dos custos operacionais, pela economia de energia que propiciam (LOPES et al., 2000).

Os secadores mecânicos necessitam de energia para movimentar o produto, aquecer e movimentar o ar, o que apresenta custos bem mais elevados; no entanto, um manejo correto maximiza a eficiência do secador contribuindo, assim, para redução do custo final de secagem. O custo da energia utilizada na secagem depende da temperatura de secagem, do fluxo de ar, do tempo de secagem e do preço do combustível (REINATO et al., 2002).

A secagem intermitente tem sido reportada como uma técnica inovadora na secagem de alimentos em termos de eficiência energética e qualidade do produto. Putranto et al. (2011) observaram que a secagem intermitente diminui o tempo efetivo de secagem e utilização do ar de secagem, reduzindo assim o consumo de energia. Kumar et al. (2014) fez uma revisão crítica da secagem intermitente em alimentos. O objetivo do trabalho foi discutir, analisar e avaliar os recentes avanços na secagem intermitente de alimentos quanto ao consumo energético e à qualidade dos produtos, considerando diferentes tipos de intermitência utilizados nos processos de secagem.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAL

3.1.1 Matéria – prima

A matéria prima utilizada na pesquisa foi a chicória (*Cichorium intybus* L.), a qual foi plantada no Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP, situado no município de Campinas (SP), com coordenadas geográficas de 22º48'57" de latitude sul e 47º03'33" de longitude oeste. Foram realizadas duas safras por dois anos consecutivos no período de julho (época do plantio) até dezembro (época da colheita). Inicialmente foi feito o preparo do solo no sistema plantio direto com cobertura vegetal para garantir a nutrição do solo e não realizar aplicações de fertilização química.

Foram feitos os canteiros de 25 m de comprimento e 1,2 m de largura. Estes foram cobertos por plástico para ter controle das plantas daninhas e manutenção da umidade do solo. As sementes de chicória foram plantadas em tubetes um mês antes do plantio em campo. Os tubetes foram irrigados diariamente e colocados numa estufa para o controle do crescimento. As plântulas foram transplantadas nos canteiros quando o sistema radicular encontrou-se desenvolvido, com espaçamento entre linhas e plantas de 0,30 m, em formato de triângulo. Uma vez por semana, foi feito o controle de plantas daninhas entre os canteiros por meio de limpezas manuais. O cálculo da vazão para a irrigação por gotejamento foi feito com o uso consultivo da planta em cada estágio para atingir as necessidades hídricas, com controle automatizado duas vezes por dia, durante todo o período da cultura. A colheita manual foi realizada antes que ocorresse a floração da planta, pois esse é o período de maior concentração de inulina nas raízes (Figura 3.1).

Após a colheita foram separadas as raízes das folhas. As raízes foram lavadas e cortadas com um picador em cubos de 0,009 x 0,009 x 0,009 m. O material foi acondicionado em sacos de plástico e congelado numa temperatura de -15°C, ideal para evitar sua deterioração até o momento do processamento nos ensaios de secagem.



Fonte: Arquivo pessoal.



Na figura 3.2 é apresentada a sequência do processamento das raízes de chicória.



Fonte: Arquivo pessoal.

FIGURA 3.2. Processamento das raízes de chicória. (A): semente; (B): germinação nos tubetes; (C): disposição no campo experimental; (D): raízes de chicória após a colheita; (E): raízes após cortadas no picador; (F): raízes cortadas em cubo e disponibilizadas em saco plástico pra congelamento.

3.1.2 Equipamentos para secagem

3.1.2.1 Secador convectivo

O equipamento utilizado na secagem com HTST foi um secador convectivo operando em fluxo perpendicular com bandejas de tela de aço inoxidável, com dimensões de área de 53,6 x 23,9 cm², pertencente ao Laboratório de Secagem da FEAGRI da Universidade Estadual de Campinas. O secador é composto por uma cabine de aço inoxidável, com uma porta independente, onde foram colocadas as bandejas feitas de tela de aço inoxidável (Figura 3.3).



Fonte: RIBEIRO (2009).

FIGURA 3.3. Desenho esquemático do secador convectivo.

3.1.2.2 Secador agitador/misturador

O secador contínuo utilizado foi: Secador Agitador/Misturador patente PI 0506639-5 (UNIVERSIDADE..., 2005). Este secador foi construído pelo financiamento da FAPESP e encontra-se no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp (Figura 3.4) e foi inicialmente projetado como um equipamento que

conjugasse diversos aparatos tecnológicos que pudessem auxiliar em um processo de secagem baseado nas características do material.



Fonte: OLIVEIRA (2009). FIGURA 3.4. Fotografia do secador agitador/misturador.

O sistema de secagem inclui o corpo do secador (1), o sistema de ventilação (2), o sistema de aquecimento (3), o sistema de alimentação (4) e movimentação de sólidos (5) e a bomba de vácuo (6). O secador com agitador/misturador consiste em um corpo cilíndrico provido de fundo perfurado, através do qual o ar secante entra no corpo após atravessar o plenum. A movimentação do produto é dada por um eixo conectado a pás movido por um moto-redutor (5).

O secador faz parte de um sistema de secagem composto por um ventilador de insuflamento (2), sistema de aquecimento por resistências elétricas (3), tubulações e uma válvula de regulagem do reaproveitamento do ar (7). Os emissores de radiação infravermelha estão dispostos longitudinalmente na parte superior da câmara de secagem. Dessa forma, o produto recebe a radiação infravermelha durante todo o período em que permanece sob as condições de secagem.

Os sistemas de ventilação e pressão contidos no secador agitador/misturador são munidos de válvulas de regulagem que permitem variar e controlar pressão e velocidade do ar no interior do secador. É possível com isso, utilizá-lo em processo de secagem a vácuo. Todo o secador foi construído em aço inox. O secador consiste em uma câmara cilíndrica provida de eixo rotativo que impulsiona pás, responsáveis pelo transporte e/ou movimentação dos sólidos contidos na câmara. Foi necessário fazer as adaptações das pás, já que quando o secador era utilizado de forma contínua, estas ainda não estavam funcionando de forma eficiente. Os sólidos foram introduzidos no corpo do secador por meio de um sistema de alimentação dotado de um moto-redutor, uma rosca-sem-fim e uma pequena moega. A descarga dos sólidos foi feita por uma abertura no final do leito de secagem, para onde todo o material foi carregado pelas pás. O material a ser seco se movimentou sobre uma placa perfurada que separa a câmara de secagem e o plenum.

Com o projeto financiado pela FAPESP, logrou-se fazer as adequações do sistema de ventilação e aquecimento do ar de secagem, pois os inicialmente implementados mostraram uma operação inferior à adequada. Foi instalado um ventilador centrífugo, da marca Asten, de 2000 W de potência e uma bateria de resistências elétricas fixadas em uma caixa blindada com potência total de 12000 W (Figura 3.5). Foram incorporadas ao secador unidades radiantes infravermelhas com tubo de quartzo (modelo CQZ 10, fabricadas pela empresa Corel Aquecimento Industrial). Este módulo possui potência de 4500 W e está posicionado na parte superior da câmara do secador, encobrindo todo o leito de secagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

FIGURA 3.5. Sistema de ventilação e aquecimento do ar de secagem antigo (direita) e adequado (esquerda).

3.1.2.3 Adequação das pás do eixo agitador do secador contínuo

Para avaliar a movimentação das raízes de chicória dentro do secador foram realizados ensaios com produto previamente seco. Nesta etapa do trabalho, observou-se que as pás danificaram o produto e não permitiu a movimentação total das raízes no leito do secador. Na Figura 3.6 obtida após o ensaio, foi possível observar que grande parte do material ficou no interior do secador, e apresentou danos resultantes do contato das pás com o material, o que justificou o planejamento de um suporte para as pás que minimizasse o choque mecânico no contato do material com as hastes das pás e melhorasse a movimentação e arraste do produto.



Fonte: arquivo pessoal FIGURA 3.6. Material no leito de secagem após ensaio.

Foram elaborados prolongadores acoplados nas pás. Na extremidade de cada prolongador (parte em contato com o material) foi colocada uma tira de borracha maleável. Desta forma, a área em contato com o leito de secagem aumentou, possibilitando uma melhora na movimentação do material.

Trabalhando com esta hipótese, foram construídos dois modelos de suportes: o primeiro com a parte da borracha, paralela a pá acoplada, e a segunda com uma angulação em relação à pá, onde a mesma foi acoplada. A justificativa da angulação no suporte foi a possibilidade de melhorar o arraste do material, o que poderia diminuir também o tempo de residência do material. A Figura 3.7 apresenta os modelos elaborados.



Fonte: arquivo pessoal.

FIGURA 3.7. Esboço do prolongador planejado para acoplar nas pás rotativas.

Os prolongadores foram cortados em chapas de aço e dobrados até adquirir o formato esperado. As faixas de borracha foram coladas na parte superior dos prolongadores (formato fechado com uma abertura ao meio) para melhor fixação, e os prolongadores foram fixados nas pás através da parte inferior (mesmo formato da parte da borracha, mas menos largo) como uma luva com pressão. Três amostras de cada suporte foram cortadas e colocadas nas pás.

Para testar os prolongadores, foram realizados ensaios com raízes de chicória. Comparando aos ensaios previamente realizados sem os suportes das pás, foi possível observar a melhora da movimentação do material no leito de secagem. Sendo assim, foi possível deduzir que o tempo de residência fosse diminuir e esta análise foi validada através da observação da imagem obtida (Figura 3.8). No local onde os prolongadores foram fixados, não houve acúmulo nem dano do material.





FIGURA 3.8. Material no leito de secagem após ensaio com os prolongadores desenvolvidos.

Observando a disposição dos prolongadores nas pás foi possível analisar que o prolongador sem angulação, paralelo a pá, foi mais eficaz na movimentação do material seco e apresentou menor dano nas amostras causado pela fricção da mesma dentro do secador. Portanto, foram confeccionados prolongadores em aço inox para todo o eixo neste formato (Figura 3.9).



Fonte: Arquivo pessoal. FIGURA 3.9. Disposição dos prolongadores nas pás do eixo agitador.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Pré-Secagem com HTST

Os ensaios da pré-secagem com HTST das raízes de chicória foram realizados tanto com amostras *in natura*, quanto com amostras após um período de 6 meses de congelamento. De acordo com planejamento experimental, as amostras foram colocadas em uma bandeja e levadas ao secador convectivo (Figura 3.10). O ajuste da temperatura do ar de secagem foi realizado com controlador *on/off*, enquanto que a velocidade do ar foi ajustada por um inversor de frequência e mantida constante durante todos os ensaios de secagem (0,94 m s⁻¹). Após o período de secagem foram tiradas amostras aleatoriamente para a sua determinação do teor de água, análises de textura e concentração de inulina. Os dados da umidade relativa do ar e a temperatura do ar

ambiente foram registrados com o *datalogger* AK 172. Foi utilizado o *software* HT Datalogger para fazer a coleta dos dados do *datalogger*.



Fonte: Arquivo pessoal.

FIGURA 3.10. Disposição das amostras na bandeja de pré-secagem com HTST.

3.2.2 Secagem contínua com o secador agitador/misturador

3.2.2.1 Distribuição do tempo de residência - DTR

A curva de distribuição do tempo de residência (DTR) das raízes de chicória foi determinada por meio da técnica experimental conhecida como estímulo e resposta descrita na seção 2.1.2. Para cada ensaio utilizou-se aproximadamente 2 kg de produto. Parte deste material (cerca de 0,3 kg) foi pintado com tinta *spray* preta fosca, e denominado traçador.

Definiu-se como tempo de residência, o tempo médio que o produto levou para passar por todo o sistema de alimentação, desde o ponto de entrada da moega até o bocal de saída. No ensaio, alimentou-se o sistema com parte do produto (raízes sem tinta) até atingir uma vazão constante de saída de material no bocal de saída (regime permanente). A partir deste momento, aplicou-se o pulso de material traçador, seguido de mais material sem tinta. A partir do pulso de traçador, contou-se o tempo de funcionamento do sistema de alimentação e coletou-se as amostras no bocal de saída, em períodos de tempo pré-definido. Neste caso, foram intervalos de tempo de 15 segundos. O material de cada coleta foi separado e pesado. Com as massas do traçador (m_{tr}) e os totais das amostras, calculou-se as frações em cada uma delas e, somando-se essas frações, pôde-se chegar ao valor total de traçador (m_{trtot}) que foi recolhido na corrida inteira.

Então, para cada amostra, a concentração C(t) de traçador foi calculada pela seguinte equação:

$$C(t) = \frac{m_{tr}}{m_{trtot}}$$
(3.1)

Determinou-se, então, a área sob a curva de concentração versus o tempo (Q), por integração numérica:

$$E(t) = \frac{C(t)}{Q} \tag{3.2}$$

em que:

$$F(t) = \int_{0}^{\infty} E(t)dt = \sum_{n} \left(\frac{E(t)_{n+1} + E(t)_{n}}{2}\right) * (t_{n+1} - t_{n})$$
(3.3)

A curva E(t) foi calculada segundo a Equação 3.2, e a curva F(t) segundo a Equação 3.3. Assim, o tempo de residência médio foi obtido pela Equação 3.4.

$$\bar{t} = \sum_{n} t_n * E(t_n) * \Delta t \tag{3.4}$$

Para conhecer como as condições operacionais do secador influenciaram na DTR foi necessário realizar um planejamento fatorial completo 2², para estudar os efeitos das variáveis independentes, rotação do eixo das pás agitadoras (RP) e rotação da rosca alimentadora (A) sobre a resposta ou variável independente DTR (Tabela 3.1).

Variável	-α (-1,41)	-1	0	+1	+ α (+1,41)
RP (rpm)	47,1	49,6	55,7	61,8	64,3
A (rpm)	44	46,3	52	57,7	60

Tabela 3.1. Definição dos níveis das variáveis independentes da DTR.

3.2.2.2 Secagem contínua de raízes de chicória (secador convectivo com aplicação de radiação infravermelha).

Com base nos testes da pré-secagem com HTST e dos resultados do DTR foram

escolhidos os pontos ótimos destas etapas para realizar a secagem contínua (HTST + secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha) das raízes de chicória. Foram determinados os parâmetros operacionais de secagem contínua: temperatura do ar, velocidade do ar e rotação do eixo das pás.

A aplicação do pulso de radiação infravermelha foi realizado em todos os ciclos da passagem do produto pelo secador contínuo. O tempo desta aplicação foi determinado com as análises da DTR.

Foram utilizadas amostras de cerca de 4 kg de raízes de chicória em cubos em cada experimento para garantir um fluxo de produto contínuo no secador agitador/misturador descrito no item 3.1.2.2. Os dados da umidade relativa do ar e a temperatura do ar ambiente foram registrados com o *datalogger* AK 172. Foi utilizado o *software* HT Datalogger para fazer a coleta dos dados do *datalogger*.

Os dados experimentais foram obtidos a partir da pesagem consecutiva das amostras coletadas na saída do secador a cada ciclo da passagem do produto por este, nas condições operacionais definidas pelo planejamento experimental (Tabela 3.8). Com os valores da pesagem obteve-se o teor de água para cada ciclo e, conhecendo o tempo do ciclo, foram construídas as curvas do teor de água em função do tempo de secagem para cada tratamento. Foi feita a linearização com função polinomial das curvas. Com a derivada dessa função foram determinadas as taxas de secagem. Dessa forma, foram construídas as curvas de secagem (taxa de secagem *versus* teor de água). Para cada tratamento, calculou-se a taxa média de secagem, sendo esta a resposta utilizada na análise estatística.

Terminado o processo de secagem, uma amostra de raiz de chicória seca foi utilizada para determinar a massa seca segundo a metodologia da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1995). O restante do material foi armazenado a temperatura média de 5°C para ser utilizado posteriormente nas análises laboratoriais.

3.2.3 Avaliação do produto

3.2.3.1 Teor de água

O teor de água, tanto das amostras *in natura*, como das amostras secas foi determinado numa estufa com circulação forçada de ar (Marca Fanem – Modelo 320 – SE, controle de temperatura com resolução de 0,1°C) a 105±1°C durante 24 horas (AOAC, 1995), disposto no Laboratório de Tecnologia Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp.

3.2.3.2 Atividade de água (a_w)

A atividade de água (a_w) foi medida por um aparelho de determinação (AquaLab by Decagon, modelo Series 4TEV) com resolução de 0,0001 e precisão ± 0,015, calibrado e disposto na sala do Laboratório de Tecnologia Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. As amostras foram colocadas na cápsula do equipamento de leitura e o resultado final foi expresso como a média entre três leituras consecutivas.

3.2.3.3 Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, porosidade e encolhimento.

A densidade aparente (ρ_a) foi medida com uma proveta graduada no Laboratório de Tecnologia Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. A densidade real (ρ_r) foi determinada pelo deslocamento de volume das amostras quando imersas em Tolueno (MOHSENIN, 1970). A densidade aparente foi calculada de acordo com a Equação 3.1.

$$\rho_r = \frac{(m_a)}{V - V_{tol}} \tag{3.5}$$

A densidade da matriz sólida (ρ_{ms}) foi determinada com picnômetro de gás hélio (AccuPyc 1330 V2.02) disponibilizado no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração – LRAC da Faculdade de Engenharia Química – FEQ da UNICAMP. Cada amostra foi analisada com uma média de 10 corridas no picnômetro.

A porosidade das partículas (ϵ_p) foi calculada através da densidade aparente (ρ_a) e da densidade real (ρ_r), e a porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) através da densidade real (ρ_r) e a densidade da matriz sólida (ρ_{ms}) conforme mostra a Equação 3.6 e 3.7.

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \tag{3.6}$$

$$\varepsilon_{ms} = 1 - \frac{\rho_r}{\rho_{ms}} \tag{3.7}$$

A mudança de volume (encolhimento) foi expressa como uma razão do volume aparente da amostra num determinado tempo de secagem em relação ao seu volume aparente inicial, conforme mostra a Equação 3.8.

$$S_b = \frac{V_b}{V_{b_0}} \tag{3.8}$$

3.2.3.4 Mudanças estruturais

3.2.3.4.1 Cinética de reidratação

Durante o processo de extração de inulina, as raízes de chicória sofrem, inicialmente, uma reidratação antes da difusão propriamente dita da inulina. Assim, foi quantificado o processo de reidratação, em três temperaturas da água (25, 60 e 98 °C). Esta quantificação foi realizada pelo ganho de água na amostra seca através da razão de reidratação - RR (Equação 3.9) utilizada por Miranda et al. (2010).

$$RR = \frac{(W_r * X_r) - (W_s * X_s)}{W_s * (1 - X_s)}$$
(3.9)

Os valores experimentais (U_{bs} *versus* t) corresponderam à média de três repetições e foram ajustados com três modelos diferentes (Tabela 3.2), capazes de descrever satisfatoriamente a cinética da reidratação para as amostras. O ajuste das curvas foi obtido utilizando-se a função de regressão não-linear do *software* STATISTICA 9.0 (STATSOFT, 2001), e a avaliação do ajuste das curvas mediante o desvio relativo médio (Equação 3.10):

$$DRM = \left| \frac{(OBS - PRED)}{OBS} \right| \tag{3.10}$$

Modelo	Equação	
Fick	$Y = \left\{ \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} exp\left[-(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \right\}^3 $ (3.11)	
Peleg	$RR = X_s + \frac{t}{k_1 + (k_2 * t)} $ (3.12)	
Modelo de primeira ordem	$RR = X_r + (X_s - X_r)exp(k_3 * t) $ (3.13)	

Tabela	3.2.	Modelos	utilizados	na	descrição	da	cinética	de	reidratação	de	raízes	de
chicória	a sec	a.										

3.2.3.4.2 Textura

Ao final de cada processo de pré-secagem com HTST e secagem no secador contínuo com convecção e aplicação da radiação infravermelha, as amostras de chicória foram submetidas à compressão a velocidade constante em um texturômetro (Modelo TA 500, fabricante LloyD Instruments) do Laboratório de Propriedades Físicas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

Após a calibração da força com uma carga de 5 kg, além do estabelecimento dos parâmetros de teste no software e devido à baixa reprodutibilidade dos testes de textura para este tipo de produto, optou-se por realizar 20 repetições para cada um dos ensaios. Cada amostra foi escolhida de forma aleatória e posicionada deitada, no centro da mesa do texturômetro, de forma que a compressão foi realizada no sentido das fibras do produto.

Em seguida, aplicou-se um teste de força sob compressão uniaxial utilizando-se a célula de carga, a uma velocidade de deformação de 1mm s⁻¹ para as amostras da présecagem e de 0,6 mm s⁻¹ para as amostras da secagem completa. Cada amostra foi comprimida até 50 % da altura original. Com os dados de força (Newton), distância percorrida pela célula de carga (mm), tempo de teste (segundo) e as dimensões de cada amostra, foram plotadas curvas de tensão (MPa) versus deformação específica (adimensional) para cada repetição. Em cada curva, determinou-se o módulo de elasticidade através de regressão linear. O valor final considerado para cada ensaio foi a média da inclinação da reta entre as vinte repetições, sendo calculado o desvio-padrão correspondente.

3.2.3.5 Análise de imagens

Para a análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras resultantes da secagem foram previamente colocadas num dessecador para garantir que o teor de água fosse inferior a 0,10 (bs). Inicialmente as amostras foram colocadas em nitrogênio líquido para facilitar a fratura. A fratura foi feita manualmente com uma espátula e montadas nos *stubs* e pulverizadas com ouro no Sputter Coater Polaron (VG Microtech- Uckfield, Inglaterra - modelo SC7620).

Para a obtenção das micrografias e/ou microanálise elementar foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com detector de energia dispersiva de raios X (LEO Electron Microscopy/Oxford - modelo 440i) disponibilizado no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração – LRAC da Faculdade de Engenharia Química – FEQ da UNICAMP.

As imagens foram realizadas tanto para a superfície, quanto para a fratura das amostras (no mesmo sentido das fibras), em diferentes ampliações e magnitudes (Tabela 3.3). A tensão da aceleração do equipamento foi de 10 kV e a corrente do feixe de 50 pA, para a obtenção das micrografias. Não foi possível realizar esta análise para as amostras *in natura* e as da secagem com HTST, pois apresentaram teor de água superior a 0,10 em base seca.

SUPER	FICIE	FRATURA				
Ampliação µm	Aumento X	Ampliação µm	Aumento X			
300	100	300	50			
20	500	100-300	100			
10	2000	20	500			
		10	2000			

Та	bela	3.3	Valo	res d	las a	ampl	iações	e	magnitud	les	emprega	adas	na	análise	de	MEV	para	a
suj	perfí	cie	e a fr	atura	da:	s am	ostras	de	e raiz de cl	nico	ória seca							

A fim de visualizar as estruturas da raiz de chicória em um maior nível de detalhamento, decidiu-se usar um microscópio de luz (Olympus, BX51, Japão) disponível no Departamento de Biologia Vegetal do Instituto de Biologia da UNICAMP.

Para análise neste microscópio, as raízes, tanto *in natura* quanto dos tratamentos da secagem, foram seccionadas em lâminas com cortes no sentido transversal das fibras. Após a escolha das seções de melhor qualidade dos cortes, estas foram clarificadas com hipoclorito de sódio 5 %, lavadas em água destilada e submetidas à coloração com a solução azul de Toluidina à 0,05 %. Após este procedimento, as amostras foram montadas nas lâmina de vidro e analisadas no microscópio. As imagens foram capturadas em uma câmera digital (DP Controller, Olympus, DP71, Japão), acoplada ao microscópio.

3.2.3.6 Determinação das condições de armazenamento

3.2.3.6.1 Isotermas de sorção

Utilizou-se o método gravimétrico estático proposto por Labuza (1984) para a determinação do teor de água de equilíbrio das amostras de raiz de chicória. Para estes, usou-se soluções salinas saturadas em água destilada, para uma determinada faixa de umidade relativa, de acordo com a Tabela 3.4.

	SAL	a _w
NOME	FÓRMULA MOLECULAR	
Cloreto de lítio	LiCl	0,12
Acetato de Potássio	CH ₃ COOK	0,23
Cloreto de magnésio	$Mg Cl_2$	0,32
Carbonato de potássio	K_2CO_2	0,43
Nitrato de magnésio	$Mg (NO_3)_2$	0,53
lodeto de potássio	KI	0,68
Cloreto de sódio	NaCl	0,76
Cloreto de potássio	KCl	0,84

Tabela 3.4. Valores de a _w relacionados às soluções salinas satura	das a 25	5°(].
---	----------	-----	----

Fonte: GREENSPAN (1977).

As amostras de raízes de chicória foram colocadas em cadinhos, pesadas e armazenadas em recipientes herméticos com as respectivas soluções salinas para cada

valor de umidade relativa desejada, a 25 °C. As amostras foram pesadas numa balança analítica em intervalos regulares de tempo, até atingirem o equilíbrio. Os dados experimentais obtidos corresponderam à média de 5 repetições e foram ajustados pelos modelos citados na seção 2.2.4. Os parâmetros dos modelos foram determinados com regressão não linear dos dados experimentais, realizada pelo *software* Statistica 9.0 (STATSOFT, 2001), usando como método de ajuste Gauss-Newton. Os critérios de escolha dos melhores ajustes dos modelos aos dados experimentais foram o coeficiente de determinação entre as respostas observadas e os valores preditos pelo modelo e o desvio médio relativo DRM (Equação 3.6).

3.2.3.6.2 Temperatura de Transição Vítrea (Tg)

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória de termogravimetria (TGA) para avaliar em que temperatura a raiz de chicória foi degradada. Esta análise avaliou a perda de massa (mg) em função da temperatura (°C) e permitiu encontrar a faixa de trabalho para a análise de calorimetria de varredura (DSC). Utilizou-se o equipamento TGA-50 com uma vazão de nitrogênio de 50 mL min⁻¹ na faixa de temperatura de 0 a 1000 °C a uma taxa de 10 °C min⁻¹. Inicialmente foi feita uma corrida em branco como padrão do procedimento a ser utilizado.

A determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) do produto triturado foi realizada por análise calorimétrica de varredura (DSC). O equipamento (Mettler-Toledo, modelo DSC1 – ZÜRICH, SUIZA) foi previamente calibrado. Inicialmente foi feita uma corrida em branco como padrão do procedimento a ser utilizado. As amostras foram colocadas em cápsulas de alumínio de 20 μ L, pesadas e fechadas hermeticamente. Utilizou-se nitrogênio como gás de purga, com vazão constante de 25 mL min⁻¹. Inicialmente, cada amostra foi aquecida (25 a 200 °C)à uma taxa de +20 °C min⁻¹, mantendo-se esta temperatura por 3 minutos. Em seguida, foi resfriada (200 a -140 °C) à uma taxa de -20°C min⁻¹, permanecendo nesta temperatura por 3 minutos. Finalmente foi feito aquecimento (-140 a 200 °C) à uma taxa de +20 °C min⁻¹.

3.2.3.7 Extração da inulina

A extração da inulina das amostras da pré-secagem com HTST e da secagem contínua, foi realizada por um processo de difusão em água quente. Para esses ensaios, as amostras originadas dos diferentes ensaios experimentais foram retiradas da câmara fria após o período de estocagem, pesadas de acordo com seus respectivos teores de água e relação água:massa seca de raiz (12,0 kg_{H20} kg_{MS}-1). Subsequentemente, uma porção específica de raízes secas foi imersa em água destilada em um Becker (250 ml) e colocada em banho térmico com temperatura fixa. Os valores dos parâmetros de extração como relação água:massa seca e temperatura do banho foram definidas previamente (OLIVEIRA, 2005). Foi definido o tempo de 90 min para cada extração como resultado de ensaio de curva crescente de sólidos solúveis extraídos. A quantidade de sólidos solúveis extraída foi determinada usando um refratômetro digital de bancada com amostra do extrato final, segundo o método nº 13.6.1 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1976).

3.2.3.8 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE)

O cromatógrafo utilizado consta de uma bomba (Varian 9012), forno (Phenomenex – Thermasphere TS-130), detector de índice de refração (Varian Star 9040) e coluna de detecção de carboidratos (BIO-RAD, modelo HPX- 87C Aminex 300mm x 7,8 mm). O *software* para a aquisição e processamento dos dados foi *Star Chromatography Workstation – Varian Star 4.5.*

Para a análise dos açúcares no CLAE foi necessário utilizar água como fase móvel. Foi utilizado um sistema de purificação compacto Milli-Q Plus. A fase móvel foi gaseificada em banho ultrassom (Thornton - modelo C/T) durante 12 min diariamente. O fluxo da água foi aumentado lentamente até atingir 0,6 mL min⁻¹. O sistema foi deixado com a fase móvel até conseguir estabilização do índice de refração monitorado pela linha de base do software.

Para a construção da curva de calibração foram preparadas 3 soluções em diferentes concentrações de inulina pura, glucose e frutose (inulin 90 % Frutafit IQ - *Instant Quality Native Inulin*. Marca Sensus). Feita a solução padrão foi submetida a análise cromatográfica. Utilizando o *Software* de aquisição de dados, foi feita a integração

e otimização dos picos do padrão com base no melhor coeficiente de regressão. A curva de calibração obtida foi utilizada na quantificação das amostras e o tempo de retenção para a identificação de inulina, glucose e frutose.

As amostras foram diluidas em água destilada a relação de 1:10 (1 mL de extrato de inulina: 10 mL de água destilada), filtradas (Agilent Technologies - membrana Regenerated Cellulose – Tamanho do poro: 0,45 μ m) e injetadas na coluna nas seguintes condições de operação: temperatura ambiente entre 20- 25 °C, temperatura do forno de 88 °C, volume de injeção 20 μ L e fluxo do eluente de 0,6 mL min⁻¹.

3.2.4 Demanda de energia elétrica

A demanda de energia elétrica foi determinada por meio do uso de analisadores de grandezas elétricas (marca Kron – modelo Mult-k Plus). Esses equipamentos foram conectados nos circuitos elétricos de cada componente consumidor de energia (ventilador, resistências elétricas, resistências de infravermelho, motor de rotação do eixo das pás e motor de alimentação do produto). A soma de todos os valores obtidos nesses circuitos foram utilizados na determinação da demanda total de energia - EA [kWh]. Os dados obtidos pela leitura destes analisadores foram armazenados e tratados em planilhas de cálculo.

3.2.5 Planejamento experimental e análise estatística

3.2.5.1 Planejamento experimental de pré-secagem com HTST

Operando o secador convectivo, a pré-secagem com HTST de raízes de chicória, foi realizada um planejamento fatorial completo 2^2 , com pontos centrais (nível 0) e pontos axiais (níveis ± α), para estudar os efeitos das variáveis independentes temperatura e tempo da secagem com HTST sobre as respostas ou variáveis dependentes: teor de água (U_{bs}), módulo de elasticidade (YM), concentração de sólidos solúveis (SS) e consumo energético (EA). Dessa forma, cada fator foi estudado em 5 níveis, conforme apresenta a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Definição dos níveis das variáveis inder	pendentes da pré-secagem com HTST.
--	------------------------------------

Variável	-α (-1,41)	-1	0	+1	+α(+1,41)
Temperatura (°C)	110	116	130	144	150
Tempo (min)	0	4	14	24	28

Neste estudo, foram realizados 11 ensaios (Tabela 3.6), sendo quatro fatoriais (combinações entre os níveis \pm 1), três centrais (duas variáveis independentes no nível 0) e quatro axiais (uma variável independente no nível $\pm \alpha$ e a outra, em 0), gerando um modelo quadrático, no qual o valor das variáveis dependentes é função das variáveis independentes, conforme descreve a equação 3.14.

$$Y = f(T,t) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 t + \beta_{11} T^2 + \beta_{22} t^2 + \beta_{12} T t$$
(3.14)

Para a elaboração dos modelos, foi utilizado o *software* Statistica 9.0 (STATSOFT, 2001), com a finalidade de assegurar a validade dos coeficientes dentro de um nível de confiança de 90 e 95%, através de análises estatísticas apropriadas. Foram utilizadas as variáveis codificadas.

		F							
Pontos	Ensaio	F	Real	Codificado					
		T (°C)	tempo (min)	Temperatura	tempo				
Fatoriais	1	116	4	-1	-1				
	2	144	4	-1	1				
	3	116	24	1	-1				
	4	144	24	1	1				
	5	110	14	-1,41	0				
Aviais	6	150	14	1,41	0				
платэ	7	130	0	0	-1,41				
	8	130	28	0	1,41				
	9	130	14	0	0				
Centrais	10	130	14	0	0				
	11	130	14	0	0				

Tabela 3.6. Ensaios para o planejamento experimental, variando os parâmetros temperatura e tempo nos experimentos da pré-secagem com HTST. Variáveis Independentes

Após a análise estatística dos coeficientes, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R²) e do teste F, verificando se o modelo apresenta um ajuste adequado aos dados experimentais. Os dados foram representados na superfície de resposta correspondente.

Para validar as condições ótimas das variáveis do processo, foram utilizados os modelos das respostas que apresentaram validade estatística, baseada na porcentagem de variação explicada (R²) e na distribuição de Fischer (Teste F). Nesta validação foram realizados ensaios de secagem em 3 repetições para as condições operacionais correspondentes ao ponto ótimo. Com os valores das respostas calculados com os modelos e os dados obtidos experimentalmente, foi calculado o desvio médio relativo, corroborando as condições operacionais do processo.

3.2.5.2 Planejamento experimental da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha.

A etapa imediatamente seguinte às condições ótimas da secagem com HTST foi a secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha. Tendo em consideração os resultados prévios da análise de DTR foram determinadas as variáveis a serem estudadas nesta etapa de trabalho. Sendo assim, foi realizado um planejamento fatorial completo 2^3 , com pontos centrais (nível 0) e pontos axiais (níveis $\pm \alpha$), para estudar os efeitos das variáveis independentes: velocidade do ar (VA), temperatura do ar (T) e rotação do eixo das pás (RP) sobre as respostas ou variáveis dependentes: teor de água, taxa de secagem, atividade de água, porosidade, encolhimento, textura, capacidade de reidratação, concentração de sólidos solúveis, concentração de inulina, glucose e frutose, e demanda de energia elétrica. Dessa forma, cada fator foi estudado em 5 níveis, conforme apresenta a Tabela 3.7, totalizando 17 ensaios (Tabela 3.8).

Tabela 3.7. Definiçã	io dos níveis da	as variáveis inc	lependentes	da secagem	convectiva com
radiação infraverm	elha.				

Variável	-α (-1,68)	-1	0	+1	+ α (+1,68)
Velocidade do ar (m s-1)	1,87	2,04	2,38	2,74	2,96
Temperatura do ar(°C)	40	48	60	72	80
Rotação eixo das pás (rpm)	47,14	50,57	55,71	60,75	64,30

Para a elaboração dos modelos, foi utilizado o *software* Statistica 9.0 (STATSOFT, 2001), com a finalidade de assegurar a validade dos coeficientes dentro de um nível de confiança de 90 e 95%, através de análises estatísticas apropriadas. Foram utilizadas as variáveis codificadas. Após a análise estatística dos coeficientes, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R²) e do teste F, verificando se o modelo apresenta um ajuste adequado aos dados experimentais. Os dados foram representados na superfície de resposta correspondente.

		Variáveis Independentes						
Ensaio		Real			Codificado			
		VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	VA	Т	RP	
Fatoriais	1	2,04	48	50,57	-1	-1	-1	
	2	2,74	48	50,57	+1	-1	-1	
	3	2,04	72	50,57	-1	+1	-1	
	4	2,74	72	50,57	+1	+1	-1	
	5	2,04	48	60,75	-1	-1	+1	
	6	2,74	48	60,75	+1	-1	+1	
	7	2,04	72	60,75	-1	+1	+1	
	8	2,74	72	60,75	+1	+1	+1	
Axiais	9	1,87	60	55,71	-1,68	0	0	
	10	2,96	60	55,71	+1,68	0	0	
	11	2,38	40	55,71	0	-1,68	0	
	12	2,38	80	55,71	0	+1,68	0	
	13	2,38	60	47,14	0	0	-1,68	
	14	2,38	60	64,30	0	0	+1,68	
Centrais	15	2,38	60	55,71	0	0	0	
	16	2,38	60	55,71	0	0	0	
	17	2,38	60	55,71	0	0	0	

Tabela 3.8 Ensaios para o planejamento experimental, variando os parâmetros velocidade do ar (VA), temperatura do ar (T) e rotação do eixo das pás (RP) nos experimentos da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha.

Para determinar a otimização do processo de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha, foram consideradas as respostas significativas do planejamento experimental geradas estatisticamente e as melhores condições do processo em quanto à menor demanda energética. Para estes, foram realizados ensaios de secagem contínua com a aplicação da radiação infravermelha de forma intermitente nos ciclos da secagem e foram avaliadas todas as propriedades e ensaios laboratoriais do material seco.

3.2.5.3 Análise dos dados

O tratamento estatístico dos dados experimentais foi realizado com o uso da ferramenta de regressão não-linear do *software* STATISTICA 9.0 (STATSOFT, 2001), com o qual o comportamento da secagem com HTST e da secagem contínua foram verificados através de ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais.

A análise estatística foi realizada considerando os coeficientes de regressão lineares, quadráticos e de interações das variáveis independentes sobre as respostas estudadas, assim como o erro padrão, o valor da estatística *t* e a significância estatística (p-valor).

Os coeficientes de regressão estimados indicaram o quanto cada fator influenciou na resposta avaliada, ou seja, quanto maior é o seu valor, maior é a sua influência positiva ou negativa. Os coeficientes positivos estão relacionados ao aumento das respostas, quando o valor da variável passa de um nível mínimo a um nível máximo, sendo a relação contrária estabelecida para o coeficiente negativo, ou seja, ao passar de um nível mínimo para um máximo, a resposta diminui. O valor de *t* indica o quão grande é a variável em relação ao seu desvio. Assim, quanto maior o valor de *t*, maior a probabilidade da variável ser estatisticamente significativa. Foram utilizados os níveis de confiança de 95 e 90% para as variáveis, com a finalidade de não desconsiderar fatores com valores de p-valor entre 0,05 e 0,10 de significância, devido à grande variabilidade inerente aos processos que envolvem produtos agrícolas.

Os modelos matemáticos foram construídos para as respostas que apresentaram melhor ajuste dos resultados experimentais ao modelo de segunda ordem descrito na equação 3.12, levando em conta apenas os fatores estatisticamente significativos e tendo como critérios da análise a distribuição de Fisher (Teste F) e a porcentagem de variação explicada pelo modelo (R²) na análise de variância (ANOVA).

65

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROCESSO DE PRÉ-SECAGEM COM HTST DE RAÍZES DE CHICÓRIA

O estudo da pré-secagem com HTST de raiz de chicória teve como objetivo obter as melhores condições do processo avaliando o efeito das variáveis (temperatura do ar e tempo de secagem) nos parâmetros de teor de água e nas características de qualidade da textura (módulo de elasticidade) e concentração de sólidos solúveis nas raízes de chicória, tanto em amostras *in natura* quanto congeladas, após um período de seis meses de armazenamento. Isto garantiu que, na etapa de secagem no secador contínuo agitador/misturador, as amostras não fossem destruídas. A velocidade do fluxo de ar foi mantida constante para os onze ensaios, sendo ela igual a 0,935 m s⁻¹.

4.1.1. Teor de água e concentração de sólidos solúveis

Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental (Tabela 3.6) para o teor de água (U_{bs}) e concentração de sólidos solúveis (SS) são apresentados na Tabela 4.1.

	Variáveis do processo		Respostas					
Ensaios								
	T (°C)	tempo	U _{bs} (kg kg ⁻¹)	U _{bs} (kg kg ⁻¹)	SS (kg kg-1)	SS (kg kg-1)		
		(min)	in natura	congelada	in natura	congelada		
1	116	4	2,43	2,50	0,58	0,69		
2	144	4	2,6	2,30	0,59	0,63		
3	116	24	1,15	1,03	0,55	0,64		
4	144	24	0,94	0,72	0,61	0,62		
5	110	14	1,80	1,66	0,53	0,61		
6	150	14	1,51	1,21	0,61	0,64		
7	130	0	3,11	2,72	0,60	0,68		
8	130	28	0,82	0,69	0,64	0,56		
9	130	14	1,43	1,51	0,54	0,59		
10	130	14	1,70	1,34	0,58	0,66		
11	130	14	1,64	1,51	0,63	0,72		

Tabela 4.1. Resultados do teor de água (U_{bs}) e concentração de sólidos solúveis (SS) das amostras *in natura* e congeladas no processo de pré-secagem com HTST.

Observa-se que o processo de congelamento gerou uma perda de 12,5 % no teor de água nas raízes de chicória já que o valor diminuiu de 3,11 para 2,72 bs (ensaio 7). Já o processo de secagem com HTST gerou uma perda no teor de água num 75 %, sendo que para as amostras *in natura* houve uma diminuição de 3,11 para 0,82 bs (ensaios 7 e 8) e para as amostras congeladas de 2,72 para 0,69 (ensaios 7 e 8). Os valores de sólidos solúveis para as amostras *in natura* ficaram entre 0,53 e 0,64 (ensaios 5 e 8) e para as amostras congeladas ficaram entre 0,56 e 0,72 (ensaios 8 e 11).

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (temperatura e tempo do HTST) e suas interações sobre as respostas teor de água e concentração de sólidos solúveis os quais são apresentados na Tabela 4.2.
Resposta	Fatores	Coeficiente de	Erro	t (5)	n- valor
Resposed	i utor es	regressão	Padrão	((3)	p vuloi
	Média Global	1,59*	0,07	22,61	0,000003
Teor de	Temperatura (L)	-0,06	0,04	-1,31	0,245725
água -	Temperatura (Q)	0,03	0,05	0,53	0,621903
amostras in	tempo (L)	-0,77*	0,04	-17,97	0,000010
natura	tempo (Q)	0,18*	0,05	3,50	0,017230
	T (L) x t (L)	-0,10	0,06	-1,57	0,177913
	Média Global	1,45*	0,05	30,35	0,000001
Teor de	Temperatura (L)	-0,14*	0,03	-4,89	0,004524
água -	Temperatura (Q)	0,01	0,03	0,22	0,833923
amostras	tempo (L)	-0,74*	0,03	-25,24	0,000002
congelada	tempo (Q)	0,14*	0,03	4,09	0,009454
	T (L) x t (L)	-0,03	0,04	-0,66	0,536550
	Média Global	0,582*	0,020	29,74	0,000001
Sólidos	Temperatura (L)	0,023	0,012	1,91	0,114383
Solúveis -	Temperatura (Q)	-0,009	0,014	-0,62	0,562961
amostras in	tempo (L)	0,005	0,012	0,46	0,666325
natura	tempo (Q)	0,014	0,014	1,00	0,361524
	T (L) x t (L)	0,011	0,017	0,64	0,550289
	Média Global	0,601*	0,03	21,99	0,000004
Sólidos	Temperatura (L)	-0,002	0,02	-0,09	0,928421
Solúveis –	Temperatura (Q)	-0,001	0,02	-0,07	0,946335
amostras	tempo (L)	-0,040	0,02	-2,40	0,061375
congelada	tempo (Q)	-0,024	0,02	-1,20	0,284067
	T (L) x t (L)	-0,001	0,02	-0,03	0,975163

Tabela 4.2. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas teor de água e concentração de sólidos solúveis.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Após a identificação dos coeficientes de regressão estatisticamente significativos, para a resposta teor de água foram determinados a validade dos modelos e o seu ajuste aos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseado no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Resposta	Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	Regressão	4,967	2	2,483	141,74	4,46	0,97
Teor de	Resíduo	0,140	8	0,018			
água –	Falta ajuste	0,098	6	0,016			
amostras	erro puro	0,042	2	0,021			
in natura	Total	5,107	10				
	Modelo: Ubs_n	= 1,615 - 0,775	*t + 0,172*t ²				
	Regressão	4,671	3	1,557	274,63	4,35	0,99
Teor de	Resíduo	0,040	7	0,006			
água –	Falta ajuste	0,019	5	0,004			
amostras	erro puro	0,020	2	0,010			
congelada	Total	4,711	10				
	Modelo: Ubs _c	= 1,459 - 0,143 [°]	*T – 0,742*t +	0,141*t ²			

Tabela 4.3. Análise de variância para a resposta teor de água (U_{bs}).

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Verificou-se que os modelos da resposta teor de água tanto para as amostras *in natura* quanto para as amostras congeladas, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,97 e 0,99, respectivamente, indicando que os modelos explicam 97 e 99% da variação dos dados observados. Os valores de F_{cal} foram superiores ao F_{tab} , implicando que para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar as superfícies de resposta e respectivas curvas de contorno (Figura 4.1).



FIGURA 4.1. Superfícies de resposta e curvas de contorno para o teor de água em função da temperatura e o tempo de secagem para amostras *in natura* (a) e (b) e para as amostras congeladas (c) e (d).

Observa-se na Figura 4.1 que o teor de água das amostras *in natura* foi influenciado pelo tempo da pré- secagem com HTST. Já para as amostras congeladas, esta resposta mostrou influência tanto da temperatura do ar, quanto do tempo da pré- secagem com HTST.

Avaliando a resposta da concentração de sólidos solúveis observou-se que os coeficientes de regressão não foram estatisticamente significativos (Tabela 4.2). Por isso, não foi possível determinar a validade do modelo e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseada no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Isto foi positivo para a nossa pesquisa, porque significa que a temperatura do ar e o tempo da pré-secagem com HTST não afetaram a concentração de

sólidos solúveis. Isto é fundamental para garantir a extração de inulina no final do processo, independente do processo de secagem.

Comparando os resultados das amostras *in natura* e congeladas, notou-se que a concentração de sólidos solúveis também não teve perda no processo de congelamento e armazenagem. Park et al. (2007) encontraram valores de sólidos solúveis das raízes de chicória *in natura* entre 0,57 e 0,64 e para amostras congeladas entre 0,63 e 0,68 quando realizaram secagem convectiva.

4.1.2 Textura

São apresentadas as médias das 20 medições dos ensaios de compressão para cada tratamento como amostra do comportamento da Tensão (MPa) *versus* Deformação Específica (adimensional) para amostras *in natura* e congeladas nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente.



FIGURA 4.2. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras *in natura*.





Observa-se nas Figuras 4.2 e 4.3 que as amostras congeladas apresentaram modificação na estrutura, já que foi necessário aplicar uma menor tensão para obter valores de deformação específica iguais aos valores apresentados nas amostras *in natura*. A partir destas figuras, foram determinados os valores do módulo de elasticidade YM (MPa), através da linearização. Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental (Tabela 3.6) são apresentados na Tabela 4.4.

Ensaios	Variáveis d	lo processo	Respostas		
	T (°C)	T (°C)	YM (MPa) in natura	YM (MPa) congelada	
1	116	116	3,62 ± 0,66	0,98 ± 0,25	
2	144	144	3,45 ± 0,64	1,19 ± 0,52	
3	116	116	2,63 ± 0,61	0,92 ± 0,39	
4	144	144	2,33 ± 0,76	1,51 ± 0,60	
5	110	110	3,37 ± 0,50	0,97 ± 0,35	
6	150	150	2,76 ± 0,53	1,23 ± 0,52	
7	130	130	3,56 ± 0,45	$0,92 \pm 0,32$	
8	130	130	2,39 ± 0,62	1,76 ± 0,67	
9	130	130	3,15 ± 0,79	1,21 ± 0,48	
10	130	130	2,97 ± 0,58	$0,97 \pm 0,41$	
11	130	130	2,98 ± 0,58	1,40 ± 0,55	

Tabela 4.4. Resultados do módulo de elasticidade (YM) das amostras *in natura* e congeladas.

Houve um efeito considerável do congelamento das amostras durante o armazenamento já que os valores do módulo de elasticidade para as amostras *in natura* ficaram entre 3,62 e 2,33 MPa (ensaios 1 e 4) e, para as amostras congeladas, ficaram entre 1,76 e 0,92 (ensaios 8 e 3). Além disso, os valores apresentaram desvios padrão elevados nos ensaios do planejamento experimental, o que pode ser atribuído à grande heterogeneidade entre as amostras e à falta de uniformidade da estrutura interna. As propriedades mecânicas de um tecido vegetal estão associadas a diferentes níveis estruturais e são determinadas mais intensamente pelos constituintes da parede celular, afetados pelas condições de processo (VIEIRA, 2010). Alta variabilidade nas determinações das propriedades de textura também foram observadas em goiabas (PEREIRA et al., 2004), melão (FERRARI, 2005) e manga (ITO et al., 2007).

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais do módulo de elasticidade, considerando-se o intervalo de confiança de 90 %, são apresentados na Tabela 4.5.

Resposta	Fatores	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t (5)	p- valor
	Média Global	3,03*	0,07	46,36	0,00000
Módulo de	Temperatura (L)	-0,17*	0,04	-4,22	0,00832
Elasticidade	Temperatura (Q)	0,01	0,05	0,28	0,79287
in natura	tempo (L)	-0,47*	0,04	-11,78	0,00008
mnatara	tempo (Q)	-0,03	0,05	-0,67	0,53495
	T (L) x t (L)	-0,03	0,06	-0,58	0,58677
	Média Global	1,19*	0,12	9,56	0,000212
Módulo de	Temperatura (L)	0,15	0,08	1,93	0,112123
Elasticidade	Temperatura (Q)	-0,06	0,09	-0,70	0,513816
congelada	tempo (L)	0,18*	0,08	2,36	0,064835
congenata	tempo (Q)	0,06	0,09	0,61	0,565663
	T (L) x t (L)	0,10	0,11	0,89	0,413246

Tabela 4.5. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta módulo de elasticidade YM (MPa).

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Após a identificação dos coeficientes de regressão estatisticamente significativos, foi determinada a validade dos modelos e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseado no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.6.

Resposta	Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	Regressão	2,010	2	1,0052	103,98	3,11	0,96
VM	Resíduo	0,077	8	0,0097			
(MDa) <i>in</i>	Falta ajuste	0,057	6	0,0096	0,96	9,33	
natura	erro puro	0,020	2	0,0099			
nuturu	Total	2,088	10				
	Modelo: YM _n	= 3,019 - 0,169	*T- 0,472*t				
	Regressão	0,434	2	0,217	5,28	3,11	0,70
	Resíduo	0,329	8	0,041			
YM (MPa)	Falta ajuste	0,238	6	0,040	0,87	9,33	
congelada	erro puro	0,091	2	0,045			
	Total	0,763	10				
	Modelo: YM _c	= 1,188+ 0,147	*T + 0,18*t				

Tabela 4.6. Análise de variância para a resposta módulo de elasticidade YM (MPa).

*Teste F Tabelado a 90% de significância.

Verificou-se que os modelos, tanto para as amostras *in natura* quanto para as amostras congeladas, ficaram em função tanto da temperatura do ar quanto do tempo do HTST e apresentaram coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,96 e 0,70 respectivamente, indicando que os modelos explicam 96 e 70% da variação dos dados observados. Os valores de F_{cal} foram superiores ao F_{tab} , implicando que, para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar as superfícies de resposta e respectivas curvas de contorno (Figura 4.4).



FIGURA 4.4. Superfícies de resposta e curvas de contorno para o módulo de elasticidade YM (MPa) em função da temperatura e o tempo de secagem para amostras *in natura* (a) e (b) e para as amostras congeladas (c) e (d).

Nota-se nas superfícies de resposta e curvas de contorno que, para o produto *in natura*, o módulo de elasticidade é menor quando é trabalhada a secagem HTST com altas temperaturas e maior tempo. Já o caso contrário ocorreu com as amostras congeladas. O módulo de elasticidade foi maior nas temperaturas mais altas e tempos maiores. Verificando-se o impacto do processo de congelamento na estrutura das raízes de chicória.

Para efeitos desta pesquisa, o ideal foi ter um módulo de elasticidade maior, já que isto garantiu que na etapa de secagem no secador contínuo agitador/misturador, as amostras não fossem destruídas.

Com os dados do *software* computacional do texturômetro, foi possível obter os dados da força máxima $F_{máx}$ (N), Tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e Rigidez (N m⁻¹). Estes dados são apresentados na Tabela 4.7 de acordo com o delineamento experimental (Tabela 3.6)

Ensaio	Produto <i>in natura</i>			Pro	oduto conge	lado
	Fmáx (N)	Tmáx	R (N m ⁻¹)	Fmáx (N)	Tmáx	R (N m ⁻¹)
		(MPa)			(MPa)	
1	176,86	1,90	58782,80	35,66	0,53	21915,9
2	159,12	1,77	58146,00	42,46	0,61	27179,9
3	159,54	2,13	80900,59	31,33	0,54	33371,5
4	133,41	1,80	57971,56	56,76	0,87	41200,5
5	166,35	2,01	66537,79	32,86	0,56	36840,7
6	141,28	1,87	65116,15	43,47	0,71	36085,8
7	144,82	1,43	48281,55	40,07	0,50	30945,8
8	148,92	2,00	65497,76	66,31	1,06	54163,4
9	174,81	2,39	75924,28	43,79	0,70	40731,0
10	153,50	2,12	67645,60	43,86	0,69	37808,9
11	173,42	2,18	73565,26	50,35	0,83	36391,7

Tabela 4.7. Resultados da análise de textura para as respostas força máxima $F_{máx}$ (N), Tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e Rigidez R (N m⁻¹) das amostras *in natura* e congeladas.

Observa-se (Tabela 4.7) que, em geral, os valores de força máxima, tensão máxima e rigidez foram maiores quando realizada a pré-secagem com raízes de chicória *in natura*. Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais destas respostas, considerando-se o intervalo de confiança de 90 %, são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9 para as amostras *in natura* e congeladas, respectivamente.

Resposta	Fatores	Coeficiente	Erro	t (5)	p- valor
		de regressão	Padrão		
	Média Global	167,21*	6,81	24,54	0,000002
Force	Temperatura (L)	-9,83*	4,18	-2,35	0,065404
mávima	Temperatura (Q)	-4,98	4,99	-1,00	0,363440
Factor (N)	tempo (L)	-4,77	4,18	-1,14	0,304895
	tempo (Q)	-8,48	4,99	-1,70	0,149905
	T (L) x t (L)	-2,10	5,90	-0,36	0,736797
	Média Global	2,23*	0,14	16,23	0,000016
Tonção	Temperatura (L)	0,01	0,08	0,11	0,916645
mávima	Temperatura (Q)	-0,13	0,10	-1,25	0,265154
	tempo (L)	0,04	0,08	0,53	0,619577
	tempo (Q)	-0,24*	0,10	-2,36	0,064398
	T (L) x t (L)	-0,05	0,12	-0,44	0,678697
	Média Global	72367,84*	5221,33	13,86	0,000035
	Temperatura (L)	2499,79	3202,20	0,78	0,470335
Rigidez R	Temperatura (Q)	-2621,59	3821,06	-0,69	0,523169
(N m ⁻¹)	tempo (L)	88,89	3202,20	0,03	0,978927
	tempo (Q)	-7116,99	3821,06	-1,86	0,121569
	T (L) x t (L)	-5573,06	4521,86	-1,23	0,272561

Tabela 4.8. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas Força máxima $F_{máx}$ (N), Tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e Rigidez R (N m⁻¹) das amostras *in natura*.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Resposta	Fatores	Coeficiente	Erro	t (5)	p- valor
		de regressão	Padrão		
	Média Global	46,00*	3,57	12,87	0,00005
Forca	Temperatura (L)	5,91*	2,19	2,70	0,04286
mávima	Temperatura (Q)	-4,95	2,60	-1,90	0,11594
Fmán (N)	tempo (L)	5,88*	2,19	2,69	0,04336
	tempo (Q)	2,57	2,60	0,99	0,36975
	T (L) x t (L)	4,66	3,10	1,51	0,19258
	Média Global	0,74*	0,06	11,77	0,00008
Tensão	Temperatura (L)	0,08*	0,04	2,02	0,09904
máxima	Temperatura (Q) -0,07		0,05	-1,57	0,17660
	tempo (L)	0,13*	0,04	3,43	0,01869
	tempo (Q)	0,001	0,05	0,01	0,99041
	T (L) x t (L)	0,06	0,05	1,16	0,29911
	Média Global	47573,30*	6309,32	7,54	0,00065
	Temperatura (L)	2182,18	3863,65	0,56	0,59661
Rigidez R	Temperatura (Q)	-8151,14	4598,67	-1,77	0,13651
(N m ⁻¹)	tempo (L)	7688,60	3863,65	1,99	0,10325
	tempo (Q)	1487,31	4598,67	0,32	0,75947
	T (L) x t (L)	1358,87	5464,03	0,25	0,81349

Tabela 4.9. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas Força máxima $F_{máx}$ (N), Tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e Rigidez R (N m⁻¹) das amostras congeladas.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Após a identificação dos coeficientes de regressão estatisticamente significativos, foi determinada a validade dos modelos e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseado no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.10 para as amostras *in natura* e na Tabela 4.11 para as amostras congeladas.

Tabela 4.10.	Análise de	variânc	cia para as respostas	Força máxima	Fmáx (N)	, Tensão	máxima
T _{máx} (MPa) e	Rigidez R ((N m ⁻¹)	das amostras in na	itura.			

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	Fcal	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
	Regressão	7,70E+02	1	7,70E+02	5,19	3,36	0,36
Força	Resíduo	1,34E+03	9	1,49E+02			
máxima	Falta ajuste	1,05E+03	7	1,50E+02	1,06	9,35	
F _{máx} (N)	erro puro	2,84E+02	2	1,42E+02			
	Total	2,11E+03	10				
Tonção	Regressão	2,46E-01	1	2,46E-01	5,57	3,36	0,38
mávima	Resíduo	3,98E-01	9	4,42E-02			
шахппа Т _{та́ч}	Falta ajuste	3,58E-01	7	5,11E-02	2,52	9,35	
(MPa)	erro puro	4,05E-02	2	2,03E-02			
()	Total	6,44E-01	10				
	Regressão	2,47E+08	1	2,47E+08	3,58	3,36	0,28
Rigidez R	Resíduo	6,22E+08	9	6,91E+07			
$(N \text{ m}^{-1})$	Falta ajuste	5,85E+08	7	8,36E+07	4,60	9,35	
(((m))	erro puro	3,64E+07	2	1,82E+07			
	Total	8,69E+08	10				

*Teste F Tabelado a 90% de significância.

Tabela 4.11.	Análise de variância para as respos	stas Força máxima F _{má}	_« (N), Tensão máxima
T _{máx} (MPa) e	Rigidez R (N m ⁻¹) das amostras co	ongeladas.	

Docnocta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	Е.	Г.,*	D 2
Resposta	variação	quadrática	liberdade	quadrática	F cal	I 'tab	N -
	Regressão	7,57E+02	3	2,52E+02	5,60	3,07	0,69
Força	Resíduo	3,16E+02	7	4,51E+01			
máxima	Falta ajuste	2,87E+02	5	5,74E+01	4,05	9,29	
F _{máx} (N)	erro puro	2,84E+01	2	1,42E+01			
	Total	1,07E+03	10				
Tanção	Regressão	1,89E-01	2	9,47E-02	6,99	3,11	0,64
Telisao mávima	Resíduo	1,08E-01	8	1,35E-02			
шахина Т (л	Falta ajuste	9,59E-02	6	1,60E-02	2,57	9,33	
(MPa)	erro puro	1,24E-02	2	6,22E-03			
(111.4)	Total	2,98E-01	10				
	Regressão	9,29E+08	2	4,64E+08	5,67	3,11	0,58
Rigidez R	Resíduo	6,55E+08	8	8,19E+07			
$(N m^{-1})$	Falta ajuste	5,97E+08	6	9,95E+07	3,41	9,33	
(num)	erro puro	5,84E+07	2	2,92E+07			
	Total	1,58E+09	10				

*Teste F Tabelado a 90% de significância.

Verificou-se pela ANOVA (Tabelas 4.10 e 4.11) que nenhum modelo obtido para as características de textura foi preditivo para descrever os dados experimentais devido aos baixos coeficientes de determinação e valores de F_{cal} próximos ao F_{tab} , refletindo os altos valores de falta de ajuste encontrados. Desse modo, não foi adequado gerar modelo e construir as superfícies de resposta, tendo em vista que os modelos não conseguem explicar a variabilidade dos dados experimentais. Resultados similares foram encontrados por Vieira (2010) com desidratação de goiabas.

Por outro lado, a análise dos coeficientes de regressão (Tabela 4.8 e 4.9) indicou a tendência dos fatores estudados sobre o processo. Para as amostras *in natura*, os resultados revelaram que houve um efeito negativo da temperatura sobre a força máxima de compressão; a tensão e a rigidez também foram afetadas negativamente pelo

tempo da pré-secagem com HTST. Já para as amostras congeladas, foi observado um efeito positivo da temperatura e do tempo da pré-secagem com HTST sobre a força máxima, a tensão e a rigidez. Os efeitos positivos dos fatores sobre as respostas indicam que, ao aumentar o nível dos fatores na faixa estudada, ocorre o aumento na resposta. Essa mudança no comportamento pode ter sido causado pela quebra da estrutura da matriz sólida das raízes no processo de congelamento.

4.1.3 Demanda de energia elétrica

Os resultados da demanda de energia elétrica dos ensaios de secagem com HTST das raízes de chicória são apresentados na Tabela 4.12 de acordo com a matriz do DCCR (Tabela 3.6)

Ensaios	Variáveis d	o Processo	Resposta
	T (°C)	t (min)	EA (kWh)
1	116	4	0,550
2	144	4	0,755
3	116	24	3,301
4	144	24	4,528
5	110	14	1,887
6	150	14	2,654
7	130	0	0,000
8	130	28	5,206
9	130	14	2,648
10	130	14	2,662
11	130	14	2,663

Tabela 4.12. Resultados da secagem com HTST na resposta demanda da energia elétrica EA (kWh).

Pode-se observar na Tabela 4.12 que o menor consumo energético da secagem foi obtido nos ensaios 1 e 2 e os ensaios que demandaram maior consumo de energia foram 4 e 8. Já o ensaio 7, por ser aquele no qual não foi feita a secagem, não teve consumo energético. Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais desta resposta, considerando-se o intervalo de confiança de 95 %, são apresentados na Tabela 4.13.

Resposta	Fatores	Coeficiente	Erro	t (5)	p- valor
		de regressão	Padrão		
EA (kWh)	Média Global	2,60*	0,10	26,05	0,000002
	Temperatura (L)	0,31*	0,06	5,14	0,003651
	Temperatura (Q)	-0,20*	0,07	-2,81	0,037560
	tempo (L)	1,74*	0,06	28,36	0,000001
	tempo (Q)	-0,04	0,07	-0,53	0,621537
	T (L) x t (L)	0,26*	0,09	2,95	0,031771

Tabela 4.13. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta demanda de energia elétrica EA (kWh) da pré-secagem HTST.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Após a identificação dos coeficientes de regressão estatisticamente significativos, foi determinada a validade do modelo e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseada no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.14.

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	Fcal	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
EA (kWh)	Regressão	25,39	4	6,35	240,90	3,36	0,99
	Resíduo	0,16	6	0,03			
	Falta ajuste	0,16	4	0,04			
	erro puro	0,00	2	0,00			
	Total	25,55	10				
	Modelo: EA = 2,567+ 0,314*T – 0,193T ² + 1,736*t +0,255*T*t						

Tabela 4.14. Análise de variância para a resposta demanda de energia elétrica - EA (kWh) da secagem HTST.

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Verificou-se que o modelo foi gerado em função da temperatura e do tempo da présecagem com HTST e apresentou coeficientes de determinação (\mathbb{R}^2) igual a 0,99, indicando que o modelo explicou o 99% da variação dos dados observados. Os valores de F_{cal} foram superiores ao F_{tab} , implicando que para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar a superfície de resposta e respectiva curva de contorno (Figura 4.5).



FIGURA 4.5. Superfícies de resposta e curvas de contorno para a demanda total de energia.

Através da análise de superfície de resposta e curva de contorno (Figura 4.5), pode-se verificar que, para a obtenção de menor demanda de energia elétrica no processo de pré-secagem com HTST, há uma região onde diferentes combinações dos parâmetros podem ser utilizados.

4.1.4 Otimização e validação da pré-secagem HTST das raízes de chicória

Para avaliar as respostas simultaneamente e encontrar as condições ótimas das variáveis do processo para o produto congelado, foram utilizados os modelos das respostas que apresentaram validade estatística, baseada na porcentagem de variação explicada (R²) e na distribuição de Fischer (Teste F). Verificou-se que, apenas os modelos obtidos para teor de água, e módulo de elasticidade apresentaram um R² \geq 0,70 e valores de F_{cal} maiores que o F_{tab}. Sob esses critérios, somente os modelos destas respostas foram utilizados para gerar as superfícies de resposta. Os modelos obtidos para as variáveis: força máxima, tensão máxima e rigidez, apresentaram R²<0,70, indicando o baixo ajuste dos modelos aos dados experimentais.

A otimização simultânea das respostas obtidas no planejamento, realizada de modo a maximizar o módulo de elasticidade e minimizar teor de água das raízes de chicória, foi feita visualizando as regiões de cor vermelha escuro para a resposta módulo de elasticidade e verde escuro para a resposta teor de água sendo estas determinadas como região ótima. Dessa forma, o valor do ponto ótimo correspondeu aos valores mais altos das variáveis independentes utilizados na secagem HTST (+ α): 150 °C e 28 min. Não foi levado em consideração o consumo de energia porque nesta fase o importante foi viabilizar o processo posterior. Isso só seria possível se o produto mantivesse uma resistência adequada à compressão e resistisse aos esforços gerados num processo contínuo de secagem. Concomitantemente, avaliou-se o teor de água no final da présecagem, pois o interesse era diminuir este, para que o produto entre num processo de secagem com um teor de água baixo.

Os resultados da validação experimental das condições ótimas de processo para a pré-secagem com HTST de raízes de chicória, são apresentados na Tabela 4.15. Para a validação dos dados foram utilizados os modelos obtidos e realizadas 3 repetições experimentalmente. São apresentados os valores preditos, os valores obtidos experimentalmente nas condições ótimas e o desvio médio relativo entre os valores.

Resposta	Valor Predito V (Ótimo) Expe		DRM (%)
Teor de água U _{bs} (kg kg ⁻¹)	0,49	0,53 ± 0,18	0,067
Módulo Elasticidade YM (MPa)	1,64	1,58 ± 0,31	0,038

Tabela 4.15: Resultado da validação das condições ótimas obtidas para a secagem HTST de raízes de chicória.

Os valores experimentais obtidos para as respostas foram próximos aos valores preditos e apresentaram baixos valores de desvio médio relativo, indicando que as condições operacionais foram adequadas para a obtenção dessas respostas.

4.2 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DTR

As curvas F e E foram calculadas com as equações 2.8 e 2.9, respectivamente, para cada ensaio e determinou-se o Tempo de Residência correspondente. Como mostra dos resultados os valores são apresentados na Figura 4.6 para o ensaio 1. As outras figuras são apresentadas no APÊNDICE A.



Tempo de Residência (s)



Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental (Tabela 3.1) para a determinação do tempo de residência (DTR), considerando a rotação do eixo das pás (RP) e a rotação da rosca alimentadora (A), são apresentados na Tabela 4.16.

Ensaios	Variáveis d	o Processo	Resposta
	RP (RPM)	A (RPM)	DTR (s)
1	49,6	46,3	94,2
2	61,8	46,3	92,1
3	49,6	57,7	148,1
4	61,8	57,7	66,1
5	47,1	52	110,7
6	64,3	52	64,8
7	55,7	44	90,0
8	55,7	60	75,2
9	55,7	52	75,5
10	55,7	52	87,3
11	55,7	52	81,4

Tabela 4.16. Resultados da determinação do tempo de residência (DTR) das raízes de chicória no secador contínuo.

O tempo de residência apresentou valores entre 64,8 e 148,1 s. considerando a mesma quantidade de raízes de chicória no secador contínuo. A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados e suas interações sobre a resposta DTR os quais são apresentados na Tabela 4.17.

Docnocta	Fatores	Coeficiente de	Erro	t (6)	p- valor
Resposta		regressão	Padrão		
DTR (s)	Média Global	81,39*	7,57	10,74	0,00012
	RP (L)	-18,63*	9,28	-4,02	0,01016
	RP (Q)	6,93	11,04	1,26	0,26493
	A (L)	0,87	9,28	0,19	0,85901
	A (Q)	4,35	11,04	0,79	0,46612
	RP (L) x A (L)	-19,96*	13,12	-3,04	0,02864

Tabela 4.17. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta DTR.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Após a identificação dos coeficientes de regressão estatisticamente significativos, para a resposta DTR foi determinada a validade do modelo e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseada no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Análise de variância para a resposta DTR.

Docnosta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	F	с *	D 2
Resposta	variação	quadrática	liberdade	quadrática	F cal	∎ tab	N²
DTR (s)	Regressão	4371,3	2	2185,6	14,93	4,46	0,79
	Resíduo	1171,0	8	146,4			
	Falta ajuste	1100,9	6	183,5	5,24	19,33	
	erro puro	70,1	2	35,0			
	Total	5542,2	10				
Modelo: DTR = 89,59 - 18,63*RP - 19,96*RP*A							

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Verificou-se que o modelo da resposta DTR foi influenciado, tanto pela rotação do eixo das pás, quanto pela rotação da rosca alimentadora, e apresentou coeficiente de

determinação (R²) igual a 0,79, indicando que o modelo explicou o 79% da variação dos dados observados. Para a análise da regressão, o valor de F_{cal} foi superior ao F_{tab} , e para a análise da falta de ajuste o valor do F_{cal} foi inferior ao F_{tab} , implicando que para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar as superfícies de resposta e respectivas curvas de contorno (Figura 4.7).





Pode-se observar no modelo gerado que a rotação do eixo das pás tem um efeito linear negativo na DTR. Da mesma forma, a combinação entre as duas rotações gerou um efeito negativo na DTR. Isto se verificou na análise de superfície de resposta (Figura 4.7). Este resultado esteve de acordo com o esperado, pois a maior rotação, mais rápido se movimenta o sólido dentro do secador, causando menor tempo de residência do mesmo.

4.3 SECAGEM CONTÍNUA DE RAÍZES DE CHICÓRIA (SECADOR CONVECTIVO COM APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA)

Para esta etapa, inicialmente, as raízes de chicória foram submetidas a présecagem com HTST nas condições do ponto ótimo (150 °C e 28 min), seguida da secagem contínua no secador convectivo com aplicação de radiação infravermelha conforme o planejamento experimental descrito na seção 3.2.5.2.

A aplicação do tempo da radiação infravermelha foi determinada a partir do modelo obtido na análise de DTR. A rotação da rosca alimentadora foi fixada em 55 rpm.

Sendo assim, o tempo de aplicação da radiação infravermelha foi fixada em função da rotação do eixo das pás. Os tempos correspondentes são apresentados na Tabela 4.19.

Variável	-α (-1,68)	-1	0	+1	+α(+1,68)
Rotação eixo das pás (rpm)	47,14	50,57	55,71	60,75	64,30
Tempo da radiação infravermelha (s)	106	99,4	89,6	80	73,2

Tabela 4.19. Definição dos tempos da aplicação da radiação infravermelha na secagem.

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas do teor de água em função do tempo de secagem e da taxa de secagem em função do teor de água para o ensaio 1. As curvas para os outros ensaios são apresentadas no APÊNDICE B.



FIGURA 4.8. Curva do teor de água em função do tempo de secagem e taxa da secagem em função do teor de água para o ensaio 1 de secagem.

Os resultados observados na Figura 4.8 e as curvas apresentadas no APÊNDICE B, são coerentes com as teorias clássicas de secagem. Deve-se notar apenas que as alterações entre as curvas são causadas pelas diferenças nas variáveis dos ensaios nas condições experimentais. Da mesma forma, apresenta-se a evolução da taxa de secagem em função do teor de água para os ensaios e é possível observar a não existência de um período de taxa constante em todas as condições experimentais utilizadas. Este fato pode ser atribuído a que os dados correspondem só à etapa da secagem contínua e não está sendo considerado o fenômeno na etapa da pré-secagem. Os resultados obtidos da taxa de secagem média para os ensaios da secagem contínua são apresentados na Tabela 4.20.

	variaveis do processo		DCesso	Taxa ue secagelli		
Ensaios	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	$dX/dt [kg_{\rm H20} kg_{\rm MS}^{-1}]$		
1	2,04	48	50,57	1,51E-04		
2	2,74	48	50,57	2,36E-04		
3	2,04	72	50,57	1,72E-04		
4	2,74	72	50,57	1,93E-04		
5	2,04	48	60,75	1,18E-04		
6	2,74	48	60,75	1,38E-04		
7	2,04	72	60,75	3,08E-04		
8	2,74	72	60,75	2,16E-04		
9	1,87	60	55,71	1,90E-04		
10	2,96	60	55,71	1,22E-04		
11	2,38	40	55,71	2,15E-04		
12	2,38	80	55,71	2,35E-04		
13	2,38	60	47,14	1,22E-04		
14	2,38	60	64,30	2,17E-04		
15	2,38	60	55,71	1,76E-04		
16	2,38	60	55,71	1,93E-03		
17	2,38	60	55,71	1,41E-04		

Tabela 4.20. Resultados da taxa de secagem média do processo de secagem contínuo.Variáveis do processoTaxa de secagem

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais desta resposta foram determinados através do erro residual, considerando-se o intervalo de confiança de 95%. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.21.

Docnocto	Fatoroc	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n valor
Resposta	Fatores	regressão	Padrão	(/)	p- valoi
	Média Global	7,46E-04	3,16E-04	2,36	0,050
	VA (L)	-5,92E-06	2,97E-04	-0,04	0,969
	VA (Q)	-2,00E-04	3,26E-04	-1,23	0,259
dX/dt [kg _{H20} kg _{MS} -1]	T (L)	2,05E-05	2,97E-04	0,14	0,894
	T (Q)	-1,76E-04	3,26E-04	-1,08	0,317
	RP (L)	1,38E-05	2,97E-04	0,09	0,929
	RP (Q)	-1,95E-04	3,26E-04	-1,20	0,270
	VA (L) x T (L)	-2,20E-05	3,88E-04	-0,11	0,913
	VA (L) x RP (L)	-2,23E-05	3,88E-04	-0,12	0,912
	T (L) x RP (L)	3,61E-05	3,88E-04	0,19	0,858

Tabela 4.21. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta taxa de secagem média das amostras de raiz de chicória.

Esta resposta não apresentou coeficientes de regressão estatisticamente significativos, e não foi possível determinar a validade do modelo e o seu ajuste aos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseada no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²). Isto é devido a que, possivelmente, o processo de secagem foi governado pela radiação infravermelha, ficando mascaradas as variáveis independentes do planejamento experimental. Portanto, foram realizados ensaios de secagem avaliando a intermitência da radiação infravermelha. Foi escolhido um dos ensaios com a menor demanda de energia elétrica, sendo este considerado como o tratamento com as condições ótimos da secagem, uma vez que não houve diferença significativa entre as taxas de secagem. A descrição detalhada desta análise esta referida no item 4.4.7.

4.3.1. Teor de água e atividade de água

Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental (Tabela 3.8) para o teor de água (U_{bs}) e atividade de água (a_w) são apresentados na Tabela 4.22.

Ensaios	Variáveis do processo		esso	Respo	ostas
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	U _{bs} (kg kg ⁻¹)	a _w (decimal)
1	2,04	48	50,57	0,178	0,586
2	2,74	48	50,57	0,152	0,451
3	2,04	72	50,57	0,159	0,502
4	2,74	72	50,57	0,128	0,390
5	2,04	48	60,75	0,180	0,534
6	2,74	48	60,75	0,140	0,483
7	2,04	72	60,75	0,147	0,528
8	2,74	72	60,75	0,144	0,390
9	1,87	60	55,71	0,164	0,487
10	2,96	60	55,71	0,175	0,595
11	2,38	40	55,71	0,166	0,525
12	2,38	80	55,71	0,144	0,292
13	2,38	60	47,14	0,156	0,600
14	2,38	60	64,30	0,128	0,373
15	2,38	60	55,71	0,205	0,525
16	2,38	60	55,71	0,159	0,464
17	2,38	60	55,71	0,156	0,508

Tabela 4.22. Resultados do teor de água (U_{bs}) e atividade de água (a_w) das amostras de raiz de chicória.

Observa-se que o teor de água em base seca ficou entre 0,128 e 0,205 (ensaios 14 e 15). Na média, o teor de água das raízes de chicória no processo de secagem contínuo diminuiu em 70 % quando comparado com o valor de teor de água após a finalização da secagem com HTST, sendo esta em base seca igual a 0,53 (kg kg⁻¹). Os valores de atividade de água para as amostras ficaram entre 0,29 e 0,60 (ensaios 12 e 13). A atividade de água para as amostras *in natura* foi de 0,95 e para as amostras antes do processo de secagem convectiva foi de 0,84. Nesta etapa de secagem quando comparado com a etapa HTST, a atividade de água diminuiu em média em 43 %.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre as respostas teor de água e atividade de água, os quais são apresentados na Tabela 4.23.

Dognosta	Fataras	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n valar
Resposta	Fatores	regressão	Padrão	ι(/)	p- valoi
	Média Global	0,173*	0,011	15,19	1,29E-06
	VA (L)	-0,006	0,011	-1,12	3,01E-01
	VA (Q)	-0,002	0,012	-0,26	8,03E-01
	T (L)	-0,008	0,011	-1,49	1,79E-01
U _{bs} (kg kg ⁻¹)	T (Q)	-0,007	0,012	-1,12	3,01E-01
	RP (L)	-0,004	0,011	-0,72	4,96E-01
	RP (Q)	-0,011	0,012	-1,91	9,75E-02
	VA (L) x T (L)	0,004	0,014	0,59	5,76E-01
	VA (L) x RP (L)	0,002	0,014	0,25	8,11E-01
	T (L) x RP (L)	0,002	0,014	0,25	8,08E-01
	Média Global	0,499*	0,048	10,38	1,67E-05
	VA (L)	-0,019	0,045	-0,83	4,35E-01
	VA (Q)	0,016	0,050	0,65	5,38E-01
	T (L)	-0,047	0,045	-2,06	7,79E-02
a (decimal)	T (Q)	-0,031	0,050	-1,24	2,54E-01
	RP (L)	-0,028	0,045	-1,22	2,62E-01
	RP (Q)	-0,003	0,050	-0,12	9,05E-01
	VA (L) x T (L)	-0,008	0,059	-0,28	7,90E-01
	VA (L) x RP (L)	0,007	0,059	0,24	8,15E-01
	T (L) x RP (L)	0,006	0,059	0,19	8,53E-01

Tabela 4.23. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas teor de água e atividade de água.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

A análise estatística para o teor de água não apresentou coeficientes de regressão estatisticamente significativos, sendo que seus erros padrões são maiores que os próprios coeficientes do modelo. Assim, não foi possível determinar a validade do modelo e o seu ajuste dos dados experimentais através da análise de variância (ANOVA), baseada no Teste F e na porcentagem de variação explicada (R²).

Para a atividade de água, analisando a Tabela 4.23, também foi observado que os coeficientes de regressão não foram estatisticamente significativos, sendo que seus erros

padrões são maiores que os próprios coeficientes do modelo. A Tabela 4.24 da ANOVA mostra justamente isso, visto que a porcentagem de variação explicada pela regressão é baixa (26 %) e o F_{cal} próximo ao F_{tab} . Não houve um bom ajuste dos valores experimentais ao modelo, indicando que não foi adequado gerar modelo nem superfície de resposta.

ue raiz ue cili	coria.					
Fonte de	Soma	Graus de	Média	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
variação	quadrática	liberdade	quadrática			
Regressão	0,030	1	0,0296	5,32	4,54	0,26
Resíduo	0,083	15	0,0056			
Falta ajuste	0,082	13	0,0063			
Erro puro	0,002	2	0,0010			
Total	0,113	16				
-		-				

Tabela 4.24. Análise de variância ANOVA para a resposta atividade de água das amostras de raiz de chicória.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Ao constatar que as variáveis do processo (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) não diferiram estatisticamente entre si (p < 0,05), estas mostram que contribuíram da mesma forma para a redução do teor de água e da atividade de água das amostras. Estes resultados estão de acordo com o resultado anterior, no qual a taxa de secagem também não diferiu significativamente entre os tratamentos. Além disso, esta secagem foi mais efetiva no decréscimo da atividade de água quando comparada à pré-secagem com HTST. Entretanto, os resultados alcançados para a atividade de água das raízes de chicória secas com HTST foram altos, indicando que esse produto é altamente perecível e, com isso, é necessária a aplicação de um processo complementar a fim de contribuir para a estabilidade microbiológica e conservação dos atributos de qualidade das raízes, sendo então a secagem convectiva contínua uma boa alternativa já que apresentou valores de atividade de água inferiores a 0,6.

4.3.2. Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, porosidade e encolhimento das raízes de chicória

Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental (Tabela 3.7) para densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (S_b) das raízes de chicória *in natura* e secas são apresentados na Tabela 4.25.

Observa-se que o processo de secagem diminui a densidade aparente e real e aumenta a porosidade das partículas das raízes de chicória quando comparada com o produto *in natura*. Observou-se também que a secagem gerou um encolhimento volumétrico médio de 168 % das raízes.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre as respostas densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (S_b), os quais são apresentados nas Tabelas 4.26 e 4.27.

F	Variáveis do processo				Respostas				
Ensalos	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	$\rho_a(g/cm^3)$	$\rho_r g/cm^3$)	$\rho_{\rm ms}$ (g/cm ³)	$\epsilon_p(adm)$	ϵ_{ms} (adm)	S _b (adm)
1	2,04	48	50,57	0,303	0,747	1,471	0,592	0,492	1,675
2	2,74	48	50,57	0,303	0,825	1,474	0,632	0,440	1,675
3	2,04	72	50,57	0,304	0,827	1,480	0,632	0,441	1,675
4	2,74	72	50,57	0,301	0,844	1,468	0,644	0,425	1,683
5	2,04	48	60,75	0,304	0,822	1,466	0,630	0,439	1,667
6	2,74	48	60,75	0,304	0,877	1,493	0,653	0,412	1,683
7	2,04	72	60,75	0,308	0,845	1,485	0,635	0,431	1,692
8	2,74	72	60,75	0,306	0,862	1,476	0,645	0,416	1,692
9	1,87	60	55,71	0,295	0,840	1,490	0,649	0,436	1,708
10	2,96	60	55,71	0,314	0,853	1,489	0,632	0,427	1,675
11	2,38	40	55,71	0,302	0,882	1,466	0,657	0,398	1,700
12	2,38	80	55,71	0,299	0,844	1,446	0,645	0,416	1,692
13	2,38	60	47,14	0,300	0,762	1,488	0,606	0,433	1,692
14	2,38	60	64,30	0,300	0,837	1,478	0,642	0,434	1,675
15	2,38	60	55,71	0,300	0,799	1,458	0,624	0,452	1,683
16	2,38	60	55,71	0,305	0,825	1,452	0,630	0,432	1,667
17	2,38	60	55,71	0,297	0,798	1,445	0,627	0,447	1,700
in				0,509	0,925		0,450		
natura									

Tabela 4.25. Resultados da densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (S_b) das raízes de chicória *in natura* e secas.

Docnosta	Fatoros	Coeficiente de	Erro	+ (7)	p- valor	
Respostu	Fatores	regressão	Padrão	(/)		
	Média Global	0,30047*	0,0030	101,08	2,44E-12	
	VA (L)	0,00195	0,0028	1,40	2,04E-01	
	VA (Q)	0,00185	0,0031	1,21	2,67E-01	
	T (L)	-0,00004	0,0028	-0,03	9,79E-01	
ρ_a (g cm ⁻³)	T (Q)	0,00053	0,0031	0,34	7,40E-01	
	RP (L)	0,00062	0,0028	0,44	6,72E-01	
	RP (Q)	0,00027	0,0031	0,18	8,65E-01	
	VA (L) x T (L)	-0,00060	0,0036	-0,33	7,52E-01	
	VA (L) x RP (L)	0,00016	0,0036	0,09	9,34E-01	
	T (L) x RP (L)	0,00097	0,0036	0,53	6,12E-01	
	Média Global	0,808*	0,013	61,25	8,12E-11	
	VA (L)	0,014*	0,012	2,24	5,98E-02	
	VA (Q)	0,012	0,014	1,81	1,13E-01	
	T (L)	0,003	0,012	0,49	6,38E-01	
$a \left(a am^3 \right)$	T (Q)	0,018*	0,014	2,67	3,22E-02	
pr (g cm ³)	RP (L)	0,021*	0,012	3,41	1,13E-02	
	RP (Q)	-0,004	0,014	-0,62	5,56E-01	
	VA (L) x T (L)	-0,012	0,016	-1,53	1,70E-01	
	VA (L) x RP (L)	-0,003	0,016	-0,34	7,45E-01	
	T (L) x RP (L)	-0,011	0,016	-1,42	2,00E-01	
	Média Global	1,4516*	0,0045	325,011	6,89E-16	
	VA (L)	0,0006	0,0042	0,307	7,68E-01	
	VA (Q)	0,0132*	0,0046	5,711	7,27E-04	
	T (L)	-0,0021	0,0042	-1,001	3,50E-01	
o_{ma} (g cm ⁻³)	T (Q)	0,0013	0,0046	0,572	5,85E-01	
pins (g cin)	RP (L)	0,0007	0,0042	0,327	7,53E-01	
	RP (Q)	0,0109*	0,0046	4,733	2,13E-03	
	VA (L) x T (L)	-0,0064*	0,0055	-2,322	5,32E-02	
	VA (L) x RP (L)	0,0036	0,0055	1,297	2,36E-01	
	T (L) x RP (L)	-0,0001	0,0055	-0,028	9,78E-01	

Tabela 4.26. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r) e densidade da matriz sólida (ρ_{ms}).

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Deeneste	Estavos	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n volor
Resposta	ratores	regressão	Padrão	τ(/)	p- valoi
	Média Global	0,628*	0,0079	79,82	1,27E-11
	VA (L)	0,004	0,0074	1,12	2,98E-01
	VA (Q)	0,003	0,0081	0,81	4,45E-01
	T (L)	0,002	0,0074	0,58	5,80E-01
ε _p	T (Q)	0,007	0,0081	1,75	1,24E-01
(adimensional)	RP (L)	0,009*	0,0074	2,49	4,15E-02
	RP (Q)	-0,003	0,0081	-0,63	5,51E-01
	VA (L) x T (L)	-0,005	0,0096	-1,08	3,16E-01
	VA (L) x RP (L)	-0,002	0,0096	-0,47	6,50E-01
	T (L) x RP (L)	-0,007	0,0096	-1,40	2,05E-01
	Média Global	0,443*	0,011	40,27	1,52E-09
	VA (L)	-0,009	0,010	-1,77	1,20E-01
	VA (Q)	-0,001	0,011	-0,20	8,46E-01
	T (L)	-0,003	0,010	-0,56	5,90E-01
ε _{ms}	T (Q)	-0,010	0,011	-1,72	1,30E-01
(adimensional)	RP (L)	-0,007	0,010	-1,40	2,05E-01
	RP (Q)	-0,001	0,011	-0,10	9,23E-01
	VA (L) x T (L)	0,006	0,014	0,88	4,08E-01
	VA (L) x RP (L)	0,003	0,014	0,48	6,43E-01
	T (L) x RP (L)	0,008	0,014	1,14	2,90E-01
	Média Global	0,0096*	0,0096	174,67	5,32E-14
	VA (L)	0,0045	0,0091	-0,50	6,31E-01
	VA (Q)	0,0050	0,0100	0,12	9,05E-01
	T (L)	0,0045	0,0091	0,45	6,68E-01
S _b	T (Q)	0,0050	0,0100	0,42	6,87E-01
(adimensional)	RP (L)	0,0045	0,0091	-0,05	9,62E-01
	RP (Q)	0,0050	0,0100	-0,47	6,54E-01
	VA (L) x T (L)	0,0059	0,0118	-0,18	8,65E-01
	VA (L) x RP (L)	0,0059	0,0118	0,18	8,65E-01
	T (L) x RP (L)	0,0059	0,0118	0,53	6,14E-01

Tabela 4.27. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (Sb).

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Para a densidade aparente, porosidade da matriz sólida e o encolhimento, não foi realizada a ANOVA por não apresentar fatores estatisticamente significativos. Sendo assim, estes fatores contribuíram na mesma proporção na redução da densidade aparente e no encolhimento das amostras. Para as outras respostas, foram retirados os termos não significativos e a reparametrização dos dados foi realizada. Foi feita a análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.28.

Verificou-se pela ANOVA (Tabela 4.27) que não foi possível gerar modelos para porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}). A análise não foi preditiva para descrever os dados experimentais, devido aos baixos coeficientes de determinação R² e valores de F_{cal} menores ao F_{tab}, refletindo os altos valores de falta de ajuste encontrados. Desse modo, não foi adequado gerar modelo e construir as superfícies de resposta, tendo em vista que os modelos não conseguem explicar a variabilidade dos dados experimentais.

Já para a densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), verificou-se que os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,70 e 0,84, respectivamente. Os valores de F_{cal} foram superiores ao F_{tab} , implicando que para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar as superfícies de resposta e respectivas curvas de contorno (Figura 4.9 e 4.10).

Através da análise da superfície de resposta e curvas de contorno (Figura 4.9), pode-se verificar que para a diminuição a densidade real deve-se trabalhar com velocidades do ar e temperaturas do ar com valores ao redor do ponto central e com velocidade da rotação do eixo das pás com os menores valores. A diminuição é explicada pelo mesmo processo de encolhimento. Porém, sabe-se que esse fenômeno traz em si uma diminuição da porosidade interna do produto que não é interessante num processo de reidratação posterior.

Resposta	Fonte de	Fonte de Soma Graus de		Média F _{cal}		F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
o (a am ²)	Regressão	1,45E-02	4	3,61E-03	6,85	2,48	0,7
	Resíduo	6,33E-03	12	5,27E-04			
	Falta ajuste	5,87E-03	10	5,87E-04	2,58	9,39	
pr (g cm *)	Erro puro	4,54E-04	2	2,27E-04			
	Total	2,08E-02	16				
	Modelo: ρ _r =0,8	302 + 0,014*VA	+ 0,014*VA ² ·	+ 0,019*T² + 0,0)21*RP		
	Regressão	3,10E-03	3	1,03E-03	21,9	2,56	0,8
	Resíduo	6,14E-04	13	4,72E-05			
o (g cm-3)	Falta ajuste	5,25E-04	11	4,77E-05	1,07	9,4	
	erro puro	8,89E-05	2	4,44E-05			
	Total	3,72E-03	16				
	Modelo: ρ_{ms} =	1,453 + 0,128*	VA ² + 0,011*R	XP ² – 0,006*VA*'	Г		
	Regressão	1,16E-03	1	1,16E-03	5,55	3,07	0,3
	Resíduo	3,12E-03	15	2,08E-04			
^{کو} (adimensional)	Falta ajuste	3,10E-03	13	2,39E-04	23,6	9,41	
(uumensionar)	erro puro	2,02E-05	2	1,01E-05			
	Total	4,28E-03	16				
	Regressão	2,29E-03	2	1,14E-03	3,78	2,73	0,4
c.	Resíduo	4,24E-03	14	3,03E-04			
٤ms (adimensional)	Falta ajuste	4,02E-03	12	3,35E-04	3,13	9,41	
	erro puro	2,14E-04	2	1,07E-04			
	Total	6,53E-03	16				

Tabela 4.28. Análise de variância para as respostas densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}).

*Teste F Tabelado a 90% de significância.

Observa-se na Tabela 4.28 que os modelos da densidade real (ρ_r) e densidade da matriz sólida (ρ_{ms}) estão em função das variáveis independentes do processo (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás).



FIGURA 4.9. Superfícies de resposta e curvas de contorno para densidade real (ρ_r).



FIGURA 4.10. Superfícies de resposta e curvas de contorno para densidade da matriz sólida (ρ_{ms}).

Pela análise da superfície de resposta e curvas de contorno geradas pelo modelo (Figura 4.10), verifica-se que para se obter valores baixos da densidade da matriz sólida, deve-se aplicar temperaturas do ar em qualquer valor dentro da faixa estudada e velocidade do ar e rotação do eixo das pás com valores próximos ao ponto central. Dentro das faixas estudadas das variáveis do processo, pode-se concluir que a densidade real e a densidade da matriz sólida foram afetadas por todas as variáveis independentes do processo de secagem contínuo.

4.3.3. Cinética de reidratação

Os resultados da razão de reidratação (RR) das raízes de chicória secas, para as diferentes temperaturas (25, 60 e 98°C) estão apresentados na Tabela 4.29 de acordo com a matriz do DCCR (Tabela 3.8).

Ensaios	Variáveis do processo			Respostas			
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	RR (25 °C)	RR (60 °C)	RR (98 °C)	
1	2,04	48	50,57	4,41	5,55	7,13	
2	2,74	48	50,57	5,47	5,05	5,05	
3	2,04	72	50,57	5,11	5,19	5,66	
4	2,74	72	50,57	6,47	6,63	4,92	
5	2,04	48	60,75	7,70	6,44	6,51	
6	2,74	48	60,75	5,56	5,96	4,53	
7	2,04	72	60,75	4,89	6,08	5,99	
8	2,74	72	60,75	5,64	5,98	5,79	
9	1,87	60	55,71	5,02	6,30	6,47	
10	2,96	60	55,71	5,72	5,66	5,94	
11	2,38	40	55,71	6,86	4,57	5,03	
12	2,38	80	55,71	5,84	6,11	6,35	
13	2,38	60	47,14	4,40	5,70	4,94	
14	2,38	60	64,30	5,13	4,84	4,77	
15	2,38	60	55,71	5,25	6,69	7,12	
16	2,38	60	55,71	5,22	5,52	6,51	
17	2,38	60	55,71	5,91	5,11	5,58	

Tabela 4.29. Resultados da razão de reidratação (RR) para cada uma das temperaturas (25, 60 e 98°C) das raízes de chicória secas.

Com os valores da razão de reidratação da Tabela 4.29 foram calculados os valores médios sendo que para a temperatura de 25°C foi de 5,56, para 60°C foi de 5,73 e para 98 °C foi de 5,78. Observou-se o aumento destes valores quando aumentou a temperatura da água, comportamento adequado para este tipo de análise.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre a resposta razão de reidratação os quais são apresentados na Tabela 4.30 para cada uma das temperaturas trabalhadas.

Para a razão de reidratação na temperatura de 60 °C, não foi realizada a ANOVA por não apresentar fatores estatisticamente significativos. Para as outras temperaturas (25 e 98 °C), foram retirados os termos não significativos e a reparametrização dos dados foi realizada. Foi feita a análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.31.
Resposta	Fatores	Coeficiente de	Erro	t (7)	p- valor
•		regressão	Padrão		
	Média Global	5,45*	0,254	21,42	1,22E-07
	VA (L)	0,16	0,239	1,36	2,17E-01
	VA (Q)	0,00	0,263	0,03	9,80E-01
	T (L)	-0,20	0,239	-1,68	1,37E-01
RR (25 °C)	T (Q)	0,35*	0,263	2,66	3,25E-02
	RP (L)	0,26	0,239	2,18	6,54E-02
	RP (Q)	-0,21	0,263	-1,60	1,54E-01
	VA (L) x T (L)	0,40*	0,312	2,55	3,80E-02
	VA (L) x RP (L)	-0,48*	0,312	-3,05	1,85E-02
	T (L) x RP (L)	-0,55*	0,312	-3,55	9,39E-03
	Média Global	5,75*	0,406	14,16	2,08E-06
	VA (L)	-0,05	0,382	-0,27	7,92E-01
	VA (Q)	0,15	0,420	0,71	5,01E-01
RR (60 °C)	T (L)	0,25	0,382	1,33	2,25E-01
	T (Q)	-0,08	0,420	-0,37	7,24E-01
Mit (00 C)	RP (L)	0,04	0,382	0,22	8,30E-01
	RP (Q)	-0,10	0,420	-0,49	6,38E-01
	VA (L) x T (L)	0,29	0,499	1,16	2,82E-01
	VA (L) x RP (L)	-0,19	0,499	-0,76	4,72E-01
	T (L) x RP (L)	-0,19	0,499	-0,78	4,63E-01
	Média Global	6,39*	0,369	17,33	5,23E-07
	VA (L)	-0,43*	0,346	-2,49	4,18E-02
	VA (Q)	-0,04	0,381	-0,18	8,59E-01
	T (L)	0,10	0,346	0,57	5,86E-01
RR (98 °C)	T (Q)	-0,22	0,381	-1,13	2,94E-01
	RP (L)	-0,02	0,346	-0,10	9,24E-01
	RP (Q)	-0,51*	0,381	-2,68	3,16E-02
	VA (L) x T (L)	0,39	0,453	1,72	1,29E-01
	VA (L) x RP (L)	0,08	0,453	0,35	7,34E-01
	T (L) x RP (L)	0,29	0,453	1,30	2,35E-01

Tabela 4.30. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta razão de reidratação para cada uma das temperaturas trabalhadas.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
	Regressão	6,33	3	2,11	5,45	3,41	0,56
	Resíduo	5,03	13	0,39			
RR (25 °C)	Falta ajuste	4,72	11	0,43	2,84	19,4	
	Erro puro	0,30	2	0,15			
	Total	11,35	16				
	Regressão	5,21	2	2,61	6,64	3,74	0,49
	Resíduo	5,50	14	0,39			
RR (98 °C)	Falta ajuste	4,29	12	0,36			
	Erro puro	1,20	2	0,60			
	Total	10,71	16				

Tabela 4.31. Análise de variância para a resposta razão de reidratação para as temperaturas de 25 e 98 °C das amostras se raiz de chicória seca.

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Analisando-se a Tabela 4.31, encontrou-se que mesmo sendo o F_{cal} maior que o F_{tab} da regressão dando significância, a porcentagem de variação explicada pela regressão é muito baixa (<57%). Sendo assim, não há um bom ajuste do modelo aos valores experimentais. Portanto, não foi adequado gerar modelo e superfície de resposta.

Para avaliar a cinética da reidratação, foram determinados os conteúdos adimensionais de umidade (Y) e construídas as curvas de reidratação para cada tratamento do planejamento experimental e cada temperatura de reidratação. Da mesma forma, foram aplicados os modelos descritos na seção 3.2.3.4.1 para avaliar a cinética. As curvas de reidratação são apresentadas na Figura 4.11 para o ensaio 1 nas diferentes temperaturas, como exemplo do comportamento. As outras curvas são apresentadas no APÊNDICE C.



FIGURA 4.11. Curvas da cinética de reidratação das raízes de chicória seca para o ensaio 1 do planejamento experimental. A) temperatura 25 °C. B) temperatura 60 °C. C) temperatura 98 °C.

Pode-se observar na Figura 4.11 que, no início da reidratação, a absorção de água acontece de maneira muito rápida. Quando o tempo de reidratação progrediu, houve uma diminuição da transferência de água e o sistema foi atingindo lentamente o equilíbrio. No equilíbrio os poros disponíveis ficaram praticamente cheios (BILBAO-SÁINZ et al., 2005; MALDONADO et al., 2010). As temperaturas mais elevadas resultaram em um aumento na magnitude da água absorvida. Por exemplo, a 25°C a reidratação atingiu o equilíbrio em 10000 segundos aproximadamente, enquanto o equilíbrio foi alcançado após 4000 e 1000 segundos a 60 e 98 °C, respectivamente. O aumento da temperatura a 98 °C aumentou a taxa de absorção de água e o equilíbrio foi atingido após 1000 segundos, representando uma redução de 63 % em média no tempo de reidratação em comparação com a reidratação a 25 °C.

Para este ensaio os valores os valores do teor de água ao final do processo de reidratação foram de 1,69_{bs}, 1,84_{bs} e 1,93_{bs} para as temperaturas de 25 °C, 60 °C e 89 °C respetivamente. As altas temperaturas de reidratação resultaram em valores maiores de teor de água possivelmente causado pelo processo prévio de secagem seguido do processo de reidratação (KROKIDA e PHILIPPOPOULUS, 2005; CHANG et al., 2006; LEMUS-MONDACA et al., 2009). Resultados semelhantes foram encontrados por Zura-

Bravo et al. (2013) na reidratação de pimentão vermelho quando reidratado com três diferentes temperaturas da água. Este comportamento mostrou que o processo de secagem gerou alterações irreversíveis na estrutura das raízes de chicória, reduzindo a porosidade e gerando a destruição das células (KROKIDA e MAROULIS, 2001; KROKIDA e MARINOS-KOURIS, 2003).

Na análise de superfície de resposta foram utilizados a D_{ef} do modelo de Fick com 5 termos e a constante do modelo de primeira ordem. Os valores das constantes dos modelos, o R² e o DRM são apresentados na Tabela 4.32 para a temperatura de 25 °C, na Tabela 4.33 para a temperatura de 60 °C e na Tabela 4.34 para a temperatura de 98 °C.

ENSAIO	VARIÁVI	EIS DO PR	ROCESSO	MODE	LO FICK		N	MODELO) PELEG		MODELO PRI	MEIRA OR	RDEM
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	R ²	DMR	К1	K ₂	R ²	DMR	K ₃	R ²	DMR
1	2,04	48	50,57	2,1E-09	0,99	0,051	1026,06	0,63	0,99	0,063	3,7E-04	0,96	0,113
2	2,74	48	50,57	2,6E-09	0,98	0,224	515,24	0,57	0,98	0,071	5,0E-04	0,91	0,142
3	2,04	72	50,57	4,1E-09	0,99	0,219	402,62	0,59	0,99	0,044	7,6E-04	0,95	0,102
4	2,74	72	50,57	2,2E-09	0,99	0,0683	705,05	0,49	0,99	0,056	4,0E-04	0,96	0,119
5	2,04	48	60,75	2,1E-09	0,99	0,3252	801,76	0,43	0,99	0,070	3,6E-04	0,97	0,113
6	2,74	48	60,75	2,4E-09	0,97	0,4287	1085,28	0,46	0,99	0,063	3,9E-04	0,99	0,071
7	2,04	72	60,75	2E-09	0,99	0,193	905,76	0,60	0,97	0,101	3,5E-04	0,92	0,152
8	2,74	72	60,75	1,7E-09	0,98	0,284	1302,87	0,48	0,99	0,084	3,0E-04	0,98	0,116
9	1,87	60	55,71	2,8E-09	0,99	0,130	720,43	0,57	0,99	0,060	4,9E-04	0,96	0,107
10	2,96	60	55,71	3,1E-09	0,99	0,191	498,87	0,56	0,97	0,075	5,6E-04	0,92	0,131
11	2,38	40	55,71	3,5E-09	0,99	0,156	450,79	0,48	0,98	0,060	6,0E-04	0,95	0,114
12	2,38	80	55,71	2E-09	0,99	0,188	1013,73	0,49	0,99	0,070	3,5E-04	0,98	0,111
13	2,38	60	47,14	1,9E-09	0,99	0,121	995,31	0,64	0,98	0,081	3,6E-04	0,94	0,131
14	2,38	60	64,30	1,6E-09	0,99	0,074	1092,92	0,57	0,97	0,097	2,8E-04	0,93	0,160
15	2,38	60	55,71	1,6E-09	0,99	0,066	1226,65	0,58	0,98	0,084	2,8E-04	0,94	0,137
16	2,38	60	55,71	1,3E-09	0,99	0,119	1586,32	0,53	0,98	0,081	2,4E-04	0,97	0,128
17	2,38	60	55,71	3,7E-09	0,99	0,084	467,98	0,52	0,99	0,047	6,4E-04	0,96	0,103

Tabela 4.32. Constantes dos modelos, R2 e DRM da cinética de reidratação na temperatura de 25 °C.

ENCALO	VARIÁVE	IS DO PR	OCESSO	MOD	ELO FIC	CK		MODEL	O PELEG		MODELO PR	RIMEIRA	ORDEM
ENSAIU	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	$D_{ef}(m^2 s^{-1})$	R ²	DMR	K1	K ₂	R ²	DMR	K3	R ²	DMR
1	2,04	48	50,57	3,4E-09	0,99	0,193	690,75	0,51	0,99	0,054	5,7E-04	0,97	0,094
2	2,74	48	50,57	4,8E-09	0,99	0,305	471,21	0,53	0,99	0,054	7,8E-04	0,97	0,090
3	2,04	72	50,57	3,9E-09	0,99	0,172	564,23	0,54	0,99	0,050	6,7E-04	0,98	0,092
4	2,74	72	50,57	5,1E-09	0,99	0,326	390,73	0,45	0,99	0,036	8,4E-04	0,99	0,064
5	2,04	48	60,75	4,8E-09	0,98	0,325	488,49	0,45	0,99	0,030	7,7E-04	0,99	0,055
6	2,74	48	60,75	8E-09	0,99	0,244	272,02	0,49	0,99	0,030	1,3E-03	0,99	0,046
7	2,04	72	60,75	3,4E-09	0,98	0,180	635,52	0,46	0,99	0,040	5,8E-04	0,99	0,078
8	2,74	72	60,75	5,8E-09	0,99	0,138	305,72	0,51	0,99	0,021	9,9E-04	0,98	0,081
9	1,87	60	55,71	3E-09	0,99	0,104	557,60	0,48	0,99	0,055	5,5E-04	0,97	0,112
10	2,96	60	55,71	6,9E-09	0,99	0,071	246,03	0,55	0,99	0,036	1,2E-03	0,96	0,083
11	2,38	40	55,71	8,3E-09	0,99	0,094	236,09	0,63	0,99	0,041	1,4E-03	0,96	0,086
12	2,38	80	55,71	3,3E-09	0,99	0,213	619,89	0,47	0,99	0,035	5,7E-04	0,99	0,080
13	2,38	60	47,14	8,8E-09	0,99	0,081	183,04	0,54	0,99	0,042	1,6E-03	0,96	0,083
14	2,38	60	64,30	6,8E-09	0,99	0,074	307,18	0,58	0,99	0,032	1,1E-03	0,98	0,077
15	2,38	60	55,71	3,8E-09	0,99	0,086	433,99	0,49	0,99	0,054	6,6E-04	0,96	0,109
16	2,38	60	55,71	5E-09	0,99	0,098	394,81	0,53	0,99	0,034	8,5E-04	0,98	0,087
17	2,38	60	55,71	5,2E-09	0,99	0,145	411,62	0,55	0,99	0,034	8,8E-04	0,98	0,079

Tabela 4.33. Constantes dos modelos, R² e DRM da cinética de reidratação na temperatura de 60 °C.

Ensaio	VARIÁVI	EIS DO PH	ROCESSO	MOD	ELO FICK	ζ.		MODEL	O PELEG		MODELO P	RIMEIRA	ORDEM
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	R ²	DMR	K ₁	K ₂	R ²	DMR	K ₃	R ²	DMR
1	2,04	48	50,57	1,4E-08	0,99	0,110	113,48	0,46	0,99	0,0154	2,3E-03	0,98	0,053
2	2,74	48	50,57	1,7E-08	0,99	0,283	110,29	0,57	0,99	0,0366	2,7E-03	0,97	0,059
3	2,04	72	50,57	1,1E-08	0,99	0,093	179,67	0,52	0,99	0,0274	1,8E-03	0,99	0,061
4	2,74	72	50,57	6,6E-09	0,99	0,377	373,98	0,53	0,99	0,0282	1,1E-03	0,99	0,046
5	2,04	48	60,75	1,1E-08	0,98	0,301	190,80	0,47	0,99	0,0327	1,8E-03	0,99	0,024
6	2,74	48	60,75	1,4E-08	0,99	0,196	175,58	0,60	0,99	0,0189	2,1E-03	0,99	0,042
7	2,04	72	60,75	8,7E-09	0,99	0,095	221,73	0,49	0,99	0,0417	1,4E-03	0,98	0,073
8	2,74	72	60,75	6,9E-09	0,99	0,227	308,46	0,49	0,99	0,0311	1,1E-03	0,98	0,073
9	1,87	60	55,71	8,8E-09	0,98	0,344	217,16	0,46	0,99	0,0334	1,5E-03	0,99	0,037
10	2,96	60	55,71	1E-08	0,99	0,432	177,16	0,52	0,99	0,0366	1,7E-03	0,98	0,065
11	2,38	40	55,71	1,3E-08	0,99	0,045	156,49	0,58	0,99	0,0259	2,1E-03	0,98	0,063
12	2,38	80	55,71	9,8E-09	0,98	0,489	220,46	0,45	0,99	0,0231	1,6E-03	0,99	0,035
13	2,38	60	47,14	8,4E-09	0,99	0,168	240,07	0,57	0,99	0,0237	1,5E-03	0,98	0,060
14	2,38	60	64,30	1,5E-08	0,99	0,474	161,29	0,56	0,99	0,0361	2,3E-03	0,99	0,045
15	2,38	60	55,71	1,1E-08	0,99	0,095	134,83	0,48	0,99	0,0418	1,9E-03	0,96	0,080
16	2,38	60	55,71	1,1E-08	0,98	0,585	194,92	0,45	0,99	0,0264	1,7E-03	0,99	0,029
17	2,38	60	55,71	9,2E-09	0,99	0,765	254,38	0,50	0,99	0,0330	1,5E-03	0,99	0,050

Tabela 4.34. Constantes dos modelos, R² e DRM da cinética de reidratação na temperatura de 98 °C.

Analisando estes dados, observa-se que para o modelo de Fick, a D_{ef} da reidratação aumentou com o acréscimo da temperatura da água de trabalho. Resultados similares foram encontrados por Zura-Bravo et al. (2013) na reidratação de pimentão vermelho quando reidratado com três diferentes temperaturas da água. Os três modelos apresentaram um R² alto, sendo que o modelo que melhor ajuste apresentou nos dados de reidratação foi o de Peleg, já que foi o que teve menor desvio médio relativo dos dados.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre as respostas das constantes do modelo de Fick e do modelo de primeira ordem, os quais são apresentados nas Tabelas 4.35 e 4.36, respectivamente.

Dognosta	Fataraa	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n valar
Resposta	ratores	regressão	Padrão	(/)	p- valor
	Média Global	2,20E-09*	5,01E-10	4,39	0,003
	VA (L)	-5,52E-11	4,70E-10	-0,23	0,821
	VA (Q)	2,36E-10	5,18E-10	0,91	0,392
	T (L)	-1,23E-10	4,70E-10	-0,52	0,618
D _{ef} (m ² s ⁻¹) - 25°C	T (Q)	1,82E-10	5,18E-10	0,70	0,505
	RP (L)	-2,39E-10	4,70E-10	-1,02	0,344
	RP (Q)	-1,75E-10	5,18E-10	-0,68	0,521
	VA (L) x T (L)	-3,68E-10	6,15E-10	-1,20	0,270
	VA (L) x RP (L)	1,72E-10	6,15E-10	0,56	0,593
	T (L) x RP (L)	-3,18E-10	6,15E-10	-1,03	0,336
	Média Global	4,76E-09*	8,79E-10	5,41	0,001
	VA (L)	1,07E-09*	8,26E-10	2,60	0,035
	VA (Q)	-1,97E-10	9,09E-10	-0,43	0,678
	T (L)	-8,11E-10	8,26E-10	-1,96	0,090
D_{ef} (m ² s ⁻¹) - 60°C	T (Q)	8,72E-11	9,09E-10	0,19	0,853
	RP (L)	1,16E-10	8,26E-10	0,28	0,786
	RP (Q)	7,99E-10	9,09E-10	1,76	0,122
	VA (L) x T (L)	-1,34E-10	1,08E-09	-0,25	0,811
	VA (L) x RP (L)	3,82E-10	1,08E-09	0,71	0,502
	T (L) x RP (L)	-5,72E-10	1,08E-09	-1,06	0,324
	Média Global	1,05E-08*	1,53E-09	6,83	0,0002
	VA (L)	1,06E-10	1,44E-09	0,15	0,8866
	VA (Q)	-2,47E-10	1,58E-09	-0,31	0,7640
	T (L)	-2,08E-09*	1,44E-09	-2,89	0,0235
D _{ef} (m ² s ⁻¹) –	T (Q)	3,96E-10	1,58E-09	0,50	0,6323
98°C	RP (L)	2,31E-10	1,44E-09	0,32	0,7575
98°C	RP (Q)	5,40E-10	1,58E-09	0,68	0,5176
	VA (L) x T (L)	-1,47E-09	1,88E-09	-1,56	0,1617
	VA (L) x RP (L)	2,64E-10	1,88E-09	0,28	0,7872
	T (L) x RP (L)	5,07E-10	1,88E-09	0,54	0,6062

Tabela 4.35. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta D_{ef} do modelo de Fick nas três temperaturas avaliadas.

Resposta	Fatores	Coeficiente de	Erro	t (7)	p- valor
Ĩ		regressão	Padrão		
	Média Global	3,89E-04*	8,92E-05	4,36	0,003
	VA (L)	-8,57E-06	8,38E-05	-0,20	0,844
	VA (Q)	4,54E-05	9,22E-05	0,98	0,358
	T (L)	-1,72E-05	8,38E-05	-0,41	0,694
K₃– 25°C	T (Q)	2,66E-05	9,22E-05	0,58	0,583
1,5 20 0	RP (L)	-5,60E-05	8,38E-05	-1,34	0,223
	RP (Q)	-2,73E-05	9,22E-05	-0,59	0,572
	VA (L) x T (L)	-7,27E-05	1,09E-04	-1,33	0,226
	VA (L) x RP (L)	2,59E-05	1,09E-04	0,47	0,650
	T (L) x RP (L)	-5,01E-05	1,09E-04	-0,91	0,391
	Média Global	8,16E-04*	1,70E-04	4,81	0,002
	VA (L)	1,77E-04	1,60E-04	2,22	0,062
	VA (Q)	-3,21E-05	1,76E-04	-0,37	0,726
К ₃ - 60°С	T (L)	-1,23E-04	1,60E-04	-1,55	0,166
	T (Q)	2,33E-06	1,76E-04	0,03	0,980
	RP (L)	-2,42E-06	1,60E-04	-0,03	0,977
	RP (Q)	1,32E-04	1,76E-04	1,51	0,176
	VA (L) x T (L)	-1,40E-05	2,08E-04	-0,13	0,897
	VA (L) x RP (L)	6,57E-05	2,08E-04	0,63	0,549
	T (L) x RP (L)	-7,55E-05	2,08E-04	-0,72	0,492
	Média Global	1,69E-03*	2,16E-04	7,80	0,0001
	VA (L)	4,81E-06	2,03E-04	0,05	0,9635
	VA (Q)	-3,05E-05	2,24E-04	-0,27	0,7927
	T (L)	-3,10E-04*	2,03E-04	-3,05	0,0187
K₂- 98°C	T (Q)	4,87E-05	2,24E-04	0,44	0,6763
11, 50 0	RP (L)	-1,04E-05	2,03E-04	-0,10	0,9213
	RP (Q)	7,09E-05	2,24E-04	0,63	0,5462
	VA (L) x T (L)	-2,19E-04	2,65E-04	-1,65	0,1425
	VA (L) x RP (L)	5,46E-05	2,65E-04	0,41	0,6931
	T (L) x RP (L)	9,59E-05	2,65E-04	0,72	0,4936

Tabela 4.36. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta K_3 do modelo de primeira ordem nas três temperaturas avaliadas.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Para a D_{ef} e K₃ na temperatura de 25°C, não foi realizada a ANOVA por não apresentar fatores estatisticamente significativos. Para as outras respostas foram retirados dos termos não significativos e a foi realizada a reparametrização dos dados. Foi feita a análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para verificar-se a significância da regressão e gerar os modelos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.37.

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
	Regressão	3.36E-17	3	1.12E-17	6.89	3.41	0.61
\mathbf{D} (m ² c ¹)	Resíduo	2.11E-17	13	1.62E-18	-)	_,	-,
D_{ef} (III-S ⁻)	Falta	_)	10	1,011 10			
– 60°C	ajuste	1,99E-17	11	1,81E-18	3,06	19,4	
	Erro puro	1,19E-18	2	5,93E-19			
	Total	5,47E-17	16				
	Regressão	5,89E-17	1	5,89E-17	11,47	4,54	0,43
	Resíduo	7,70E-17	15	5,14E-18			
D _{ef} (m ² s ⁻¹)	Falta ajuste	7,46E-17	13	5,74E-18	4,64	19,4	
– 98°C	Erro puro	2,47E-18	2	1,24E-18			
	Total	1,36E-16	16				
	Regressão	4,28E-07	1	4,28E-07	5,52	4,54	0,27
	Resíduo	1,16E-06	15	7,75E-08			
K ₃ - 60°C	Falta ajuste	1,13E-06	13	8,73E-08	6,04	19,41	
	Erro puro	2,89E-08	2	1,44E-08			
	Total	1,59E-06	16				
	Regressão	1,31E-06	1	1,31E-06	12,42	4,54	0,45
	Resíduo	1,58E-06	15	1,05E-07			
К ₃ - 98°С	Falta ajuste	1,49E-06	13	1,15E-07	2,55	19,41	
	Erro puro	9,00E-08	2	4,50E-08	, 	,	
	Total	2,89E-06	16				

Tabela 4.37. Análise de variância para as respostas D_{ef} do modelo de Fick e K₃ do modelo de primeira ordem nas temperaturas de 60 e 98 °C.

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Analisando-se a Tabela 4.37, encontrou-se que, mesmo sendo o F_{cal} maior que o F_{tab} para a regressão (significativo), a porcentagem de variação explicada pela regressão é muito baixa (<62 %). Sendo assim, não há um bom ajuste do modelo aos valores experimentais em nenhuma das respostas avaliadas. Portanto, não foi adequado gerar modelo e superfície de resposta.

4.3.4. Textura

Calcularam-se as médias das 20 medições dos ensaios de compressão para cada tratamento como amostra do comportamento da Tensão (MPa) *versus* Deformação Específica (adimensional) utilizados para determinar do módulo de elasticidade das amostras de raiz de chicória seca. Os pontos fatoriais do delineamento experimental (Tabela 3.8) são apresentados na Figura 4.12, os pontos axiais na Figura 4.13 e os pontos centrais na Figura 4.14.



FIGURA 4.12. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de chicória secas – pontos fatoriais.

Pode-se observar na Figura 4.12 que, para os pontos fatoriais do delineamento experimental, ao manter as mesmas condições operacionais de duas variáveis, a deformação específica em função da tensão tem valores próximos apresentando comportamento similar. Por exemplo, o ensaio 1 e 5 tem as mesmas condições da velocidade do ar e a temperatura do ar, mudando só as condições da velocidade da rotação do eixo das pás.

Já para os pontos axiais, notou-se na Figura 4.13 que o módulo de elasticidade em função da inclinação da reta vai ser diferente quando duas variáveis atuam nas condições do ponto central e só uma atua nas condições extremas do planejamento.



FIGURA 4.13. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de chicória secas – pontos axiais.

Analisando a Figura 4.14 observa-se que os valores da deformação específica em função da tensão são próximos. Este comportamento era esperado, pois nas condições do ponto central, avalia-se a repetitibilidade do processo.



FIGURA 4.14. Resultado médio dos ensaios de compressão para as amostras de raiz de chicória secas – pontos centrais.

Com estes gráficos, através da linearização, foram determinados os valores do módulo de elasticidade YM (MPa). Com os dados do *sofware* do texturômetro foi possível obter os dados da força máxima $F_{máx}$ (N), tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹). Os resultados obtidos conforme o delineamento experimental são apresentados na Tabela 4.38 de acordo com a matriz do DCCR (Tabela 3.8).

Encoioc	Variáve	eis do pr	ocesso		Res	postas	
Elisaius	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	YM (MPa)	F _{máx} (N)	T _{máx} (MPa)	R (N m ⁻¹)
1	2,04	48	50,57	3,56	167,11	1,87	134070,0
2	2,74	48	50,57	6,90	195,31	2,25	173788,7
3	2,04	72	50,57	5,49	171,83	2,05	138548,8
4	2,74	72	50,57	8,18	184,76	2,14	190837,1
5	2,04	48	60,75	3,93	171,62	1,96	95769,5
6	2,74	48	60,75	7,13	223,05	2,39	168218,5
7	2,04	72	60,75	7,47	215,77	2,49	156283,9
8	2,74	72	60,75	6,61	208,44	2,29	148387,4
9	1,87	60	55,71	6,50	219,90	2,59	157346,7
10	2,96	60	55,71	4,03	179,94	2,11	113693,5
11	2,38	40	55,71	3,60	165,74	1,85	92829,3
12	2,38	80	55,71	8,01	210,55	2,41	191569,7
13	2,38	60	47,14	6,48	203,95	2,53	142208,0
14	2,38	60	64,30	8,21	189,37	2,07	206323,3
15	2,38	60	55,71	4,37	181,91	2,07	123521,9
16	2,38	60	55,71	5,61	202,68	2,31	149599,0
17	2,38	60	55,71	5,01	210,95	2,35	125657,7

Tabela 4.38. Resultados do módulo de elasticidade YM (MPa), força máxima $F_{máx}$ (N), tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹) das raízes de chicória secas.

Observa-se na Tabela 4.35 que os valores do módulo de elasticidade ficaram entre 4,37 e 8,21 MPa, os de F_{max} entre 165 e 223 N, os de T_{max} entre 1,85 e 2,59 MPa e os de Rigidez entre 92830 e 206400 N m⁻¹. Estes valores foram maiores quando comparados com os resultados obtidos na etapa da pré-secagem (Tabelas 4.4 e 4.7). Este comportamento foi o resultado do processo de secagem e da aplicação da radiação infravermelha que influenciam na estrutura do produto.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre as respostas módulo de elasticidade, força máxima, tensão máxima e rigidez os quais são apresentados nas Tabelas 4.39 e 4.40.

Docnosta	Fatoros	Coeficiente	Erro	+ (7)	n valor
Resposta	ratores	de regressão	Padrão	(7)	p- valui
	Média Global	5,00*	0,82	6,10	0,0005
	VA (L)	0,31	0,77	0,80	0,4489
	VA (Q)	0,08	0,85	0,19	0,8514
	T (L)	1,00*	0,77	2,59	0,0357
YM (MPa)	T (Q)	0,27	0,85	0,65	0,5371
	RP (L)	0,29	0,77	0,75	0,4803
	RP (Q)	0,82*	0,85	1,94	0,0942
	VA (L) x T (L)	-0,59	1,01	-1,17	0,2807
	VA (L) x RP (L)	-0,46	1,01	-0,91	0,3920
	T (L) x RP (L)	-0,02	1,01	-0,05	0,9635
	Média Global	198,67*	13,21	15,04	1,38E-06
	VA (L)	1,32	12,41	0,21	8,38E-01
	VA (Q)	-0,05	13,65	-0,01	9,95E-01
	T (L)	7,25	12,41	1,17	2,80E-01
F (N)	T (Q)	-4,21	13,65	-0,62	5,57E-01
	RP (L)	5,52	12,41	0,89	4,03E-01
	RP (Q)	-1,20	13,65	-0,18	8,65E-01
	VA (L) x T (L)	-9,25	16,21	-1,14	2,91E-01
	VA (L) x RP (L)	0,37	16,21	0,05	9,65E-01
	T (L) x RP (L)	4,42	16,21	0,55	6,02E-01

Tabela 4.39. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas módulo de elasticidade YM (MPa) e força máxima $F_{máx}$ (N).

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Despecta	Fataros	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n volor
Resposta	ratores	regressão	Padrão	(/)	p- valor
	Média Global	2,25*	0,15	14,79	1,55E-06
	VA (L)	-0,01	0,14	-0,10	9,20E-01
	VA (Q)	0,02	0,16	0,25	8,09E-01
	T (L)	0,11	0,14	1,48	1,83E-01
T _{már} (MPa)	T (Q)	-0,06	0,16	-0,75	4,76E-01
	RP (L)	0,00	0,14	0,04	9,71E-01
	RP (Q)	0,00	0,16	0,02	9,85E-01
	VA (L) x T (L)	-0,12	0,19	-1,24	2,57E-01
	VA (L) x RP (L)	-0,03	0,19	-0,31	7,67E-01
	T (L) x RP (L)	0,05	0,19	0,48	6,43E-01
	Média Global	132990,6*	20759,7	6,41	3,65E-04
	VA (L)	6088,1	19497,8	0,62	5,52E-01
	VA (Q)	695,2	21460,2	0,06	9,50E-01
	T (L)	16714,8	19497,8	1,71	1,30E-01
D (N 1)	T (Q)	3056,7	21460,2	0,28	7,84E-01
K (N M ⁻ 1)	RP (L)	2873,5	19497,8	0,29	7,77E-01
	RP (Q)	14393,8	21460,2	1,34	2,22E-01
	VA (L) x T (L)	-8472,0	25475,2	-0,67	5,27E-01
	VA (L) x RP (L)	-3431,8	25475,2	-0,27	7,95E-01
	T (L) x RP (L)	2394,5	25475,2	0,19	8,56E-01

Tabela 4.40. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas tensão máxima T_{máx} (MPa) e rigidez R (N m⁻¹).

Valores estatisticamente significativos: *p<0,10

Para a força máxima $F_{máx}$ (N) tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹), não foi realizada a ANOVA por não apresentar coeficientes de regressão estatisticamente significativos, sendo que seus erros padrões são maiores que os próprios coeficientes do modelo. Já para o módulo de elasticidade, foram retirados dos termos não significativos e a reparametrização dos dados foi realizada. Foi feita a análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar o modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 4.41.

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
	Regressão	20,719	2	10,3596	6,63	2,73	0,49
	Resíduo	21,886	14	1,5633			
YM (MPa)	Falta ajuste	21,123	12	1,7603	4,62	9,41	
	Erro puro	0,763	2	0,3814			
	Total	42,605	16				

Tabela 4.41. Análise de variância para as respostas módulo de elasticidade YM (MPa), das amostras se raiz de chicória secas.

*Teste F Tabelado a 90% de significância.

A análise de ANOVA para a resposta módulo de elasticidade YM (MPa) mostrou que a porcentagem de variação explicada pela regressão é baixa (<50 %) e o F_{cal} quase igual ao F_{tab} . Sendo assim, não houve um bom ajuste do modelo aos valores experimentais. Portanto, não foi adequado gerar modelo e superfície de resposta.

4.3.5. Análise de imagens

Na Figura 4.15, estão exemplificadas as imagens obtidas com o microscópio de Luz para as amostras *in natura*. As imagens mostram que as raízes de chicória apresentam as fibras vasculares, os elementos de vasos de condução do xilema e as células parenquimáticas com formato esférico.



FIGURA 4.15. Microscopia de Luz de amostras *in natura* de raiz de chicória.

Para verificar quais as modificações que ocorreram na estrutura celular (distribuição dos poros), em consequência da perda de água, aplicação da radiação infravermelha e demais caraterísticas do processo de secagem nas raízes de chicória, na Figura 4.16 apresentam-se imagens da microscopia de luz e na Figura 4.17 apresentam-se imagens da MEV. Dentre estas duas técnicas, a microscopia de luz mostrou-se uma técnica interessante e complementar para a identificação de estruturas celulares das raízes de chicória, permitindo a distinção qualitativa destas estruturas mediante a coloração das amostras.



FIGURA 4.16. Microscopia de Luz de amostras de raiz de chicória seca. (A)- tratamento 11 e (B) tratamento 12.



FIGURA 4.17. Imagens MEV das amostras de raiz de chicória seca. Direita - tratamento 11 e esquerda - tratamento 12.

Através das imagens obtidas pelo microscópio de luz (Figura 4.16), visualizaramse estruturas semelhantes às obtidas pelo MEV (Figura 4.17). As imagens correspondem aos tratamentos com menor temperatura (Trat. 11) e maior temperatura (Trat. 12) do delineamento experimental (Tabela 3.8). Observa-se que a temperatura de secagem tem uma influência direta nas células parenquimáticas as quais são mais susceptíveis à perda de água. As paredes das células ficam mais onduladas. Já para os tratamentos nos quais foram utilizadas temperaturas mais elevadas, observa-se retração no citoplasma das células. As pontoações correspondem à fragmentação do núcleo evidenciando a degeneração celular.

Nota-se que o efeito do HTST seguido da secagem contínua, promoveu nas raízes de chicória uma formação de uma estrutura porosa (corroborando os resultados de aumento da porosidade, item 4.3.2.), o que resultou num produto com boa expansão e alta capacidade de absorção de água, como apresentado no item 4.3.3. Resultados similares foram encontrados por Cardoso (1998).

Niamnuy et al. (2014), na sua revisão, destacam a importância do estudo das mudanças na microestrutura dos alimentos submetidos a secagem já que estas mudanças podem afetar a transferência de calor e massa no processo, e têm uma relação direta com as mudanças químicas e bioquímicas do produto. Os autores destacam também a importância de um pré-tratamento prévio ao processo de secagem para manter ou melhorar a microestrutura do alimento.

4.3.6. Extração de inulina

Utilizou-se o extrato de inulina para determinar a concentração de sólidos solúveis – SS (kg kg⁻¹) e analisar (via CLAE) a concentração de inulina – INU ($g_{INU} g_{MS}$ -1), glucose - GLU ($g_{GLU} g_{MS}$ -1) e frutose - FRU ($g_{FRU} g_{MS}$ -1) das amostras de raízes de chicória conforme o delineamento experimental (Tabela 3.8). Os resultados destas respostas são apresentados na Tabela 4.42.

Tabela 4.42. Resultados da concentração de sólidos solúveis – SS (kg kg⁻¹), inulina – INU (g_{INU} g_{MS}⁻¹), glucose - GLU (g_{GLU} g_{MS}⁻¹) e frutose-FRU (g_{FRU} g_{MS}⁻¹) das raízes de chicória secas.

	Variávei	s do proc	esso		Respostas					
Ensaios	$\mathbf{V} \mathbf{A} \left(\dots 1 \right)$	T (0C)	RP	SS	INU	GLU	FRU			
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	(rpm)	(kg kg-1)	(g _{INU} g _{MS} -1)	(g _{GLU} g _{MS} -1)	(g _{FRU} g _{MS} -1)			
1	2,04	48	50,57	0,66	0,45	0,012	0,025			
2	2,74	48	50,57	0,71	0,51	0,011	0,051			
3	2,04	72	50,57	0,66	0,68	0,013	0,029			
4	2,74	72	50,57	0,66	0,47	0,008	0,024			
5	2,04	48	60,75	0,64	0,59	0,009	0,025			
6	2,74	48	60,75	0,69	0,51	0,016	0,055			
7	2,04	72	60,75	0,66	0,68	0,011	0,032			
8	2,74	72	60,75	0,65	0,48	0,007	0,029			
9	1,87	60	55,71	0,67	0,56	0,009	0,037			
10	2,96	60	55,71	0,64	0,69	0,013	0,029			
11	2,38	40	55,71	0,72	0,52	0,010	0,025			
12	2,38	80	55,71	0,68	0,58	0,010	0,033			
13	2,38	60	47,14	0,67	0,64	0,011	0,021			
14	2,38	60	64,30	0,69	0,50	0,016	0,049			
15	2,38	60	55,71	0,65	0,60	0,012	0,021			
16	2,38	60	55,71	0,65	0,49	0,017	0,044			
17	2,38	60	55,71	0,67	0,66	0,016	0,045			

Como pode ser observado nos resultados obtidos para os diferentes ensaios realizados (Tabela 4.42), as raízes de chicória apresentaram sólidos solúveis entre 0,64 e 0,72 (kg kg⁻¹), conteúdo de inulina entre 0,45 e 0,69 (g_{INU} g_{MS}⁻¹), glucose entre 0,007 e 0,017 (g_{GLU} g_{MS}⁻¹) e frutose entre 0,021 e 0,55 (g_{FRU} g_{MS}⁻¹), valores estes mínimo e máximo, respectivamente, para os 17 ensaios. Observa-se que a variação destes valores para a condição do ponto central, com a qual se avalia a repetitividade do processo, apresentou valores próximos àqueles obtidos nas outras condições do delineamento.

Foi importante secar raízes de chicória cujas variáveis do processo não afetaram sua concentração de sólidos solúveis, inulina, glucose e frutose. Foram realizadas as análises para o produto "*in natura*" obtendo-se os valores para sólidos solúveis de 0,68 (kg kg⁻¹), inulina de 0,45 (g_{INU} g_{MS}⁻¹), glucose de 0,004 (g_{GLU} g_{MS}⁻¹) e frutose de 0,004 (g_{FRU} g_{MS}⁻¹).

Assim, era de se esperar que nenhuma variável fosse estatisticamente significativa para estas respostas e os resultados mostrados nas Tabelas 4.43 e 4.44 confirmam esta avaliação. Nenhum efeito linear, quadrático ou de interação entre as variáveis apresentou significância (p<0,05). Ou seja, não foi possível estabelecer um modelo para as respostas em função destas variáveis.

Tabela 4.43. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas concentração de sólidos solúveis – SS e inulina – INU.

Docnosta	Fatoros	Coeficiente de	Erro	+ (7)	n-valor
Resposta	ratores	regressão	Padrão	(7)	p- valoi
	Média Global	0,657*	0,011	60,23	9,14E-11
	VA (L)	0,003	0,010	0,65	5,35E-01
	VA (Q)	-0,003	0,011	-0,53	6,15E-01
	T (L)	-0,011	0,010	-2,17	6,65E-02
SS (kg kg ⁻¹)	T (Q)	0,012	0,011	2,12	7,14E-02
	RP (L)	0,000	0,010	-0,09	9,34E-01
	RP (Q)	0,005	0,011	0,95	3,74E-01
	VA (L) x T (L)	-0,013	0,013	-1,96	9,03E-02
	VA (L) x RP (L)	0,001	0,013	0,11	9,17E-01
	T (L) x RP (L)	0,004	0,013	0,65	5,36E-01
	Média Global	0,585*	0,055	10,72	1,35E-05
	VA (L)	-0,015	0,051	-0,59	5,72E-01
	VA (Q)	0,008	0,056	0,28	7,91E-01
	T (L)	0,026	0,051	1,00	3,52E-01
INII (σ ₁₀₁₁ σ ₁₀₆ -1)	T (Q)	-0,019	0,056	-0,68	5,16E-01
IIIO (GINO GW2)	RP (L)	-0,006	0,051	-0,24	8,14E-01
	RP (Q)	-0,012	0,056	-0,43	6,77E-01
	VA (L) x T (L)	-0,049	0,067	-1,46	1,87E-01
	VA (L) x RP (L)	-0,017	0,067	-0,52	6,19E-01
	T (L) x RP (L)	-0,017	0,067	-0,52	6,22E-01

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

,	Média Global	0,0149*	0,0014	10,90	1,21E-05
	VA (L)	0,0002	0,0013	0,30	7,74E-01
	VA (Q)	-0,0015	0,0014	-2,09	7,47E-02
	T (L)	-0,0005	0,0013	-0,77	4,68E-01
GLU (g _{GUU} g _{MS} -1)	T (Q)	-0,0017	0,0014	-2,48	5,24E-02
	RP (L)	0,0006	0,0013	0,92	3,89E-01
	RP (Q)	-0,0007	0,0014	-0,93	3,81E-01
	VA (L) x T (L)	-0,0016	0,0017	-1,96	9,03E-02
	VA (L) x RP (L)	0,0011	0,0017	1,26	2,47E-01
	T (L) x RP (L)	-0,0006	0,0017	-0,71	5,01E-01
	Média Global	0,0367	0,0067	5,48	0,0009
	VA (L)	0,0025	0,0063	0,79	0,4575
	VA (Q)	-0,0009	0,0069	-0,27	0,7950
	T (L)	-0,0021	0,0063	-0,67	0,5242
EDU (a a 1)	T (Q)	-0,0024	0,0069	-0,71	0,5033
FRU (gFRU gms ⁻⁺)	RP (L)	0,0042	0,0063	1,35	0,2184
	RP (Q)	-0,0003	0,0069	-0,07	0,9431
	VA (L) x T (L)	-0,0079	0,0082	-1,94	0,0941
	VA (L) x RP (L)	0,0008	0,0082	0,19	0,8566
	T (L) x RP (L)	0,0005	0,0082	0,13	0,9018

Tabela 4.44. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre as respostas concentração de glucose - GLU e frutose – FRU.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Assim, a secagem contínua no secador convectivo com aplicação de radiação infravermelha dentro das faixas estudadas, não apresentou alterações estatisticamente significativas na concentração de sólidos solúveis, inulina, glucose e frutose. Alguns estudos de secagem também não relataram mudanças na concentração de açúcar durante a secagem (BOROMPICHAICHARTKUL et al., 2009; CORREIA et al., 2009).

4.3.7. Demanda de energia elétrica

São apresentados os valores da demanda de energia elétrica de cada um dos componentes medidos no processo de secagem das raízes de chicória conforme o delineamento experimental (Tabela 3.8) na Tabela 4.45.

Ensaio	Variáveis	s do proc	cesso		Componente elétrico (kWh)					
	VA (m s ⁻¹)	T(°C)	RP (rpm)	Infra	Resis	Vent	Pás	Alimenta	EA (kWh)	
1	2,04	48	50,57	6,92	4,76	0,25	0,44	0,19	12,56	
2	2,74	48	50,57	6,86	7,66	0,50	0,44	0,19	15,65	
3	2,04	72	50,57	5,91	17,17	0,21	0,38	0,16	23,83	
4	2,74	72	50,57	5,2	18,42	0,38	0,33	0,14	24,47	
5	2,04	48	60,75	6,22	4,76	0,23	0,81	0,17	12,19	
6	2,74	48	60,75	7,98	7,98	0,58	1,04	0,22	17,81	
7	2,04	72	60,75	6,43	19,47	0,23	0,84	0,18	27,14	
8	2,74	72	60,75	4,85	17,58	0,35	0,63	0,13	23,55	
9	1,87	60	55,71	5,91	9,97	0,17	0,59	0,16	16,81	
10	2,96	60	55,71	5,27	11,99	0,47	0,53	0,15	18,40	
11	2,38	40	55,71	6,39	3,42	0,33	0,64	0,18	10,96	
12	2,38	80	55,71	4,73	17,72	0,24	0,47	0,13	23,30	
13	2,38	60	47,14	5,26	10,65	0,27	0,33	0,15	16,66	
14	2,38	60	64,30	6,99	12,26	0,36	1,1	0,19	20,91	
15	2,38	60	55,71	5,83	12,67	0,30	0,58	0,16	19,54	
16	2,38	60	55,71	5,35	11,05	0,28	0,53	0,15	17,36	
17	2,38	60	55,71	4,88	8,22	0,25	0,49	0,13	13,97	

Tabela	4.45.	Valores	de	energia	dos	componentes	elétricos	medidos	no	processo	de
secager	n de r	aízes de (chic	ória.							

*Infra: Emissor infravermelho; Resis: Resistências elétricas; Vent: Motor do Ventilador; Pás: motor da rotação do eixo das pás; Alimenta: motor da alimentação de entrada.

Observa-se na Tabela 4.45 que os componentes das resistências de infravermelho e as resistências elétricas foram os que geraram um maior aporte (32 e 62 %, respectivamente) à demanda total de energia no processo de secagem contínuo de raízes de chicória.

A análise estatística dos resultados experimentais possibilitou o cálculo dos coeficientes de regressão dos fatores estudados (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) e suas interações sobre a resposta demanda de energia elétrica os quais são apresentados na Tabela 4.46.

Posposta	Fatoros	Coeficiente de	Erro	t (7)	n-valor
Resposta	Fatores	regressão	Padrão	(/)	p- valoi
	Média Global	16,84*	1,38	12,21	5,66E-06
	VA (L)	0,62	1,30	0,95	3,72E-01
	VA (Q)	0,62	1,43	0,87	4,13E-01
	T (L)	4,51*	1,30	6,96	2,20E-04
EA (kWh)	T (Q)	0,45	1,43	0,63	5,47E-01
	RP (L)	0,83	1,30	1,28	2,41E-01
	RP (Q)	1,04	1,43	1,45	1,89E-01
	VA (L) x T (L)	-1,46	1,69	-1,72	1,29E-01
	VA (L) x RP (L)	-0,21	1,69	-0,25	8,09E-01
	T (L) x RP (L)	0,08	1,69	0,09	9,31E-01

Tabela 4.46. Coeficientes de regressão dos fatores estudados sobre a resposta demanda de energia elétrica - EA.

Valores estatisticamente significativos: *p<0,05

Foram retirados dos termos não significativos e a reparametrização dos dados foi realizada. Foi possível realizar a análise de variância (ANOVA) e aplicar o teste F. Os resultados são apresentados na Tabela 4.47.

Resposta	Fonte de	Soma	Graus de	Média	F _{cal}	F _{tab} *	R ²
	variação	quadrática	liberdade	quadrática			
	Regressão	277,320	1	277,3200	48,65	4,59	0,77
EA (kWh)	Resíduo	85,506	15	5,7004			
	Falta ajuste	69,748	13	5,3653			
	Erro puro	15,7572	2	7,8786			
	Total	362,826	16				
	Modelo: EA =	= 18,54 + 4,51	*Т				

Tabela 4.47. Análise de variância para a resposta demanda de energia elétrica - EA das amostras se raiz de chicória secas.

*Teste F Tabelado a 95% de significância.

Verificou-se que o modelo apresentou coeficientes de determinação (\mathbb{R}^2) igual a 0,77, indicando que o modelo explica 77% da variação dos dados observados. Os valores de F_{cal} foram superiores ao F_{tab} , implicando que para cada variável, o modelo obtido foi significativo e válido para descrever os dados experimentais, sendo possível gerar a superfície de resposta e respectiva curva de contorno (Figura 4.18).





Através da análise de superfície de resposta e curva de contorno (Figura 4.18), pode-se verificar que para a obtenção de menor demanda de energia elétrica o processo de secagem deve operar em condições de baixa temperatura. Este resultado está de acordo com os estudos de conservação de energia na secagem que aponta o aquecimento como o maior fonte de energia no processo.

4.3.8. Condições ótimas do processo de secagem

Analisando todos os resultados da análise estatística para as respostas avaliadas observou-se que ao não ser gerado nenhum modelo para descrever como as variáveis independentes (velocidade do ar, temperatura do ar e rotação do eixo das pás) dentro das faixas estudadas, influenciaram estas respostas, optou-se por escolher o ensaio 5 (VA = 2,04 m s⁻¹, T = 48 °C, RP = 60,75 rpm) como o ponto ótimo da secagem por ter valor da demanda de energia elétrica baixo, para avaliar a intermitência da radiação infravermelha, já que os resultados mostram que esta governou o processo de secagem. Para facilidade no reconhecimento do tratamento, o ponto ótimo do ensaio 5 foi identificado como ensaio OT-1.

Foi feita a secagem com as mesmas características operacionais, alternando os ciclos da aplicação da radiação infravermelha (intermitência) até obter taxas médias de secagem com valores próximos ao ensaio original (radiação infravermelha constante). Foi considerado um ciclo, como sendo uma passagem do material no secador. Esses ciclos foram feitos com ou sem a radiação infravermelha. Uma vez encontrado o ensaio com os ciclos corretos da radiação infravermelha (intermitente), foram avaliadas todas as propriedades do material seco além das isotermas de sorção e a temperatura de transição vítrea.

4.3.8.1 Taxa de secagem

Os valores da taxa média de secagem das avaliações da intermitência da radiação infravermelha para o ensaio OT-1 comparadas com o valor da taxa média da secagem com aplicação de radiação infravermelha constante (ensaio 5), estão apresentados na Tabela 4.48.

Tabela	4.48.	Taxas	média	de	secagem	dos	ensaios	avaliando	diferentes	ciclos	da
aplicaçã	ăo da r	adiação	o infrave	erm	elha (inter	mitê	ncia).				

Taxa secagem (ensaio 5) dX/dt (kg _{H20} kg _{MS} -1)	Intermitência 1-2 (1 ciclo com – 2 ciclos sem) dX/dt (kg _{H20} kg _{MS} -1)	Intermitência 1-1 (1 ciclo com – 1 ciclo sem) dX/dt (kg _{H20} kg _{MS} -1)	Intermitência 2-1 (2 ciclos com – 1 ciclo sem) dX/dt (kg _{H20} kg _{MS} -1)
0,00012	0,000040	0,000123	0,000123

Observa-se na Tabela 4.48 que o valor da taxa média de secagem para o ensaio com a intermitência 1-2 foi diferente ao valor do ensaio 5. Já para o ensaio com a intermitência 1-1 e 2-1 os valores foram próximos quando comparado com o ensaio 5. Dessa forma a intermitência 1-1 já foi suficiente para mostrar que a aplicação da radiação infravermelha influenciou o processo de secagem. Para avaliar as características do produto foi escolhida a intermitência 2-1 (2 ciclo com – 1 ciclos sem) como ponto ótimo (OT-1). As curvas da taxa de secagem para o ensaio OT-1 são apresentadas na Figura 4.19.



FIGURA 4. 19. Curvas da taxa de secagem com intermitência (2-1) na aplicação da radiação infravermelha no processo de secagem. Ensaio OT-1 ótimo.

4.3.8.2 Teor de água e atividade de água

O teor de água para o tratamento OT-1 ótimo foi de 0,143 (kg kg⁻¹) e a atividade de água de 0,477 (decimal); valores próximos as obtidos nos ensaios da secagem contínua com aplicação constante da radiação infravermelha (ensaio 5).

4.3.8.3 Densidade aparente, densidade real, densidade da matriz sólida, porosidade e encolhimento.

Os resultados obtidos para o ponto ótimo da secagem com intermitência para densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (S_b) são apresentados na Tabela 4.49.

Tabela 4.49. Resultados da densidade aparente (ρ_a), densidade real (ρ_r), densidade da matriz sólida (ρ_{ms}), porosidade das partículas (ϵ_p), porosidade da matriz sólida (ϵ_{ms}) e encolhimento (S_b) do ensaio OT-1 ótimo.

				Respostas		
Ensaio	$ ho_a$	$ ho_{ m r}$	$ ho_{ms}$	ε _p	ε _{ms}	S _b
	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(adimensional)	(adimensional)	(adimensional)
OT-1 Ótimo	0,29	0,81	1,474	0,63	0,448	1,80

Em geral, os resultados desta análise apresentaram valores dentro da faixa encontrada nos ensaios de secagem com aplicação da radiação infravermelha constante (Tabela 4.24). Assim, a intermitência da aplicação da radiação infravermelha, não afetou estas propriedades nas raízes de chicória.

4.3.8.4 Cinética da reidratação

Os resultados da razão de reidratação (RR) das raízes de chicória secas, para cada uma das temperaturas trabalhadas nesta análise (25, 60 e 98 °C) estão apresentados na Tabela 4.50 de acordo com a matriz do DCCR (Tabela 3.8).

Tabela 4.50. Resultados da razão de reidratação (RR) para cada uma das temperaturas trabalhadas (25, 60 e 98°C) das raízes de chicória secas.

Ensaio	Respostas								
	RR (25 °C)	RR (60 °C)	RR (98 °C)						
0T-1	F 01	())	4.05						
Ótimo	5,31	6,38	4,05						

Observa-se que os valores a razão de reidratação foram próximos quando comparados com os resultados obtidos na secagem contínua com aplicação da radiação infravermelha constante (Tabela 4.29). Isto quer dizer que a intermitência da radiação infravermelha não afetou a capacidade de reidratação das raízes de chicória nas diferentes temperaturas da água no processo.

Para avaliar a cinética da reidratação foram determinados os conteúdos adimensionais de umidade Y e construídas as curvas de reidratação para cada tratamento e cada temperatura de reidratação. Da mesma forma, foram aplicados os modelos descritos na seção 3.2.3.4.1 para avaliar a cinética. As curvas de reidratação são

apresentadas na Figura 4.20 para o ensaio OT-1 ótimo nas diferentes temperaturas de reidratação.



FIGURA 4.20. Curvas da cinética de reidratação das raízes de chicória seca para o ensaio OT-1. A) temperatura 25 °C. B) temperatura 60 °C. C) temperatura 98 °C.

O comportamento das curvas de reidratação (Figura 4.20) para o ensaio OT-1 foi similar ao encontrado nas curvas nos ensaios com aplicação constante da radiação infravermelha (Figura 4.11 e APÊNDICE C). Os valores das constantes dos modelos de Fick, Peleg e Primeira Ordem, o R² e o DRM são apresentados na Tabela 4.51 para as temperatura estudadas neste ensaio.

Ensaio	MODELO FICK			MODELO PELEG				ORDEM		
	D _{ef} (m ² s ⁻¹)	R ²	DMR	K1	K2	R ²	DMR	К3	R ²	DMR
OT-1 ótimo 25 °C	1,48E-09	0,98	0,250	1601,92	0,49	0,99	0,095	2,78E-04	0,98	0,1201
OT-1 ótimo 60 °C	6,59E-09	0,99	0,131	261,39	0,49	0,99	0,044	1,13E-03	0,97	0,088
OT-1 ótimo 98 °C	1,17E-08	0,97	0,193	317,34	0,53	0,99	0,031	1,83E-03	0,99	0,038

Tabela 4.51. Constantes dos modelos, R² e DRM da cinética de reidratação do ponto OT-1 ótimo.

Observa-se que os valores das constantes dos modelos foram próximos quando comparados com os resultados obtidos na secagem contínua com aplicação constante da radiação infravermelha (Tabelas 4.32, 4.33 3 4.34). Isto quer dizer que a intermitência da radiação infravermelha não afetou a cinética da reidratação das raízes de chicória nas diferentes temperaturas da água no processo.

4.3.8.5 Textura

Na Figura 4.21. são apresentadas as médias das 20 medições do ensaio de compressão como amostra do comportamento da Tensão (MPa) *versus* Deformação Específica (adimensional) utilizados para determinar do módulo de elasticidade das amostras de raiz de chicória seca do ensaio OT-1.



FIGURA 4.21. Resultado médio dos ensaios de compressão para o ponto ótimo da secagem de raiz de chicória secas.

Observa-se que o comportamento da curva é similar ao apresentado pelos ensaios da secagem contínua com aplicação constante da radiação infravermelha (Figuras 4.12, 4.13 e 4.14). Com este gráfico, através da linearização da curva, foi determinado o valor do módulo de elasticidade YM (MPa). Com os dados do programa do texturômetro, foi possível obter os dados da força máxima $F_{máx}$ (N), tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.52.

Tabela 4.52. Resultados do módulo de elasticidade YM (MPa), força máxima $F_{máx}$ (N), tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹) das raízes de chicória secas do ponto OT -1 ótimo.

Ensaio	Respostas				
	YM (MPa)	F _{máx} (N)	T _{máx} (MPa)	R (N m ⁻¹)	
0T-1	2.07	150.0	1.0	01400.2	
ótimo	3,97	150,0	1,9	91498,2	

Observa-se que os valores do módulo de elasticidade YM (MPa), força máxima $F_{máx}$ (N), tensão máxima $T_{máx}$ (MPa) e rigidez R (N m⁻¹) foram próximos quando comparados com os resultados obtidos na secagem contínua com aplicação constante do da radiação infravermelha. Isto quer dizer que a intermitência do infravermelho não afetou estas características da textura das raízes de chicória.

4.3.8.6 Análise de imagens - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens da MEV para o ponto OT-1 ótimo da secagem de raízes de chicória são apresentadas na Figura 4.22.



FIGURA 4.22. MEV para a superfície das amostras do ponto OT-1 ótimo.

Assim, observou-se que a aplicação da radiação infravermelha de forma intermitente no processo de secagem também teve uma influência direta nas células parenquimáticas. As paredes das células ficaram mais onduladas e observou-se a retração no citoplasma das células e a presença das pontoações.

4.3.8.7 Extração de inulina

Utilizou-se o extrato de inulina para determinar a concentração de sólidos solúveis – SS (kg kg⁻¹) e a análise (CLAE) para a concentração de inulina – INU (g_{INU} g_{MS}⁻¹), glucose - GLU (g_{GLU} g_{MS}⁻¹) e frutose - FRU (g_{FRU} g_{MS}⁻¹) das amostras de raízes de chicória para o ensaio OT-1 ótimo. Os resultados destas respostas são apresentados na Tabela 4.53.

Tabela 4.53. Resultados da concentração de sólidos solúveis - SS (kg kg-1) e anális	se
(CLAE) da concentração de inulina – INU (g _{INU} g _{MS} -1), glucose - GLU (g _{GLU} g _{MS} -1) e frutose) -
FRU (g _{FRU} g _{MS} -1) das raízes de chicória secas do ensaio OT-1 ótimo.	

Ensaio	Respostas			
	SS (kg kg ⁻¹)	INU (g _{INU} g _{MS} -1)	GLU ($g_{GLU} g_{MS}^{-1}$)	FRU (g _{FRU} g _{MS} -1)
0T-1	0,704	0,66	0,019	0,041

Observam-se na Tabela 4.53 que os valores são próximos aos obtidos na secagem contínua com aplicação da radiação de infravermelho constante. Ramallo et al. (2010) também encontraram que a concentração de açúcar no chá e no café não foi alterada aplicando secagem intermitente, quando comparada com a secagem contínua.

4.3.8.8 Isotermas de sorção

Para o material *in natura* foram construídas as isotermas de dessorção e para o material resultante da secagem sob condições do ponto ótimo (OT-1) foram construídas as isotermas de adsorção. A Tabela 4.54 relaciona os valores experimentais médios de teor de água de equilíbrio (Xe) correspondentes às atividades de água (a_w) determinada pelas soluções salinas saturadas, para a construção das isotermas de sorção.

Sais	a _w	Teor de água de Equilíbrio, Xe (g g matéria seca-1)			
		In natura	Ensaio OT-1		
LiCl	0,12	0,058	0,053		
CH ₃ COOK	0,23	0,075	0,067		
Mg Cl ₂	0,32	0,088	0,079		
K ₂ CO ₂	0,43	0,106	0,091		
Mg (NO ₃) ₂	0,53	0,133	0,112		
KI	0,68	0,155	0,159		
NaCl	0,76	0,178	0,175		
KCl	0,84	0,189	0,189		

Tabela 4.54. Valores experimentais de teor de água de equilíbrio a 25 °C, para as amostras de raiz de chicória *in natura* e ponto ótimo (OT-1) da secagem.

Observa-se na Tabela 4.54 que na condição de 25 °C, os valores de teor de água de equilíbrio para as amostras *in natura* são maiores que os valores de teor de água de equilíbrio para as amostras do ponto ótimo (OT-1). Isto era esperado, já que o teor de água inicial das raízes *in natura* é maior que o teor de água do produto seco. Essa diferença é explicada pela histerese entre as curvas de isoterma de dessorção e adsorção. Observou-se também que em todas as condições do ponto ótimo (OT-1), houve adsorção de água pelo produto.

Na Tabela 4.55, estão descritos os parâmetros das equações, o R² e os valores dos desvios médios relativos, obtidos pelo programa Statistica 9.0 (STATSOFT, 2001), utilizando-se o módulo de estimativa não linear (método Gauss -Newton).

Modelo	Ensaio	Parâmetros de ajuste			R ²	DRM
		Xm	C _{BET}	n		
BET	in natura	0,90	0,42	0,81	0,96	0,099
	0T-1	3,87	0,079	0,83	0,98	0,104
		Xm	C_{GAB}	k		
GAB	in natura	0,07	18,43	0,86	0,99	0,032
	OT -1	0,08	11,11	0,72	0,99	0,057
HENDERSON		k		n		
PURO	in natura	21,71		1,64	0,99	0,060
1 0110	0T-1	34,17		1,79	0,99	0,062
LANCMUD		Xm	C_{LAN}			
LANGMUIK	in natura	1,67	0,16		0,97	0,104
	0T-1	1,24	0,21		0,98	0,108
		А		В		
OSWIN	in natura	0,12		0,44	0,99	0,040
	OT-1	0,11		0,37	0,99	0,049

Tabela 4.55 - Parâmetros de ajuste das isotermas das raízes de chicória *in natura* e os pontos ótimos.

Analisando os valores da Tabela 4.55, observou-se que todos representaram as isotermas de sorção já que apresentaram valores de coeficiente de determinação R² superiores a 0,97. Porém, para uma avaliação mais adequada desses ajustes, os desvios médios relativos entre os valores preditos e os observados foram calculados (DRM). Dessa forma, para os diferentes ensaios, os modelos de GAB e Oswin foram os que apresentaram melhores ajustes, com desvios inferiores a 5,7 %.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 encontram-se as representação gráfica das isotermas de sorção das raízes de chicória ajustadas pelos modelos para os ensaios OT-1 ótimo e *in natura*, respectivamente.



FIGURA 4.23. Isotermas de sorção das raízes de chicória experimental e preditas pelos modelos para o ensaio OT-1 ótimo.





Comprovou-se nas Figuras 4.23 e 4.24 que os melhores ajustes foram apresentados pelos modelos de GAB e OSWIN para as condições avaliadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Figueira et al. (2004), para os quais as isotermas de
sorção ficaram com o melhor ajuste com os modelos de GAB e Peleg nas raízes de chicória secas. Na pesquisa desenvolvida por Park et al. (2001), foram determinadas as isotermas de sorção e a modelagem matemática para pêra *in natura* e desidratada e os modelos de GAB e Oswin encontraram-se dentro dos que melhor representaram os dados experimentais.

4.3.8.9 Temperatura de transição Vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g "*midpoint*") para as amostras de raiz de chicória nas condições dos pontos ótimos da intermitência do infravermelho estão apresentadas na Figura 4.25 para o ensaio OT-1 ótimo. Conhecendo o valor de umidade de equilíbrio para cada amostra, determinou-se a atividade de água com o modelo de Oswin nas curvas de isotermas de sorção determinadas para 25 °C, para analisar a estabilidade estrutural para os valores da T_g .



FIGURA 4.25. Termograma obtido para a amostra de raiz de chicória para o ensaio OT-1.

Observa-se na Figura 4.25 que a T_g para o ensaio OT-1 ótimo foi de 82,7 °C. Com o teor de água de equilíbrio de 0,143 bs para este ensaio, encontrou-se a atividade de água correspondente a 0,68. Sendo assim, para essas condições, o produto apresentou estabilidade estrutural.

4.3.8.10 Demanda de energia elétrica

São apresentados os valores da demanda de energia elétrica de cada um dos componentes medidos no processo de secagem das raízes de chicória conforme para os pontos ótimos (Tabela 4.56).

Ensaio		Componente elétrico (kWh)				
	Infra	Resis	Vent	Pás	Alimenta	EA (kWh)
OT-1						
ótimo	2,75	5,85	0,156	0,16	0,11	9,02

Tabela 4.56. Valores dos componentes elétricos medidos no processo de secagem de raízes de chicória.

*Infra: Emissor infravermelho; Resis: Resistências elétricas; Vent: Motor do Ventilador; Pás: motor da rotação do eixo das pás; Alimenta: motor da alimentação de entrada.

Analisando-se a Tabela 4.56 e comparando com os valores de demanda de energia elétrica obtidos no processo aplicando a radiação infravermelha em todos os ciclos da secagem contínua, observa-se que, para o ensaio OT-1 ótimo, o fato de ter uma intermitência de 2-1 (2 ciclos com infravermelho – 1 ciclo sem infravermelho) gerou uma redução de 26 % na energia total do processo.

Kumar et al. (2014), na sua revisão, destacam a importância da secagem intermitente já que o processo de secagem tem um elevado consumo energético sendo este de cerca de 20-25 % da energia utilizada na indústria no processamento de alimentos. A secagem intermitente é considerada uma das soluções promissoras para a melhoria da eficiência energética e da qualidade do produto, sem aumento no custo dos secadores. Na pesquisa feita por Zhu et al. (2010), encontrou-se que a degradação da cor das fatias de maçãs secas com a intermitência do infravermelho catalítico (CIR) foi menor, quando comparada com aquecimento contínuo.

5. CONCLUSÕES

 A adaptação do secador agitador/misturador contínuo para estudo da otimização do processo de secagem mostrou melhoras quanto:

- a escoabilidade com menor dano da amostra causado pela fricção da mesma dentro do secador;
- 2. ao aumento da vazão de ar e de temperatura utilizadas nos experimentos.
- a facilidade na determinação da DTR considerando a rotação do eixo das pás e a rotação da rosca alimentadora.

✓ A técnica de estímulo e resposta utilizando método de pulso de traçador no leito de secagem mostrou-se eficiente na determinação do tempo de residência para as raízes de chicória no secador agitador/misturador. A metodologia do planejamento fatorial permitiu avaliar a influência significativa da rotação do eixo das pás e da rotação da rosca alimentadora nesta resposta.

✓ A pré-secagem com HTST das raízes de chicória foi fundamental para garantir um produto com boas características estruturais para a secagem contínua convectiva com aplicação de radiação infravermelha. Esta etapa também foi importante como pré-tratamento, para reduzir os tempos de secagem e avaliar a concentração de sólidos solúveis da raiz de chicória. Nas condições operacionais trabalhadas nesta etapa, destaca-se que:

- a metodologia do planejamento experimental possibilitou a obtenção dos modelos significativos e preditivos e sua representação com as superfícies de resposta e curvas de contorno para as respostas teor de água, módulo de elasticidade e demanda de energia elétrica tanto para as amostras *in natura*, quanto para as amostras congeladas.
- a temperatura e o tempo da pré-secagem com HTST não afetaram a concentração de sólidos solúveis, a força máxima, a tensão máxima e a rigidez das raízes de chicória.
- 3. a avaliação das condições ótimas feita de maneira simultânea com os modelos gerados e as superfícies de resposta das respostas obtidas no planejamento experimental, realizada de modo a maximizar o módulo de elasticidade e minimizar teor de água das raízes de chicória, foi na condição de 150 °C de

143

temperatura do ar e 28 min da aplicação da pré-secagem HTST.

✓ A combinação da pré-secagem HTST seguida da secagem contínua das raízes de chicória com aplicação da radiação infravermelha, permitiu avaliar o comportamento do processo através das taxas de secagem. Foram avaliadas as características físicas e de textura e o comportamento do produto seca quanto à sua capacidade de reidratação, à temperatura de transição vítrea e às isotermas de sorção. Também foi possível analisar a demanda de energia elétrica do processo de secagem.

 \checkmark A metodologia do planejamento fatorial associada à análise de superfície de resposta, mostrou-se uma ferramenta útil ao permitir analisar os fatores simultaneamente, otimizar as respostas, calcular o erro experimental e avaliar a reprodutibilidade do processo.

✓ A secagem contínua com aplicação intermitente da radiação infravermelha foi eficaz, mantendo a taxa média de secagem, as características de qualidade das raízes de chicória e reduzindo a demanda de energia elétrica em 26% quando comparada com a secagem contínua com aplicação da radiação infravermelha constante.

6. REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 3 (3), 349-53, 1999.

AGUILERA, J.M; STANLEY, D.S. **Microstructural principles of food processing engineering**. 1. ed. Elsevier Science Publishers, New York (USA), p.115-125/301-320, 1990.

AGUILERA, J. M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science and Technology**, 14, 432-437, 2003.

ALONSO, Luís Felipe Toro. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

ALZUGARAY, D.; ALZUGARAY, C. Chicória Amarga. **Plantas que curam – A natureza a serviço da saúde.** sl. 40 (11), 153-154, 1983.

ANANTHARAMAN, H. G.; BALLEVRE, O.; ROCHAT, F. Gelatinized cereal product containing oligosaccharide and processes of preparing and using same. **USA Patent** number 5,952,033. September 14, 1999.

ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. J. Am. Chem. Soc., Easton, PA:Mack Printing Company, n.68, 1946.

ANTONIO, Graziella Colato. **Avaliação do efeito dos pré-tratamentos de desidratação osmótica e secagem HTST na obtenção de snacks de batata doce (***Ipomoea batatas* **Lam).** Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

APPLIED TECHNOLOGY. Converting chicory - not just a cup of coffee, **Dairy Foods**, Chicago: Cahners, 94 (11), 112, Oct. 1993.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. International**. 16^a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc. 1995.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, London, 55 (4), 323-30, 2002.

BARRET, A.H. Structure-functionality relationships in foods. In Welti-Chanes, J.; Barbosa-CÁNOVAS, G.V.; J. M. AGUILERA (Eds.), **Engineering and food for the 21st century**, New York: CRC Press, chapter 29, 2002.

BERG, C. V. D. Water activity. In: MACCARTHY, D. Concentration and drying of foods.

The Proceeding of the Kellog Foundation 2nd International Food Research Symposium. 1ª edição. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, pp. 11-12, 24, 1986.

BILBAO-SÁINZ, C.; ANDRÉS, A.; FITO, P. Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. **Journal of Food Engineering,** 68, 369–376. 2005.

BLASCO, R.; ESTEVE, M.J.; FRÍGOLA, A.; RODRIGO, M. Ascorbic acid degradation kinetics in mushrooms in a high-temperature short-time process controlled by a thermoresistometer. LWT - **Food Science and Technology**, 37(2),171-175. 2004.

BOBBIO, P.A. **Química dos Processamento de Alimentos.** 2aEd. São Paulo: Varela., 223p, 1992.

BOROMPICHAICHARTKUL, C.; LUENGSODE, K.; CHINPRAHAST, N.; DEVAHASTIN, S. Improving quality of macadamia nut (Macadamia integrifolia) through the use of hybrid drying process. **Journal of Food Engineering**, 93 (3), 348–353. 2009.

BOURNE, M. Relation between texture and mastication. **Journal of Texture Studies**. 5 (2):125-143, 2004.

BRENNAN, J.G. **Food Dehydration: a dictionary and guide**, Wood head Publishing, New York, USA, 196 p. 1994.

BROD, F. P. R., PARK, K. J., ALMEIDA, R. G. de. Image analysis to obtain the vibration amplitude and the residence time distribution of a vibro-fluidized dryer. **Journal of Food and Bioproducts Processing-Trans.** Institution of Chemical Engineers, London, 82 (2), 157-163, 2004.

BROSNAN, T.; DA-WEN, S. Improving quality inspection of food products by computer vision - a review. **Journal of Food Engineering**, 61, 3-16, 2004.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multi-molecular layers. **Journal American Chemistry Society,** Easton, PA: Mack Printing Company, 60(2), 309-319,1938.

CARDOSO, Carla Sant'Anna Bechtlufft. **Secagem de fatias de banana em leito vibrofluidizado a altas temperaturas por curto tempo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1998.

CARRÍN, M.E.; CRAPISTE, G.H. Convective Drying of Foods. In: RATTI, C. **Advances in food dehydration**. CRC Press, Cap. 5, p.123-151, 2009.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem pratica**. São Paulo. Mc Graw Hill, 3ª edição. 902p. 2009.

CHANG, X.L.,WANG, C.H., FENG, Y. and LIU, Z. Effects of heat treatments on the stabilities of polysaccharides substances and barbalo in in gel juice from Aloe vera Miller. **Journal of Food Engineering**. 75, 245–251. 2006.

CHEN, L. OPARA, U.L. Texture measurement approaches in fresh and processed foods — A review. **Food Research International,** 51, 823–835, 2013.

CHINNAN, M.S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft e Technologie**, London: Academic Press Ltd, 18, 83-88, 1985.

CLYDESDALE, F. M. Color perception and food quality. **Journal of Food Chemistry,** 14, 61-74, 1991.

COELHO, M. C. S.; CORRÊA, M.V; AGUIRRE, L. A. Metodologia para Representação de Modelos NARX Polinomiais na Forma de Hammerstein e Wiener. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, 3 (1), 71-80. 2002.

CORREIA, P.; LEITÃO, A.; BEIRÃO-DA-COSTA, M.L. The effect of drying temperatures on morphological and chemical properties of dried chestnuts flours. **Journal of Food Engineering**. 90 (3), 325–332. 2009.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**, 2^a ed. S.I Claredon Press Oxford, 414p., 1975.

CUNNINGHAM, F.E. Practical applications of food dehydration: a review. **Journal of Food Protection**, 45(5), 479-483, 1982.

DATTA, A.K.; ALMEIDA, M. Properties relevant to infrared heating of foods. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H.; DATTA, A.K. (Ed.) **Engineering properties of foods**. 3rd ed. Taylor e Francis Group, New York, 2005.

DAVIDSON A. **The Oxford Companion to Food**. Oxford, U.K.: Oxford University Press. 1999.

DESROSIER, N. W.; DESROSIER, J. N. **The Technology of Food Preservation**. 4ª edição. AVI Publishing Company, INC, Westport, Connecticut, EUA, 220, 237, 243p., 1997.

DIONELLO, R. G.; BERBERT, P. A.; MOLINA, MARÍLIA A. B. de M.; PEREIRA, R. de C.; VIANA, A. P.; CARLESSO, V. de O. Secagem de fatias de abacaxi *in natura* e prédesidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 29 (1), 232-240. 2009.

DOSTIE, M., SEGUIN, J. N., MAURE, D., TON-THAT, Q. A., & CHATINGY, R. **Preliminary measurements on the drying of thick porous materials by combinations of intermittent infrared and continuous convection heating**. In A. S. Mujumdar, & M. A. Roques (Eds.), Drying '89. New York: Hemisphere. 1989.

FARAG, K. W.; LYNG, J. G.; MORGAN, D. J.; CRONIN, D. A. Effect of low temperatures (18 to +5 degrees C) on the texture of beef lean. **Meat Science**, 81, 249–254. 2009.

FERRARI, Cristhiane Caroline. **Estudo da transferência de massa e qualidade do melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FIGUEIRA, Glyn Mara. **Desenvolvimento agrotecnológico da espécie** *Cichorium intybus* **L.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

FIGUEIRA, G. M; PARK, K. J; BROD, F. P. R.; HONÓRIO, S.L. Evaluation of desorption isotherms, drying rates and inulin concentration of chicory roots (*Cichorium intybus* L.) with and without enzymatic inactivation. **Journal of Food Engineering**, 63, 273–280. 2004.

FOX JR., T.G.; FLORY, P. J. Second-order transition temperatures and related properties of polystyrene – Influence of molecular weight. **Journal of Applied Physics**, 21, 581-591, 1950.

GALVÃO, G. Almeirão. **Natureza.** São Paulo. 8 (7), 53-55, 1995.

GILANI AH.; JANBAZ KH.; JAVED MH. Hepatoprotective activity of Cichorium intybus, and indigenous medicinal plant. **Medical Science Research**, 21, 151–152, 1993.

GODOI, L.F.G. **Estudo de um secador com promotores estáticos de mistura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Curso de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas. 1996.

GOLDSTEIN, J.I. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. **A textbook for Biologist, Materials Scientists and Geologists**. Plenum Press. New York. 1992.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards – Physics and Chemistry**, 81 (1), 89-96, 1977.

GUIMARÃES, R.M.; VIEIRA, M.G.G.C.; FRAGA, A.C.; PINHO, E.V.R.V.; FERRAZ, V.P. Tolerância à dessecação em sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, 26 (1), 128-139, 2002.

GUGGHENHEIM, E.A. **Applications of statistical mechanics.** Oxford: Clarendon Press, 86p. 1966.

HAINES, P. **Thermal methods of analysis – Principles, applications and problems**. London: Blackie Academic & Professional, 1995. HAN, W.; MAI, B.; GU, T. Residence time distribution and characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. **Drying Technology**, 9 (1), 159–181. 1991.

HATAMIPOUR, M.S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inertmedium fluidized bed. **Journal of Food Engineering**, 55, 247-252, 2002.

HEINRICH, S.; IHLOW, M.; HENNEBERG, M.; PEGLOW, M.; MACHNOW, E.; MORL, LOTHAR. Studies of steam drying in a fluidized bed. **Drying technology**, 20 (1), 175-194, 2002.

HOFSETZ, Kelly. **Obtenção de banana nanica (***Musa acuminata colla* **subgrupo Cavendish) crocante a partir de secagem a alta temperatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz. v.1. São Paulo, 1976.

ITO, Ana Paula. **Estudo dos processos de desidratação osmótica a pulso de vácuo (PVOD) de fatias de manga**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007,

JAYAMARAN, K. S.; DAS GUPTA, D. K. Dehydration of fruits and vegetables – recent developments in principles and techniques. **Drying Technology**. 10 (1), 1-50, 1982.

KAJIYAMA, T.; PARK, K. J. Influência da umidade inicial da alimentação no tempo de secagem em secador atomizador. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, 10 (1), 1-8, 2008.

KATEKAWA, Marcel Eiki. **Análise teórico-experimental do encolhimento: estudo da secagem de banana.** Tese (Doutorado em Engenharia Química)- Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

KARATHANOS, V.; ANGLEA, S.; KAREL, M. Collapse of structure during drying of celery. **Drying Technology**, 11(5), 1005-1023, 1993.

KAUR, N.; GUPTA, A. K.; SAIJPAUL, S. Triglyceride and cholesterol owering effect of chicory roots in the liver of dexamethasone-injected rats. **Medical Science Research**, 17, 1009–1010. 1989.

KEEY, R.B. **Drying Principles and Practices**. 1aEd. Oxford: Pergamon Press, 358p. 1972.

KEEY, R.B. **Introduction to Industrial Drying Operations**. 1aEd. Oxford: Pergamon Press, 376p. 1978.

KONOPACKA, D.; PLOCHARSKI, W. J. Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. **Postharvest Biology and Technology**, 32, 205–211, 2004.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil. 641p. 1969.

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, 15(10), 2441-2458, 1997.

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Structural properties of dehydrated products during rehydration. **International Journal Food Science and Technology**, 36, 529–538. 2001.

KROKIDA, M.K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, 57, 1–7. 2003.

KROKIDA, M.K.; KARATHANOS, V.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, London, 59 (4), 391-403, 2003.

KROKIDA, M.K.; FOUNDOUKIDIS, E.; MAROULIS, Z. Drying constant: literature data compilation for foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, London, 61 (3), 321-30, 2004.

KROKIDA, M.K.; PHILIPPOPOULUS, C. Rehydration of dehydrated foods. **Drying Technology**, 23, 799-830, 2005.

KUMAR, C.; KARIM M. A.; JOARDDER M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering,** 121, 48–57. 2014.

LABUZA, T. P. Moisture sorption: practical aspects of isotherm measurement and use. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1984.

LABUZA, T.P. The properties of water in relationship to water begging in food: a review. **Journal of Food Engineering**, 25, 151-166, 1995.

LANA, M. M.; TIJSKENS, L. M. M.; VAN KOOTEN, O. Effects of storage temperature and fruit ripening on firmness of fresh cut tomatoes. **Postharvest Biology and Technology**, 35, 87–95, 2005.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases in a plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal American Chemistry Society**, 46, 1361-1403, 1918.

LAURENZO, K. S.; NAVIA; J. L.; NEIDITCH; D. S. **Preparation of inulin products**. USA Patent number 5, 365, 968. October 19, 1999.

LEE, K. T.; FARID, M.; NGUANG, S. K. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. **Journal of Food Engineering**, 72, 16 - 23. 2006.

LEMUS-MONDACA, R.; MIRANDA, M.; ANDRES GRAU, A.; BRIONES,V.; VILLALOBOS, V.; VEGA-GÁLVEZ, A. Effect of osmotic pretreatment on hot air drying kinetics and quality of Chilean papaya (Carica pubescens). **Drying Technology**. 27, 1105–1115. 2009.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas: volume 2 – Cálculo de reatores**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. v. 2, 207p.

LOPES, R.P.; AFONSO, A.D.L.; SILVA, J.S. **Energia no pré-processamento de produtos agrícolas**. In: _____. *Secagem e armazenamento de produtos agrícolas*. Viçosa - MG: UFV, 2000. 1 CD--ROM.

LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, 45, 1403-1407, 1980.

LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, 48, 1497-1502/1553, 1983.

LUCCAS, Valdecir. **Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

LUSAS, E. W.; ROONEY, L. W. Snack foods processing. **CRC Press**, Florida, EUA, p. 34, 219, 2001.

MABBERLEY DJ. **The Plant Book**. 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. 1997.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, 29 (1), 75-97, 1996.

MALDONADO, S.; ARNAU, E.; BERTUZZI, M.A. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. **Journal of Food Engineering**, 96, 333–341. 2010.

MARTINEZ N.N.; ANDRES, A.M.G.; CHIRALT A.B.; FITO P.M. Transiciones de fase em alimentos. In FITO P.M (Org.). **Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno.** 1. ed., Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, C 9, 223-262p, 1998.

MATOS, J.; MACHADO, L. Análise térmica – Termogravimetria e Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial. In: CANEVAROLO JR, S (Org.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo, SP: Artliber editora, 2004, 209-262p.

MIRANDA, M.; VEGA-GÁLVEZ, A.; GARCÍA, P.; DI SCALA, K.; SHI, J.; XUE, S.; URIBE, E. Effect of temperature on structural properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel

and Weibull distribution for modelling drying process. **Food and Bioproducts Processing**, 88 (2–3), 138–144. 2010.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, 66 (4), 513-518, 2005.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials.** Gordon and Breach Science Publisher, New York, USA, 1970.

MONGPRANEET, S.; ABE, T.; TSURUSAKI, T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. **Journal of Food Engineering**, 55 (2), 147-156, 2002.

MOTHÉ, C.; AZEDO, A. **Análise térmica de materiais**. São Paulo, SP: Artiber Editora, 2009.

MUJUMDAR, A., S. Drying Fundamentals. In: BAKER, C., G., J. **Industrial Drying of Foods**. 1^a edição. Chapman e Hall: London, UK, pp. 7, 2007.

NATH, A.; CHATTOPADHYAY, P.K.; MAJUMDAR, G.C. High temperature short time air puffed ready-to-eat (RTE) potato snacks: process parameter optimization. **Journal of Food Engineering**, 80 (3), 770-780, 2007.

NELLIST, M.E. Developments in continuous flow grain dryers. **The Agricultural Engineering**. [S.l.: s.n.], Autumn, p.74-80. 1982.

NIAMNUY, C.; DEVAHASTIN, S.; SOPONRONNARIT, S. Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review. **Journal of Food Engineering**, 123, 148–156. 2014.

NIETO, A.B.; SALVATORI, D.M.; CASTRO, M.A.; ALZAMORA, S.M. Structuralchanges in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration:shrinkage, porosity density and microscopic features. **Journal of Food Engineering**, 61, 269-278, 2004.

NINDO C.; MWITHIGA G. Infrared Drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. New York: CRC Press, C. 5, 89 – 97p, 2011.

NONHEBEL, G.M.A.; MOSS, A.A.H. **Drying of Solids in the Chemical Industry**. London: Butterworth e Co. 301p. 1971.

NOWAK, D.; LEWICKI, P.P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 353–360, 2004.

OKOS, M.R.; CAMPANELLA, O.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R.K.; WEITNAUER, A.C. Food Dehydration. In: HELDMAN, D.R.; LUND, D.B. **Handbook of Food Engineering,** Second Edition. CRC Press, Cap. 10, 471–493, 2007.

OLIVEIRA, Rafael Augustus de. **Efeito da secagem de raiz de chicória na obtenção de inulina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

OLIVEIRA, R. A. DE; OLIVEIRA, W. P. DE; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, 26 (1), 181-189, 2006.

OLIVEIRA, Michelle. **Efeito da composição química, origem e grau de maturação sobre a cor e a crocância da banana nanica obtida por secagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

OLIVEIRA, Rafael Augustus de. **Estudo da secagem em dois tipos de secadores: Avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento do material seco.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, London, 42 (4), 225-233, 1999.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thinlayer. Indiana, 1949. Dissertation (M.Sc), Purde University Indiana, USA, 1949.

PARK, K. J. **Fundamentos de secagem**. Notas de aula. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, 1987.

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural.** Piracicaba,3(1), 81-86, 1992.

PARK, K. J.; PARK, T. H. K. B.; PARK, K. J. B.; NOGUEIRA, R. I.; LEITE, J. T. C. **Processo de obtenção de concentrado de inulina por abaixamento de temperatura e separação física**. BR Patente número PI 0003867-9. 17 ago. 2000.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. Sorption isotherms data and mathematical models for pear bartlett (Pyrus sp.) with and without osmotic dehydration. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 21 (1), 73-77, 2001.

PARK, K.J.; OLIVEIRA R. A.; BROD F. P. R. Drying operational parameters influence on chicory roots drying and inulin extraction. **Food and Bioproducts Processing**, 85(C3), 184–192, 2007.

PARK, K.J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. CTEA. 2007. Disponível na Internet: <u>http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html. 15-03-2011</u>

PAYNE, F.A.; TARABA, J.L.; SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of Food Engineering**, 10, 183-197, 1989.

PELEG, M.A. Empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, 53, 1216–1219. 1988.

PEREIRA, L. M.; RODRIGUES, A. C. C.; SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; JUNQUEIRA, V. C. A.; CUNHA, R. L.; HUBINGER, M. D. Influence of Modified Atmosphere Packaging and Osmotic Dehydration on the Quality Maintenance of Minimally Processed Guavas. **Journal of Food Science**, 69, 172-177, 2004.

PUTRANTO, A.; CHEN, X.D.; DEVAHASTIN, S.; XIAO, Z.; WEBLEY, P.A. Application of the reaction engineering approach (REA) for modeling intermittent drying under time-varying humidity and temperature. **Chemical Engineering Science** 66 (10), 2149–2156. 2011.

RAMALLO, L.A.; LOVERA, N.N.; SCHMALKO, M.E. Effect of the application of intermittent drying on Ilex paraguariensis quality and drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, 97 (2), 188–193. 2010.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, 23, 91-105, 1994.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A.S. Infrared drying, In: **Handbook of Industrial Drying**, 2nd Edition, edited by Mujumdar, A.S., Marcel Dekker Inc., New York, 567–588p, 1995.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of fruits**, in Processing fruits, 2nd ed., Barret, D. M.; Somogyi, L.; Ramaswamy, H. Eds. CRC Press, Boca Raton, FL, 127-159p. 2005.

REINATO, C H. R;. BORÉM, F. M; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES, E. P. Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6 (1), 112-116, 2002.

RHODES, M.J.; JHOU, S., HIRAMA, T.; CHENG, H. Effects of operating conditions on longitudinal solids mixing in a circulating fluidized bed riser. **AIChE Journal**, 37 (10), 1450–1458. 1991.

RIBEIRO, Carmelita de Fátima Amaral. **Processamento de piraíba (***Brachyplatystoma filamentosum***): desidratação osmótica, defumação e secagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ROBERFROID, M.; GIBSON, G.R.; DELZENNE, N. The biochemistry of oligofructose, anondigestible fiber: na approach to calculate its caloric value. **Nutrition Reviews.** Lawrence, 51 (5), 137-146, 1993.

ROBINSON, R. K. The potential of inulin as a functional ingredient. **British Food Journal**, Bradford, 97 (4), 30-32, 1995.

ROOS, Y.H. **Phase transitions in foods**. Academic Press Inc.: San Diego, California, USA, p. 19-48/60-71/110-112/157-160/167-170/198- 202/206-208/260-262. 1995.

ROOS, Y.H.; KAREL, M.; KOKINI, J.L. Glass transition in low moisture and frozenfoods: effect on shelf life and quality. **Food Technology**, November: 95-108,1996.

SAATH, R.; BORÉM, F. M.; ALVES, E.; TAVEIRA, J. H. S.; MEDICE, R.; CORADI, P. C. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência agrotecnologica**, Lavras, 34 (1), 196-203, 2010.

SAKAI, N.; MAO, W. Infrared heating. In: SUN, D.W. (Ed.). **Thermal food processing: new technologies and quality issues**. Boca Raton, FL: Taylor e Francis Group. p. 493 – 525, 2006.

SARAVACOS, G.D. Effect of drying method on the water sorption of dehydrated apple and potato. **Journal of food Science**, *3*, 81-84, 1967.

SCHULTZ, E.L.; MAZZUCO, M.M.; MACHADO, R.A.F.; BOLZAN, A.; QUADRI, M.B.; QUADRI, M.G.N. Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices. **Journal of Food Engineering**, 78(3), 1103-1110, 2007.

SENARATNA, T.; McKERSIE, B.D. Loss of desiccation tolerance during seed germination: a free radical mechanism of injury. In: LEOPOLD, A.C. (Ed.). **Membranes, metabolism and dry organisms**. Ithaca: Corneell University. p.85-101, 1986.

SERENO, A.M.; SILVA, M.A.; MAYOR, L. Determination of the particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, 10(3), 455-469, 2007.

SHARMA, S. K.; MULVANEY, S. J.; RIZVI, S. S. H. **Food Process Engineering – Theory and Laboratory Experiments**. John Wiley e Sons Publication, INC., Cornell University, Ithaca, NY, EUA, p. 216-218, 2000.

SILVA, R.F. Use of inulin as a natural texture modifier. **Cereal Foods World**. St. Paul. v.41, n.10, p.792-795, 1996.

SLADE, L.; LEVINE, H.; IEVOLELLA, J.; WANG, M. The glassy state phenomenon in applications for the food industry: application of the food polymer science approach to structure – function relationships of sucrose in coolie and cracker systems. **Journal of Science of Food and Agriculture**, 63, 133-176, 1993.

SLADE, L.; LEVINE, H. Glass transitions and water-food structure interactions. **Advances in Food and Nutrition Research**, 38, 103-156, 1995.

STATSOFT INC. Statistica, version 9.0. Data analysis software system. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.

STEVENS, G.R.; THOMPSON, T.L. Improving Cross-flow Grain Dryer Design Using Simulation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.19, p.778-81, 1976.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

SWASDISEVI, T.; DEVAHASTIN, S.; NGAMCHUM, R.; SOPONRONNARIT, S. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, 29 (3), 809-816, 2007.

SZALAY, A.; ERDÉSZ, K.; ZAGROUBA, F.; ROQUES, M.A. Principles for hydro dynamical and geometrical design of vibrated bed driers. **Drying Technology**, New York, 13 (5-7), 1249-1260, 1995.

SZCZESNIAK, A. S. Texture is a sensory property. **Food Quality Preference,** 13, 215-225, 2002.

TELIS, V.R.N.; SOBRAL, P.J.A. Glass transition and state diagram for freeze-dried pineapple. **Lebensmittel – Wissenschaft und Technologies**, 34, 199-205, 2001.

TOLEDO, R.T. **Dehydration.** In TOLEDO, R.T (Org.). Fundamentals of food process engineering. 2. ed. Chapman e Hall (Eds.), New York, USA, 456-506p, 1991.

TORRINGA, E.; ESVELD, E.; SCHEEWE, I.; VAN DEN BERG, R.; BARTELS, P. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. **Journal of Food Engineering**, 49, 185-191. 2001.

UBEROID SK. Cholesterol lowering effect of chicory (*Cichorium intybus*) root in facceine-fed rats. **Medical Science Research**, 19, 643–644. 1991.

UDDIN, M. S.; HAWLADER, M.N. A.; RAHMAN, M. S. Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. **Journal of Food Processing and Preservation**. Trumbull: Food e Nutrition Press, 14, 375-391, 1990.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Campinas – SP, Kil Jin Park, Kil Jin Brandini Park, Tatiane Hae Kyung Park, Rafael Augustus de Oliveira. **Equipamento e processo de secagem de líquidos, semi-sólidos e sólidos a diferentes pressões dotado de agitação e mistura dos componentes**. BR nº PI 0506639-5. 15 dez. 2005.

VAN LOO, J.; COUSSEMENT, P.; LEENHEER, L. de; HOEBREGS, H.; SMITS, G. On the presence of inulin and oligofructose as natural ingredients in the western diet. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition.** Boca Raton. 35 (6), 525-552, 1995.

VARNALIS, A.I.; BRENNAN, J.G.; MACDOUGALL, D.B. A proposed mechanism of high temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, 48, 361-367, 2001a.

VARNALIS, A.I.; BRENNAN, J.G.; MACDOUGALL, D.B. A proposed mechanism of high temperature puffing of potato. Part II. Influence of blanching and initial drying on the permeability of the partially dried layer to water vapor. **Journal of Food Engineering**, 48, 369-378, 2001b.

VIEIRA, Gláucia Santos. **Otimização do Processo de Desidratação Osmótica de Goiaba e Avaliação do Uso de Pulso de Vácuo e Sais de Cálcio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

WAJE, S.S.; PATEL, A.K.; THORAT, B.N.; MUJUMDAR, A.S. Study of residence time distribution in a pilot-scale screw. **Drying Technology**, 25 (1), 1–11. 2007.

WALKER, L.P.; BAKKER-ARKEMA, F. W. **ASAE Paper**: N.78 (Energy efficiency in concurrent flow rice drying). St. Joseph, p.3540, 1978.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Changes in structure, density and porosity of potatoduring dehydration. **Journal of Food Engineering**, 24, 61-76, 1995.

WEBB, P. A.; ORR, C. Density. Analytical Methods in Fine Particle Technology. **Micromeritics Instrument Corporation**, Norcross, GA USA, p. 193-218, 1997.

WHITE, G. W.; CAKEBREAD, S. H. The glassy state in certain sugar-containing food products. **Journal of food Technology**, 1, 73-82, 1966.

WILKINSON, C.; DIJKSTERHUIS, G. B.; MINEKUS, M. From food structure to texture. **Trends in Food Science e Technology**, 11, 442-450, 2000.

YAMAZAKI, Y.; HASHIMOTO, T.; HONDA, T.; SHIMIZU, M. **Optical characteristics gelatinous materials in infrared radiation drying**. In A. S. Mujumdar, & M. A. Roques (Eds.), Drying '92. New York: Hemisphere. 1992.

ZHU, Y.; PAN, Z.; MCHUGH, T.H.; BARRETT, D.M. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. **Journal of Food Engineering**, 97, 8–16, 2010.

ZURA-BRAVO, L.; VEGA-GÁLVEZ, A.; LEMUS-MONDACA, R. AH-HEN, K. S.; DI SCALA, K. Effect of temperature on rehydration kinetics, functional properties, texture and antioxidant activity of red pepper var. hungarian (*Capsicum annuum* L.). **Journal of Food Processing and Preservation**, 37, 74–85. 2013.

7. APÊNDICE

7.1 Apêndice A. Curvas de determinação de tempo de residência DTR.

Figuras para a determinação da curva E, F e tempo de residência para o planejamento DCCR.



FIGURA A.1. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 2.







FIGURA A.3. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 4.



FIGURA A.4. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 5.



FIGURA A.5. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 6.



FIGURA A.6. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 7.



FIGURA A.7. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 8.



Tempo Residência (s)

FIGURA A.8. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 9.



Tempo Residência (s)

FIGURA A.9. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 10.



FIGURA A.10. Curvas E, F e Tempo de Residência utilizando fração mássica. Ensaio 11.

7.2 APÊNDICE B. Curvas da taxa secagem de raízes de chicória.



FIGURA B. 1. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 2.



FIGURA B. 2. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 3.



FIGURA B. 3. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 4.



FIGURA B. 4. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 5.



FIGURA B. 5. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 6.



FIGURA B. 6. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 7.



FIGURA B. 7. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 8.



FIGURA B. 8. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 9.



FIGURA B. 9. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 10.



FIGURA B. 10. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 11.



FIGURA B. 11. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 12.



FIGURA B. 12. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 13.



FIGURA B. 13. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 14.



FIGURA B. 14. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 15.



FIGURA B. 15. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 16.



FIGURA B. 16. Curvas de secagem de raiz de chicória - Ensaio 17.

7.3 APÊNDICE C. Curvas de cinética de reidratação de raízes de chicória secas em três diferentes temperaturas de processo (25, 60 e 98 °C), baseadas no planejamento experimental fatorial 2³.



FIGURA C. 1. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 2 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 2. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 2 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 3. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 2 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 4. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 3 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 5. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 3 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 6. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 3 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 7. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 4 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 8. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 4 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 9. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 4 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 10. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 5 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 11. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 5 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 12. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 5 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 13. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 14. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 15. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 6 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 16. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 17. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 18. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 7 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 19. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 20. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 21. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 8 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 22. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 23. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 24. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 9 – temperatura 98°C.


FIGURA C. 25. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 10 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 26. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 10 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 27. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 10 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 28. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 11 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 29. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 11 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 30. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 11 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 31. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 32. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 33. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 12 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 34. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 35. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 36. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 13 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 37. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 38. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 39. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 14 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 40. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 41. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 42. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 15 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 43. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 44. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 45. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 16 – temperatura 98°C.



FIGURA C. 46. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 – temperatura 25°C.



FIGURA C. 47. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 – temperatura 60°C.



FIGURA C. 48. Curvas de cinética de reidratação de raiz de chicória seca - ensaio 17 – temperatura 98°C.