

**Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI**

**EFEITO DA SECAGEM DE RAÍZES DE CHICÓRIA
NA OBTENÇÃO DE INULINA**

Rafael Augustus de Oliveira

Campinas, Fevereiro de 2005.

**Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI**

**EFEITO DA SECAGEM DE RAÍZES DE CHICÓRIA
NA OBTENÇÃO DE INULINA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

Rafael Augustus de Oliveira
Engenheiro Agrícola

Orientador: **Prof. Dr. Kil Jin Park**

Co-orientador: **Dr. Fernando Pedro Reis Brod**

Campinas, Fevereiro de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

OL4e Oliveira, Rafael Augustus de
Efeito da secagem de raízes de chicória na obtenção de inulina / Rafael Augustus de Oliveira. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Kil Jin Park, Fernando Pedro Reis Brod.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Produtos agrícolas - secagem. 2. Planejamento experimental. 3. Difusão. I. Park, Kil Jin. II. Brod, Fernando Pedro Reis. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Effect of chicory roots drying to obtain inulin.

Palavras-chave em Inglês: Agricultural products – drying, Experimental design e Diffusion

Área de concentração: Tecnologia Pós-colheita

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Miriam Dupas Hubinger e João Domingos Biagi

Data da defesa: 18/02/2005

“A ciência tem as raízes amargas, mas os frutos são muito doces.”

Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.)

A chicória, assim como a ciência, tem as raízes amargas, mas os ‘frutos’ são muito doces.

DEDICO

Aos meus pais Antonio e Ednamar, por todo o amor e dedicação,

Aos meus irmãos Denis e Leandro, pela amizade e apoio,

Aos meus avós Orlando (in memoriam) e Laura, pelo carinho e incentivo,

À Juliana, pelo amor, cumplicidade e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que ilumina meu caminho e me reservou mais esta oportunidade.

Ao Prof. Dr. Kil Jin Park, pela orientação, amizade e respeito. Um exemplo de dignidade e competência.

Ao Dr. Fernando Pedro Reis Brod, pela amizade e ensinamentos.

Aos Membros da Banca Examinadora Prof^a. Dr^a. Miriam Dupas Hubinger, Prof^a. Dr^a. Fernanda E. X. Murr e Prof. Dr. João Domingos Biagi, pela colaboração.

Ao Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, pela amizade e cooperação.

À Juliana Tonelli pela amizade e valiosa ajuda. Companheira de chicória e inulina.

À Rosa Helena pela paciência e ajuda nas análises.

Aos amigos que torceram pelo êxito em mais esta etapa, em especial ao Daniel, Rodrigo, Angel, Franceli, Wig, Jean, Ana Paula, Augusto, Anna e Duván.

Aos alunos Willian, Marcos, Thiago e Fábio, pelo auxílio nos experimentos.

Aos funcionários Gelson, Francisco, Rosália, Edson e André, pela boa vontade em ajudar.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

À CPG e Faculdade de Engenharia Agrícola e Universidade Estadual de Campinas.

A todos que colaboraram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
I INTRODUÇÃO.....	1
II OBJETIVOS.....	2
III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 CHICÓRIA (<i>CICHORIUM INTYBUS</i> L.) E SUAS APLICAÇÕES	3
3.2 INULINA	4
3.2.1 Estrutura química	4
3.2.2 Considerações nutricionais	6
3.2.3 Exploração comercial.....	8
3.2.4 Processos de obtenção de inulina.....	9
3.2.5 Aplicações.....	10
3.2.6 Mercado.....	13
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	14
3.4 SECAGEM	16
3.4.1 Conceitos básicos	16
3.4.2 Umidade de equilíbrio	17
3.4.3 Taxa de secagem.....	18
3.4.4 Período à taxa decrescente de secagem	19
3.4.5 Energia de Ativação	21
3.4.6 Modelo de Page	22
3.4.7 Secagem da raiz de chicória.....	22
3.5 EXTRAÇÃO.....	22
3.6 REIDRATAÇÃO	23
IV MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE INULINA	24
4.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS PARA OBTENÇÃO DAS RAÍZES DE CHICÓRIA.....	26
4.2.1 Plantio	26
4.2.2 Tratos culturais	26
4.2.3 Colheita	27
4.2.4 Lavagem das raízes	28

4.2.5	<i>Corte</i>	28
4.3	SECAGEM	29
4.4	REIDRATAÇÃO	33
4.4.1	<i>Avaliação do ajuste de curvas</i>	33
4.5	EXTRAÇÃO	34
4.6	ANÁLISES	36
4.6.1	<i>Umidade</i>	36
4.6.2	<i>Teor de Sólidos Solúveis</i>	36
V	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	SECAGEM	37
5.1.1	<i>Raízes fatiadas in natura</i>	37
5.1.1.1	Cinética de secagem.....	37
5.1.1.2	Modelo de Page.....	44
5.1.2	<i>Raízes fatiadas congeladas</i>	46
5.1.2.1	Cinética de secagem.....	46
5.1.2.2	Modelo de Page.....	52
5.1.3	<i>Raízes cubetadas in natura</i>	54
5.1.3.1	Cinética de secagem.....	54
5.1.3.2	Modelo de Page.....	60
5.1.4	<i>Raízes cubetadas congeladas</i>	63
5.1.4.1	Cinética de secagem.....	63
5.1.4.2	Modelo de Page.....	69
5.2	ENERGIA DE ATIVAÇÃO	71
5.3	EXTRAÇÃO	74
5.3.1	<i>Extração de inulina de raízes in natura</i>	74
5.3.2	<i>Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes fatiadas in natura</i>	76
5.3.3	<i>Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes fatiadas congeladas</i>	77
5.3.4	<i>Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes cubetadas in natura</i>	81
5.3.5	<i>Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes cubetadas congeladas</i>	85
5.4	REIDRATAÇÃO	89
VI	CONCLUSÕES	93
VII	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 4.1-1: Fluxograma não-quantitativo de obtenção de inulina em pó.</i>	24
<i>Figura 4.1-2: Fluxograma não-quantitativo de processamento de raiz de chicória.</i>	25
<i>Figura 4.2-1: Visão da área plantada com sistema de irrigação.</i>	27
<i>Figura 4.2-2: Raiz de chicória antes e depois da lavagem.</i>	28
<i>Figura 4.2-3: Raízes de chicória fatiadas e cubetadas.</i>	29
<i>Figura 4.3-1: Esquema do Secador Convectivo de Fluxo Perpendicular e Paralelo.</i>	30
<i>Figura 4.3-2: Posição das medidas de velocidade do ar utilizando tubo de Pitot.</i>	31
<i>Figura 5.1-1: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos fatoriais.</i>	39
<i>Figura 5.1-2: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos centrais.</i>	40
<i>Figura 5.1-3: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos axiais.</i>	40
<i>Figura 5.1-4: Gráfico dos resíduos.</i>	43
<i>Figura 5.1-5: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes fatiadas in natura.</i>	44
<i>Figura 5.1-6: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas in natura - pontos fatoriais.</i>	44
<i>Figura 5.1-7: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas in natura - pontos centrais.</i>	45
<i>Figura 5.1-8: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas in natura - pontos axiais.</i>	45
<i>Figura 5.1-9: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos fatoriais.</i>	48
<i>Figura 5.1-10: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos centrais.</i>	48
<i>Figura 5.1-11: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos axiais.</i>	49
<i>Figura 5.1-12: Gráfico dos resíduos.</i>	51
<i>Figura 5.1-13: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes fatiadas após congelamento.</i>	52
<i>Figura 5.1-14: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos fatoriais.</i>	52
<i>Figura 5.1-15: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos centrais.</i>	53

<i>Figura 5.1-16: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos axiais.</i>	53
<i>Figura 5.1-17: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas in natura - pontos fatoriais.</i>	55
<i>Figura 5.1-18: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas in natura - pontos centrais.</i>	56
<i>Figura 5.1-19: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas in natura - pontos axiais.</i>	57
<i>Figura 5.1-20: Gráfico dos resíduos.</i>	59
<i>Figura 5.1-21: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas in natura.</i>	60
<i>Figura 5.1-22: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos fatoriais.</i>	61
<i>Figura 5.1-23: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos centrais.</i>	61
<i>Figura 5.1-24: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos axiais.</i>	62
<i>Figura 5.1-25: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos fatoriais.</i>	65
<i>Figura 5.1-26: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos centrais.</i>	65
<i>Figura 5.1-27: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos axiais.</i>	66
<i>Figura 5.1-28: Gráfico dos resíduos.</i>	68
<i>Figura 5.1-29: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas após congelamento.</i>	69
<i>Figura 5.1-30: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos fatoriais.</i>	69
<i>Figura 5.1-31: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos centrais.</i>	70
<i>Figura 5.1-32: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos axiais.</i>	70
<i>Figura 5.3-1: Gráfico dos resíduos.</i>	80
<i>Figura 5.3-2: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas fatiadas congeladas.</i>	81
<i>Figura 5.3-3: Gráfico dos resíduos.</i>	84
<i>Figura 5.3-4: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas cubetadas in natura.</i>	85

<i>Figura 5.3-5: Gráfico dos resíduos.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.3-6: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas cubetadas congeladas.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.4-1: Curva de reidratação de raiz de chicória fatiada à 25°C.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.4-2: Curva de reidratação de raiz de chicória cubetada à 25°C.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.4-3: Curva de reidratação de raiz de chicória fatiada à 98°C.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.4-4: Curva de reidratação de raiz de chicória cubetada à 98°C.</i>	<i>92</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.2-1: Níveis de inulina em vegetais consumidos na dieta humana</i>	6
<i>Tabela 3.2-2: Composição centesimal de raiz de chicória</i>	6
<i>Tabela 4.3-1: Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental da secagem</i>	32
<i>Tabela 4.5-1: Níveis das variáveis codificada e real para o planejamento experimental da extração de raiz in natura</i>	34
<i>Tabela 5.1-1: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes fatiadas in natura</i>	38
<i>Tabela 5.1-2: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes fatiadas in natura</i>	41
<i>Tabela 5.1-3: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória fatiadas in natura</i>	42
<i>Tabela 5.1-4: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória fatiadas in natura</i>	46
<i>Tabela 5.1-5: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes fatiadas congeladas</i>	47
<i>Tabela 5.1-6: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes fatiadas congeladas</i>	49
<i>Tabela 5.1-7: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas</i>	50
<i>Tabela 5.1-8: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas</i>	54
<i>Tabela 5.1-9: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes cubetadas in natura</i>	55
<i>Tabela 5.1-10: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes cubetadas in natura</i>	58
<i>Tabela 5.1-11: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória cubetadas in natura</i>	58
<i>Tabela 5.1-12: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória cubetadas in natura</i>	63
<i>Tabela 5.1-13: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes cubetadas congeladas</i>	64
<i>Tabela 5.1-14: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes cubetadas congeladas</i>	66
<i>Tabela 5.1-15: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas</i>	67
<i>Tabela 5.1-16: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas</i>	71
<i>Tabela 5.2-1: Energia de Ativação para raízes fatiadas in natura</i>	72
<i>Tabela 5.2-2: Energia de Ativação para raízes fatiadas congeladas</i>	72

<i>Tabela 5.2-3: Energia de Ativação para raízes cubetadas in natura.</i>	73
<i>Tabela 5.2-4: Energia de Ativação para raízes cubetadas congeladas.</i>	73
<i>Tabela 5.3-1: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória in natura.</i>	74
<i>Tabela 5.3-2: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes in natura.</i>	75
<i>Tabela 5.3-3: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória in natura.</i>	75
<i>Tabela 5.3-4: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas fatiadas in natura.</i>	76
<i>Tabela 5.3-5: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas fatiadas in natura.</i>	77
<i>Tabela 5.3-6: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas fatiadas congeladas.</i>	78
<i>Tabela 5.3-7: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas fatiadas congeladas.</i>	78
<i>Tabela 5.3-8: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas fatiadas congeladas.</i>	79
<i>Tabela 5.3-9: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas in natura.</i>	82
<i>Tabela 5.3-10: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas cubetadas in natura.</i>	82
<i>Tabela 5.3-11: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas in natura.</i>	83
<i>Tabela 5.3-12: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas congeladas.</i>	86
<i>Tabela 5.3-13: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas cubetadas congeladas.</i>	86
<i>Tabela 5.3-14: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas congeladas.</i>	87
<i>Tabela 5.4-1: Constantes de Peleg para reidratação de raiz de chicória.</i>	90

RESUMO

Chicória (*Cichorium intybus* L.) é uma planta que tem uma raiz tuberosa cujo carboidrato de reserva é a inulina. A inulina presente nas raízes de chicória apresenta um teor de frutose muito elevado (cerca de 94%), sugerindo importante propriedade não somente de baixo poder calórico como também fator “bífido”, que implica na regulação da flora intestinal. Recentemente a inulina foi identificada como um ingrediente que substitui a gordura e/ou o açúcar, e no Brasil ainda não existe produção comercial, diferentemente de países da Europa, nos Estados Unidos e no Canadá. Além disso, a inulina tem sido reconhecida como um ingrediente funcional, sendo aplicada nas indústrias alimentícia e farmacêutica na produção de medicamentos ou alimentos funcionais. As raízes de chicória são matérias primas altamente perecíveis, e para permitir um maior tempo de vida útil deste material, possibilitando assim um período maior de disponibilidade para o processamento industrial, deve-se reduzir a sua atividade de água, como por exemplo, através da secagem. Neste trabalho, as raízes de chicória foram submetidas a um processo de secagem, avaliando-se os efeitos deste processo na obtenção da inulina. Foram avaliados também os efeitos das condições de extração para raízes *in natura*. Foram obtidos modelos preditivos para a determinação da difusividade efetiva da secagem, modelos para reidratação e extração. Para a secagem de raízes de chicória, em todos os tratamentos, a região de condições ótimas situa-se próxima aos valores mais altos de temperatura do ar, enquanto que o mesmo ocorre para a velocidade do ar, porém somente nos casos em que esta variável foi considerada estatisticamente significativa, levando-se em conta a escala de valores estudada. Os valores de difusividade efetiva variaram de $2,75 \times 10^{-10}$ a $1,15 \times 10^{-09}$ m²/s. A energia de ativação variou de 11,20 a 21,75 kJ/mol. Para extração de inulina a partir de raízes *in natura*, o modelo não foi considerado preditivo, enquanto que para extração a partir de raízes secas, conclui-se que as condições de secagem não interferem na obtenção da inulina.

Palavras-chave: Difusividade efetiva, modelo de Fick, modelo de Page, energia de ativação, reidratação.

ABSTRACT

Chicory (*Cichorium intybus* L.) is a plant whose tuberous roots store inulin, with a high fructose content (about 94%). Chicory root is the most important tuberous root for industrial production of inulin. Inulin is a fructooligosaccharide that is not digestible but is selectively utilized by bifidobacteria in the large intestine, making inulin-type fructans the prototype prebiotic. Recently, inulin was identified as an ingredient that substitutes fat or sugar, but there is still no commercial production of the roots as an inulin source in Brazil, differently of European countries, United States and Canada. Inulin is also identified as a functional ingredient, being applied in the pharmaceutical and food industries in the production of medicines or functional foods. Chicory roots are highly perishable products and, in order to allow a longer period of availability for industrial processing, its water activity must be reduced by drying, for example. In this work, chicory roots had been submitted to a drying process in order to evaluate the effects of this process in inulin extraction. The effects of extraction conditions had been also evaluated in *in natura* roots. Mathematical models to verify effective diffusivity, rehydration and inulin extraction had been obtained. All treatments presented better results in higher air temperature and velocity, when these parameters were considered statistically significant, based on studied range of conditions. The values of calculated effective diffusivity for drying ranged from 2.75×10^{-10} to 1.15×10^{-09} m²/s. The activation energies varied from 11.20 to 21.75 kJ/mol. The model of inulin extraction from *in natura* roots has not been considered predictive. Drying conditions do not have influence on the inulin extraction from dried roots.

Keywords: Effective diffusivity, Fick's model, Page's model, activation energy, rehydration.

I INTRODUÇÃO

A inulina é um carboidrato de reserva presente em diversos produtos vegetais, formado por uma cadeia de moléculas de frutose e uma molécula de glicose terminal. Dentre os vegetais que produzem a inulina destacam-se as raízes de chicória (*Cichorium intybus* L.) e de alcachofra de Jerusalém (*Helianthus tuberosus* L.). Em países europeus, como Bélgica, França e Holanda, a chicória tem sido mais utilizada para a produção industrial de inulina, principalmente devido à sua estabilidade na produção de cadeias longas de glicose e frutose (GFn) e produção constante, mesmo em condições de clima moderado.

A aplicação da inulina na indústria alimentícia, a princípio, resumia-se à produção de bebidas similares ao café, devido ao seu sabor amargo. Entretanto, recentemente descobriu-se que a inulina pode atuar como substituto do açúcar ou da gordura, com a vantagem de não resultar em incremento calórico.

Além de atuar como substituto do açúcar ou da gordura, a inulina apresenta também algumas propriedades funcionais. Ela atua no organismo de maneira similar às fibras dietéticas, contribuindo para melhorar as condições do sistema gastrointestinal.

No Brasil ainda não existem muitos estudos a respeito da exploração comercial da chicória para a extração de inulina, nem dos processos envolvidos. Em geral, esses estudos ainda são restritos à área agrônômica, na seleção dos cultivares mais adequados ao nosso clima.

Além disso, as raízes de chicória são um produto altamente perecível, exigindo, do ponto de vista industrial, um curto período de processamento, ou seja, equipamentos superdimensionados e com grande tempo ocioso durante a entressafra. Assim, para permitir um melhor dimensionamento de uma planta de processamento para obtenção de inulina e garantir um fornecimento contínuo do produto, é necessário estudar uma maneira de disponibilizar a raiz de chicória ao longo do ano. A secagem entraria, então, como uma alternativa para diminuir a atividade de água da matéria prima e conseqüentemente prolongar a sua vida útil. Portanto, neste trabalho as raízes de chicória foram submetidas a um processo de secagem e foram avaliados os efeitos deste processo na obtenção de inulina, assim como sua reidratação e extração de inulina de raízes *in natura*.

II OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho foram:

1. Determinar, através de planejamento experimental, quais as melhores condições e para secagem de raiz de chicória;
2. Determinar, através de planejamento experimental, quais as melhores condições para extração de inulina de raiz de chicória *in natura*;
3. Determinar, através de planejamento experimental, quais os efeitos da secagem na obtenção de inulina da raiz de chicória seca;
4. Verificar modelo para a reidratação da raiz de chicória seca.

III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CHICÓRIA (*CICHORIUM INTYBUS L.*) E SUAS APLICAÇÕES

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. As folhas, assim como as raízes, apresentam um sabor amargo.

A chicória é uma planta que cresce espontaneamente por toda a Europa e Ásia, em lugares secos, às margens dos caminhos e em terrenos baldios (ALZUGARAY e ALZUGARAY, 1983). Talvez por esse motivo, alguns autores considerem, em alguns trabalhos científicos, a *Cichorium intybus L.* como uma espécie invasora.

De acordo com GALVÃO (1995), a chicória é uma planta nativa da Europa, que pode ser cultivada em praticamente todo o mundo. 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).

FIGUEIRA (2000) realizou um estudo agrotecnológico da espécie *Cichorium intybus L.*, e verificou que, no Brasil, a chicória pode ser cultivada tanto na primavera quanto no outono. Entretanto, a produtividade (kg/m^2) se mostrou maior no ciclo do outono.

VAN LOO et al. (1995) relatam que 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.

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).

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. Devido a esse sabor amargo, as raízes de chicória costumavam ser torradas e utilizadas por holandeses e egípcios para a produção de bebidas com propriedades similares ao café. Desde o final do século XVIII, o “café chicória” tem sido preparado em escala industrial, sendo bastante consumido na Europa até os dias de hoje (VAN LOO et al., 1995).

Mais recentemente, a inulina foi identificada como um ingrediente capaz de substituir a gordura ou o açúcar, com baixa contribuição calórica (ROBERFROID, GIBSON e DELZENNE, 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.

3.2 INULINA

3.2.1 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 glicose terminal. Sua fórmula pode ser descrita como **GF_n**, onde **G** representa a molécula de glicose, **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).

LAURENZO, NAVIA e NEIDITCH (1999) e SILVA (1996) definem a inulina como um FOS composto por uma mistura de oligômeros de diferentes graus de polimerização (GP)

que ocorre naturalmente em produtos vegetais tais como cebola, alho, alcachofra de Jerusalém, dahlia e raízes de chicória.

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, com um comprimento médio de cadeia de aproximadamente 9.

Embora a composição molecular da inulina seja bem conhecida, as publicações divergem quanto a sua solubilidade. Merck Index descreve a inulina como levemente solúvel em água fria e solúvel em água quente, enquanto que um estudo quantitativo (PHELPS, 1965 citado por COOPER, 1990) sugere que nas duas formas da inulina ser extraída – a primeira obtida pela precipitação na água, a segunda pela precipitação no etanol – nas quais são substancialmente solúveis em água a 37°C. Sabe-se também que as suspensões de inulina são menos solúveis quando não agitadas. A forma obtida pela precipitação em água é chamada de alfa-inulina e a forma obtida pela precipitação em etanol é chamada de beta-inulina.

Entretanto, COOPER (1990) admite que as diferenças de conformação entre as duas formas não foram determinadas, nem tampouco foram estabelecidas as metodologias que possam distingui-las quanto às diversas formas polimórficas de inulina.

Este mesmo autor descobriu e isolou, durante processo de desenvolvimento de metodologia para distinção de várias formas de inulina, uma terceira forma, até então desconhecida. Esta terceira estrutura chamada de gama-inulina é praticamente insolúvel em água a 37°C, mas é solúvel em temperaturas na escala de 70 a 80°C, como são as formas alfa e beta. Todas as formas são inconversíveis, progredindo da mais solúvel e mais instável e para a menos solúvel e mais estável, sendo o processo reversível apenas com a solubilização completa, seguida pela recristalização.

3.2.2 Considerações nutricionais

A inulina é um FOS que pode ser encontrado em mais de 30.000 espécies vegetais, inclusive algumas consumidas normalmente na dieta humana (SILVA, 1996), conforme pode ser observado na Tabela 3.2-1:

Tabela 3.2-1: Níveis de inulina em vegetais consumidos na dieta humana

Planta	Nível de inulina (%)
Trigo	1 – 4
Cebola	2 – 6
“Murnong”	8 – 13
Alho porro	10 – 15
Aspargos	10 – 15
Raiz de chicória	13 – 20
“Yacon”	15 – 20
Raiz de barba de bode	15 – 20
Alcachofra de Jerusalém	15 – 20
Tubérculos de Dahlia	15 – 20
Alho	15 – 25

Fonte: SILVA (1996)

A Tabela 3.2-2 mostra a composição centesimal e o valor calórico das raízes de chicória (NOGUEIRA, 2001):

Tabela 3.2-2: Composição centesimal de raiz de chicória.

Raiz de chicória	(g/100g)
Umidade	73,60
Cinzas	1,00
Lipídios	0,20
Proteínas	1,30
Carboidratos	23,90
Calorias (kcal/100g)	1,03

De acordo com SILVA (1996) e TEEUWEN, THONÉ e VANDORPE (1992), os povos aborígenes australianos consumiam “murnong” (*Microseris scapigera*) no século XIX como principal fonte vegetal de alimento, com média diária de 200 a 300 gramas. Trata-se de uma planta tuberosa rica em inulina. O mesmo é verdade para os tubérculos de “yacon” (*Polymnia sonchifolia*), que são vegetais tradicionais para algumas tribos indígenas latino-americanas e o novo alimento da moda para os japoneses contemporâneos. Já na Europa Ocidental, a alcachofra de Jerusalém foi a principal fonte de carboidratos até o advento da batata.

TEEUWEN, THONÉ e VANDORPE (1992), relatam que a inulina obteve o status de alimento durante as guerras mundiais, onde as pessoas consumiam tubérculos de dahlia ou tulipas, por falta de batatas.

A dose diária aceitável (ADI) para inulina é estabelecida em 40 gramas. Entretanto, não existem evidências de toxicidade ou distúrbios gastrointestinais associados ao consumo de inulina. A média diária de consumo *per capita* varia de 1 a 10 gramas em populações da parte ocidental dos EUA e da Europa (VAN LOO et al., 1995).

A inulina pode ser considerada como um ingrediente funcional, com baixa contribuição calórica, devido às seguintes propriedades nutricionais:

- Após a ingestão, a inulina não é quebrada no sistema digestivo humano, devido à resistência à hidrólise oferecida pelas ligações β -(2,1) entre as molécula de frutose (ROBINSON, 1995). Por esse motivo, não resulta em contribuição calórica nesse processo. Apenas no cólon ocorre a degradação de inulina por fermentação de bactérias e, conseqüentemente, vai ocorrer uma baixa contribuição calórica indireta (ROBERFROID, GIBSON, DELZENNE, 1993; e RANHOTRA, GELROTH e GLASER, 1993).
- A inulina afeta os parâmetros fisiológicos do sistema digestivo, como esvaziamento gástrico, tempo de trânsito, pH, e massa fecal de forma similar às fibras dietéticas (ROBERFROID, GIBSON e DELZENNE, 1993). Pelo efeito benéfico no sistema digestivo, a inulina é considerada um “alimento funcional”.

- A ingestão de inulina resulta em um significativo incremento dos benefícios das bifidobactérias. A flora *Bifidus* estimula o sistema imunológico, a absorção de minerais e inibe o crescimento de bactérias nocivas ao organismo (HEWITT, 1994);
- Muitos outros efeitos benéficos à saúde relacionados a diabetes, metabolismo de lipídios e redução de risco de câncer tem sido reportados (ROBERFROID, 1993; FLAMM et al, 2001).

A inulina é considerada como um alimento e não um aditivo em 12 países, entre os quais EUA, Bélgica, França, Luxemburgo, Dinamarca, Japão e Reino Unido. Por esse motivo, não está sujeita a regulamentação (CÂNDIDO e CAMPOS, 1995).

3.2.3 *Exploração comercial*

SILVA (1996) relata que carboidratos como inulina podem ser obtidos através de fungos e bactérias. Entretanto, a fonte de inulina predominantemente usada comercialmente é baseada nos produtos vegetais. De acordo com SILVA (1996) e LAURENZO, NAVIA e NEIDITCH (1999), as raízes de chicória são os produtos vegetais mais aplicados para a produção comercial de inulina.

LEENHEER e HOEBREGS (1994) mencionam a existência de dois tipos de raízes apropriadas para a exploração comercial, a alcachofra de Jerusalém (*Helianthus tuberosus* L.) e a chicória (*Cichorium intybus* L.). A chicória tem sido usada para a produção industrial de inulina na Bélgica, Holanda e França. As razões desta escolha estão na estabilidade de produção de cadeias longas do GFn e uma boa produção, mesmo em condições de clima moderado.

Devido ao reconhecido valor nutricional e funcional apresentado pela inulina e pelas oligofrutoses presentes nas raízes de chicória, o grupo Rhône-Poulenc decidiu comercializar esses produtos através de um acordo com o grupo Raffinerie Tirlemontoise S. A., na Bélgica. Os nomes comerciais dos produtos são Raftiline[®] e Raftilose[®]. O primeiro é composto principalmente por inulina e é utilizado industrialmente como substituto da gordura. O segundo, composto por oligofrutose, mono e dissacarídeos, é aplicado como substituto

superior do açúcar. Esses produtos são hoje comercializados em 16 países da Europa, no Japão e nos EUA (APPLIED TECHNOLOGY, 1993).

Outros dois produtos comerciais são produzidos pela Imperial-Suikner Unie, da Holanda para produção de diversos tipos de alimentos e bebidas. O primeiro, chamado de Frutafit[®] é baseado em inulina e o segundo, Frutalose[®], é composto de inulina e frutose.

3.2.4 Processos de obtenção de inulina

De acordo com LAURENZO, NAVIA, NEIDITCH (1999), os métodos convencionalmente utilizados para extrair inulina de produtos vegetais, tais como alcachofra de Jerusalém ou raízes de chicória, 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; filtração e recuperação da inulina por precipitação ou evaporação.

VAN LOO et al. (1995), em estudo 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, como a chicória ou a alcachofra de Jerusalém, 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, BALLEVRE e ROCHAT, 1999).

PARK et al. (2000) propõem um processo para obtenção de um concentrado de inulina utilizando a técnica de abaixamento de temperatura e posterior separação física. 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-oligosacarídeos 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.

3.2.5 Aplicações

Normalmente, ao se referir a processos de transformação da chicória, tem-se como primeira imagem uma bebida com propriedades similares ao café, devido ao antigo hábito de se produzir bebidas de sabor amargo a partir das raízes desse vegetal.

Anteriormente ao isolamento e purificação da insulina, a inulina era historicamente usada por fisiologistas na regulação do nível de açúcar no sangue de paciente com diabetes. Era necessária uma dosagem entre 25 e 50 g por dia de inulina para atingir uma modesta regulação terapêutica (MANN, 1996).

Entretanto, recentemente, a inulina foi identificada como um ingrediente capaz de substituir a gordura ou o açúcar (APPLIED TECHNOLOGY, 1993).

A maior crítica a produtos sem gordura ou com baixo teor de gordura (*no fat* ou *low fat*) se refere à sensação que o decréscimo de textura, *flavor* e *mouthfeel* (sensação tátil bucal) causa no consumo. Para substituir ou reduzir gordura com sucesso, o substituto deve não apenas resultar em produto com baixo valor calórico, mas simultaneamente suprir as propriedades funcionais como estabilidade ao calor, emulsificação, espalhamento, textura e *mouthfeel* (SILVA, 1996).

A inulina é um modificador reológico e pode ser utilizado para otimizar a textura em sistemas de alimentos. Ela tem a propriedade de formar um creme quando dissolvida em água, semelhante ao produzido por uma gordura. As propriedades de um gel podem ser aumentadas

e otimizadas através da adição de outros ingredientes como gomas e surfactantes (CÂNDIDO e CAMPOS, 1995; SILVA, 1996).

A inulina pode ainda ser utilizada em produtos de panificação e produtos de cereais, como controle da umidade e viscosidade, além de reduzir a quantidade de gordura na produção de margarina (SILVA, 1996).

Os produtos comerciais Raftiline[®] e Raftilose[®] são exemplos da aplicação comercial da inulina como ingrediente funcional (APPLIED TECHNOLOGY, 1993). A Raftiline[®] age como suplemento de fibra dietética e como substituto de gordura ou açúcar. Esta propriedade tecnológica foi denominada pelo grupo Rhône Poulenc como Raftcreming, onde o produto em pó pode ser convertido em um creme com textura semelhante à gordura. Em produtos lácteos, melhora a estabilidade de emulsões, não produzindo sabor residual quando aplicado. A Raftilose[®] é moderadamente doce, não produz sabor residual e suas propriedades físicas são similares às do xarope de glicose; contribui para o abaixamento do ponto de congelamento e elevação do ponto de ebulição. Na Europa, a Raftilose[®] é comumente utilizada como substituto de gordura em sorvetes, sobremesas e produtos lácteos.

Há uma quantidade crescente de patentes e produtos *low fat* e *no fat* que levam em sua composição oligossacarídeos como a inulina extraídos principalmente de chicória e alcachofra de Jerusalém. A aplicação da inulina na indústria alimentícia, no entanto, não se restringe apenas a substituir a gordura ou o açúcar. Existe, hoje, uma série de produtos patenteados onde a inulina é utilizada como ingrediente, seja por sua propriedade de substituir a gordura e o açúcar ou por suas propriedades funcionais, atuando no organismo de maneira similar às fibras dietéticas. GREEN et al. (1998) mencionam que o produto pode ser ministrado como alimento completo ou suplemento alimentar para pacientes clínicos ou crianças. ANANTHARAMAN, BALLEVRE e ROCHAT (1999) patentearam um produto à base de amido gelatinizado com adição de inulina de chicória ou alcachofra de Jerusalém que pode ser consumido como cereal matinal e utilizado como ração animal.

THEUER e COOL (1998) desenvolveram composições para alimentos de bebês, onde a inulina faz parte dos componentes nutricionais, tendo a função de estimular seletivamente a colônia de bifidobactérias na infância. KRISHNAMURTHY e WITTE (1998) e JAMES (1998) criaram um método para produção de molhos emulsificantes ou viscosos com teor de

gordura reduzido, utilizando inulina. YATKA, RICHEY e MEYERS (1995) utilizam a inulina na fabricação de gomas de mascar, conferindo-lhes melhores propriedades de absorção de umidade e maior vida útil.

Observa-se, ainda, a existência de patentes onde a inulina é aplicada para produção de coberturas de sorvetes (LESENS et al., 2000); de pastas de nozes (MEADE, 2000) e chocolates (ZUMBE e SANDERS, 1999) com baixas calorias e teor de gordura reduzido; produtos similares às manteigas e margarinas, com alto poder de espalhamento e baixo teor de gordura (BULIGA et al., 1996) e produtos que venham a atuar como substitutos de gordura em sistemas de alimentos (MILLER et al. 2000; MILLER, 2000; YOUNG e CROSBY, 2000).

Há ainda uma série de patentes de processos para produção de produtos à base de frutose a partir da inulina proveniente de diferentes produtos vegetais, conforme relatam FAN (1988); PARTIDA, LOPEZ e GOMES (1988) e KERKHOFFS, (1981).

A aplicação de inulina, entretanto, não se limita à indústria alimentícia. Existem registros do uso de inulina na indústria farmacêutica e na produção de alimentos funcionais. ROBERFROID et al. (1998) relatam o uso da inulina na produção de alimentos funcionais para prevenção de câncer de mama e tratamento de câncer nos seios. MANN (1996) utiliza inulina na formação de compostos reguladores da composição de açúcar no sangue de animais de sangue quente. COOPER (1990) utilizou a inulina para produzir uma composição farmacêutica para tratamento contra tumores. PAUL (1998) aplicou a inulina na produção de composições contendo fibras para a saúde gastrointestinal. O autor menciona que a vantagem de se utilizar a inulina encontra-se no fato de ela não afetar os níveis de glicose e insulina, sendo prontamente fermentada pela microflora intestinal, promovendo o crescimento de certos microorganismos benéficos. LISKA et al. (2000) também utilizaram inulina para formular uma composição com a finalidade de melhorar a integridade da microflora intestinal, a ser utilizada como suplemento alimentar.

3.2.6 Mercado

Os novos produtos, cada vez mais disponíveis no mercado internacional, obtidos pela redução ou substituição de gorduras (*low fat* ou *light*), encontram um mercado promissor. Tais produtos surgem com a finalidade de atender à crescente demanda, provocada pelos apelos de *marketing* e por pessoas cada vez mais preocupadas com melhores condições de saúde e de manutenção ou redução de peso. O incentivo proporcionado por essa demanda crescente tem permitido a melhoria das tecnologias e o desenvolvimento de melhores ingredientes e métodos de produção.

Embora o mercado consumidor esteja cada vez mais disposto a consumir produtos com baixas calorias ou isentos de gordura, esse também tem se tornado cada vez mais exigente. Esse movimento mostra a necessidade de se buscar ingredientes capazes de substituir o açúcar ou a gordura sem alterar a qualidade do produto original, conferida por tais ingredientes.

Para que isso seja possível, instituições públicas e privadas, especialmente na Europa, EUA e Japão, têm desenvolvido cada vez mais pesquisas com a finalidade de obter alimentos com as propriedades sensoriais e funcionais das gorduras, porém, sem o seu elevado teor calórico (SCHRODER e BAER, 1991; BULLOCK et al., 1992).

BYRNE (1997), apresentando a tendência de consumo de novos produtos, cita a aplicação da inulina extraída de raízes de chicória (produto comercial: Raftiline) em produtos *low fat*, *no fat*, *low cholesterol*, *low caffeine*, como alternativa saudável de consumo de alimentos enriquecidos.

Mais recentemente, FASSI (1998) afirma o crescente interesse em novos alimentos, principalmente aqueles com formulações que utilizam ingredientes funcionais tendo em vista serem não apenas saudáveis, mas também apresentarem efeitos relacionados à cura de certas doenças.

BYRNE (1998) relata que nos últimos anos o desenvolvimento de novos produtos floresceu com atividades principais em alimentos funcionais, produtos para crianças e *kits* de refeições de alimentos preparados.

O mercado nacional de alimentos para fins especiais acompanha a tendência internacional da “onda diet” ou *light*, relacionada principalmente a produtos com substitutos

de açúcar, como os edulcorantes artificiais ou naturais (MENEZES e VIEGAS, 1990 e MENEZES, 1990).

Após 1988, por meio das modificações na legislação brasileira que passaram a considerar os dietéticos como alimentos e não mais como medicamentos, o crescimento foi explosivo. Este crescimento não foi acompanhado por atualizações da legislação, ocasionando distorções e disponibilidade de produtos cuja comercialização e uso contribuíram para confundir o consumidor (CÂNDIDO e CAMPOS, 1995).

Em 1995, a portaria nº 41/95 da Secretaria da Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde (SVS/MS), revisada pela portaria nº122/95 (SVS/MS) forneceu subsídios para que o mercado pudesse começar a se organizar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO, 1989/1993).

Como é possível perceber, os mercados nacional e mundial apresentam uma demanda crescente por alimentos saudáveis. Para isso, as empresas do gênero alimentício buscam desenvolver produtos com teores reduzidos de gordura e de açúcares, preferencialmente confeccionados com ingredientes naturais, sem que haja perda de qualidade em relação ao produto original. Paralelamente, cresce também a busca por alimentos funcionais que, ao mesmo tempo em que agradam o paladar, fornecem benefícios à saúde. A inulina é um ingrediente natural e funcional, que, além de beneficiar o sistema gastrointestinal, ainda pode ser aplicado como substituto do açúcar ou da gordura com baixo valor calórico.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia de superfície de resposta (RSM) é uma técnica que tem sido aplicada com sucesso na otimização de processos alimentícios, e consiste em um grupo de procedimentos matemáticos e estatísticos que são usados para estudar a relação entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) e um número de fatores (variáveis independentes). Esta metodologia gera um modelo matemático que descreve o processo em estudo de acordo com BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS (2002), e DINIZ e MARTIN (1996).

O planejamento experimental fatorial associado à técnica de RSM dá informações seguras do processo, reduzindo iterações, envolvendo técnicas de tentativa e erro (BOX,

HUNTER e HUNTER, 1978). Usando esta técnica para realizar os ensaios experimentais, é possível estimar os efeitos principais das variáveis na resposta ou variável dependente. A tabela de análise de variância dá informações sobre o quanto o ajuste foi adequado, sendo possível propor o modelo probabilístico que correlaciona a resposta em função das variáveis estudadas, construindo a superfície de resposta para determinar a faixa ótima de operação.

A metodologia de superfície de resposta é constituída de duas etapas distintas: modelagem e deslocamento, que são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos fatoriais. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

Esta metodologia tem sido aplicada em muitos trabalhos científicos na análise e otimização de processos.

O procedimento para verificar a validade destes modelos tem como princípio básico os critérios estatísticos de coeficiente de determinação (R^2) e o teste F. O coeficiente de determinação é um parâmetro estatístico que compara a variância dos valores das respostas previstas pelo modelo proposto com a variância da própria população dos pontos experimentais. Quanto mais próximo de 1 estiver o valor de R^2 entre os valores previstos e os valores experimentais, melhor terá sido o ajuste do modelo às respostas observadas.

O teste Fischer de significância é usualmente utilizado para verificar se o modelo explica uma quantidade significativa da variação dos dados experimentais, comparando-se o valor estimado para F a partir dos resultados experimentais com o valor tabelado para uma distribuição de referência F_{p, v_1, v_2} . O fundamento do teste F consiste em verificar se existe ou não relação entre as variáveis e a resposta. Quando não há relação entre a variável e a resposta, pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas MQ_R e MQ_r segue uma distribuição F. Então, se a razão MQ_R/MQ_r (F_{calc}) for maior que o valor tabelado, pode-se afirmar que a quantidade de variação devido ao modelo é significativamente maior que a variação não explicada e o modelo é considerado válido (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

Nem sempre, porém, uma regressão dada como significativa pelo teste F é útil para realizar previsões. Pode acontecer que a faixa de variação coberta pelos fatores estudados seja pequena demais, fazendo com que o efeito sobre a resposta fique encoberto pela extensão do erro experimental. Pode-se empregar como regra prática, considerar regressão como útil para fins de previsão se o valor de MQ_R/MQ_r for, pelo menos, de cerca de dez vezes o valor do ponto da distribuição F com o número apropriado de graus de liberdade, no nível de confiança escolhido (BOX e WETZ, 1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

3.4 SECAGEM

3.4.1 *Conceitos básicos*

A secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido. Assim, a secagem é um conjunto de ciência, tecnologia e arte, ou seja, um *know-how* baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON e MUJUMDAR, 1987).

As razões para a secagem são tantas quantos são os materiais que podem ser secos. KEEY (1978) descreve que um produto tem que estar capacitado para um processo subsequente ou para ser vendido. Assim, existem materiais que necessitam de uma determinada umidade para poderem ser prensados, moídos ou peletizados. Pós necessitam serem secos a baixos conteúdos de umidade, permitindo um armazenamento satisfatório. Custos de transportes também são reduzidos pela remoção de grande parte da água contida no produto. Vegetais desidratados possuem um sabor enriquecido e são também utilizados em pratos rápidos (*fast food*) e caros (PAN *et al.*, 1997).

Segundo KEEY (1972) a secagem, durante muitos séculos, foi realizada com métodos totalmente sem técnica. Durante a Revolução Industrial na França foi descrita uma das primeiras técnicas de secagem de papel em folhas em uma sala com circulação de ar. Um

século depois, outra técnica foi descrita em Londres na “Grande Exibição”, também para a secagem de papel em cilindros aquecidos. Leite em pó e vegetais também eram secos através de um pequeno aquecimento. Fornos simples eram usados para a secagem de amido e porções de sal.

KEEY (1972) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. A água presente no sólido é chamada de umidade.

Em seu outro livro, KEEY (1978) afirma que esta definição de secagem exclui a concentração de uma solução e a remoção mecânica de água por filtração ou centrifugação. Exclui também métodos térmicos relatados à destilação, tais como a desidratação azeotrópica de alguns líquidos orgânicos. Esta definição, contudo, nos leva a uma grande variedade de tipos de equipamentos, abrangendo desde simples fornos a grandes câmaras em que soluções de sólidos são vaporizadas contra uma corrente de ar quente formando um produto seco.

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d’água, formado a partir da superfície do material a ser seco (BROD, ALONSO e PARK, 1999).

A eficiência do processo de secagem está relacionada com a qualidade do produto final (BROD, ALONSO e PARK, 1999).

3.4.2 Umidade de equilíbrio

Os produtos biológicos têm a propriedade de ceder ou absorver umidade do ar circundante. Para uma mesma temperatura, a umidade contida no material biológico tende a entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Tal fenômeno ocorre devido à relação entre a pressão de vapor d’água do material biológico e a pressão de vapor d’água do ar ambiente. Se a pressão de vapor do material biológico for menor que aquela presente no ar, o material tende a absorver umidade (adsorção); em situação inversa, o material cederá umidade para o ar (dessorção).

Quando a pressão de vapor d’água da superfície do produto se iguala à pressão de vapor do ar ambiente, é estabelecido um equilíbrio. Portanto, para o material biológico, é a

umidade final que pode se atingir no final da secagem quando o tempo da exposição do material no ambiente de secagem é infinitamente longo.

3.4.3 Taxa de secagem

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem. O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos.

O primeiro período representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água, pois o material inicialmente estava abaixo da temperatura de secagem. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

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, são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto que governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, enquanto, que no segundo período, são as transferências internas que são limitantes (DAUDIN, 1983).

3.4.4 Período à taxa decrescente de secagem

O período de taxa decrescente de secagem é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos de secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizerem a taxa de secagem.

De acordo com CHIRIFE (1981), os principais mecanismos de transporte durante o período de taxa decrescente são: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor. Segundo KING (1968) a difusão de vapor é o mecanismo predominante durante a segunda fase deste período.

A teoria difusional se apóia exclusivamente sobre a lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de Fick, na equação de balanço de massa de água no interior do produto, vem:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla X) \quad (1)$$

Onde: D_{ef} - Difusividade efetiva, m^2/s ; X - conteúdo de umidade, kg_{H_2O} / kg_{MS} ; t - tempo, s.

Independentemente dos trabalhos sobre secagem, CRANK (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Para o caso de secagem em sistemas de coordenadas cartesianas, com direção unidirecional em uma placa de espessura $2L$:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2)$$

A equação 2 com as seguintes condições inicial e de contornos:

Umidade inicial uniforme: $X(z, t) = X(z, 0) = X_0$

Umidade máxima no centro: $\left. \frac{\partial X}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$

Umidade constante na superfície: $X(z, t) = X(L, t) = X_{eq}$

E aplicando:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L X(z, t) dz \quad (3)$$

Torna-se:

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

Onde: D_{ef} = Difusividade efetiva, m^2/s ; Y = conteúdo adimensional de umidade, adimensional; \bar{X} = conteúdo médio de umidade, kg_{H_2O}/kg_{ms} ; X_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio, kg_{H_2O}/kg_{ms} ; X_o = conteúdo de umidade no instante inicial, kg_{H_2O}/kg_{ms} ; i = número de termos na série; t = tempo, s ; L = comprimento característico, semi-espessura da amostra, m ; z = direção da transferência, m .

Com o intuito de também se utilizar o modelo para amostras no formato de cubo, a equação 4 torna-se:

$$Y_{cubo} = \left\{ \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right] \right\}^3 \quad (5)$$

Algumas hipóteses têm de ser observadas para a aplicação deste modelo:

1. A difusividade de água é considerada constante;
2. O produto é considerado homogêneo;
3. As dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo;
4. movimento da água resulta de um gradiente do conteúdo de umidade na partícula;

5. A superfície do produto entra em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem;
6. conteúdo de umidade limite é o conteúdo de umidade de equilíbrio do produto.

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego. Podemos 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, convencionou-se chamar de difusividade efetiva.

A dependência da difusividade efetiva em função da velocidade do ar é resultado do aumento da transferência de calor pelo aumento da velocidade do ar, apesar de não influir na resistência de massa (PARK, ALONSO e GODOI, 1996). Portanto, os valores de difusividade efetiva devem ser relacionados com o aumento da temperatura da amostra pelo aumento da velocidade do ar (PARK, VOHNIKOVA e BROD, 2002).

3.4.5 Energia de Ativação

A energia de ativação é estimada baseada em uma equação do tipo Arrhenius que relaciona difusividade com temperatura:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{Ea}{R \cdot T} \quad (6)$$

Onde: D_0 = Fator de Arrhenius, m^2/s ; Ea = energia de ativação, J/mol; R = constante universal dos gases, J/mol K; T = temperatura absoluta, K.

A energia de ativação foi considerada por Arrhenius como a quantidade de energia em excesso em relação à energia média que os reagentes devem possuir para que a reação ocorra. Apesar da dependência não ser muito observada para variações moderadas de temperatura em reações químicas, ela prediz a dependência da temperatura de forma tão acurada que é amplamente aplicada (LIN, Van NESS e ABBOTT, 1973).

3.4.6 Modelo de Page

Em algumas situações, a teoria difusional não é adequada para ajustar o comportamento da taxa de secagem devido a interferências no efeito de resistência interna do material. Para estas situações, pode-se aplicar alguns modelos empíricos como o modelo de Page (PAGE, 1949):

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \exp(-G \cdot t^J) \quad (7)$$

Onde: Y = conteúdo adimensional de umidade, adimensional; \bar{X} = conteúdo médio de umidade, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{ms}}$; X_o = conteúdo de umidade no instante inicial, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{ms}}$; X_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{ms}}$; G, J = coeficientes do modelo de Page.

3.4.7 Secagem da raiz de chicória

Trabalhos com a secagem da raiz de chicória são raros e ainda muito pouco estudados, principalmente no tocante à produção de inulina. BROD, PARK e OLIVEIRA (2001) estudaram o comportamento de secagem de raiz de chicória (*Cichorium intybus* L.) em secador convectivo conjugado de fluxo perpendicular e paralelo. Foi analisada somente a cinética de secagem (sem estudos de concentração de inulina) para a configuração do secador na qual o ar secante passa paralelamente às bandejas, com duas diferentes temperaturas (30°C e 40°C) e três diferentes velocidades do ar (0,24, 0,30 e 0,36 m/s).

3.5 EXTRAÇÃO

A extração inicial da inulina é efetuada com a solubilização da inulina contida nos tubérculos. A extração é convenientemente efetuada utilizando água. HOEHN, McKAY e MURRAY (1983) descrevem que a inulina é moderadamente solúvel em água a temperaturas

abaixo de 50°C. Em temperaturas mais altas, entretanto, a solubilidade aumenta substancialmente, assim é preferível que a extração ocorra em temperaturas acima de 50°C, preferencialmente entre 80 e 90°C. A utilização de temperatura alta também aumenta a taxa de solubilização da inulina, inativa qualquer enzima presente que possa interferir nos processos subseqüentes e resulta na extração de quantidades menores de compostos nitrogenados.

Para raízes cortadas em fatias, encontrou-se que espessuras menores que aproximadamente 0,5 cm não aumentam o potencial de extração da inulina e, assim, prefere-se utilizar fatias entre 0,5 e 2,0 cm de espessura, aproximadamente. Para raízes cubetadas, encontrou-se que as dimensões abaixo de 0,5 cm não aumentam o potencial de extração de inulina e, assim, prefere-se utilizar raízes cubetadas com dimensões entre 0,5 e 1 cm, aproximadamente (HOEHN, McKAY e MURRAY, 1983).

Os mesmo autores também descrevem parte do processo na qual a solução de inulina filtrada é sujeita a uma etapa simultânea de concentração e purificação na qual os aminoácidos, peptídeos, minerais e outros contaminantes de peso molecular mais baixo que a inulina são removidos da solução. Esta etapa simultânea de concentração e purificação pode ser efetuada por técnica de membrana adequada na qual é permitida a passagem dos contaminantes com parte da fase aquosa, enquanto que a inulina é retida na solução concentrada.

3.6 REIDRATAÇÃO

Reidratação é um processo complexo que tem como objetivo o restabelecimento das propriedades do produto fresco. A equação comumente utilizada para modelar a reidratação é a equação de Peleg (PELEG, 1988):

$$MC(t) = MC_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \quad (8)$$

Onde: $MC(t)$ = quantidade de água no instante t , g/g_{MS}; MC_0 = quantidade de água no início, g/g_{MS}; k_1 e k_2 = constantes da equação de Peleg; t = tempo, s.

IV MATERIAL E MÉTODOS

4.1 FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE INULINA

A descrição do processo de obtenção de inulina é apresentada na Figura 4.1-1.

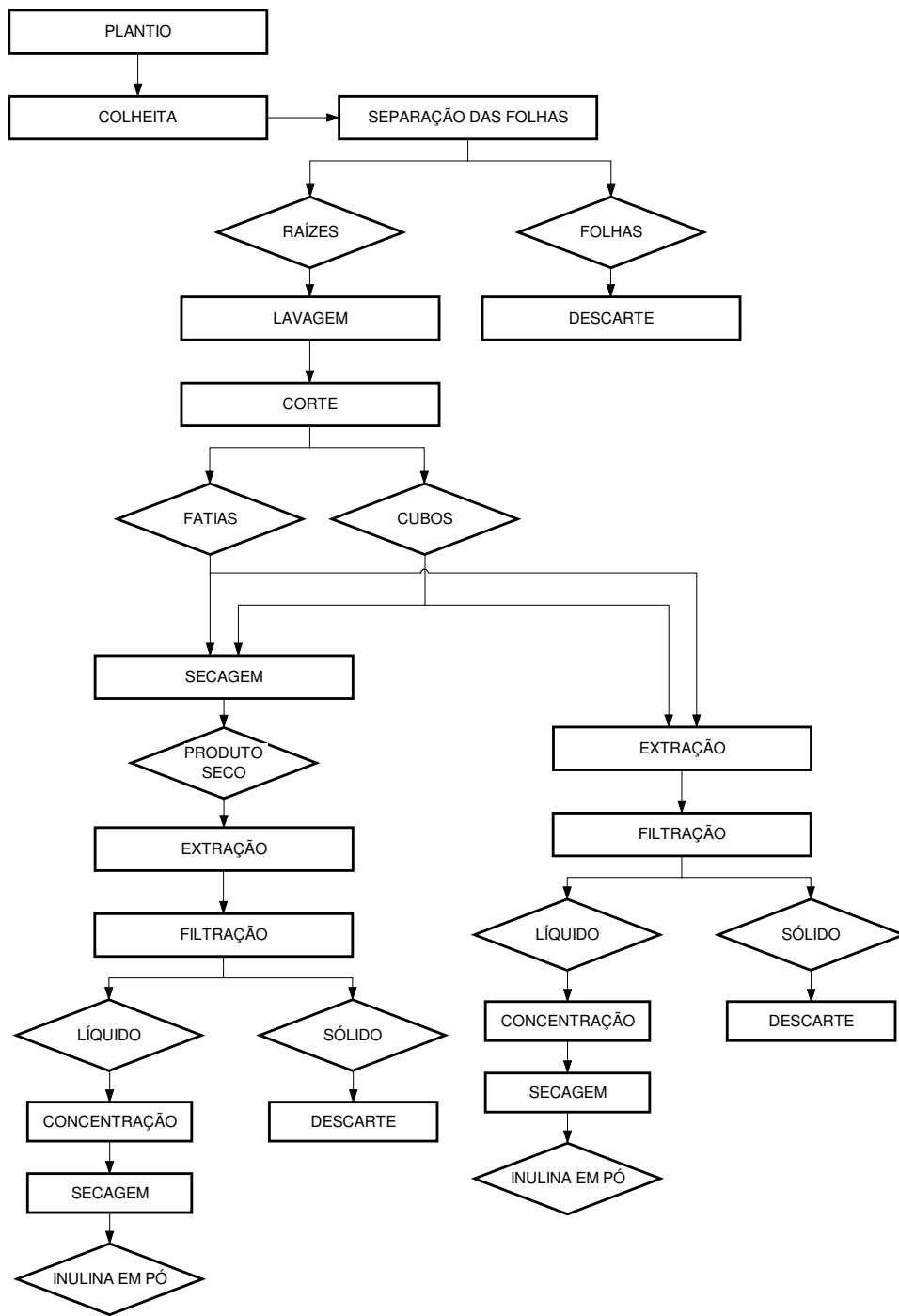


Figura 4.1-1: Fluxograma não-quantitativo de obtenção de inulina em pó.

A partir da Figura 4.1-1, as etapas que foram desenvolvidas no presente trabalho são apresentadas na Figura 4.1-2:

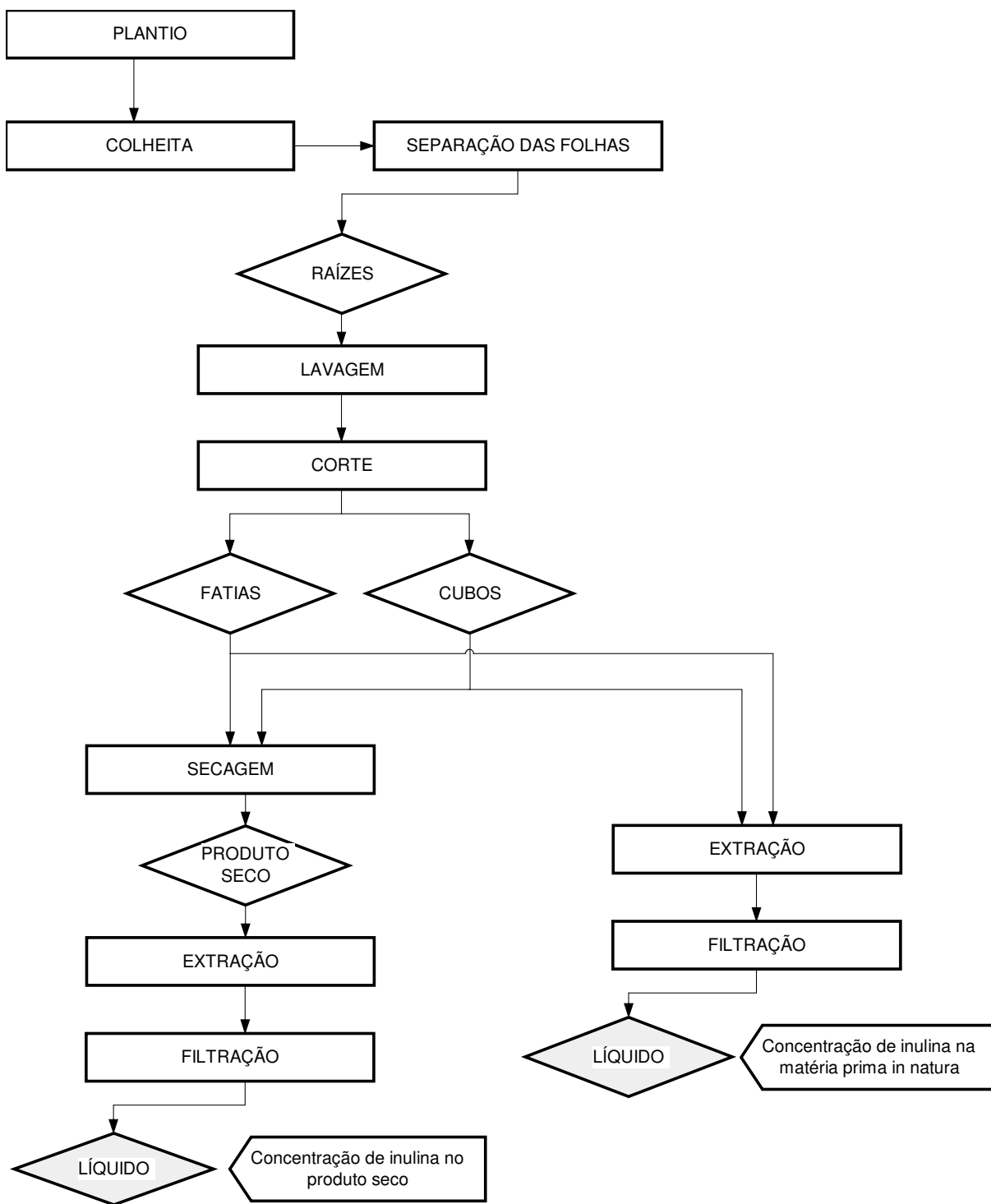


Figura 4.1-2: Fluxograma não-quantitativo de processamento de raiz de chicória.

4.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS PARA OBTENÇÃO DAS RAÍZES DE CHICÓRIA

4.2.1 *Plantio*

De acordo com os resultados fornecidos pelo CPQBA/UNICAMP, foi escolhida a variedade *Orchies* que apresentou os melhores resultados agronômicos (produção por área, resistência a pragas, facilidade no manejo, etc.) e melhor resultado de produção de inulina.

Escolhida a variedade, a chicória foi plantada nas dependências do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em tubetes na segunda quinzena de março (outono – 20 de março a 21 de junho), por se tratar do período de maior produtividade para as condições climáticas da região (FIGUEIRA, 2000). O desbaste das mudas foi realizado duas semanas após a semeadura nos tubetes. No final do mês de abril, as mudas foram transplantadas para os canteiros definitivos no campo.

4.2.2 *Tratos culturais*

Foram adotados tratos culturais necessários ao desenvolvimento adequado das plantas, tais como: irrigação, controle de ervas daninhas, etc. A irrigação foi realizada por uma linha de aspersores montada entre os canteiros, mostrada na Figura 4.2-1. O sistema de irrigação era operado quando da ocorrência de períodos de estiagem de cerca de 7 a 10 dias.



Figura 4.2-1: Visão da área plantada com sistema de irrigação.

A ocorrência de ervas daninhas foi contundente para a realização de capinas freqüentes com o uso de enxada e manualmente.

4.2.3 Colheita

A colheita foi efetuada conforme a realização dos experimentos, de acordo com a capacidade do sistema de secagem e de extração, de forma a evitar perda de material. A colheita teve início no mês de novembro e se estendeu até dezembro, respeitando a antecipação à floração, pois esse é o período de maior concentração de inulina nas raízes. Após a floração, a inulina acumulada nas raízes passa a ser quebrada em frutose para ser consumida pela planta, acarretando em um decréscimo na sua concentração.

Foram colhidas na mesma época quantidades de raiz suficientes para os experimentos que requeriam amostras congeladas. Essas amostras foram processadas e congeladas para posterior utilização nos experimentos.

4.2.4 Lavagem das raízes

Após a colheita, as folhas eram separadas das raízes para posterior lavagem com jato de água e esponja. A Figura 4.2-2 mostra uma raiz depois de colhida (a) e após a lavagem (b):

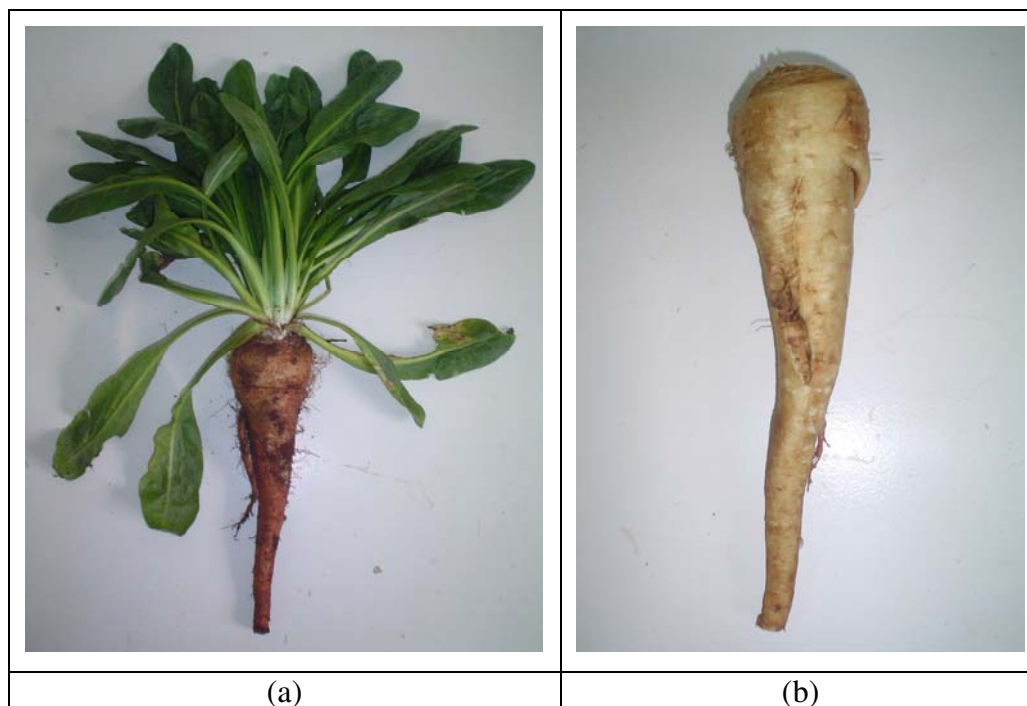


Figura 4.2-2: Raiz de chicória antes e depois da lavagem.

4.2.5 Corte

Para se verificar qual processo de diminuição de tamanho das raízes de chicória apresenta melhores resultados de cinética de secagem e de rendimento na extração, as raízes foram submetidas a dois tipos de corte: um corte em fatias e um corte em cubos homogêneos.

O material (raízes em fatias e em cubos) desta etapa foi submetido à secagem e à extração, assim pôde-se verificar a variação na concentração de inulina da raiz.

A geometria adotada na realização dos ensaios foi de placa plana e cubo. Para os experimentos com placa plana, após a remoção das extremidades, as raízes foram submetidas

ao fatiamento em um multi-processador doméstico, com o intuito de obter fatias de espessura uniforme.

Para os experimentos com amostras cubetadas, as raízes foram inicialmente fatiadas com o auxílio de um cortador metálico, construído com a finalidade de obter fatias uniformes e facilitar o processo seguinte. Posteriormente, foram submetidas novamente ao corte, desta vez em um cortador que deu formato de cubo às fatias. A Figura 4.2-3 mostra as raízes fatiadas e cubetadas. Foram descartadas as partes das raízes que apresentavam injúrias e apodrecimento. Foram desprezadas as fatias e cubos que não apresentavam as espessuras de aproximadamente 4 e 9 mm, respectivamente.

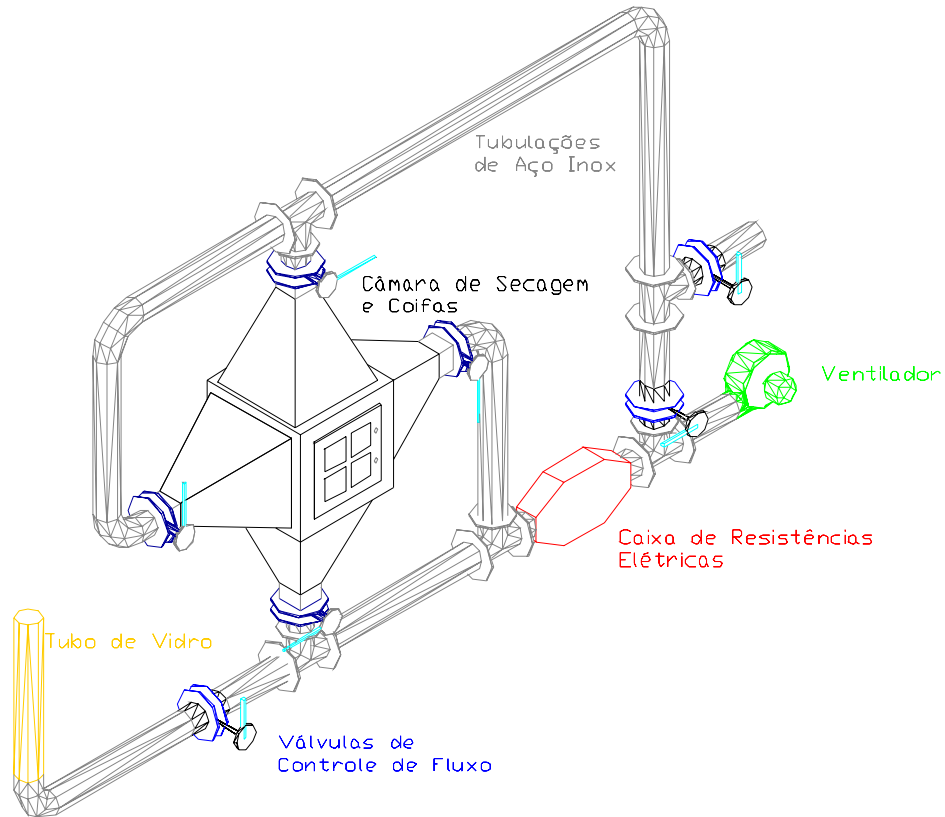


Figura 4.2-3: Raízes de chicória fatiadas e cubetadas.

As raízes apresentaram umidade média aproximadamente igual a 3,0 (em base seca).

4.3 SECAGEM

A secagem foi realizada no mesmo secador convectivo conjugado de fluxo paralelo e perpendicular utilizado por BROD, PARK e OLIVEIRA (2001), mostrado na figura a seguir (Figura 4.3-1):



Fonte: BROD; PARK e OLIVEIRA (2001).

Figura 4.3-1: Esquema do Secador Convectivo de Fluxo Perpendicular e Paralelo.

Diferentemente do trabalho citado acima, foi utilizada apenas uma bandeja na câmara do secador, ocupando, assim, apenas uma metade (coluna à esquerda) da mesma. A outra metade foi vedada, assim como as laterais da câmara, para restringir o fluxo de ar apenas para a bandeja e somente no sentido vertical.

Para cada velocidade de ar exigida pelo planejamento central composto, foi determinada a frequência a ser utilizada. Com o auxílio de um tubo de Pitot, de marca AirFlow, modelo Type 5 Test Set, mediu-se a velocidade no tubo do secador, sendo essa a média aritmética das velocidades em 6 posições radiais do tubo, como indica a Figura 4.3-2, de acordo com metodologia fornecida pela própria empresa fabricante.

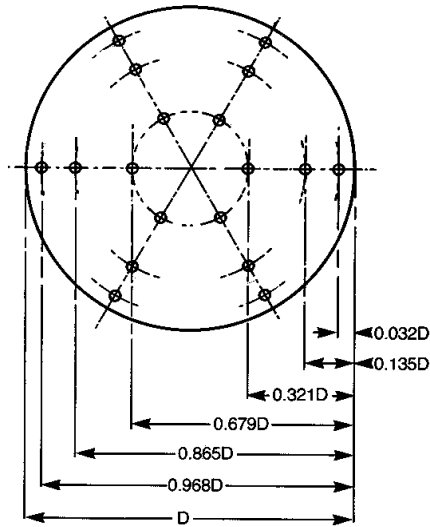


Figura 4.3-2: Posição das medidas de velocidade do ar utilizando tubo de Pitot.

A partir dessa velocidade no tubo (V_{tubo}) encontrou-se a velocidade na metade utilizada da câmara ($V_{\text{câmara}}$), partindo-se da equação da continuidade ($V_{\text{tubo}} * A_{\text{tubo}} = V_{\text{câmara}} * A_{\text{câmara}}$) e conhecendo o valor das respectivas áreas ($A_{\text{tubo}} = 1,767 * 10^{-2} \text{ m}^2$ e $A_{\text{câmara}} = 0,16 \text{ m}^2$).

Foram utilizadas amostras de cerca de 600g para raízes fatiadas e 900g para raízes cubetadas em camada única em cada experimento. Os dados experimentais foram obtidos a partir da pesagem consecutiva das amostras colocadas no secador nas condições operacionais definidas pelo planejamento experimental. O processo de secagem foi finalizado quando as amostras atingiram o equilíbrio dinâmico.

As curvas de secagem foram construídas com o conteúdo adimensional de umidade (Y – equação 4) da raiz de chicória no decorrer do tempo de secagem e indicam a marcha de decaimento do conteúdo de umidade do material. Os valores do conteúdo adimensional de umidade foram calculados com o conteúdo de umidade no equilíbrio determinada por meio dos dados relativos ao equilíbrio dinâmico das amostras.

As difusividades efetivas (Segunda Lei de Fick) foram ajustadas utilizando a regressão não linear do pacote estatístico STATISTICA (2001), assim como a energia de ativação do produto e os coeficientes do modelo de Page. Terminada a secagem no secador, a amostra de raiz de chicória seca foi utilizada para se determinar a massa seca segundo a metodologia da

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1998). O restante do material foi armazenado a temperatura média de 5°C para ser utilizado posteriormente nas análises de extração de inulina.

No planejamento experimental foram utilizadas duas variáveis independentes: temperatura e velocidade do ar, e como variável resposta (dependente), a quantidade de sólidos solúveis extraídos como avaliação para a concentração de inulina extraída.

Para se determinar os níveis de cada variável, para cada tipo de corte foram realizados testes preliminares e encontrada a faixa disponível operacionalmente no secador. Posteriormente, foi gerado um planejamento experimental com dois níveis para cada variável independente (temperatura e velocidade do ar de secagem), totalizando $2^2 = 4$ experimentos. Estes pontos fatoriais são apenas para avaliar os efeitos de suas variáveis e suas interações, não sendo possível, neste estágio, otimizar o processo. Para um planejamento completo, deve-se ainda avaliar o erro puro incluindo no mínimo 3 repetições dos pontos centrais, e mais (2 vezes n) para os pontos axiais. Neste caso, o número total de ensaios foi de: $4 + 3 + 4 = 11$. A Tabela 4.3-1 mostra a matriz experimental para o planejamento central composto:

Tabela 4.3-1: Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental da secagem.

ENSAIO	Variável codificada		Variável real		
	X ₁	X ₂	T _{sec} [°C]	V [m/s]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50
	2	-1	+1	50,0	1,30
	3	+1	-1	90,0	0,50
	4	+1	+1	90,0	1,30
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90
	6	0	0	70,0	0,90
	7	0	0	70,0	0,90
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90
	9	+1,41	0	98,3	0,90
	10	0	-1,41	70,0	0,34
	11	0	+1,41	70,0	1,46

A variável dependente ou resposta foi a difusividade efetiva. Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem, de segunda ordem e da interação entre os termos, conforme a Equação 9.

$$D_{ef} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (9)$$

No caso, D_{ef} é a variável resposta medida, e foi analisada por múltipla regressão através do método que utiliza erro padrão para ajustar a Equação 9, no software estatístico STATISTICA versão 6.0 (2001).

4.4 REIDRATAÇÃO

O produto seco é colocado em banho Maria para extração da inulina. Durante este processo o produto sofre, inicialmente, uma reidratação antes da difusão propriamente dita da inulina. Assim, pretende-se quantificar este processo de reidratação na extração. Esta quantificação foi realizada pelo ganho de água na amostra seca através da equação de Peleg (equação 8). O ajuste de curva foi obtido utilizando-se a função de regressão não-linear do pacote STATISTICA.

4.4.1 Avaliação do ajuste de curvas

O critério utilizado foi o módulo do desvio relativo médio:

$$DR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|VP - VE|}{VE} \quad (10)$$

Onde: VE = valor obtido experimentalmente; VP = valor predito pelo modelo.

De acordo com AGUERRE et al. (1985), o critério de ajuste dos dados experimentais é o desvio relativo médio de 10%.

4.5 EXTRAÇÃO

O processo de difusão por água quente foi o método empregado na extração de inulina de raízes de chicória.

A fim de aplicar a metodologia de superfície de resposta, um teste preliminar foi conduzido e o ponto central para o planejamento experimental foi definido (70°C e 8,5 kg_{H2O}/kg_{MS}). Este planejamento consistiu na determinação de dois níveis para as variáveis temperatura do banho (T) e relação água:massa seca de raiz (AR), a construção de um planejamento experimental central composto com suas possíveis combinações e a execução dos ensaios experimentais. Esse planejamento totaliza também 11 experimentos para cada combinação de tipo de corte e condição da matéria-prima, além de uma corrida completa para raízes *in natura*. O planejamento central composto é mostrado na Tabela 4.5-1.

Tabela 4.5-1: Níveis das variáveis codificada e real para o planejamento experimental da extração de raiz *in natura*.

ENSAIO	Variável codificada		Variável real	
	X ₁	X ₂	T _{extr} [°C]	AR [kg _{água} /kg _{ms}]
Pontos fatoriais	1	-1	50,0	6,0
	2	-1	50,0	11,0
	3	+1	90,0	6,0
	4	+1	90,0	11,0
Pontos centrais	5	0	70,0	8,5
	6	0	70,0	8,5
	7	0	70,0	8,5
Pontos axiais	8	-1,41	41,7	8,5
	9	+1,41	98,3	8,5
	10	0	70,0	5,0
	11	0	70,0	12,0

Para cada ensaio realizado, amostras eram coletadas e trituradas em um processador de alimentos doméstico. Subseqüentemente, uma parte destas raízes trituradas era pesada de acordo com a relação água:massa seca de raiz no planejamento experimental. Esta porção de raiz era, então, imersa em água previamente pesada em um becker (250 ml) e colocada em banho com temperatura pré-fixada.

Foi definido o tempo de 90 min para cada extração como resultado de ensaio preliminar de curva crescente de sólidos solúveis extraídos.

A quantidade de sólidos solúveis extraída foi medida usando um refratômetro de bancada com amostra do extrato final.

Para extração de inulina das amostras secas, utilizou-se o mesmo delineamento central composto realizado para cada combinação entre tipo de corte e condição de matéria-prima no processo de secagem. Esse procedimento foi assim realizado com o intuito de se avaliar os efeitos da secagem na extração da inulina.

A variável dependente ou resposta foi a concentração de sólidos solúveis extraídos. Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem, de segunda ordem e da interação entre os termos, conforme a Equação 11.

$$SS[\%] = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (11)$$

Para esses ensaios, foi definido o tempo de 15 min de reidratação acrescidos de 90 min para cada extração. O tempo de reidratação definido corresponde ao ponto de inflexão da curva de reidratação, realizada como ensaio preliminar aos tratamentos.

Com esta metodologia, obtém-se 11 amostras de extrato de raiz de chicória (seca e *in natura*) em função da temperatura e relação água:massa seca de raiz adicionadas na extração, possibilitando a extração da inulina após o processo.

Os resultados foram obtidos pela leitura de sólidos solúveis.

4.6 ANÁLISES

As análises de umidade foram realizadas após os ensaios de secagem e as análises de sólidos solúveis foram utilizadas na determinação da quantidade extraídas das raízes após processos de extração para todos os produtos, conforme as metodologias descritas a seguir.

4.6.1 Umidade

Determinação na estufa da marca FANEM modelo 320-SE, a uma temperatura de 105°C, durante 24 horas, de acordo método nº 925.45 da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (A.O.A.C.) (1998).

4.6.2 Teor de Sólidos Solúveis

O teor de sólidos solúveis foi determinado em refratômetro de bancada, segundo o método nº 13.6.1 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1976).

V RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SECAGEM

Primeiramente, fez-se o ajuste de acordo com o modelo de Fick (Equações 4 e 5) para todas as curvas de secagem para as duas geometrias propostas (placa plana e cubo) e para as duas condições da matéria-prima (*in natura* e congelada). Para se estudar os efeitos das variáveis envolvidas no processo de secagem foi realizado um delineamento central composto para cada combinação destas condições. Para melhor compreensão dos efeitos, os resultados serão discutidos individualmente.

A secagem foi finalizada quando não havia mais variação entre as pesagens, obtendo a umidade de equilíbrio dinâmico das amostras que foi utilizada na determinação dos coeficientes adimensionais de umidade Y .

FIGUEIRA et al.(2004) avaliaram as isotermas de desorção da raiz de chicória para as temperaturas de 60, 70 e 80°C. Os valores de umidade de equilíbrio dinâmico foram comparados com os valores de umidade do modelo de Henderson por estes autores. Ratificou-se o uso da umidade de equilíbrio dinâmico, pois houve pequena diferença entre eles, mesmo com a extrapolação para as temperaturas de trabalho.

Os dados foram ajustados para o modelo empírico de Page e encontrada a energia de ativação para cada condição da matéria-prima.

5.1.1 Raízes fatiadas *in natura*

5.1.1.1 Cinética de secagem

Os resultados de difusividade efetiva para secagem (Equação 4) de raízes de chicória fatiadas *in natura* de acordo com o planejamento experimental juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) no ajuste das curvas e módulo do desvio relativo médio (DR) estão apresentados na Tabela 5.1-1.

Tabela 5.1-1: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes fatiadas *in natura*.

Ensaio	Variáveis reais					
	T [°C]	V [m/s]	D_{ef} [m ² /s]	R^2	DR [%]	
Pontos fatoriais	1	50,0	0,50	5,29E-10	0,9869	8,23
	2	50,0	1,30	4,22E-10	0,9936	5,11
	3	90,0	0,50	9,40E-10	0,9951	16,55
	4	90,0	1,30	9,89E-10	0,9985	17,75
Pontos centrais	5	70,0	0,90	6,34E-10	0,9938	14,43
	6	70,0	0,90	7,73E-10	0,9927	15,29
	7	70,0	0,90	8,32E-10	0,9953	10,63
Pontos axiais	8	41,7	0,90	3,62E-10	0,9873	7,34
	9	98,3	0,90	1,11E-09	0,9987	14,48
	10	70,0	0,34	6,33E-10	0,9876	07,16
	11	70,0	1,46	6,71E-10	0,9980	16,83

Para os propósitos de engenharia, sendo o desvio relativo abaixo de 25%, o ajuste é considerado bom.

As Figuras 5.1-1, 5.1-2 e 5.1-3 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Fick para raízes de chicória fatiadas *in natura*.

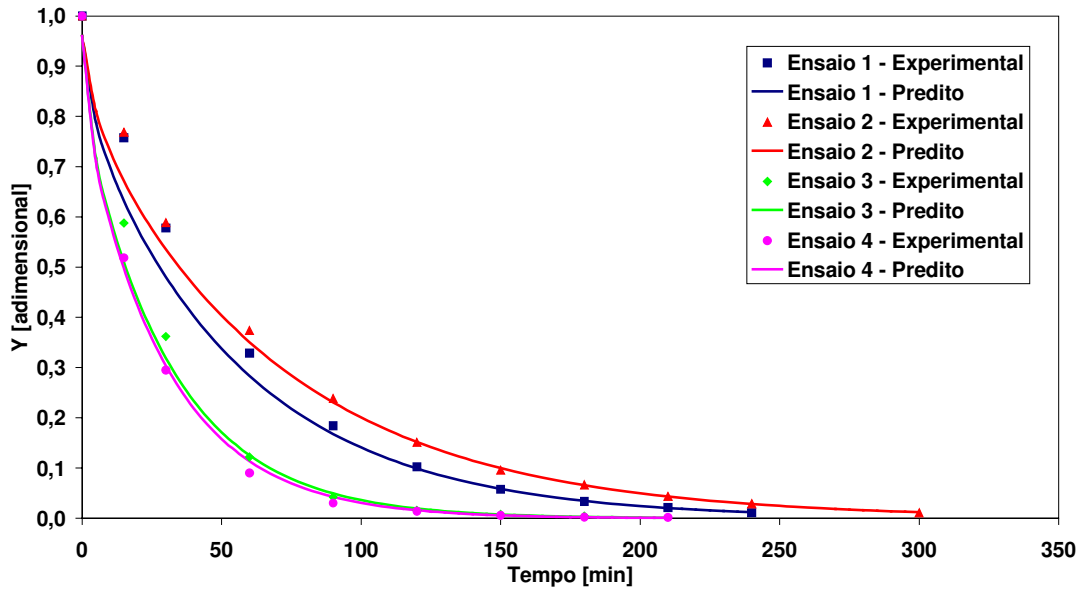


Figura 5.1-1: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos fatoriais.

Analisando-se as curvas de secagem para os pontos fatoriais (Figura 5.1-1), percebe-se que a influência da temperatura se mostra mais pronunciada, ou seja, as curvas dos ensaios 1 e 2 se distanciam pouco entre si, porém se afastam das curvas dos ensaios 3 e 4. O mesmo fato acontece se analisarmos as curvas dos ensaios 3 e 4, já que estes se diferem dos outros quanto à temperatura de secagem.

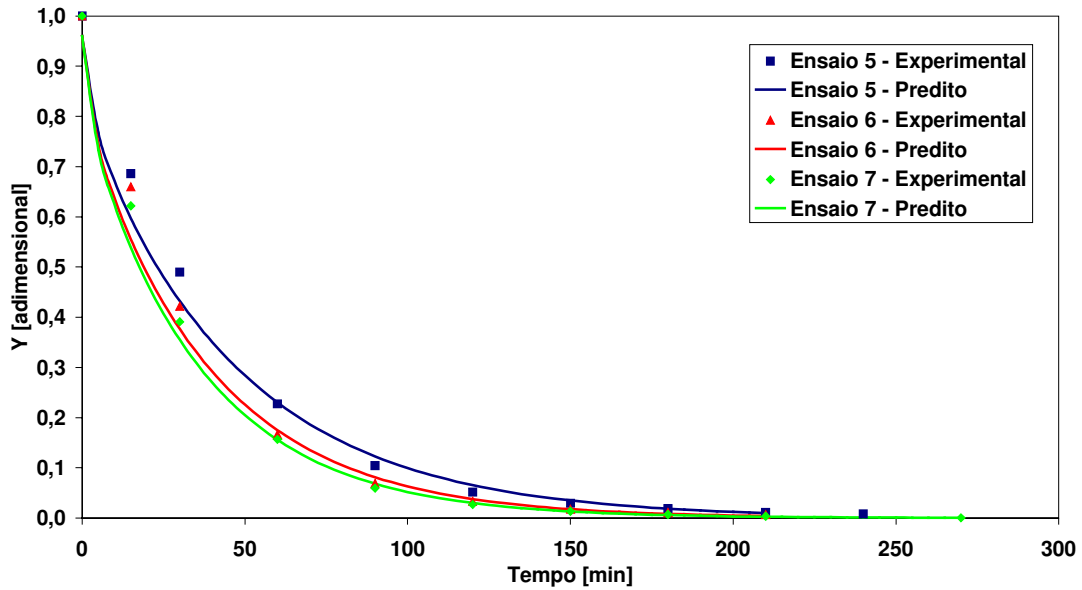


Figura 5.1-2: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos centrais.

Conforme o esperado, as curvas dos pontos centrais não se diferem pois mantêm as mesmas condições de operação.

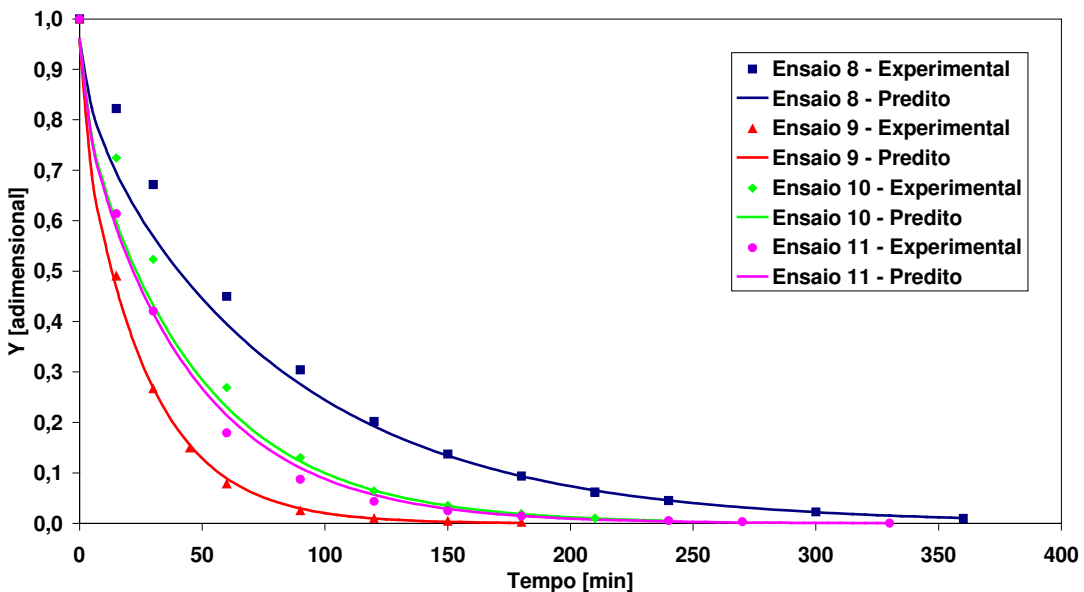


Figura 5.1-3: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas in natura - pontos axiais.

Percebe-se que a curva mais acentuada (ensaio 9) é a de maior temperatura do ar de secagem, enquanto que a menos acentuada é a de temperatura mais baixa (ensaio 8). Verifica-se, assim como nos pontos fatoriais, que o efeito da velocidade pouco influenciou neste caso no processo de secagem.

A Tabela 5.1-2 apresenta os efeitos lineares e quadráticos dos parâmetros, bem como suas interações na avaliação da difusividade efetiva na secagem. Os valores em negrito indicam que o fator ou a interação é significativo para um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

Tabela 5.1-2: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes fatiadas in natura.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Temperatura T (linear)	5,09504E-10	4,92506E-11	0,0001
Temperatura T (quadrático)	3,52819E-12	5,862E-11	0,9543
Velocidade V (linear)	-1,33088E-12	4,92506E-11	0,9795
Velocidade V (quadrático)	-8,15131E-11	5,862E-11	0,2231
Interação T x V	7,82247E-11	6,96509E-11	0,3124

Em relação à difusividade efetiva, observou-se que os efeitos linear e quadrático da velocidade do ar seguidos pelo efeito quadrático da temperatura e de interação entre temperatura e velocidade não influenciaram significativamente na resposta.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos (Tabela 5.1-3).

Tabela 5.1-3: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória fatiadas in natura.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	5,19E-19	1	5,19E-19	114,17	5,12	0,927
Resíduo	4,09E-20	9	4,55E-21			
Falta de ajuste	2,03E-20	7	2,91E-21	0,28	19,35	
Erro puro	2,06E-20	2	1,03E-20			
Total	5,60E-19	10				

Verifica-se que os modelos apresentaram regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). Entretanto, segundo BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS (2002), uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F, pode não ser útil para realizar previsões por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002) sugeriram que para uma regressão ser significativa não apenas estatisticamente, mas também ser útil para fins preditivos, o valor de F_{calc} para a regressão deve ser de cerca de dez vezes o valor de F_{tab} .

Os valores de F_{calc} para falta de ajuste ficou muito abaixo de um, além de ser muito inferior ao F_{tab} , o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A Tabela 5.1-3 mostra ainda que o coeficiente da determinação (R^2) foi superior a 0,90, ou seja, a porcentagem da variação explicada pelo modelo foi de 92,7%. A Figura 5.1-4 mostra a distribuição dos resíduos obtida na qual se verifica que os resíduos apresentam-se distribuídos de forma aleatória, confirmando que não há formação de tendência na distribuição dos valores preditos pelo modelo e, assim, refutando a possibilidade dos resíduos apresentarem um comportamento sistemático. Portanto, o modelo se mostra adequado.

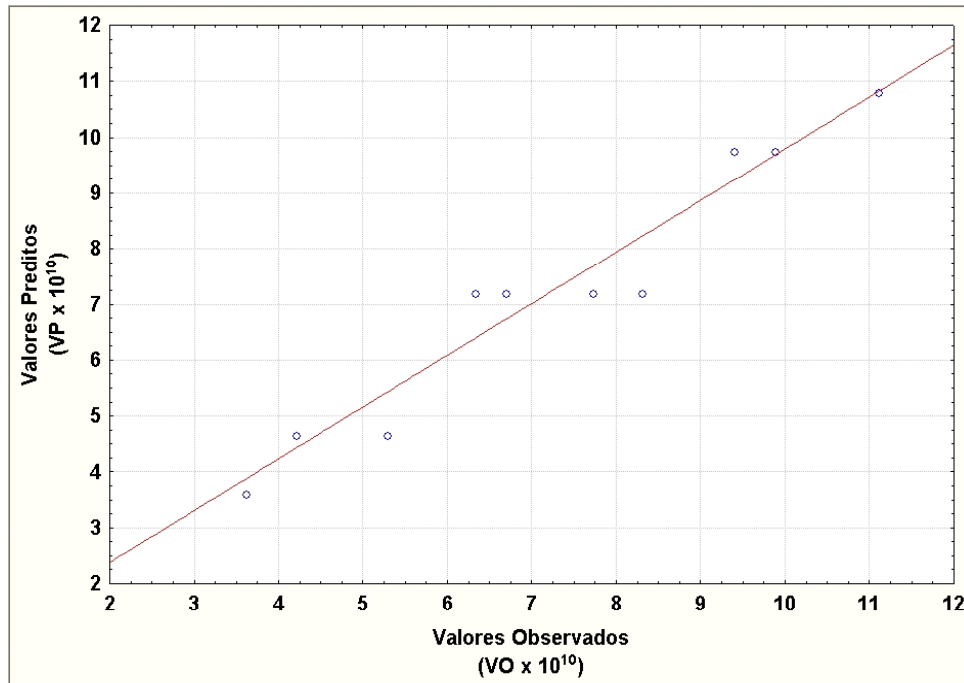


Figura 5.1-4: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar a difusividade efetiva na secagem de raízes de chicória fatiadas *in natura* está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$D_{ef} = -1,736 * 10^{-10} + 1,274 * 10^{-11} * T \quad (12)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado para o modelo de superfície de resposta foi de 7,83%, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 93% e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo é realmente preditivo para as condições do processo estudadas (Equação 12). Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a difusividade efetiva do modelo de Fick para raízes de chicória fatiadas *in natura*, como mostrado na Figura 5.1-5.

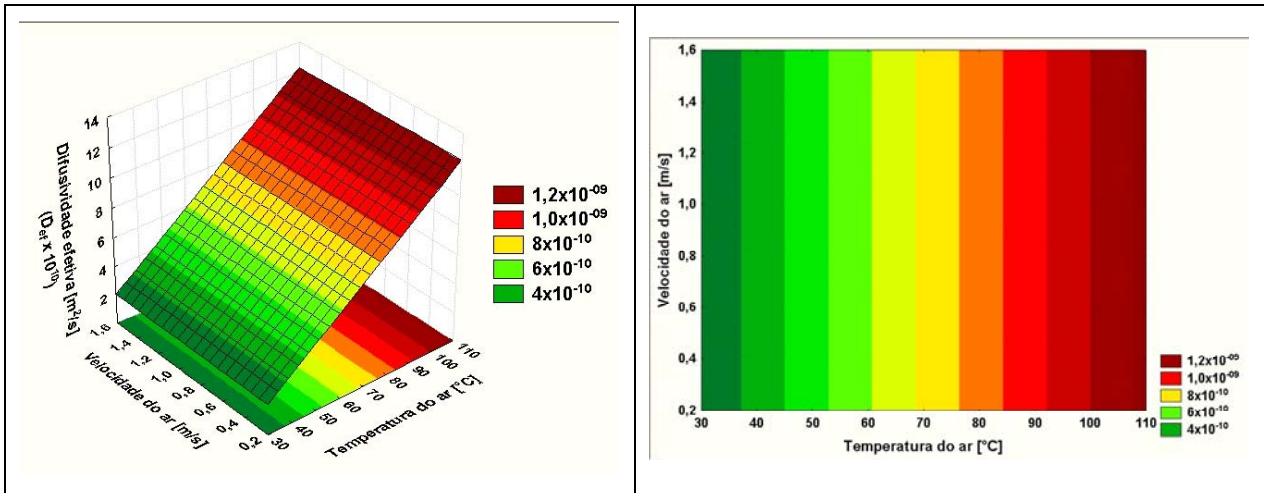


Figura 5.1-5: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes fatiadas *in natura*.

5.1.1.2 Modelo de Page

As Figuras 5.1-6, 5.1-7 e 5.1-8 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Page para raízes de chicória fatiadas *in natura*.

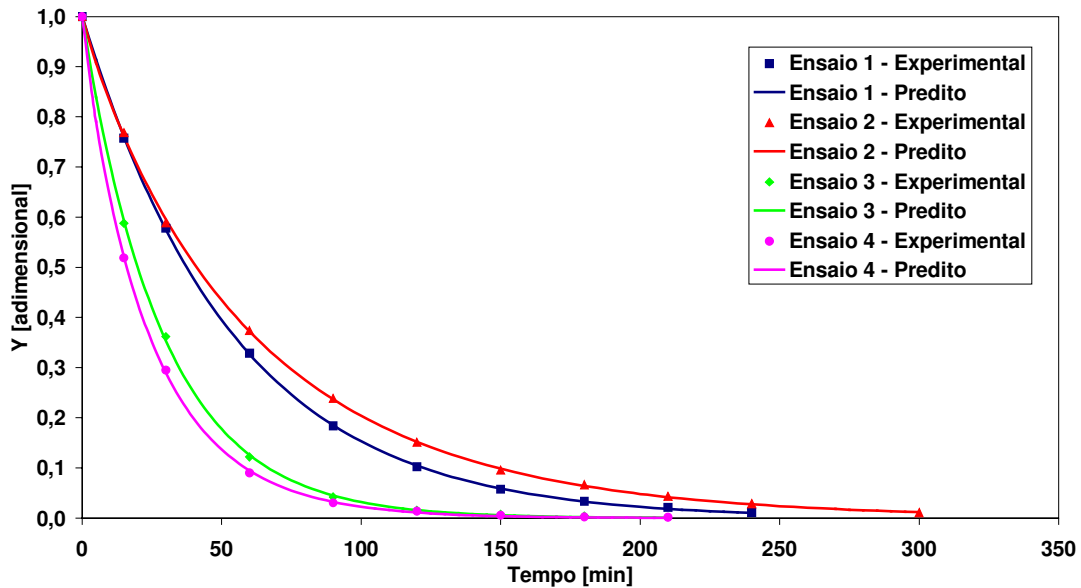


Figura 5.1-6: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas *in natura* - pontos fatoriais.

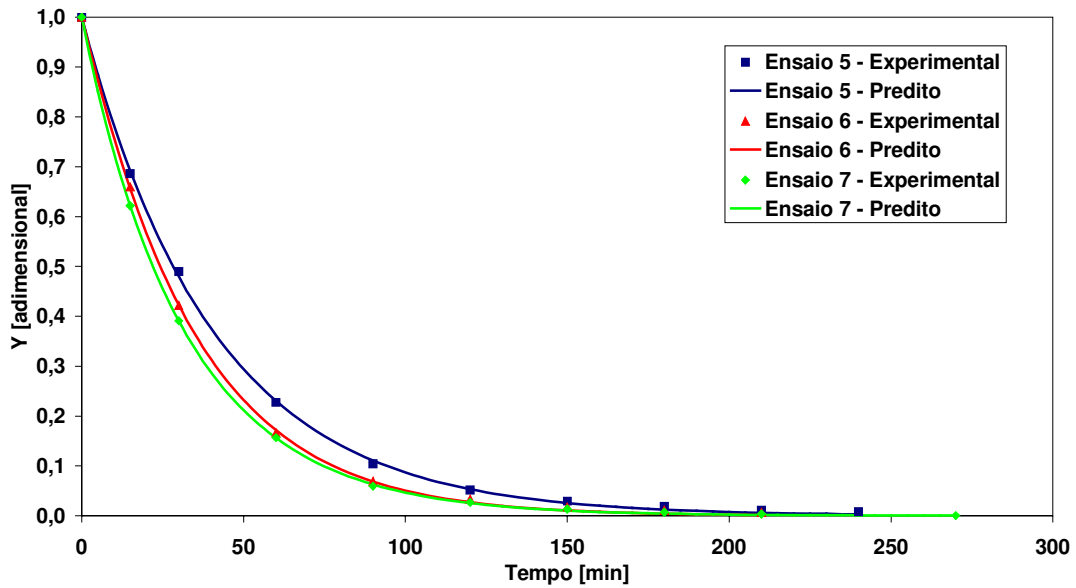


Figura 5.1-7: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas in natura - pontos centrais.

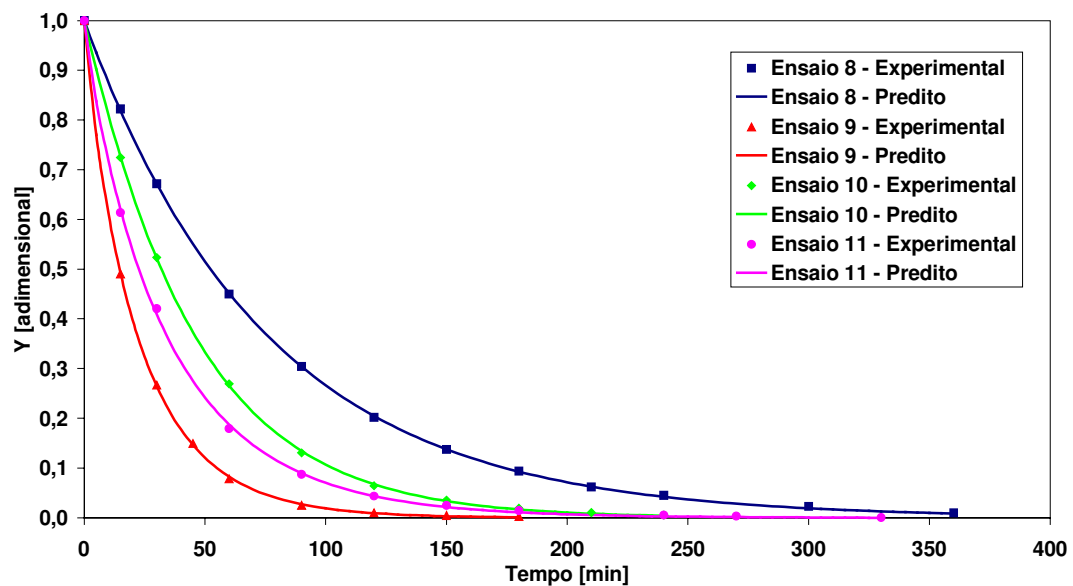


Figura 5.1-8: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas in natura - pontos axiais.

Os parâmetros do modelo (G e J) estão apresentados na Tabela 5.1-4 juntamente com os valores dos respectivos coeficientes de determinação (R^2). Verifica-se que os dados experimentais apresentaram ajustes muito bons para o modelo de Page, apresentando coeficientes de determinação acima de 0,999, sendo, portanto, um bom modelo para fazer a predição da cinética de secagem.

Tabela 5.1-4: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória fatiadas in natura.

Ensaio	Variáveis reais		Coeficientes de Page		R^2	DR [%]
	T [°C]	V [m/s]	G	J		
1	50,0	0,50	0,0176	1,0141	0,999	2,81
2	50,0	1,30	0,0218	0,9310	0,999	2,61
3	90,0	0,50	0,0355	0,9930	0,999	17,48
4	90,0	1,30	0,0529	0,9270	0,999	20,97
5	70,0	0,90	0,0246	0,9985	0,999	17,53
6	70,0	0,90	0,0256	1,0332	0,999	25,64
7	70,0	0,90	0,0332	0,9829	0,999	15,65
8	41,7	0,90	0,0134	0,9973	0,999	3,54
9	98,3	0,90	0,0607	0,9074	0,999	5,58
10	70,0	0,34	0,0199	1,0258	0,999	6,79
11	70,0	1,46	0,0413	0,9040	0,999	24,74

5.1.2 Raízes fatiadas congeladas

5.1.2.1 Cinética de secagem

Os resultados de difusividade efetiva para secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas de acordo com o planejamento experimental juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) no ajuste das curvas e módulo do desvio relativo médio (DR) estão apresentados na Tabela 5.1-5.

Tabela 5.1-5: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes fatiadas congeladas.

Ensaio	Variáveis reais					
	T [°C]	V [m/s]	D_{ef} [m ² /s]	R^2	DR [%]	
Pontos fatoriais	1	50,0	0,50	3,27E-10	0,9797	14,89
	2	50,0	1,30	3,34E-10	0,9840	11,19
	3	90,0	0,50	5,18E-10	0,9943	13,63
	4	90,0	1,30	7,81E-10	0,9899	15,11
Pontos centrais	5	70,0	0,90	5,21E-10	0,9830	9,58
	6	70,0	0,90	5,36E-10	0,9921	13,97
	7	70,0	0,90	5,09E-10	0,9965	15,12
Pontos axiais	8	41,7	0,90	2,75E-10	0,9844	14,27
	9	98,3	0,90	8,02E-10	0,9904	11,90
	10	70,0	0,34	4,54E-10	0,9887	12,53
	11	70,0	1,46	5,71E-10	0,9944	11,38

Analisando os valores de difusividade efetiva e as respectivas condições de secagem, nota-se que os valores aumentam com o aumento da temperatura, assim como com o aumento da velocidade do ar.

As Figuras 5.1-9, 5.1-10 e 5.1-11 mostram as curvas dos ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Fick para raízes de chicória fatiadas congeladas.

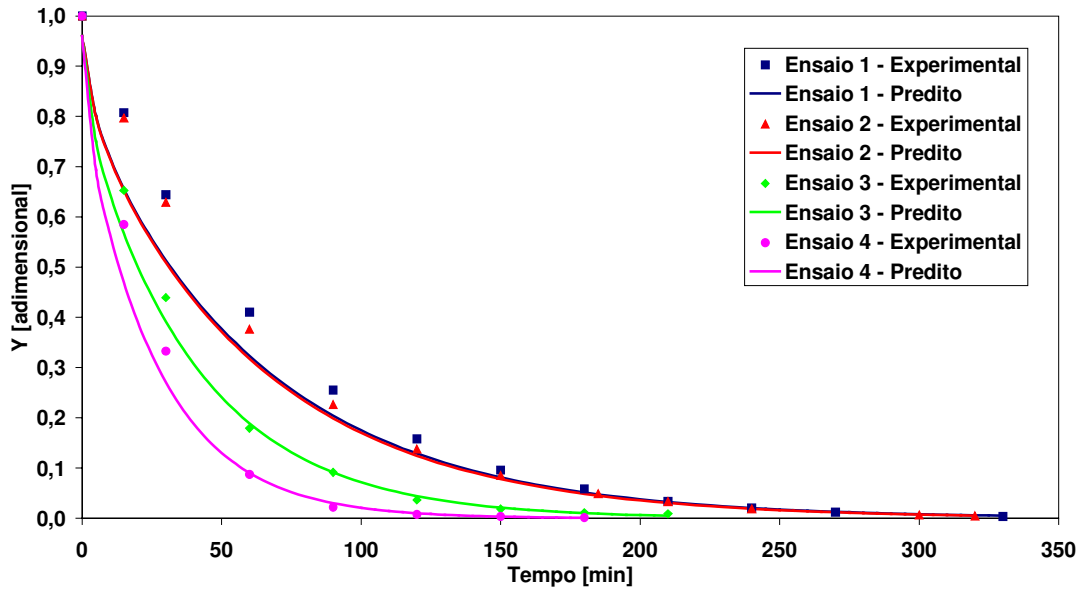


Figura 5.1-9: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos fatoriais.

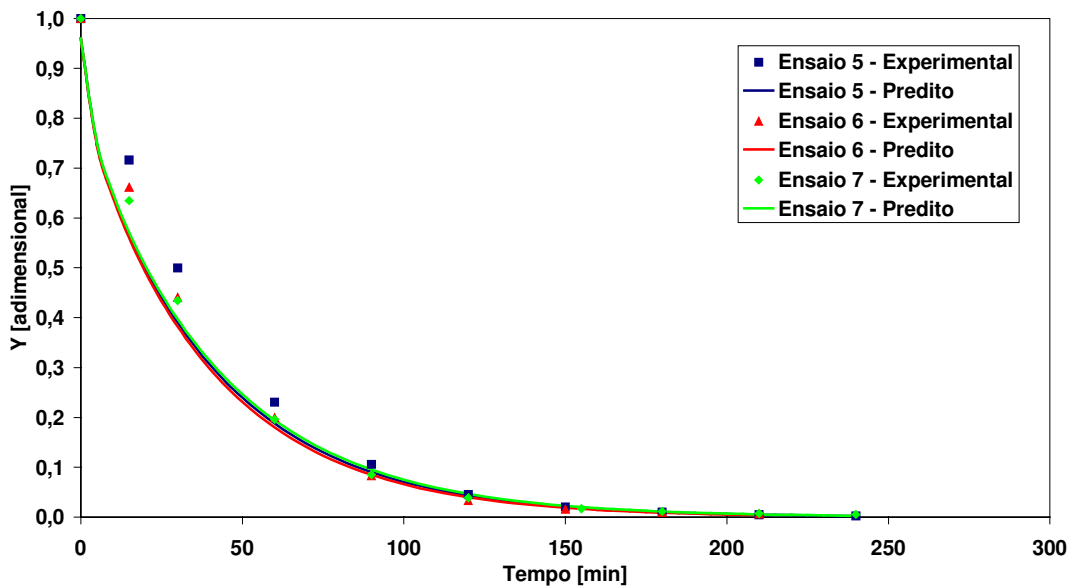


Figura 5.1-10: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos centrais.

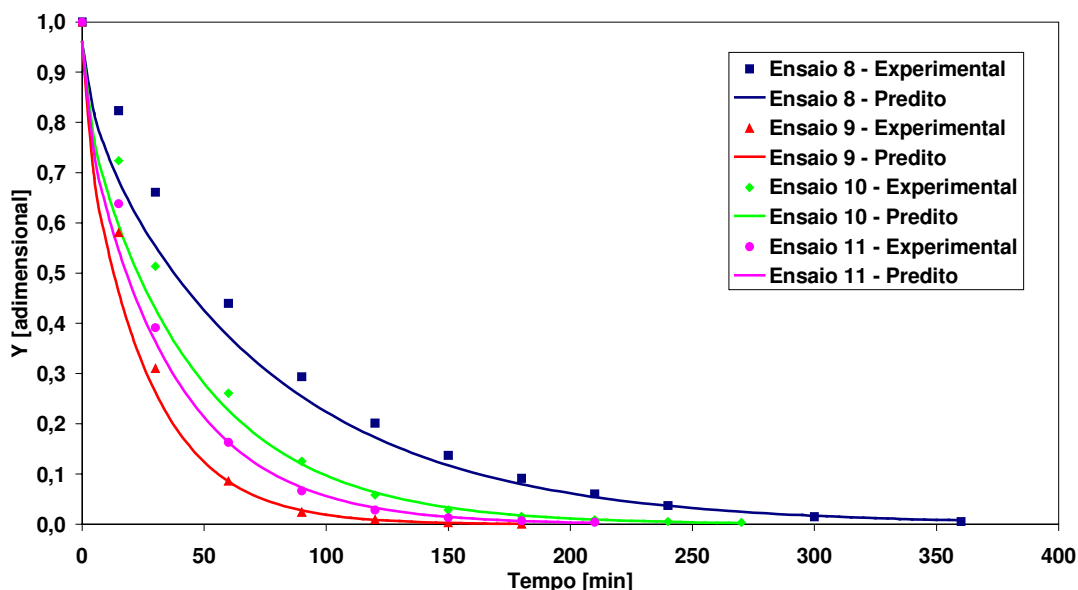


Figura 5.1-11: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes fatiadas congeladas - pontos axiais.

Também se observa a influência da velocidade e temperatura do ar no decréscimo da umidade (Figuras 5.1-9 e 5.1-11), assim como a pouca variação das curvas quando as condições permanecem inalteradas (Figura 5.1-10).

A Tabela 5.1-6 mostra os efeitos destas variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.1-6: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes fatiadas congeladas.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Temperatura T (linear)	3,458E-10	2,370E-11	0,0000
Temperatura T (quadrático)	-1,045E-12	2,821E-11	0,9719
Velocidade V (linear)	1,087E-10	2,370E-11	0,0059
Velocidade V (quadrático)	-2,744E-11	2,821E-11	0,3755
Interação T x V	1,283E-10	3,352E-11	0,0123

Os efeitos quadráticos da temperatura e velocidade do ar não foram estatisticamente significativos quanto à determinação da difusividade efetiva na faixa de valores estudada. Diferentemente da secagem de raízes fatiadas *in natura*, a velocidade se mostrou relevante nesse tratamento, contribuindo com efeito linear e de interação com a temperatura do ar no modelo da superfície de resposta.

Tabela 5.1-7: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	2,79E-19	3	9,31E-20	96,42	4,35	0,976
Resíduo	6,76E-21	7	9,65E-22			
Falta de ajuste	6,38E-21	5	1,28E-21	6,72	19,3	
Erro puro	3,79E-22	2	1,90E-22			
Total	2,86E-19	10				

O coeficiente de determinação é 0,976, ou seja, 97,6% da variação é explicada pelo modelo da superfície de resposta. O valor de F_{calc} (MQ_R/MQ_F) é cerca de 20 vezes maior que F_{tab}, assim o modelo é válido. O teste F para falta de ajuste mostra que F_{calc} (MQ_{faj}/MQ_{ep}) é menor que F_{tab}. Portanto não há evidência de falta de ajuste.

A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo e preditivo satisfazendo o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

As distribuições dos resíduos para a difusividade efetiva na secagem de raízes fatiadas congeladas são mostradas na Figura 5.1-12. Observa-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória, mostrando que o modelo é adequado.

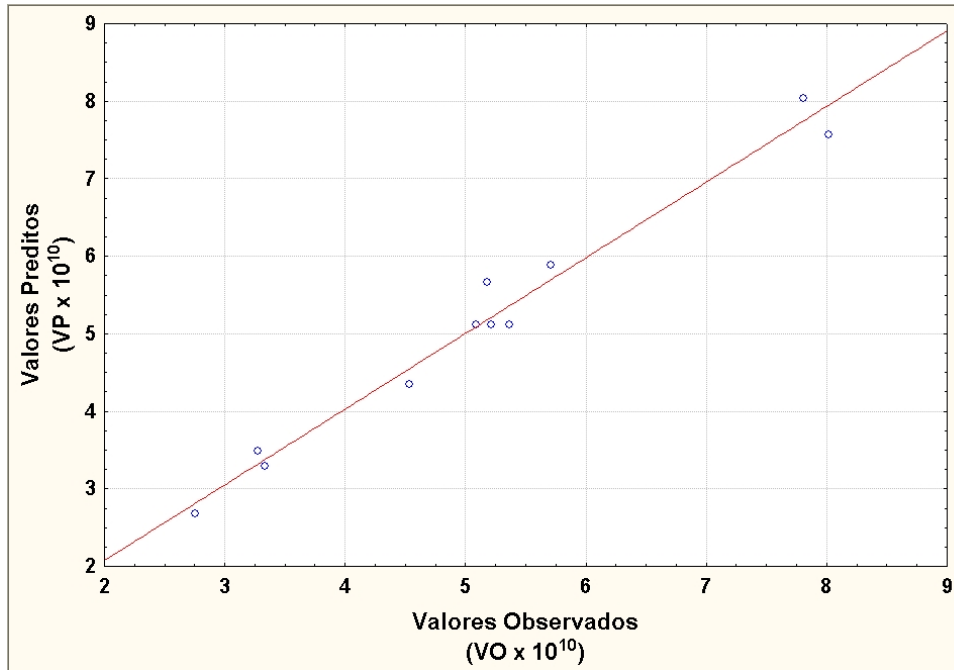


Figura 5.1-12: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar a difusividade efetiva na secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas está apresentado na equação não codificada mostrada a seguir:

$$D_{ef} = 2,894 * 10^{-10} + 1,428 * 10^{-12} * T - 4,255 * 10^{-10} * V - 8,019 * 10^{-12} * T * V \quad (13)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado para este modelo foi de 3,89%, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 97,6% e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo de superfície de resposta é realmente preditivo para as condições do processo estudadas (Equação 13). Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a difusividade efetiva do modelo de Fick para raízes de chicória fatiadas congeladas, como mostrado na Figura 5.1-13.

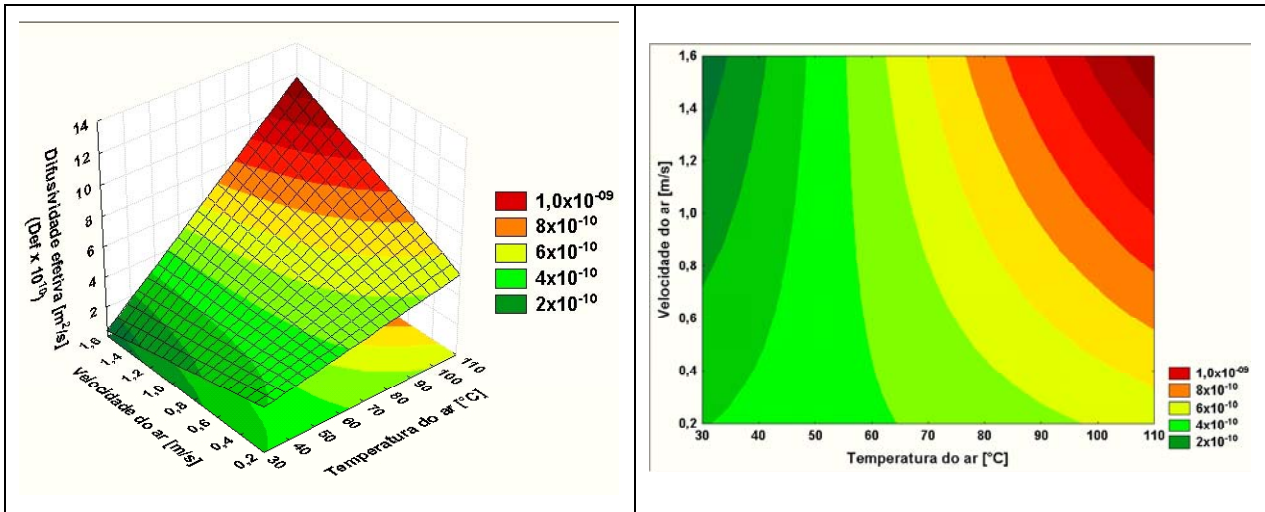


Figura 5.1-13: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes fatiadas após congelamento.

5.1.2.2 Modelo de Page

As Figuras 5.1-14, 5.1-15 e 5.1-16 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Page para raízes de chicória fatiadas congeladas.

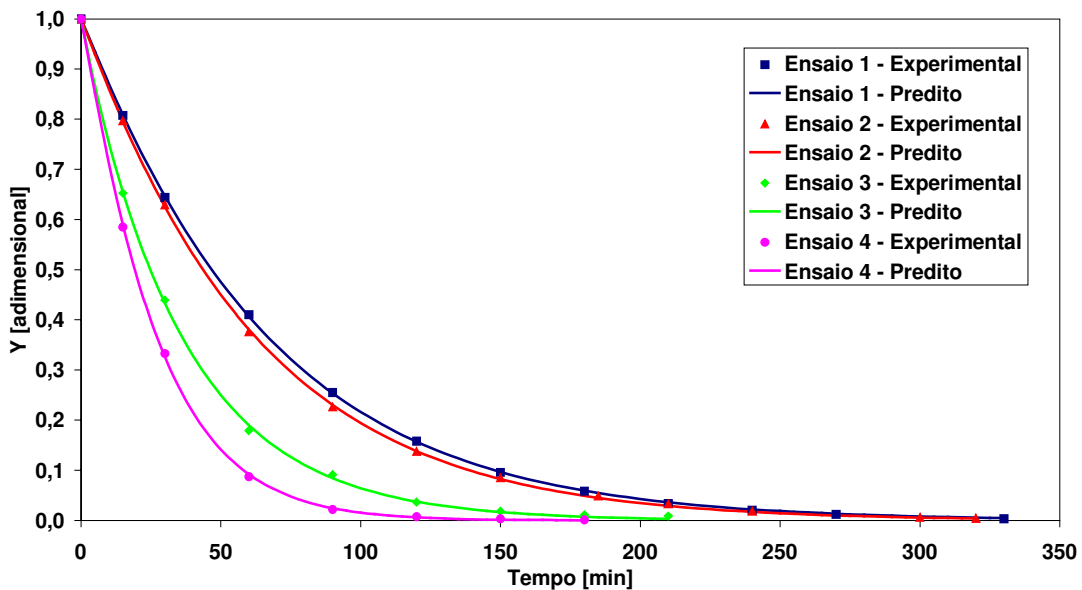


Figura 5.1-14: Curvas experimentais de secagem e curvas previstas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos fatoriais.

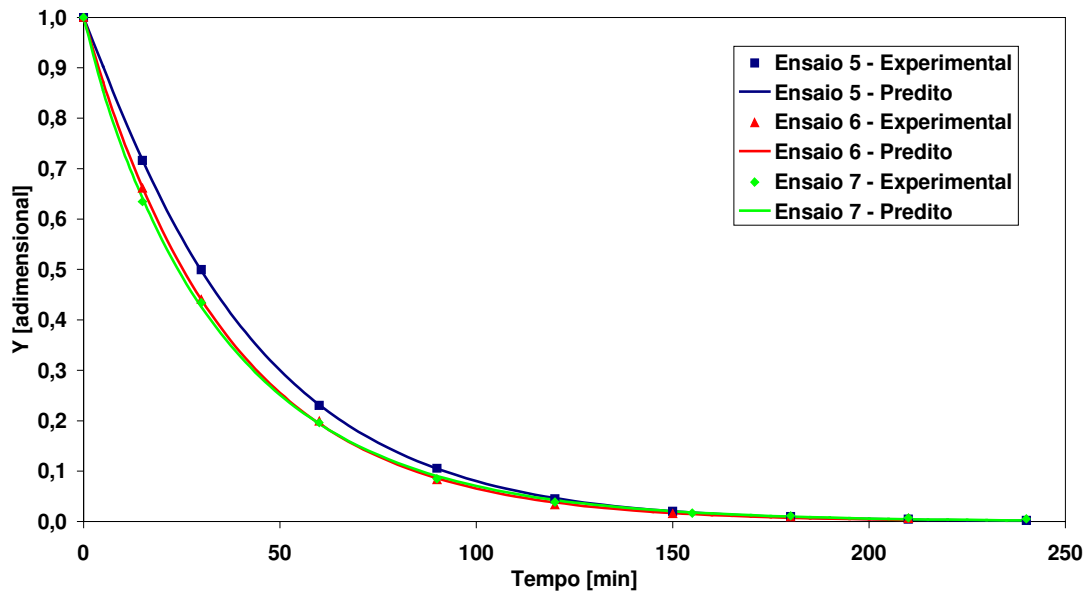


Figura 5.1-15: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos centrais.

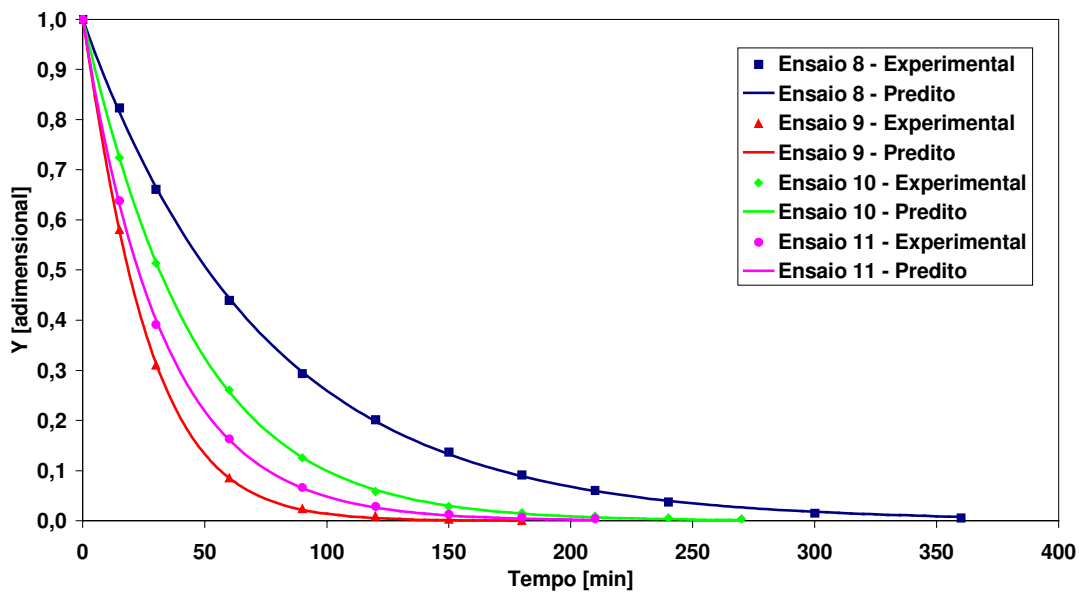


Figura 5.1-16: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes fatiadas congeladas - pontos axiais.

Os valores dos coeficientes de Page, R^2 e DR são apresentados na Tabela 5.1-8.

Tabela 5.1-8: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória fatiadas congeladas.

Ensaio	Variáveis reais		Coeficientes de Page			
	T [°C]	V [m/s]	G	J	R^2	DR [%]
1	50,0	0,50	0,0126	1,0415	0,999	5,24
2	50,0	1,30	0,0138	1,0368	0,999	4,65
3	90,0	0,50	0,0294	0,9846	0,999	13,68
4	90,0	1,30	0,0279	1,0857	0,999	19,60
5	70,0	0,90	0,0184	1,0685	0,999	7,10
6	70,0	0,90	0,0276	0,9976	0,999	13,55
7	70,0	0,90	0,0345	0,9429	0,999	13,09
8	41,7	0,90	0,0139	0,9939	0,999	6,78
9	98,3	0,90	0,0290	1,0844	0,999	22,19
10	70,0	0,34	0,0196	1,0355	0,999	13,24
11	70,0	1,46	0,0311	0,9944	0,999	14,85

Os coeficientes de determinação do ajuste das curvas pelo modelo de Page situam acima de 0,999. Nota-se que apenas as curvas que tiveram temperaturas altas como condição operacional apresentaram desvio relativo médio acima de 10%.

5.1.3 Raízes cubetadas *in natura*

5.1.3.1 Cinética de secagem

Os resultados de difusividade efetiva para secagem de raízes de chicória cubetadas *in natura* de acordo com o planejamento experimental juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) no ajuste das curvas e módulo do desvio relativo médio (DR) estão apresentados na Tabela 5.1-9.

Tabela 5.1-9: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes cubetadas *in natura*.

Ensaio	Variáveis reais			R^2	DR [%]	
	T [°C]	V [m/s]	D_{ef} [m ² /s]			
Pontos fatoriais	1	50,0	0,50	3,03E-10	0,9583	13,16
	2	50,0	1,30	3,87E-10	0,9859	7,85
	3	90,0	0,50	7,13E-10	0,9682	14,18
	4	90,0	1,30	9,44E-10	0,9813	9,53
Pontos centrais	5	70,0	0,90	5,79E-10	0,9710	14,04
	6	70,0	0,90	5,38E-10	0,9795	10,49
	7	70,0	0,90	5,26E-10	0,9805	12,99
Pontos axiais	8	41,7	0,90	2,81E-10	0,9645	14,99
	9	98,3	0,90	9,34E-10	0,9648	16,21
	10	70,0	0,34	5,31E-10	0,9807	5,17
	11	70,0	1,46	5,82E-10	0,9915	3,99

As Figuras 5.1-17, 5.1-18 e 5.1-19 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Fick para raízes de chicória cubetadas *in natura*.

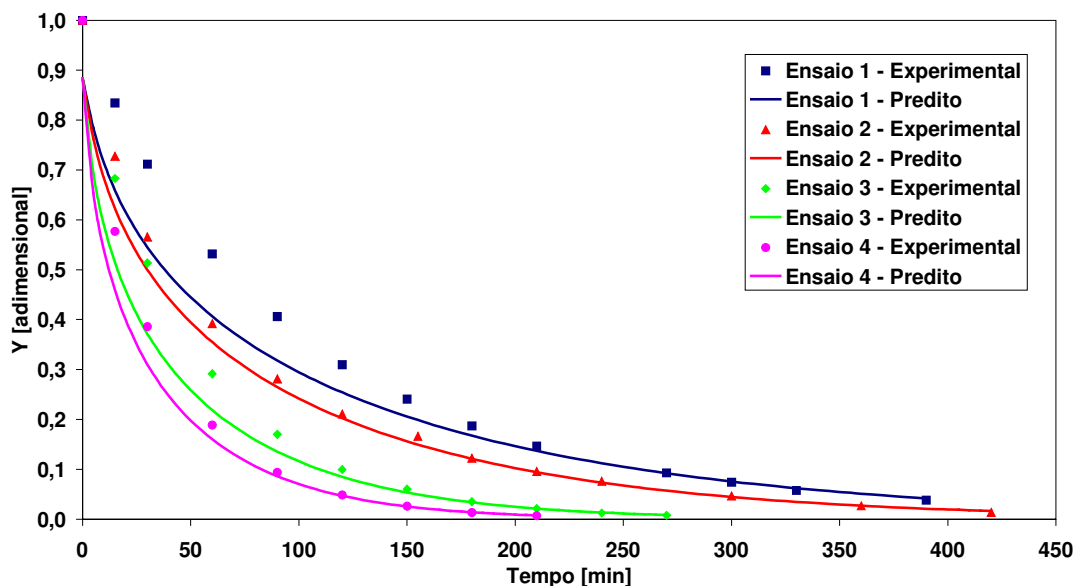


Figura 5.1-17: Curvas experimentais de secagem e curvas previstas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas *in natura* - pontos fatoriais.

Analisando-se as curvas de secagem para os pontos fatoriais (Figura 5.1-17), nota-se tanto a influência da temperatura como também a da velocidade do ar, diferentemente dos outros tratamentos.

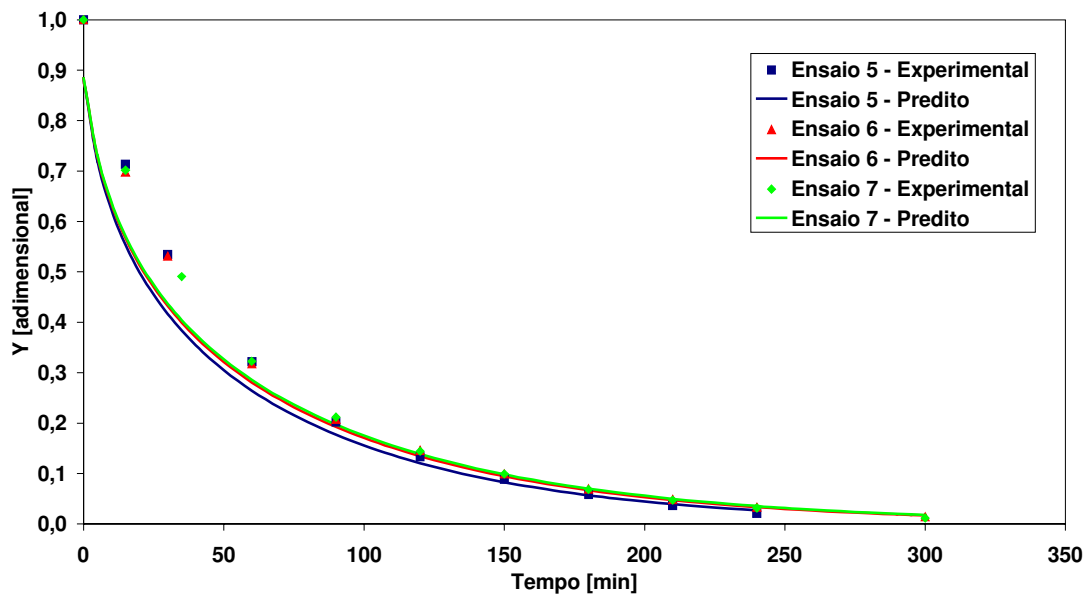


Figura 5.1-18: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas in natura - pontos centrais.

Conforme o esperado, as curvas não se diferem pois mantêm as mesmas condições operacionais.

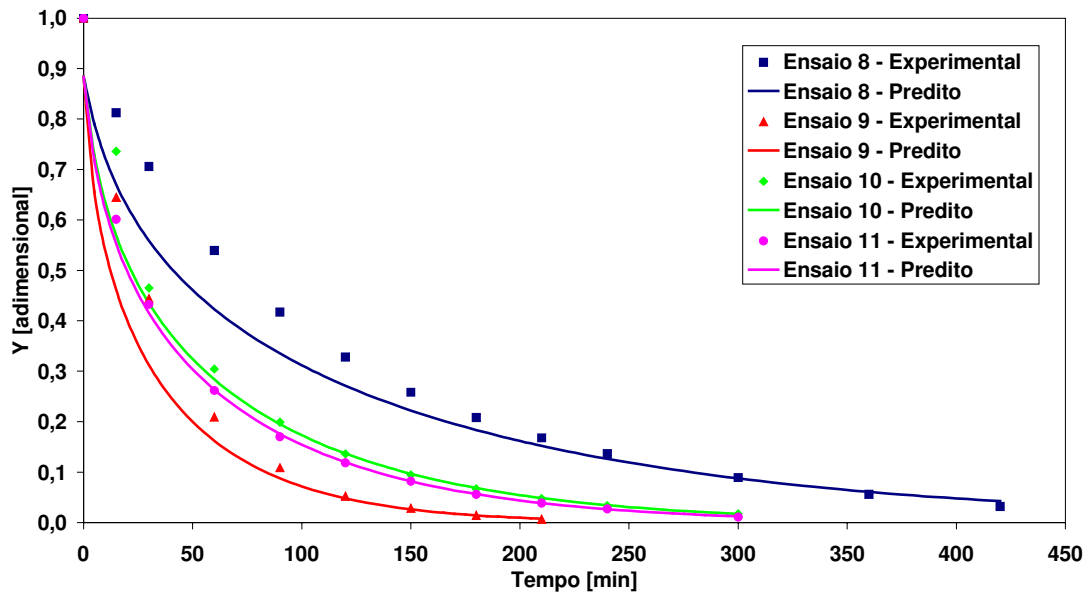


Figura 5.1-19: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas in natura - pontos axiais.

Percebe-se que a curva mais acentuada (ensaio 9) é a de maior temperatura do ar de secagem, enquanto que a menos acentuada é a de temperatura mais baixa (ensaio 8). Verifica-se que o efeito da velocidade pouco influenciou nos pontos axiais na velocidade de decréscimo de umidade.

A Tabela 5.1-10 apresenta os efeitos lineares e quadráticos dos parâmetros, bem como suas interações na avaliação da difusividade efetiva na secagem. Os valores em **negrito** indicam que o fator ou a interação é significativo para um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

Tabela 5.1-10: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes cubetadas in natura.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Temperatura T (linear)	4,726E-10	3,018E-11	0,0000
Temperatura T (quadrático)	6,215E-11	3,592E-11	0,1442
Velocidade V (linear)	9,661E-11	3,018E-11	0,0240
Velocidade V (quadrático)	1,107E-11	3,592E-11	0,7703
Interação T x V	7,359E-11	4,268E-11	0,1453

Em relação à difusividade efetiva, observou-se que os efeitos quadráticos da temperatura e da velocidade do ar seguidos pelo efeito de interação entre temperatura e velocidade não influenciaram significativamente na resposta.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos (Tabela 5.1-11).

Tabela 5.1-11: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória cubetadas in natura.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	4,65E-19	2	2,33E-19	92,80	4,46	0,959
Resíduo	2,01E-20	8	2,51E-21			
Falta de ajuste	1,85E-20	6	3,08E-21	3,94	19,33	
Erro puro	1,56E-21	2	7,82E-22			
Total	4,85E-19	10				

A porcentagem de variação explicada pelo modelo foi 95,9% de 99,7% de máxima variação explicável. O valor de F calculado foi cerca de 20 vezes maior que o valor tabelado,

para 95 % de confiança, além de o desvio relativo médio do modelo de superfície de resposta ser inferior a 9,48%. Esses resultados confirmam que o modelo é preditivo.

Os valores de F_{calc} para falta de ajuste foi muito inferior ao F_{tab} , o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A comparação entre os valores experimentais e preditos através do modelo é ilustrada na Figura 5.1-20. Verifica-se uma ótima distribuição dos pontos em torno da reta ideal, sem tendências, confirmando juntamente com a análise da variância um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

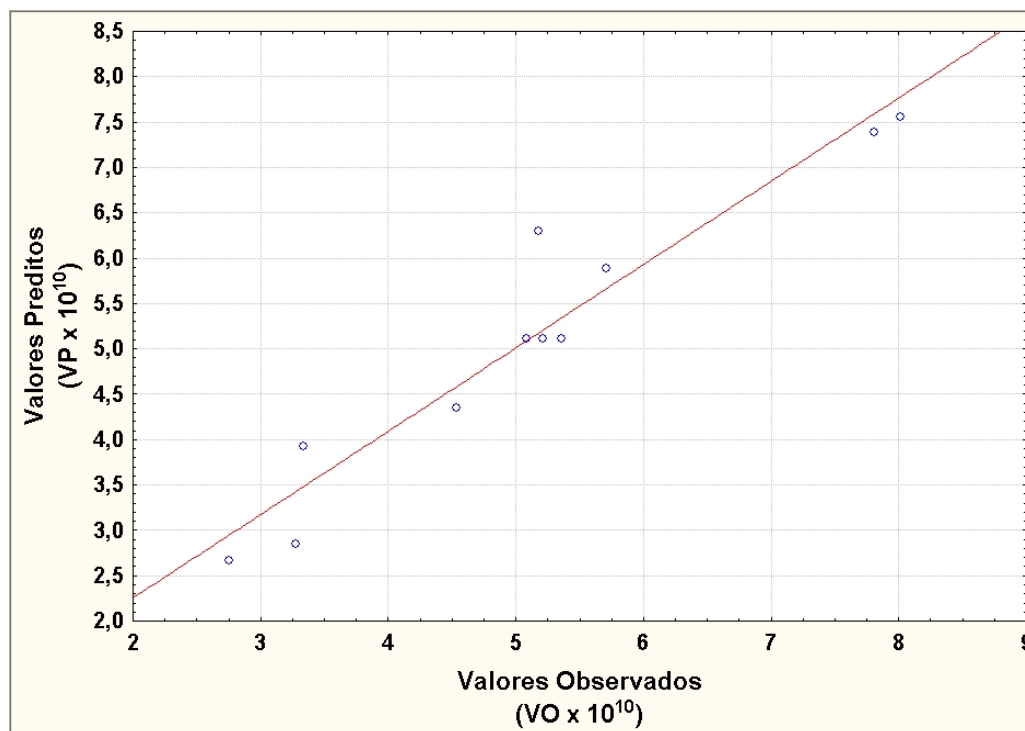


Figura 5.1-20: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar a difusividade efetiva na secagem de raízes de chicória cubetadas *in natura* está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$D_{\text{ef}} = -3,615 * 10^{-10} + 1,182 * 10^{-11} * T + 1,208 * 10^{-10} * V \quad (14)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado foi de 9,48%, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 96% e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo é realmente preditivo para as condições do processo estudadas (Equação 14). A Figura 5.1-21 apresenta a superfície de resposta e as curvas em nível geradas a partir dos dados experimentais obtidos na secagem.

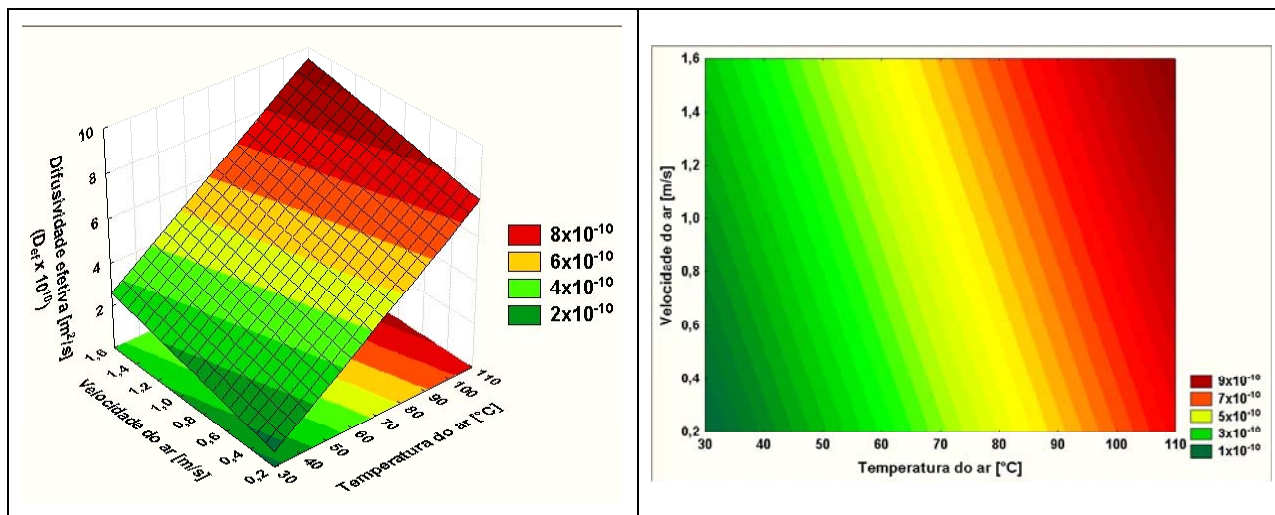


Figura 5.1-21: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas *in natura*.

5.1.3.2 Modelo de Page

As Figuras 5.1-22, 5.1-23 e 5.1-24 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Page para raízes de chicória cubetadas *in natura*.

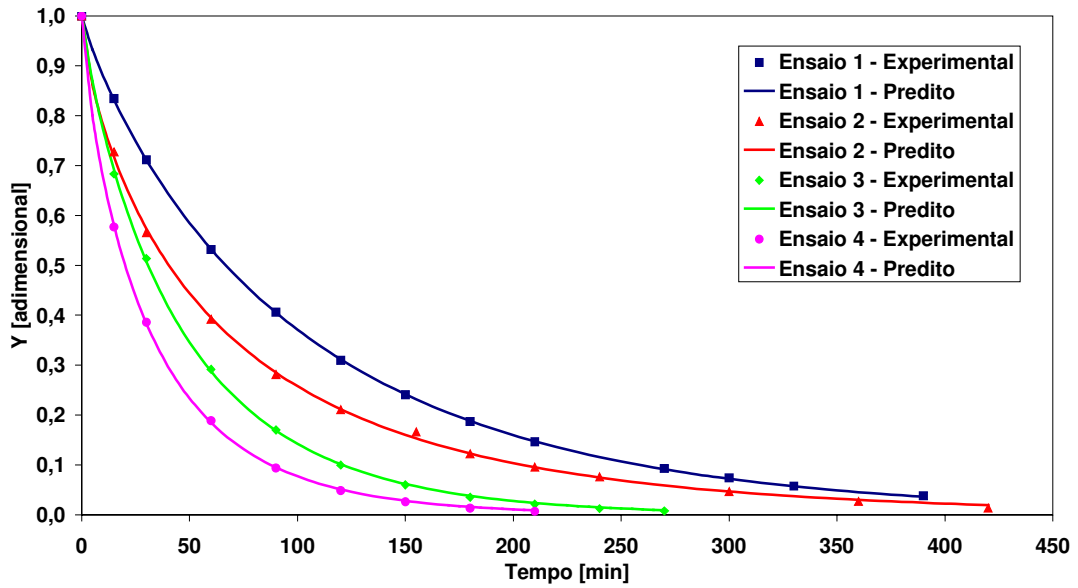


Figura 5.1-22: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos fatoriais.

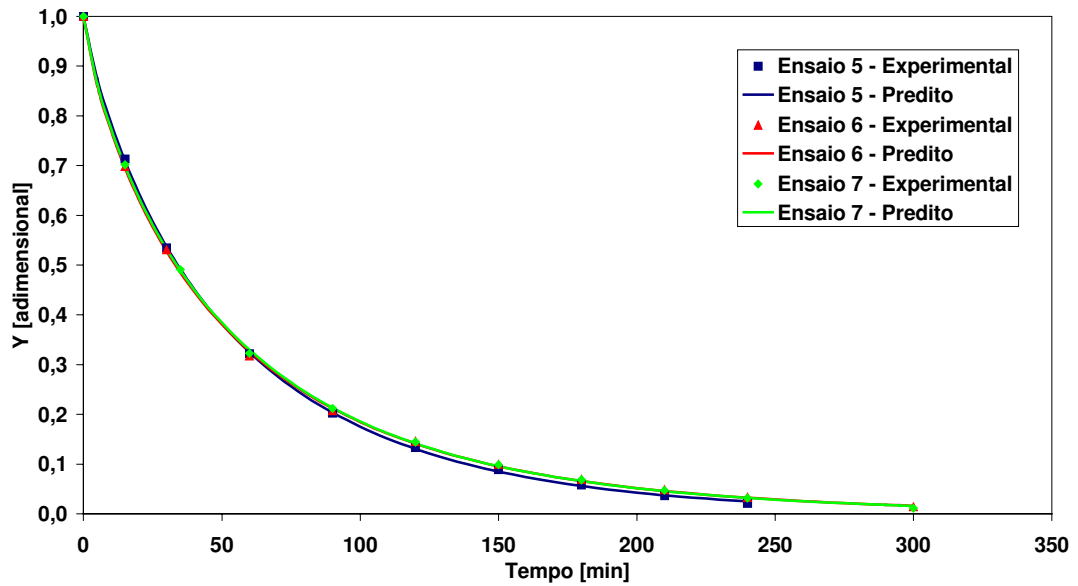


Figura 5.1-23: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos centrais.

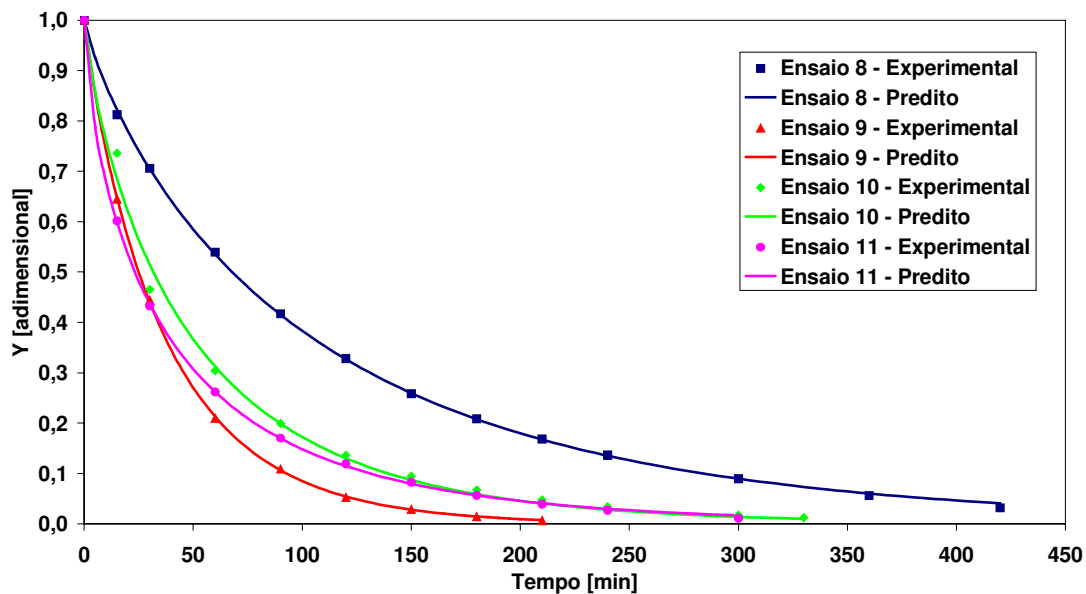


Figura 5.1-24: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas in natura - pontos axiais.

Os parâmetros do modelo (G e J) estão apresentados na Tabela 5.1-12 juntamente com os valores dos respectivos coeficientes de determinação (R^2). Verifica-se que o modelo apresentou ajuste muito bom para todos os dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação acima de 0,997 além de valores baixos de desvio relativo médio (DR), sendo, portanto, um bom modelo para fazer a predição da cinética de secagem.

Tabela 5.1-12: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória cubetadas in natura.

Ensaio	Variáveis reais		Coeficientes de Page		R^2	DR [%]
	T [°C]	V [m/s]	G	J		
1	50,0	0,50	0,0167	0,8873	0,999	1,05
2	50,0	1,30	0,0447	0,7411	0,999	5,60
3	90,0	0,50	0,0343	0,8772	0,999	6,22
4	90,0	1,30	0,0597	0,8164	0,999	6,55
5	70,0	0,90	0,0338	0,8557	0,999	3,41
6	70,0	0,90	0,0409	0,8081	0,999	3,77
7	70,0	0,90	0,0393	0,8157	0,999	4,84
8	41,7	0,90	0,0202	0,8383	0,999	3,11
9	98,3	0,90	0,0366	0,9141	0,999	2,97
10	70,0	0,34	0,0424	0,8091	0,997	9,77
11	70,0	1,46	0,0783	0,6935	0,999	6,62

5.1.4 Raízes cubetadas congeladas

5.1.4.1 Cinética de secagem

Os resultados de difusividade efetiva para secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas de acordo com o planejamento experimental juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) no ajuste das curvas e módulo do desvio relativo médio (DR) estão apresentados na Tabela 5.1-13.

Tabela 5.1-13: Difusividades efetivas, coeficiente de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes cubetadas congeladas.

Ensaio	Variáveis reais			R^2	DR [%]	
	T [°C]	V [m/s]	D_{ef} [m ² /s]			
Pontos fatoriais	1	50,0	0,50	3,77E-10	0,9061	22,79
	2	50,0	1,30	6,05E-10	0,9764	15,44
	3	90,0	0,50	8,70E-10	0,9493	16,36
	4	90,0	1,30	1,15E-09	0,9850	11,55
Pontos centrais	5	70,0	0,90	6,79E-10	0,9604	11,72
	6	70,0	0,90	7,38E-10	0,9568	13,85
	7	70,0	0,90	7,97E-10	0,9566	17,75
Pontos axiais	8	41,7	0,90	3,64E-10	0,9117	18,73
	9	98,3	0,90	1,12E-09	0,9558	16,26
	10	70,0	0,34	5,88E-10	0,9887	19,76
	11	70,0	1,46	8,82E-10	0,9322	10,80

Analisando os valores de difusividade efetiva e as respectivas condições de secagem, nota-se que os valores aumentam com o aumento da temperatura, assim como com o aumento da velocidade do ar, como era esperado. Apesar dos valores de desvio relativo médio se mostrarem maiores que os dos tratamentos anteriores, ainda se mostram adequados considerando secagem de produtos biológicos.

As Figuras 5.1-25, 5.1-26 e 5.1-27 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Fick para raízes de chicória cubetadas congeladas.

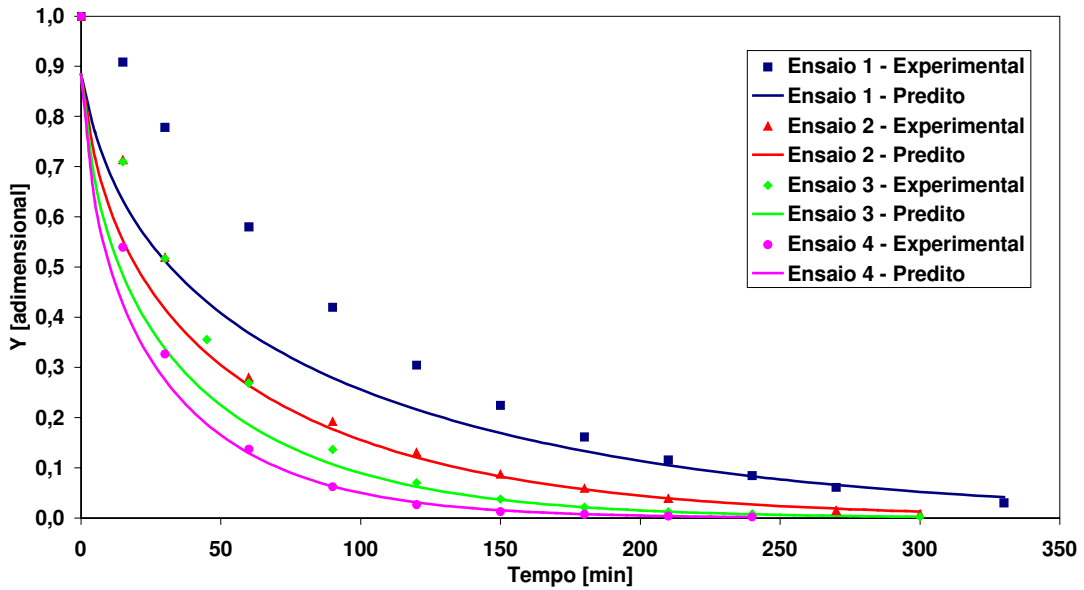


Figura 5.1-25: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos fatoriais.

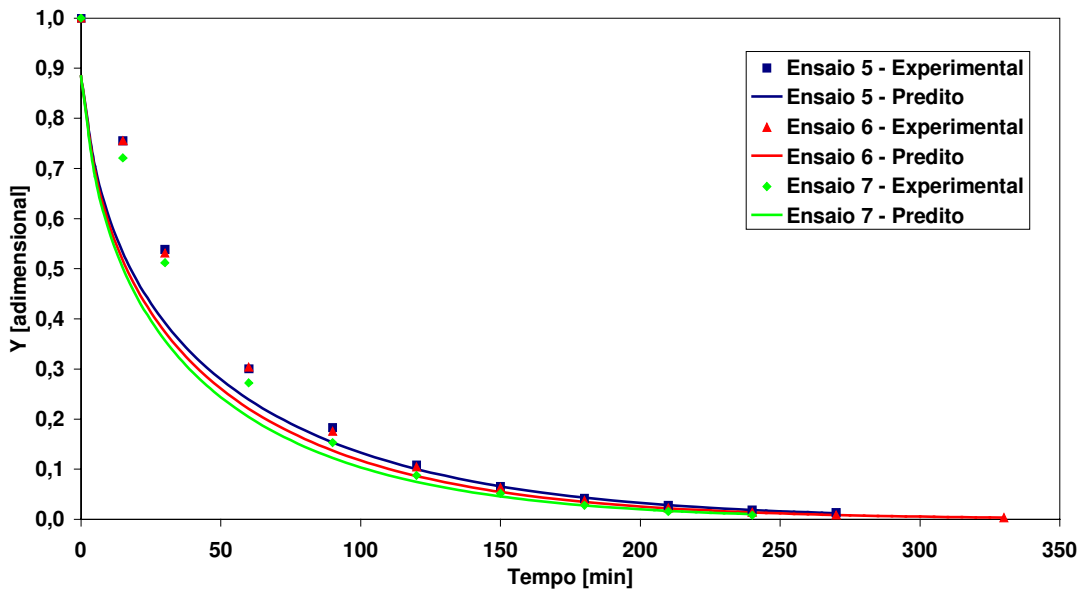


Figura 5.1-26: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos centrais.

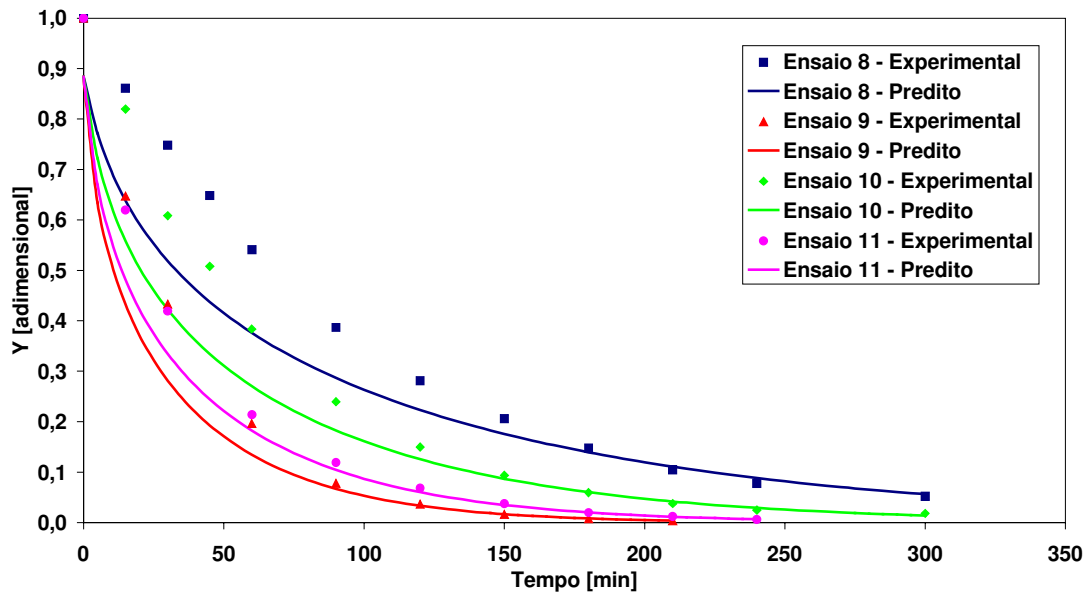


Figura 5.1-27: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Fick para raízes cubetadas congeladas - pontos axiais.

Analisando graficamente as curvas, também se observa a influência da velocidade e temperatura do ar na difusividade efetiva (Figuras 5.1-25 e 5.1-27), assim como a pouca variação das curvas quando os parâmetros permanecem inalterados (Figura 5.1-26).

A Tabela 5.1-14 mostra os efeitos destas variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.1-14: Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as difusividades efetivas para secagem de raízes cubetadas congeladas.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Temperatura T (linear)	5,275E-10	2,930E-11	0,0000
Temperatura T (quadrático)	1,088E-11	3,487E-11	0,7676
Velocidade V (linear)	2,319E-10	2,930E-11	0,0005
Velocidade V (quadrático)	3,336E-12	3,487E-11	0,9275
Interação T x V	2,774E-11	4,144E-11	0,5329

Os efeitos quadráticos da temperatura e velocidade do ar, assim como a interação entre elas, não foram estatisticamente significativos quanto à determinação da difusividade efetiva na faixa de valores estudada.

Estes efeitos foram retirados e fez-se a análise de variância.

Tabela 5.1-15: Análise de variância (ANOVA) para secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R²
Regressão	6,64E-19	2	3,32E-19	278,99	4,46	0,986
Resíduo	9,52E-21	8	1,19E-21			
Falta de ajuste	2,49E-21	6	4,15E-22	0,12	19,33	
Erro puro	7,03E-21	2	3,51E-21			
Total	6,74E-19	10				

O coeficiente de determinação é 0,986, ou seja, 98,6% da variação é explicada pelo modelo. O valor de F_{calc} (MQ_R/MQ_r) é cerca de 60 vezes maior que F_{tab} , assim o modelo é válido. O valor de F_{calc} para falta de ajuste ficou muito abaixo de um, além de ser muito inferior ao F_{tab} , o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo e preditivo satisfazendo o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

A distribuição dos resíduos para a difusividade efetiva na secagem de raízes cubetadas congeladas são mostradas na Figura 5.1-28. Observa-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória, confirmando a adequação dos dados ao modelo.

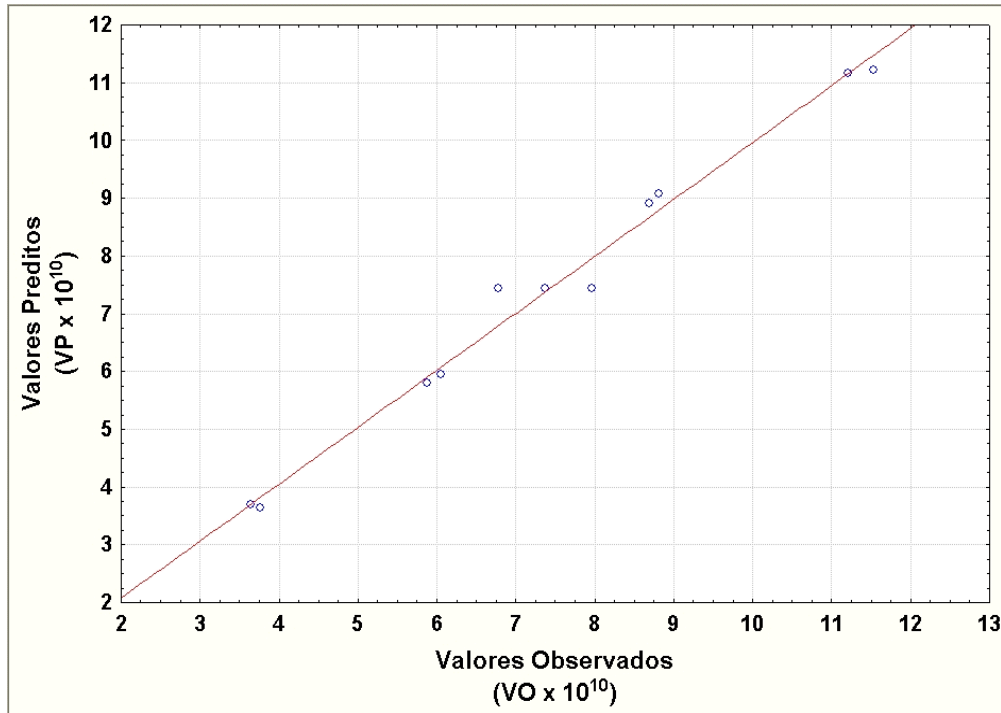


Figura 5.1-28: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar a difusividade efetiva na secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$D_{ef} = -4,410 * 10^{-10} + 1,319 * 10^{-11} * T + 2,898 * 10^{-10} * V \quad (15)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado para o modelo de superfície de resposta foi de 3,05%, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 98,6% e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo é realmente preditivo para as condições do processo estudadas (Equação 15). Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a difusividade efetiva do modelo de Fick para raízes de chicória cubetadas congeladas, como mostrado na Figura 5.1-29.

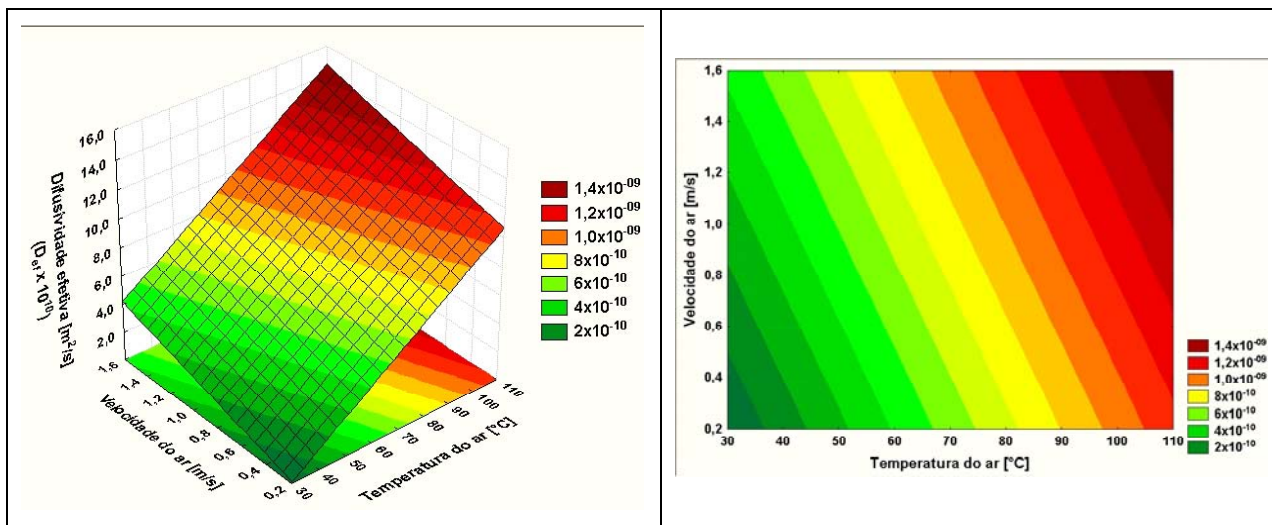


Figura 5.1-29: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas após congelamento.

5.1.4.2 Modelo de Page

As Figuras 5.1-30, 5.1-31 e 5.1-32 mostram os ajustes dos dados experimentais utilizando o modelo de Page para raízes de chicória cubetadas congeladas.

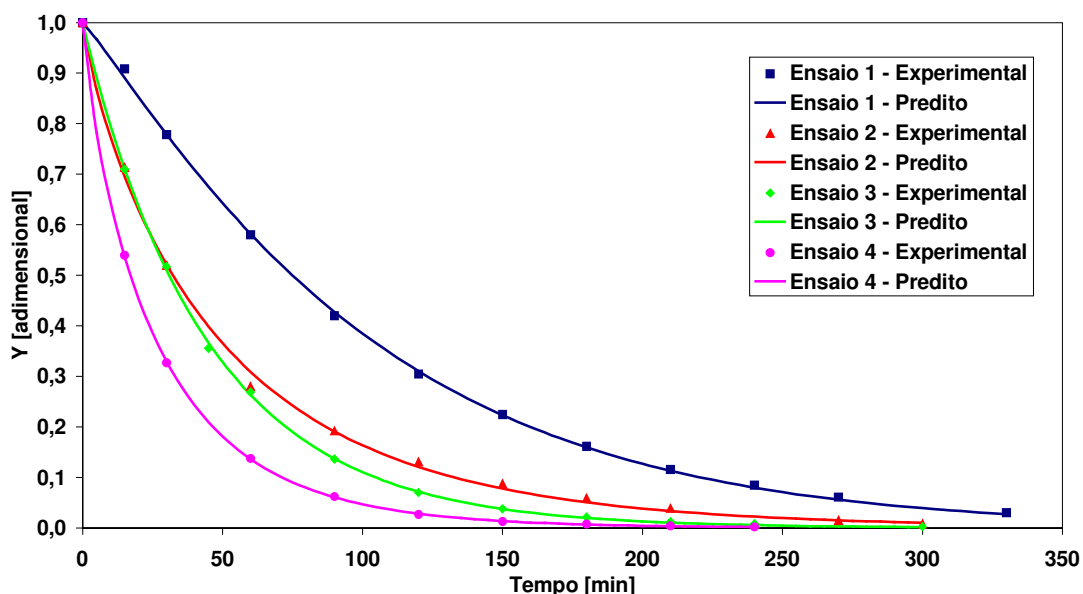


Figura 5.1-30: Curvas experimentais de secagem e curvas previstas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos fatoriais.

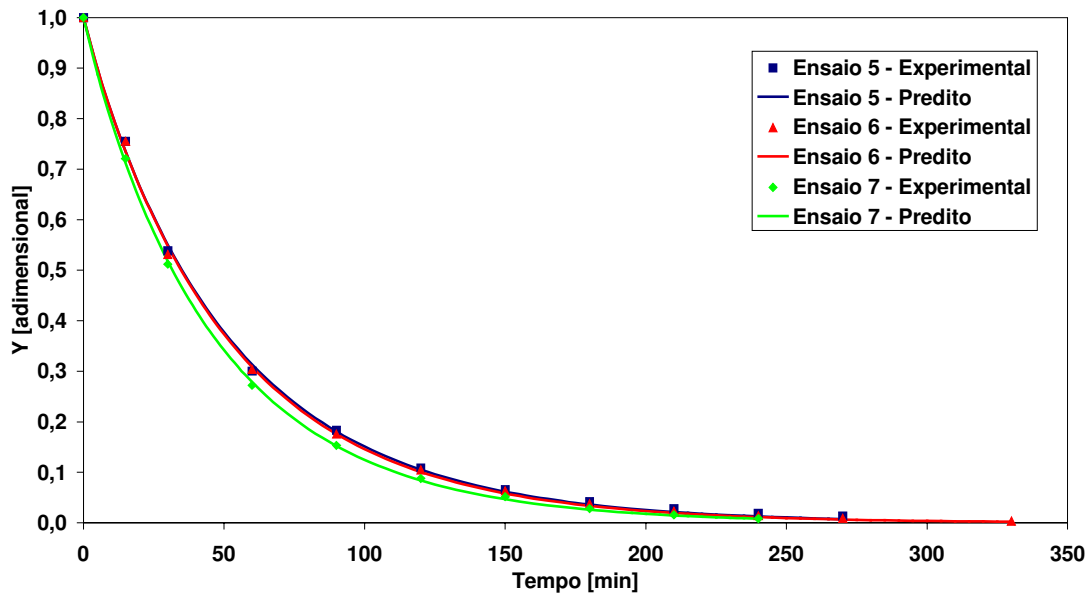


Figura 5.1-31: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos centrais.

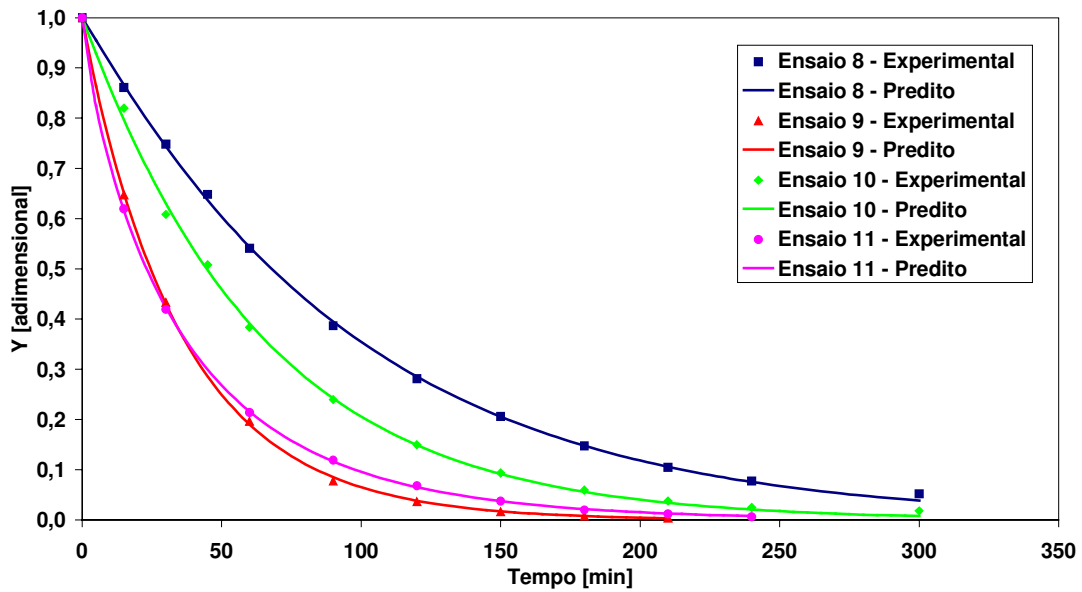


Figura 5.1-32: Curvas experimentais de secagem e curvas preditas pelo modelo de Page para raízes cubetadas congeladas - pontos axiais.

Os valores dos coeficientes de Page, R^2 e DR são apresentados na Tabela 5.1-16.

Tabela 5.1-16: Coeficientes do modelo de Page, coeficientes de determinação R^2 e desvio relativo médio DR para secagem de raízes de chicória cubetadas congeladas.

Ensaio	Variáveis reais		Coeficientes de Page			DR [%]
	T [°C]	V [m/s]	G	J	R^2	
1	50,0	0,50	0,0057	1,1127	0,999	2,86
2	50,0	1,30	0,0364	0,8486	0,999	7,83
3	90,0	0,50	0,0237	0,9842	0,999	7,97
4	90,0	1,30	0,0633	0,8425	0,999	6,11
5	70,0	0,90	0,0231	0,9566	0,999	12,16
6	70,0	0,90	0,0226	0,9655	0,999	10,35
7	70,0	0,90	0,0255	0,9555	0,999	3,74
8	41,7	0,90	0,0086	1,0412	0,999	3,08
9	98,3	0,90	0,0306	0,9747	0,999	3,65
10	70,0	0,34	0,0143	1,0215	0,999	8,50
11	70,0	1,46	0,0508	0,8319	0,999	4,24

Os parâmetros do modelo (G e J) estão apresentados na Tabela 20 juntamente com os valores dos respectivos coeficientes de determinação (R^2). Verifica-se que os dados experimentais apresentaram ajustes muito bons para todos o modelo de Page, apresentando coeficientes de determinação acima de 0,999 além de valores baixos de desvio relativo médio (DR), sendo, portanto, um bom modelo para fazer a predição da cinética de secagem.

5.2 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A partir da Equação 6, obtiveram-se os seguintes valores de energia de ativação, para diferentes velocidades do ar para as raízes fatiadas e cubetadas (Tabelas 5.2-1, 5.2-2, 5.2-3, 5.2-4):

Tabela 5.2-1: Energia de Ativação para raízes fatiadas in natura.

Velocidade de 0,5 m/s		
Temperatura [°C]	Dif. Efetiva [m²/s]	Energia de Ativação [kJ/mol]
50	5,29E-10	14,02
90	9,4E-10	
Velocidade de 1,3 m/s		
50	4,22E-10	20,78
90	9,89E-10	
Velocidade de 0,9 m/s		
70	6,34E-10	19,44
70	7,73E-10	
70	8,32E-10	
41,7	3,62E-10	
98,3	1,11E-09	

Tabela 5.2-2: Energia de Ativação para raízes fatiadas congeladas.

Velocidade de 0,5 m/s		
Temperatura [°C]	Dif. Efetiva [m²/s]	Energia de Ativação [kJ/mol]
50	3,27E-10	11,21
90	5,18E-10	
Velocidade de 1,3 m/s		
50	3,34E-10	20,75
90	7,81E-10	
Velocidade de 0,9 m/s		
70	5,21E-10	18,47
70	5,36E-10	
70	5,09E-10	
41,7	2,75E-10	
98,3	8,02E-10	

Tabela 5.2-3: Energia de Ativação para raízes cubetadas in natura.

Velocidade de 0,5 m/s		
Temperatura [°C]	Dif. Efetiva [m²/s]	Energia de Ativação [kJ/mol]
50	3,03E-10	14,02
90	7,13E-10	
Velocidade de 1,3 m/s		
50	3,87E-10	20,78
90	9,44E-10	
Velocidade de 0,9 m/s		
70	5,79E-10	19,44
70	5,38E-10	
70	5,26E-10	
41,7	2,81E-10	
98,3	9,34E-10	

Tabela 5.2-4: Energia de Ativação para raízes cubetadas congeladas.

Velocidade de 0,5 m/s		
Temperatura [°C]	Dif. Efetiva [m²/s]	Energia de Ativação [kJ/mol]
50	3,77E-10	20,39
90	8,70E-10	
Velocidade de 1,3 m/s		
50	6,05E-10	15,73
90	1,15E-09	
Velocidade de 0,9 m/s		
70	6,79E-10	19,46
70	7,38E-10	
70	7,97E-10	
41,7	3,64E-10	
98,3	1,12E-09	

Os valores de energia de ativação mostrados nas Tabelas 5.2-1, 5.2-2, 5.2-3, 5.2-4 estão próximos aos valores propostos em literatura para materiais biológicos, conforme FISH (1958) (amido gel, variando de 18,8 a 50 kJ/mol), KITIC & VIOLLEZ (1984) (grão de soja, variando de 28,8 a 30 kJ/mol), PARK, BROD e SILVA (1996) (cebolinha, variando de 29,05 a 42,05 kJ/mol) e PARK, BIN e BROD (2003) (pêras d'Anjou, variando de 24,3 a 31,2 kJ/mol).

5.3 EXTRAÇÃO

Foi realizada a extração de inulina por difusão em água quente para raízes *in natura*, além da extração com o produto das secagens, ou seja, o material oriundo da secagem das quatro combinações entre geometria empregada e condição de matéria-prima. Para estudar os efeitos das variáveis envolvidas no processo de extração de raiz *in natura*, foi realizado um delineamento central composto tendo como variáveis a temperatura do banho e a relação entre água e massa seca de raiz. Quanto às análises de extração do material seco, foram utilizadas as mesmas variáveis do delineamento das secagens com o intuito de se avaliar os efeitos da secagem na extração. Cada análise será feita separadamente para melhor compreensão dos resultados.

5.3.1 Extração de inulina de raízes *in natura*

Os resultados da extração para raízes *in natura* são mostrados na Tabela 5.3-1.

Tabela 5.3-1: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória *in natura*.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Resposta	
	X ₁	X ₂	T [°C]	AR [kg _{H2O} /kg _{MS}]	Sólidos Solúveis [%]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	6,0	0,573
	2	-1	+1	50,0	11,0	0,568
	3	+1	-1	90,0	6,0	0,870
	4	+1	+1	90,0	11,0	0,893
Pontos centrais	5	0	0	70,0	8,5	0,746
	6	0	0	70,0	8,5	0,746
	7	0	0	70,0	8,5	0,748
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	8,5	0,538
	9	+1,41	0	98,3	8,5	0,821
	10	0	-1,41	70,0	5,0	0,735
	11	0	+1,41	70,0	12,0	0,763

A tendência obtida de aumento da quantidade de sólidos solúveis extraída na medida em que há aumento na temperatura do banho é coerente com os dados encontrados na literatura científica, na qual a difusividade aumenta com a temperatura auxiliada pelo aumento da solubilização da inulina com o aumento da temperatura.

A Tabela 5.3-2 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.3-2: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes in natura.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	0,746	0,0007	0,0000
Temperatura T (quadrático)	0,256	0,0008	0,0000
Relação A:R (linear)	-0,061	0,0010	0,0003
Relação A:R (quadrático)	0,014	0,0008	0,0034
Interação T x A:R	0,008	0,0010	0,0143

Todos os parâmetros considerados na análise se mostraram estatisticamente significativos para análise pelo erro puro. Foi feita, então, uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos (Tabela 5.3-3).

Tabela 5.3-3: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória in natura.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	1,37E-01	5	2,75E-02	21,19	5,05	0,955
Resíduo	6,49E-03	5	1,30E-03			
Falta de ajuste	6,48E-03	3	2,16E-03	1540,6	19,16	
Erro puro	2,81E-06	2	1,40E-06			
Total	1,44E-01	10	1,44E-02			

Verifica-se que os modelos apresentaram regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo, porém o ajuste não satisfaz o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002).

O valor de F_{calc} para falta de ajuste ficou muito acima do valor de F_{tab} , o que significa que há evidência de falta de ajuste do modelo. Assim o modelo não pode ser considerado preditivo e não pode ser utilizado para se estimar a extração de inulina de raízes *in natura*. Portanto, este modelo não será apresentado neste trabalho.

5.3.2 Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes fatiadas *in natura*

Os resultados da extração para raízes secas fatiadas *in natura* são mostrados na Tabela 5.3-4.

Tabela 5.3-4: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas fatiadas *in natura*.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Resposta	
	X ₁	X ₂	T [°C]	V [m/s]	Sólidos Solúveis [%]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50	0,750
	2	-1	+1	50,0	1,30	0,660
	3	+1	-1	90,0	0,50	0,720
	4	+1	+1	90,0	1,30	0,735
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90	0,675
	6	0	0	70,0	0,90	0,693
	7	0	0	70,0	0,90	0,636
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90	0,660
	9	+1,41	0	98,3	0,90	0,675
	10	0	-1,41	70,0	0,34	0,690
	11	0	+1,41	70,0	1,46	0,660

A Tabela 5.3-5 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.3-5: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas fatiadas in natura.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	0,017	0,0243	0,5252
Temperatura T (quadrático)	0,022	0,0289	0,4776
Velocidade V (linear)	-0,029	0,0243	0,2802
Velocidade V (quadrático)	0,029	0,0289	0,3550
Interação T x V	0,052	0,0344	0,1874

Todos os parâmetros considerados na análise se mostraram estatisticamente não significativos.

5.3.3 Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes fatiadas congeladas

Os resultados da extração para raízes secas fatiadas congeladas são mostrados na Tabela 5.3-6.

Tabela 5.3-6: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas fatiadas congeladas.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Resposta	
	X ₁	X ₂	T [°C]	V [m/s]	Sólidos Solúveis [%]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50	0,718
	2	-1	+1	50,0	1,30	0,735
	3	+1	-1	90,0	0,50	0,750
	4	+1	+1	90,0	1,30	0,690
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90	0,660
	6	0	0	70,0	0,90	0,720
	7	0	0	70,0	0,90	0,690
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90	0,690
	9	+1,41	0	98,3	0,90	0,690
	10	0	-1,41	70,0	0,34	0,750
	11	0	+1,41	70,0	1,46	0,720

A Tabela 5.3-7 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.3-7: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas fatiadas congeladas.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	-0,003	0,0143	0,8250
Temperatura T (quadrático)	0,005	0,0171	0,7647
Velocidade V (linear)	-0,021	0,0143	0,1948
Velocidade V (quadrático)	0,051	0,0171	0,0315
Interação T x V	-0,038	0,0203	0,1169

Somente o efeito quadrático da velocidade do ar de secagem foi considerado significativo.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos (Tabela 5.3-8).

Tabela 5.3-8: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas fatiadas congeladas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R^2
Regressão	3,70E-03	1	3,70E-03	7,38	5,12	0,450
Resíduo	4,51E-03	9	5,01E-04			
Falta de ajuste	2,72E-03	7	3,88E-04	0,43	19,35	
Erro puro	1,79E-03	2	8,96E-04			
Total	8,21E-03	10				

Verifica-se que o modelo apresentou regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo, porém o ajuste não satisfaz o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002). Assim o modelo não pode ser considerado preditivo e não pode ser utilizado na estimativa do processo de extração de inulina a partir de raízes secas fatiadas e congeladas, apesar de não haver evidências de falta de ajuste. Além disso, o coeficiente de determinação foi de apenas 0,450, ou seja, apenas 45% da variação é explicada pelo modelo, considerada erros aleatórios.

O valor de F_{calc} para falta de ajuste foi inferior ao valor de F_{tab} , o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A Figura 5.3-1 mostra a distribuição dos resíduos obtida na qual se verifica que os resíduos apresentam-se afastados da linha ideal.

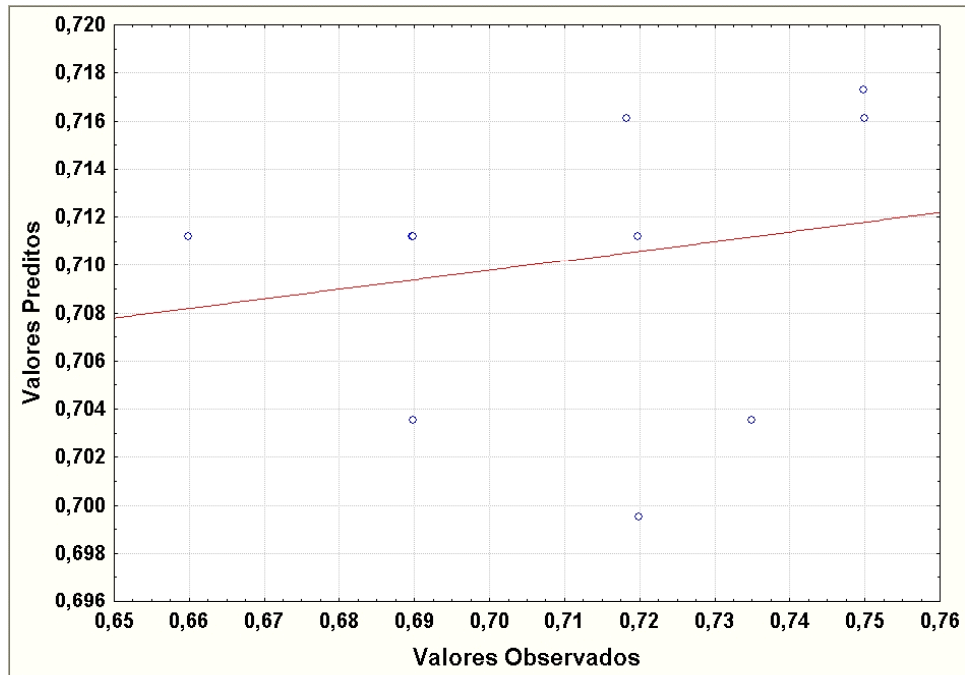


Figura 5.3-1: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar os sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas fatiadas congeladas está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$SS[\%] = 0,7183 - 0,0087 * V^2 \quad (16)$$

Foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a extração de inulina de raízes de chicória secas fatiadas congeladas, mostradas na Figura 5.3-2.

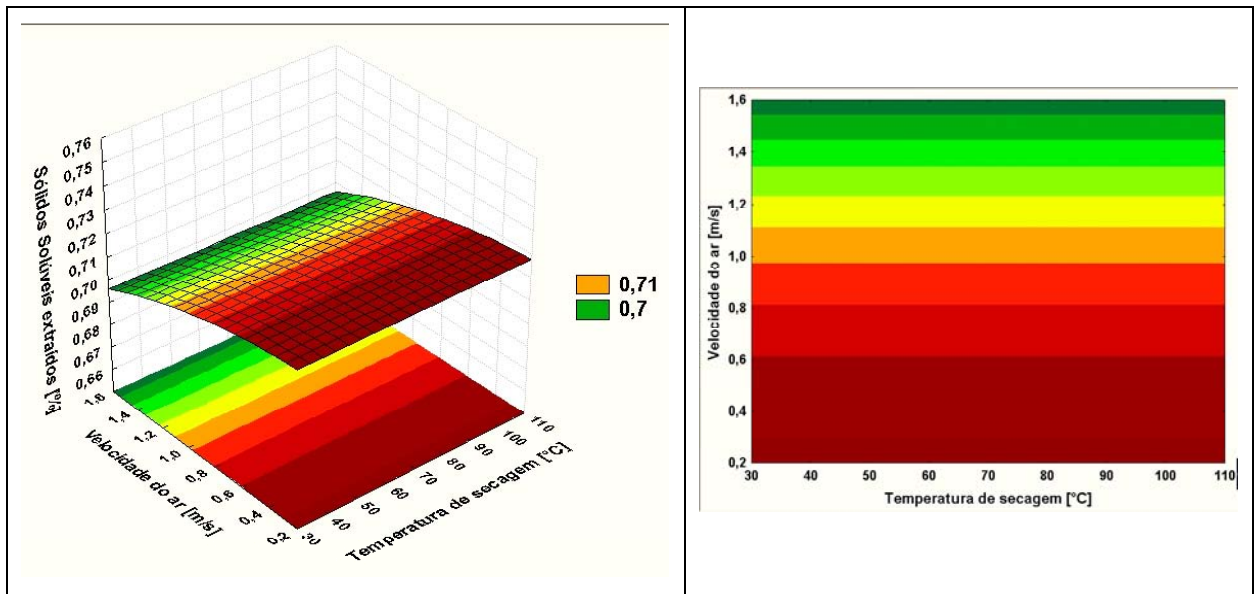


Figura 5.3-2: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas fatiadas congeladas.

5.3.4 Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes cubetadas *in natura*

Os resultados da extração para raízes secas cubetadas *in natura* são mostrados na Tabela 5.3-9.

Tabela 5.3-9: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas in natura.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Resposta	
	X ₁	X ₂	T [°C]	V [m/s]	Sólidos Solúveis [%]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50	0,600
	2	-1	+1	50,0	1,30	0,585
	3	+1	-1	90,0	0,50	0,630
	4	+1	+1	90,0	1,30	0,634
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90	0,599
	6	0	0	70,0	0,90	0,585
	7	0	0	70,0	0,90	0,615
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90	0,573
	9	+1,41	0	98,3	0,90	0,641
	10	0	-1,41	70,0	0,34	0,600
	11	0	+1,41	70,0	1,46	0,630

A Tabela 5.3-10 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.3-10: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas cubetadas in natura.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	0,044	0,0091	0,0046
Temperatura T (quadrático)	0,008	0,0108	0,5116
Velocidade V (linear)	0,008	0,0091	0,4258
Velocidade V (quadrático)	0,016	0,0108	0,2113
Interação T x V	0,009	0,0129	0,5049

Somente o efeito linear da temperatura do ar de secagem foi considerado significativo.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar o modelo preditivo (Tabela 5.3-11).

Tabela 5.3-11: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas *in natura*.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	3,92E-03	1	3,92E-03	25,34	5,12	0,738
Resíduo	1,39E-03	9	1,55E-04			
Falta de ajuste	9,47E-04	7	1,35E-04	0,61	19,35	
Erro puro	4,45E-04	2	2,22E-04			
Total	5,31E-03	10				

Verifica-se que o modelo apresentou regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo, porém o ajuste não satisfaz o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002). Assim o modelo não pode ser considerado preditivo e não pode ser utilizado para estimar o resultado de qualquer processo de extração de inulina a partir de raízes cubetadas *in natura*, apesar de não haver evidência de falta de ajuste. Além disso, o coeficiente de determinação foi de apenas 0,738, ou seja, apenas 73,8% da variação é explicada pelo modelo e considerada erros aleatórios.

O valor de F_{calc} para falta de ajuste foi inferior ao valor de F_{tab}, o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A Figura 5.3-3 mostra a distribuição dos resíduos obtida na qual observa-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória.

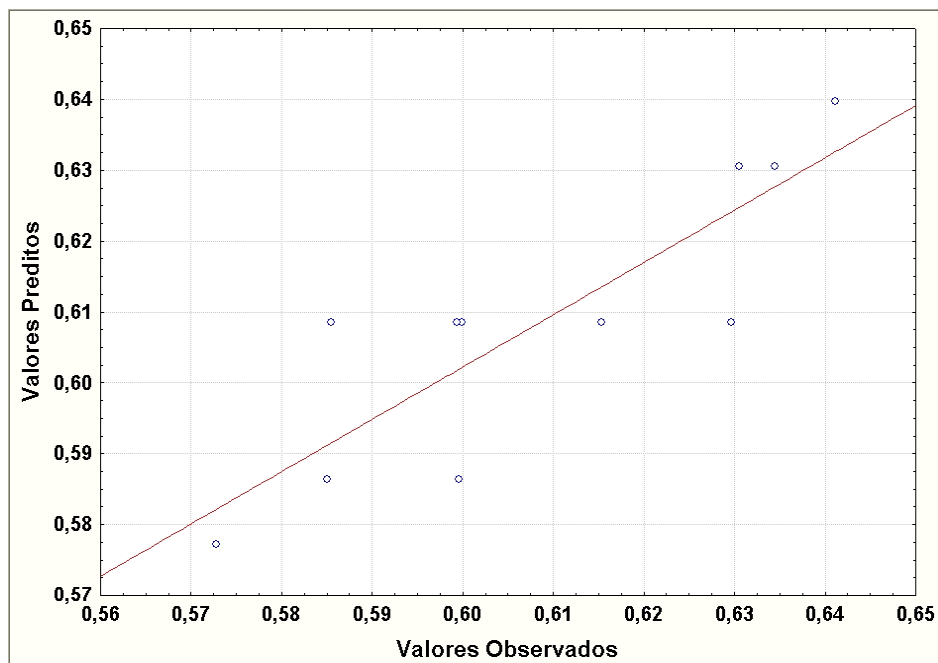


Figura 5.3-3: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar os sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas *in natura* está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$SS[\%] = 0,5310 + 0,0011 * T \quad (17)$$

Foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas *in natura*, mostradas na Figura 5.3-4.

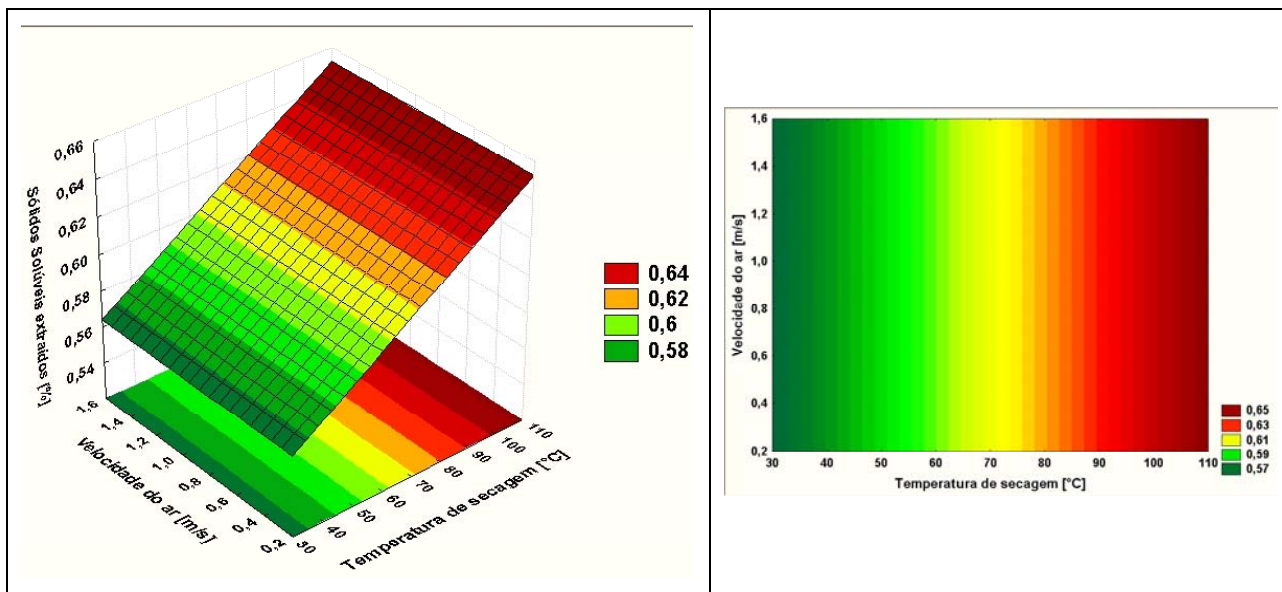


Figura 5.3-4: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas cubetadas in natura.

5.3.5 Extração de inulina de raízes secas a partir de raízes cubetadas congeladas

Os resultados da extração para raízes secas cubetadas congeladas são mostrados na Tabela 5.3-12.

Tabela 5.3-12: Sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas congeladas.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Resposta	
	X ₁	X ₂	T [°C]	V [m/s]	Sólidos Solúveis [%]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50	0,654
	2	-1	+1	50,0	1,30	0,627
	3	+1	-1	90,0	0,50	0,654
	4	+1	+1	90,0	1,30	0,639
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90	0,660
	6	0	0	70,0	0,90	0,660
	7	0	0	70,0	0,90	0,675
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90	0,654
	9	+1,41	0	98,3	0,90	0,654
	10	0	-1,41	70,0	0,34	0,681
	11	0	+1,41	70,0	1,46	0,630

A Tabela 5.3-13 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95%.

Tabela 5.3-13: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para sólidos solúveis extraídos de raízes secas cubetadas congeladas.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	0,003	0,0073	0,6669
Temperatura T (quadrático)	-0,017	0,0087	0,1153
Velocidade V (linear)	-0,028	0,0073	0,0113
Velocidade V (quadrático)	-0,015	0,0087	0,1475
Interação T x V	0,006	0,0103	0,5825

Somente o efeito linear da velocidade do ar de secagem foi considerado significativo.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar o modelo preditivo (Tabela 5.3-14).

Tabela 5.3-14: Análise de variância (ANOVA) para extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas congeladas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	1,62E-03	1	1,62E-03	12,94	5,12	0,590
Resíduo	1,13E-03	9	1,25E-04			
Falta de ajuste	9,75E-04	7	1,39E-04	1,83	19,35	
Erro puro	1,52E-04	2	7,62E-05			
Total	2,75E-03	10				

Verifica-se que o modelo apresentou regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo, porém o ajuste não satisfaz o critério sugerido por BOX e WETZ (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002). Assim o modelo não pode ser considerado preditivo e não pode ser utilizado para estimar o resultado de qualquer processo de extração de inulina a partir de raízes cubetadas congeladas, apesar de não haver evidência de falta de ajuste. Além disso, o coeficiente de determinação foi de apenas 0,590, ou seja, apenas 59,0% da variação é explicada pelo modelo.

O valor de F_{calc} para falta de ajuste foi inferior ao valor de F_{tab}, o que significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo.

A Figura 5.3-5 mostra a distribuição dos resíduos obtida na qual observa-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória.

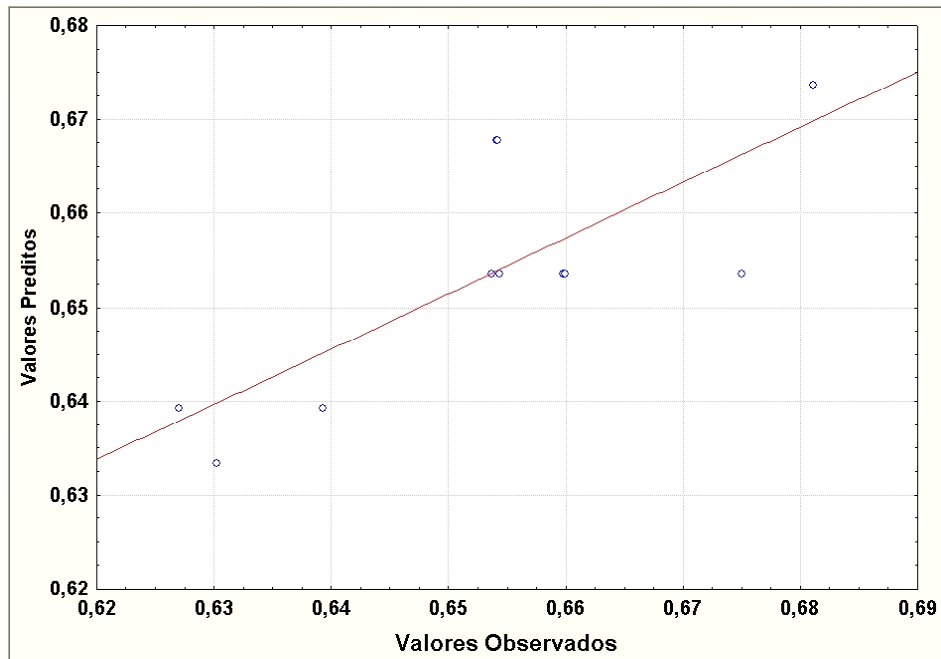


Figura 5.3-5: Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar os sólidos solúveis extraídos de raízes de chicória secas cubetadas congeladas está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$SS[\%] = 0,6855 - 0,0356 * V \quad (18)$$

Foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a extração de inulina de raízes de chicória secas cubetadas congeladas, mostradas na Figura 5.3-6.

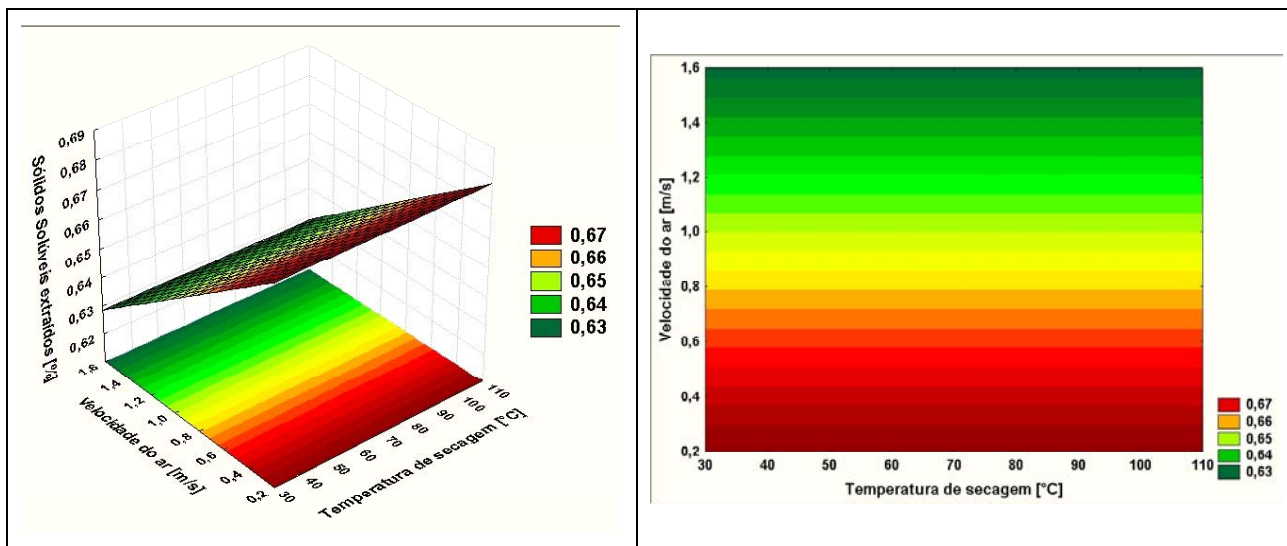


Figura 5.3-6: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na extração da inulina de raízes secas cubetadas congeladas.

De forma geral, os modelos para extração de inulina a partir de matéria-prima seca, ou seja, oriunda das secagens, se mostraram instáveis no que se refere aos efeitos considerados estatisticamente significativos. No caso de extração a partir de raízes fatiadas e secas, nenhum dos parâmetros foi considerado significativo, enquanto que para os outros tratamentos, alternou-se a utilização dos parâmetros temperatura e velocidade do ar secante, sem que houvesse consistência quanto aos valores de coeficiente de determinação. Portanto, é possível que a extração de inulina de matéria-prima seca não seja influenciada pelas condições do processo de secagem, ao qual as raízes foram submetidas.

5.4 REIDRATAÇÃO

Os valores para as constantes do modelo de Peleg (Equação 8) utilizado para determinação da reidratação da raiz de chicória são mostrados na Tabela 5.4-1.

Tabela 5.4-1: Constantes de Peleg para reidratação de raiz de chicória.

Geometria	T [°C]	MC ₀ [g _{H2O} /g _{MS}]	Constantes de Peleg		R ²	DR [%]
			k ₁	k ₂		
placa plana	25	0,1145	1539,218	0,385	0,9916	6,32
placa plana	98	0,0347	181,241	0,346	0,9992	1,12
cubo	25	0,0992	1518,300	0,579	0,9856	5,81
cubo	98	0,0561	409,102	0,439	0,9905	4,35

Observa-se que os coeficientes de determinação ficaram acima de 0,98 e os valores de desvio relativo médio ficaram abaixo de aproximadamente 7% confirmando que as curvas de reidratação foram bem ajustadas e que o modelo de Peleg se mostrou um bom modelo para reidratação.

Percebe-se que o tempo necessário para reidratação da matéria seca foi muito maior para a temperatura de 25°C. O tempo também foi maior para raízes cubetadas do que para fatiadas. Isso é explicado pelo fato de que a relação entre superfície de contato e espessura da fatia ser maior que a do cubo e, por isso, apresenta uma maior transferência de água para o interior do produto.

As curvas de reidratação são mostradas nas Figuras 5.4-1, 5.4-2, 5.4-3 e 5.4-4.

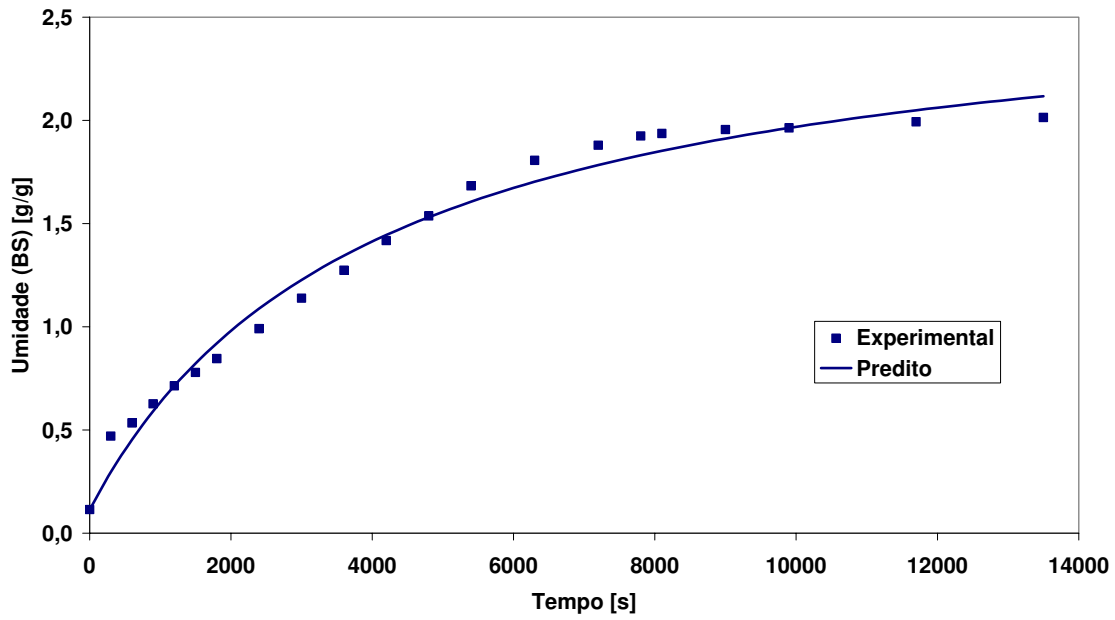


Figura 5.4-1: Curva de reidratação de raiz de chicória fatiada à 25°C.

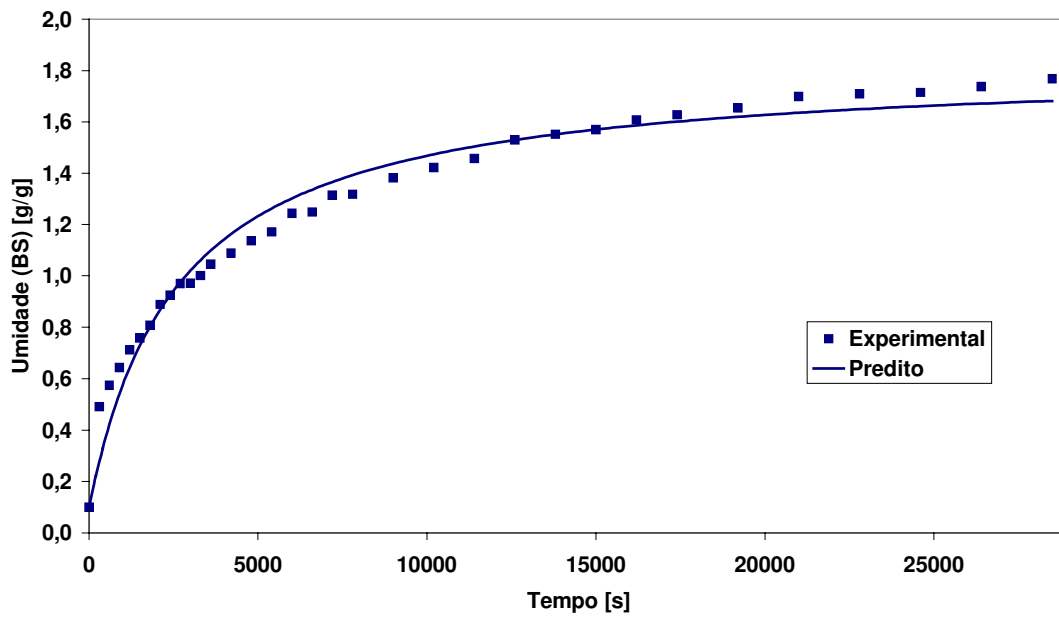


Figura 5.4-2: Curva de reidratação de raiz de chicória cubetada à 25°C.

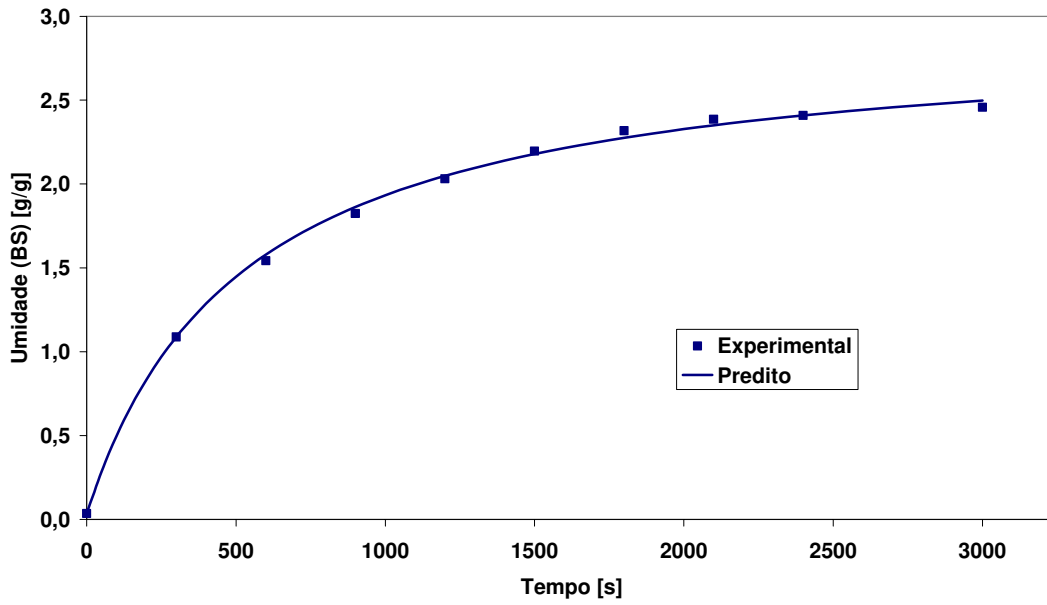


Figura 5.4-3: Curva de reidratação de raiz de chicória fatiada à 98°C.

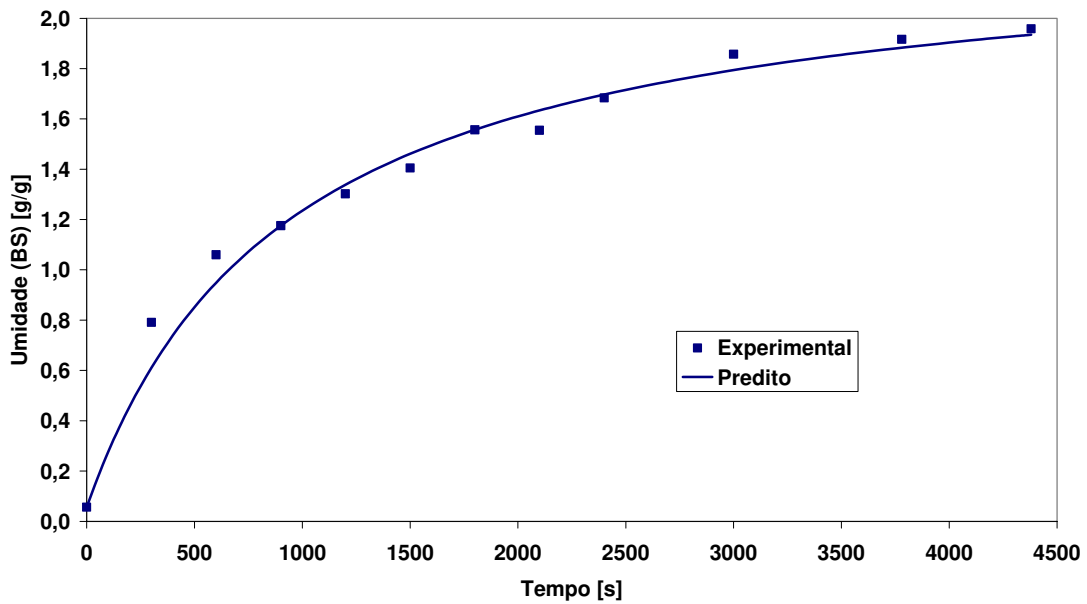


Figura 5.4-4: Curva de reidratação de raiz de chicória cubetada à 98°C.

VI CONCLUSÕES

Os dados experimentais de secagem apresentaram bom ajuste aos modelos de Fick e Page tanto para amostras de raízes de chicória fatiadas como para cubetadas nas duas condições da matéria-prima (*in natura* e congelada).

A temperatura foi a variável que se apresentou significativa em quase todos os tratamentos relativos à secagem de raízes de chicória, enquanto que a velocidade, apesar de influenciar na determinação da difusividade efetiva, se mostrou menos presente nos modelos obtidos na estimativa de difusividade efetiva.

Para a secagem de raízes de chicória, em todos os tratamentos, a região de condições ótimas situa-se próxima aos valores mais altos de temperatura do ar, enquanto que o mesmo ocorre para a velocidade do ar, porém somente nos casos em que esta variável foi considerada estatisticamente significativa, levando-se em conta a escala de valores estudada.

Os valores de difusividade efetiva para raízes fatiadas variaram de $2,75 \times 10^{-10}$ a $1,11 \times 10^{-09}$ m²/s, enquanto que para raízes cubetadas variaram de $2,81 \times 10^{-10}$ a $1,15 \times 10^{-09}$ m²/s.

A energia de ativação variou de 11,20 a 20,78 kJ/mol para raízes fatiadas e variou de 15,73 a 21,75 kJ/mol para raízes cubetadas.

O modelo obtido para extração de inulina de raízes *in natura* não foi considerado preditivo.

A extração de inulina utilizando amostras secas em diferentes condições não mostrou diferenças significativas. Além disso, as variáveis da secagem quando significativas, revelavam um efeito muito pequeno na resposta. Portanto, os parâmetros de secagem não interferem no rendimento da extração de inulina.

Os dados experimentais para reidratação apresentaram ótimo ajuste ao modelo de Peleg.

VII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R.J.; GABITTO, J.F.; CHIRIFE, J. Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion. **Journal of Food Technology**, Oxford, v. 20, n. 5, p. 623-629, 1985.

ALZUGARAY, D.; ALZUGARAY, C. Chicória Amarga. **Plantas que curam – A natureza a serviço da saúde**. sl. v.40, n.11, p.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.

APPLIED7 TECHNOLOGY. Converting chicory - not just a cup of coffee, **Dairy Foods**, Chicago: Cahners, v.94, n.11, p.112, Oct. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO. Compêndio de Legislação de Alimentos. São Paulo: ABIA, 1989/1993.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. international**. 16^a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc., Virginia, 1998.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1978. 653 p.

BOX, G.E.P.; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. **University of Wisconsin Technical Report 9**, 1973. *apud* BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

- BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. **XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp**. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.
- BROD, F.P.R.; PARK, K.J.; OLIVEIRA, R.A. Secagem de raiz de chicória em um secador convectivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR: SBEA, 2001. CD-ROM.
- BULIGA, G. S.; MILLER, M. S.; POWELL, W. F.; LIS, D. G. et al. Fat-free tablespread and method of making. **USA Patent** number 5,501,869. March 26, 1996.
- BULLOCK, L. M.; HANDEL, A. P.; SEGALL, S. et. al. Replacement of simple sugars in cookie dough. **Food Technology**. Chicago. v.46, n.1, p. 82-86, 1992.
- BYRNE, M. A world of new food products. **Food Engineering International**. Radnor, USA. v.22, n.2, p. 36-52, 1997.
- BYRNE, M. Fresh ideas from around the world. **Food Engineering International**. Radnor, USA. v.23, n. 2, p.29-44., 1998.
- CÂNDIDO, L. M. B.; CAMPOS, A. M. **Alimentos para fins especiais: dietéticos**. , São Paulo: Livraria Varela, 1995. 423 p.
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1981. v.1, p.73-102.
- COOPER, P. D. Pharmaceutical composition and method containing gamma inulin or derivative thereof. **USA Patent** number 4,954,622. September 4, 1990.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.
- DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. **Sciences des Aliments**, Paris, v.3, p.1-36, 1983.

DINIZ F.M.; MARTIN, A .M. Use of response surface methodology to describe the combined effects of pH, temperature and e/s ratio on the hydrolysis of dogfish (*Squalus acanthias*) muscle. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v.31, n.5, p. 19-426, 1996.

FAN, L. Process for producing fructose. **USA Patent** number 4,774,183. September 27, 1988.

FASSL, J. Editorial: Only the strong survive in Asia. **Food Engineering International**. Radnor, USA. v.23, n.2, p.15, 1998.

FIGUEIRA, G. M. **Desenvolvimento agrotecnológico da espécie *Cichorium intybus* L.** Campinas, 2000. 68f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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**, v.63, p. 273-280, 2004.

FLAMM, G.; GLINSMANN, W.; KRITCHEVSKY, D. PROSKY, L.; ROBERFROID, M. Inulin and oligofructose as dietary fiber: a review af the evidence. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.41, n.5, p. 353-362, 2001.

GALVÃO, G. Almeirão. **Natureza**. São Paulo. v.8, n.7, p.53-55, 1995.

GREEN, C. J.; BORK, R. A.; HAGEMAN, R. J. J.; BOERMA, J. A. et al. Nutritional composition containing fibers **USA Patent** number 5,792,754. August 11, 1998.

HEWITT, L. Fight the good fat. **Food Manufacture**, London. v.69, n.10, p.20, 1994.

HOEHN, E.; McKAY, C. J.; MURRAY, E. D. Production of high fructose syrup from inulin involving ultra filtration. **USA Patent** number 4,421,852. December 20, 1983.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. São Paulo. **Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz**. v.1. São Paulo, 1976. 371p.

JAMES, S. M. Method for producing fat-free and low-fat viscous dressings using inulin. **USA Patent** number 5,721,004. February 24, 1998.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972, 358 p.

KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.

KERKHOFFS, P. L. Preparation of fructose. **USA Patent** number 4,277,563. July 7, 1981.

KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. **Food Technology**, Chicago, v.22, p.165-71, 1968.

KRISHNAMURTHY, R. G.; WITTE, V. C. Method of making a reduced fat emulsified dressing. **USA Patent** number 5,795,614. August 18, 1998.

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

LEENHEER, L.; HOEBREGS, H. Progress in elucidation of the composition of chicory inulin. **Starch/Stärke**. Deerfield Beach. v.46, n.5, p.193-196, 1994.

LESENS, C.; DUFORT, C.; PFEIFER, A. M. A.; ROCHAT, F. Ice cream with coating containing lactic acid bacteria. **USA Patent** number 6,022,568. February 8, 2000.

LIN, K.H.; Van NESS, H.V.; ABBOTT, M.M. Reaction kinetics and reactor design. In: PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. **Chemical Engineers' Handbook**, 5 ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, LTD. 1973. s. 4, p. 3.

LISKA, De A.; KING, M.; MEDCALF, D.; PETERSON, De B. et al. Medical food composition of reduced allergen city, especially adapted for improving gut mucosal integrity. **USA Patent** number 6,051,260. April 18, 2000.

MANN, M. A. Blood sugar regulating composition and methods relating thereto. **USA Patent** number 5,550,113. August 27, 1996.

MEADE, M. B. Nut spread having reduced fat and reduced calories and process for producing the same. **USA Patent** number 6,010,737. January 4, 2000.

MENEZES, S. O mercado diet. **Alimentos e tecnologia**. São Paulo. v.6, n. 32, p.26-28, 1990.

MENEZES, S.; VIEGAS, E. Dietéticos em alta. **Alimentos e tecnologia**. São Paulo. v.6, n. 32, p.22-26. 1990.

MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. Cap. 9, p. 295-326.

MILLER, M. Foam inducing compositions and method for manufacture thereof. **USA Patent** number 6,025,006. February 15, 2000.

MILLER, M. S.; SURBER, K. J.; LIS, D. G.; MARTIN Jr, R. W. et al. Mouth feel and lubricity enhancing composition. **USA Patent** number 6,033,710. March 7, 2000.

NOGUEIRA, R. I. **Processo de obtenção de inulina de chicória (*Cichorium intybus*) em pó**. Campinas, 2001. 68p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. M.Sc. Thesis, USA. Purdue University, Indiana, 1949.

PAN, Y.K.; LI, Z.Y.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Drying of a root crop in vibro-fluidized beds. **Drying Technology**. New York, v. 15, n. 1, p. 225-223, 1997.

PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; GODOI, L. F. G. Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) characteristic drying curve. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 10, 1996, Cracóvia-Polônia. **Proceedings...** Lodz-Polônia: Lodz Technical University, 1996. v.B, p.1001-1008.

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.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 193-199, 2002.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 97-103, 2003.

PARTIDA, V. Z.; LOPEZ, A. C.; GOMEZ, A. J. M.. Method of producing fructose syrup from agave plants. **USA Patent** number 5,846,333. December 8, 1988.

PAUL, S. M. Immunoglobulin and fiber-containing composition for human gastrointestinal health. **USA Patent number** 5,744,134. April 28, 1998.

PELEG, M. An empirical-model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 53, n. 4, p. 1216-1219, 1988.

PHELPS C. F. The physical properties of inulin solutions. *J. Biochemistry*,95:41-47, 1965 *apud* COOPER, P. D. Pharmaceutical composition and method containing gamma inulin or derivative thereof. **USA Patent** number 4,954,622. September 4, 1990.

RANHOTRA, G.S.; GELROTH, J.A.; GLASER, B.K. Usable energy value of selected bulking agents. **Journal of Food Science**. Chicago. v.58, n.5, p. 1176-1178. 1993.

ROBERFROID, M. Dietary fiber, inulin, and oligofructose: a review comparing their physiological effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Boca Raton, v. 33, n.2, p.103-148, 1993.

ROBERFROID, M.; DELZENNE, N.; COUSSEMENT, P.; VAN LOO, J. Prevention of mammary carcinogenesis and breast cancer treatment. **USA Patent** number 5,721,345. February 24, 1998.

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

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

SCHRODER, B.G.; BAER, R. J. Consumer evaluation of reduced-cholesterol butter. **Food Technology**. Chicago. v.45, n.10, p. 104-107, 1991.

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

STATISTICA version 6.0. **Data analysis software system**. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.

TEEUWEN, H.; THONÉ, M.; VANDORPE,J. Inulin: a versatile fiber ingredient, **International Food Ingredient**. sl. v.4, n.5, p.10-14, 1992.

THEUER, R. C.; COOL, M. B. Fructan-containing baby food compositions and methods therefore. **USA Patent** number 5,840,361. November 24, 1998.

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. v.35, n.6, p.525-552, 1995.

YATKA, R. J.; RICHEY, L. C.; MEYERS, M. A. Chewing gum products using oligofructose. **USA Patent** number 5,431,929. July 11, 1995.

YOUNG, T. J.; CROSBY, G. A. Bakery shortening substitute, bakery products containing the same, and preparation method. **USA Patent** number 6,048,564. April 11, 2000.

ZUMBE, A.; SANDERS, N. Process for manufacture of reduced fat chocolate. **USA Patent** number 5,989,619. November 23, 1999.