Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos

ESTUDO DA SECAGEM EM LEITO FIXO E DE JORRO DO RESÍDUO INDUSTRIAL DO PROCESSAMENTO DE SUCO DE FRUTAS CÍTRICAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, na Área de Concentração em Engenharia de Processos.

Vanessa Martins da Silva
Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. Luiz Antonio Viotto
Orientador

Campinas – SP
2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Si38e

Silva, Vanessa Martins da
Estudo da secagem em leito fixo e de jorro do resíduo industrial do processamento de suco de frutas cítricas / Vanessa Martins da Silva. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Luiz Antonio Viotto
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Resíduos. 2. Fibra dietética. 3. Frutas cítricas. 4. Secagem. I. Viotto, Luiz Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Titulo em ingles: Study of convective drying of citrus by-products in a vertical tray dryer and spouted bed dryer
Palavras-chave em inglês (Keywords): By-products, Dietary fibre, Citrus fruits, Drying
Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos
Banca examinadora: Luiz Antonio Viotto
Florência Cecília Menegalli
Rosiane Lopes da Cunha
Flávio Luiz Schmidt
Programa de Pós-Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Luiz Antonio Viotto

(Orientador – DEA / FEA / UNICAMP)

_____

Prof[a]. Dr[a]. Florência Cecília Menegalli

(Membro – DEA / FEA / UNICAMP)

_____

Prof[a]. Dr[a]. Rosiane Lopes da Cunha

(Membro – DEA / FEA / UNICAMP)

_____

Prof. Dr. Flávio Luiz Schmidt

(Membro – DTA / FEA / UNICAMP)

“Se queremos um mundo de paz e de justiça temos que pôr decididamente a inteligência a serviço do amor”

Antoine de Saint-Exupéry

DEDICO

Aos meus pais, Eliete (in memorian) e Roque, pelo amor que sempre dedicaram à nossa família. Vocês sempre me incentivaram a estudar e a lutar por meus objetivos, minha gratidão e carinho por vocês serão eternos!

Aos meus irmãos Valéria e Marcelo que sempre foram exemplos de força e coragem para mim. Tenho muito orgulho de vocês!

Ao Fred, meu namorado, que é uma pessoa muito importante em minha vida pois é um grande amigo e companheiro em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof Dr. Luiz Antonio Viotto, pela orientação e apoio em todos os momentos da realização do projeto. Obrigada pelos ensinamentos que foram muito importantes para a minha formação.

Às professoras Drª. Florência Cecília Menegalli e Drª. Rosiane Lopes da Cunha e ao professor Dr. Flávio Luiz Schmidt pelas importantes correções e sugestões para o desenvolvimento do trabalho.

À empresa CPKelco pelo fornecimento das amostras. Agradeço ao Jan Staunstrup por possibilitar o trabalho conjunto com a empresa. À Yara Csordas pelas sugestões, apoio técnico e pela delicadeza comigo. Agradeço ao técnico Cleto e ao Rodrigo pela elaboração da matéria-prima além da ótima receptividade que tive todas às vezes que visitei a empresa.

À minha querida família Roque, Marcelo e Valéria pelo exemplo de vida que vocês representam para mim.

Aos amigos da pós-graduação: Ana Carla, Ana Paula, Cristiane, Fezinha, Lizi, Nádia, Kelly, Grazielle, Márcia Souza, Márcia Simões, Renata, Nara, Nenis, Patrícia Leal, Raquel, Kátia, Lucielen, Letícia, César, Genival e Gustavo. Obrigada pelo companheirismo em todos os momentos.

Ao Marcos, Roseli, Fred, Guta e Maria Fernanda que são pessoas muito especiais para mim pois se tornaram a minha família aqui em Campinas.

Aos técnicos pela colaboração na utilização de equipamentos ou realização de análises: agradeço à Camilla do Laboratório de Medidas Físicas, Joice do Laboratório de Engenharia de Processos, Maria de Fátima do Laboratório de Engenharia Bioquímica da Faculdade de Engenharia de alimentos; Celso do Laboratório de Caracterização de Produtos e Processos da Faculdade de Engenharia Química.

Aos funcionários da Fea, principalmente o pessoal da manutenção pela ajuda na montagem e manutenção dos equipamentos

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa de estudo.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) e Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

À todas as pessoas, que diretamente ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS ..... **ix**
LISTA DE TABELAS ..... **xii**
NOMENCLATURA ..... **xv**
RESUMO ..... **xix**
ABSTRACT ..... **xx**
1. Introdução e Justificativa **1**
2. Objetivos **2**
2.1. Objetivo Geral 2
2.2. Objetivos Específicos 2
3. Revisão Bibliográfica **3**
3.1. Limão e Lima 3
3.1.1. Considerações Gerais 3
3.1.2. Fibra Alimentar 5
3.2. Isotermas de Sorção 7
3.2.1. Modelos Matemáticos 10
3.3. Secagem Convectiva 13
3.3.1. Cinética de Secagem 16
3.3.1.1. Período de Taxa Constante de Secagem 16
3.3.1.2. Período de Taxa Decrescente de Secagem 17
3.3.2. Leito de Jorro 20
3.3.3. Classificação de Pós 24
3.3.4. Considerações Importantes 27
4. Material e Métodos **29**
4.1. Matéria-prima 29
4.2. Métodos 29
4.2.1. Produção das Fibras 30
4.2.1.1. Limpeza das Frutas 30
4.2.1.2. Extratora 30
4.2.1.3. Trituração Úmida 31
4.2.1.4. Lavagem do material 31
4.2.1.5. Prensagem 31
4.2.1.6. Secagem 32
4.2.1.7. Moagem Seca 32
4.2.1.8. Armazenamento 32
4.3. Determinações Analíticas do Resíduo Sólido 32
4.3.1. Umidade 32
4.3.2. Cinzas 32
4.3.3. Proteínas 32
4.3.4. Lipídeos 33
4.3.5. Atividade de Água 33
4.3.6. pH 33
4.4. Caracterização Granulométrica do Resíduo Sólido e das Fibras 33
4.5. Densidade do Resíduo Sólido e das Fibras 33
4.5.1. Densidade real por picnometria a gás hélio 33
4.5.2. Densidade bulk e real por porosimetria de Mercúrio 34
4.6. Isotermas de Dessorção do Resíduo Sólido 36
4.7. Determinações Analíticas das Fibras 37
4.7.1. Análises Físico-químicas 37
4.7.1.1. Cinzas 37
4.7.1.2. Proteínas 38

4.7.1.3. Lipídeos 38
4.7.1.4. Fibra Total, Solúvel e Insolúvel 38
4.7.1.5. Umidade 38
4.7.1.6. pH 38
4.7.1.7. Acidez 38
4.7.1.8. Atividade de Água 39
4.7.2. Propriedades Tecnológicas das Fibras 39
4.7.2.1. Índice de Absorção de Água (IAA) 39
4.7.2.2. Índice de Solubilidade em Água (ISA) 39
4.7.2.3. Índice de Absorção de Óleo (IAO) 39
4.7.2.4. Volume de Intumescimento (VI) 40
4.8. Secagem em Leito Fixo e em Leito de Jorro 40
4.8.1. Leito Fixo 40
4.8.2. Leito de Jorro 43
5. Resultados e Discussões 46
5.1. Matéria-prima 46
5.1.1. Preparo do Resíduo Sólido 46
5.1.1.1. Caracterização do Resíduo Sólido 47
5.1.1.2. Caracterização Granulométrica do Resíduo Sólido 47
5.1.1.3. Densidade real por picnometria a gás hélio do Resíduo Sólido e das Fibras 48
5.1.1.4. Densidade bulk e real por porosimetria de Mercúrio do Resíduo Sólido e das Fibras 48
5.1.1.5. Porosidade do Leito 52
5.1.1.6. Esfericidade Média da Partícula 52
5.1.2. Isotermas de Dessorção do Resíduo Sólido 53
5.2. Cinética de Secagem 58
5.2.1. Taxa de Secagem 58
5.2.2. Modelagem Matemática 61
5.2.2. Modelo de Fick 62
5.2.3. Modelo Exponencial 67
5.2.4. Caracterização das Fibras Alimentares 72
5.2.4.1. Composição Centesimal 72
5.2.4.2. Caracterização Granulométrica das Fibras 73
5.2.4.3. Análises Físico-químicas das Fibras 74
5.2.4.3.1. Conteúdo de Umidade 74
5.2.4.3.2. pH 75
5.2.4.3.3. Acidez 76
5.2.3.3.4. Atividade de Água 77
5.3. Planejamento Experimental 77
5.4. Leito de Jorro 81
6. Conclusões 89
8. Referências Bibliográficas 90
APÊNDICE A 98
APÊNDICE B 99
APÊNDICE C 106

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Corte transversal do fruto. 3

Figura 3.2. Valores de Produção de Lima e de Limão de alguns países (FAO, 2006). 5

Figura 3.3. Processamento de bagaço para obtenção de Fibra Alimentar (LARRAURI, 1999). 7

Figura 3.4. Curva típica de Isotermas em Alimentos à temperatura de 20°C (FENNEMA, 1996). 9

Figura 3.5. Curva típica de secagem convectiva (STRUMILLO & KUDRA,1986). 14

Figura 3.6. Transição de Regimes de Escoamento. 20

Figura 3.7. Curva típica de transição leito fixo para leito de jorro para distintas alturas de leito estático (H) (MATHUR & EPSTEIN, 1974). 21

Figura 3.8. Caracterização de Partículas (GELDART,1986). 25

Figura 3.9. Esfericidade em função da porosidade para leitos com empacotamento frouxo, normal ou denso (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). 28

Figura 4.1. Fluxograma para obtenção do resíduo sólido. 30

Figura 4.2. Extratora industrial e detalhe dos copos. 31

Figura 4.3. Esquema do Secador de Leito Fixo. 41

Figura 4.4. Vista esquemática lateral e frontal do leito de jorro. (A) Ventilador centrífugo; (B) Válvula globo; (C) Conjunto de resistências elétricas; (D) Regulador de voltagem; (E) Uniformizador da linha de fluxo de ar; (F) Alimentação de ar para o ânulo; (G) Distribuidor de ar para o jorro e ânulo; (H) Leito; (I) Ciclone; (J) Alimentação de Ar para o ânulo; (K) Alimentação de ar para o jorro; (L) inclinação de 45° da base na região do ânulo. 43

Figura 5.1. Fluxograma para obtenção do resíduo sólido. 46

Figura 5.2. Histograma da distribuição do tamanho de partículas. 48

Figuras 5.3 e 5.4. Curvas de intrusão e extrusão obtidas através da porosimetria de mercúrio para o resíduo sólido (a) e a fibra alimentar (b). 50

Figuras 5.5 e 5.6. Distribuição do tamanho de poro para o resíduo sólido (a) e para a fibra alimentar (b) através da porosimetria de mercúrio. 52

Figura 5.7. Comparação entre os valores observados e preditos das isotermas de dessorção do Limão Siciliano *in natura* utilizando o modelo de GAB. 55

Figura 5.8. Comparação entre os valores observados e preditos para as isotermas de dessorção do limão siciliano (com o parâmetro temperatura). 56

Figura 5.9. Comparação entre os valores observados e preditos da isoterma de dessorção do Limão Siciliano *in natura*. 58

Figura 5.10. Efeito da temperatura na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a velocidade do ar de 0,5m/s. 59

Figura 5.11. Efeito da temperatura na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a velocidade do ar de 1m/s. 59

Figura 5.12. Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a temperatura de 60°C. 60

Figura 5.13. Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a temperatura de 90°C. 60

Figura 5.14. Curvas da taxa de secagem do limão siciliano em função da umidade em base seca às temperaturas de 60, 75, 90 e 105°C e v = 0,75m/s. 61

Figura 5.15. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperaturas de 60 e 90°C. 63

Figura 5.16. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperatura de 75°C. 64

Figura 5.17. Superfície de resposta e curva de nível para Difusividade Efetiva (D_{ef}) do resíduo de limão siciliano para a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u., relacionando temperatura (°C) e velocidade do ar (m/s). 67

Figura 5.18. Ajuste do modelo de exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperaturas de 60 e 90°C. 68

Figura 5.19. Ajuste do modelo exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperatura de 75°C. 69

Figura 5.20. Superfície de resposta e curva de nível para constante de secagem (k) do resíduo de limão siciliano para a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u., relacionando temperatura (°C) e velocidade do ar (m/s). 71

Figura 5.21. Fibra Alimentar obtida do Resíduo de Limão Siciliano. 73

Figura 5.22. Histograma da Distribuição do tamanho de partículas das fibras. 74

Figura 5.23. Curva fluidodinâmica do resíduo de limão siciliano no leito de jorro. 82

Figura 5.24. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, em leito de jorro, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, nas temperaturas de 60, 75°C e 90°C 84

Figura 5.25. Gráfico da taxa de secagem versus umidade, em base seca, da secagem do resíduo de limão siciliano *in natura* no leito de jorro. 85

Figura 5.25. Ajuste do modelo exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, em leito de jorro, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, nas temperaturas de 60, 75°C e 90°C 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição Centesimal da Casca do Limão. 4

Tabela 3.2. Velocidade de Mínimo Jorro. 22

Tabela 3.3. Queda de Pressão Máxima no Jorro. 23

Tabela 3.4. Queda de Pressão no Jorro Estável. 23

Tabela 3.5. Queda de Pressão no Mínimo Jorro. 23

Tabela 4.1. Valores de umidade relativa relacionada às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 60, 75 e 90°C. 36

Tabela 4.2. Definição dos níveis das variáveis independentes para o Secador de Leito Fixo. 42

Tabela 4.3. Ensaios para o planejamento experimental fatorial completo 2^2 do Secador de Leito Fixo, variáveis independentes níveis reais e codificados. 42

Tabela 5.1. Caracterização físico-química do Resíduo de Limão Siciliano. 47

Tabela 5.2. Resultados das análises no porosímetro de mercúrio. 49

Tabela 5.3. Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção nas temperaturas de 60, 75 e 90°C do Limão Siciliano *in natura*. 53

Tabela 5.4. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do resíduo de limão siciliano *in natura* dos modelos sem o parâmetro temperatura. 54

Tabela 5.5. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do limão siciliano dos modelos com o parâmetro temperatura. 55

Tabela 5.6. Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção na temperatura de 30°C do Limão Siciliano *in natura*. 57

Tabela 5.7. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do Limão Siciliano *in natura* para alguns dos modelos sem o parâmetro temperatura para 30°C. 57

Tabela 5.8. Valores de umidade relativa do ar de secagem e de umidade de equilíbrio para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar para o limão siciliano *in natura*. 62

Tabela 5.9. Valores de difusividade efetiva estimados pelo modelo de Fick, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para o resíduo de limão siciliano *in natura*. 62

Tabela 5.10. Efeito estimado, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 65

Tabela 5.11. Análise de variância do modelo ajustado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 66

Tabela 5.12. Coeficiente de Regressão, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 66

Tabela 5.13. Constante de secagem estimada pela lei exponencial, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para o resíduo de limão siciliano *in natura*. 67

Tabela 5.14. Efeito estimado, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 70

Tabela 5.15. Análise de variância do modelo ajustado para constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 70

Tabela 5.16. Coeficiente de Regressão, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u. 71

Tabela 5.17. Composição Centesimal da Fibra Alimentar. 72

Tabela 5.18. Composição da Fibra Alimentar. 73

Tabela 5.19. Conteúdo de Umidade da Fibra Alimentar de limão siciliano. 74

Tabela 5.20. Estimativa dos efeitos para o conteúdo de umidade da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 75

Tabela 5.21. Medidas de pH para a fibra alimentar de limão siciliano. 75

Tabela 5.22. Estimativa dos efeitos para o pH da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 75

Tabela 5.23. Resultados de acidez, em g de ácido cítrico por 100mL para a fibra alimentar do resíduo de limão siciliano. 76

Tabela 5.24. Estimativa dos efeitos para a acidez da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 76

Tabela 5.25. Valores encontrados de Atividade de Água para a fibra alimentar de limão siciliano. 77

Tabela 5.26. Estimativa dos efeitos para a atividade de água da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 77

Tabela 5.27. Resultados experimentais de *IAA*, *ISA*, *IAO e VI* obtidos através da secagem do Limão Siciliano *in natura* em leito fixo. 78

Tabela 5.28. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Absorção de Água (*IAA*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 78

Tabela 5.29. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Solubilidade em Água (ISA) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 79

Tabela 5.30. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Absorção de Óleo (*IAO*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 79

Tabela 5.31. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Volume de Intumescimento (*VI*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo. 80

Tabela 5.32. Valores de umidade relativa do ar de secagem e de umidade de equilíbrio para as diferentes condições de temperatura no leito de jorro. 83

Tabela 5.33. Valores de difusividade efetiva estimados pelo modelo de Fick, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para a secagem em leito de jorro. 85

Tabela 5.34. Valores da constante de secagem (k) estimados pelo modelo exponencial, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para a secagem em leito de jorro. .. 86

NOMENCLATURA

A	Constante das equações 3.8, 3.9 e 3.12
A_a	Área dos poros (cm^2)
A_b	Área da secção transversal da bandeja (m^2)
A_{cil}	Área da seção cilíndrica do leito (m^2)
A_d	Área da secção transversal do duto (m^2)
A_r	Número de Arquimedes: $Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{\mu^2}$
a_w	Atividade de água
B	Constante das equações 3.7, 3.8 e 3.12
C_{BET}	Constante de BET
C_{GAB}	Constante de GAB
C_p	Calor específico do gás (kcal/kg°C)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
$\overline{d}_p$	Diâmetro médio da partícula (m)
D_c	Diâmetro interno do leito (m)
D_{ef}	Difusividade efetiva (m^2/s)
D_{eq}	Diâmetro equivalente (m)
D_i	Diâmetro da tubulação de entrada do fluido (m)
$(D_c)_{eq}$	Diâmetro equivalente limite do leito (m)
$(D_i)_{eq}$	Diâmetro equivalente para a entrada de ar (m)
E	Desvio relativo médio (%)
g	Aceleração da gravidade ($9{,}81 m/s^2$)
h	Coeficiente de transferência de calor ($kcal/h.m^2.ºC$)
H_0	Altura do leito estático (m)
H_L	Calor de condensação do vapor de água (J/mol)
H_m	Calor da camada molecular da água (J/mol)
H_n	Calor de sorção da camada multimolecular da água (J/mol)
H_{vap}	Calor latente de vaporização da água a T_{bu} (kcal/kg)

IAA Índice de Absorção de Água (g de água/g matéria seca)

IAO Índice Absorção de Óleo (g de óleo/g matéria seca)

ISA Índice de Solubilidade em Água (%)

k Contante de secagem (s^{-1})

k^* Constante das equações 3.6, 3.9 e 3.10

K' Constante da equação 3.3

k_a Constante da equação 3.11

k_b Constante da equação 3.11

K_{GAB} Constante de GAB

l Dimensão característica: semi-espessura (m)

M Massa de partículas no leito (kg)

m_e Massa da amostra quando atingido o equilíbrio (g)

M_{pt} Massa do penetrômetro vazio (g)

m_s Massa seca da amostra (g)

M_s Massa de Amostra (g)

M_{total} Massa total do penetrômetro preenchido com Hg

n Número de camadas moleculares

N Número de pontos experimentais

n' Constante das equações 3.9 e 3.10

n_1 Constante da equação 3.13

n_2 Constante da equação 3.13

n_3 Constante da equação 3.13

N_A Fluxo mássico ($kg/s.m^2$)

Nu Número de Nusselt: $Nu = \frac{h \cdot \overline{d}_p}{\lambda}$

P_r Número de Prandtl: $\Pr = \frac{C_p \cdot \rho_f \cdot \mu_{ar}}{\lambda}$

P Pressão de vapor da água à determinada temperatura

P_0 Pressão parcial do vapor d'água no alimento à determinada temperatura

r Raio (m)

R Constante universal dos gases (J/mol.K)

R^2 Coeficiente de Determinação

R_e Número de Reynolds: $R_e = \frac{\rho_f \cdot \overline{d}_p \cdot v_{ar}}{\mu_{ar}}$

$(\mathrm{Re}_i)_{ms}$ Número de Reynolds na condição de mínimo jorro: $R_e = \frac{\rho_f \cdot \overline{d}_p \cdot u_{ms}}{\mu_{ar}}$

R_H Raio Hidráulico (m)

t Tempo (s)

T Temperatura do ar (K) ou (°C)

T_a Temperatura ambiente (ºC)

T_{bu} Temperatura de bulbo úmido do ar (°C)

U_{ms} Velocidade de jorro mínimo (m/s)

UR Umidade relativa do ar (%)

V Volume de Hg que penetra os poros do material (m^3)

V_a Volume absoluto da amostra (m^3)

v_{an} Velocidade do ar medida pelo anemômetro (m/s)

v_{ar} Velocidade do ar (m/s)

v_b Velocidade do ar que atravessa a bandeja (m/s)

V_{bulk} Volume bulk da amostra (m^3)

V_{Hg} Volume de Hg que ocupa o espaço vazio (m^3)

VI Volume de Intumescimento (mL/g de matéria seca)

V_L Volume do Leito (m^3)

V_o Valores preditos pelo modelo

V_{ol} Volume dos poros (cm^3)

V_p Volume da partícula (m^3)

V_{pred} Valores observados experimentalmente

V_{pt} Volume do penetrômetro (m^3)

V_S Volume de sólido no leito (m^3)

V_v Volume vazio no leito (m^3)

X Umidade do produto (g água/g matéria seca)

X_e Umidade de equilíbrio (g água / g matéria seca)

x_i Fração de massa retida entre duas peneiras consecutivas

X_m Umidade na monocamada molecular (g água / g matéria seca)

X_o Umidade inicial da amostra (g água/g matéria seca)

$\overline{X}_t$ Umidade média no tempo (g água/g matéria seca)

Y Adimensional de umidade

Letras Gregas

ε_m Porosidade do leito

ϕ Esfericidade da partícula

λ Condutividade térmica do gás (kcal/h.m.°C)

μ_{ar} Viscosidade do ar (kg/m.s)

θ Ângulo do cone (°)

ρ_b Densidade bulk do sólido seco (kg/m^3)

ρ_r Densidade real da matriz sólida (kg/m^3)

ρ_s Densidade real do sólido seco (kg/m^3)

ρ_f Densidade do fluido (kg/m^3)

ψ Fator forma da partícula para o leito de jorro (esfericidade)

ΔH_{BET} Entalpia de absorção da monocamada (J/g)

ΔP Queda de pressão (N/m^2)

ΔP_m Queda de pressão máxima no jorro (N/m^2)

$\Delta P_{\min}$ Queda de pressão no mínimo jorro (N/m^2)

ΔP_S Queda de pressão no jorro estável (N/m^2)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a secagem do resíduo sólido industrial proveniente da fabricação de suco de frutas cítricas em um equipamento de leito fixo e de jorro, com a finalidade de produzir fibra dietética, como ingrediente alimentício. Para isso, foi utilizado como matéria-prima o limão da variedade siciliano para obtenção do resíduo sólido o qual foi produzido em escala piloto por método padronizado (extratora, moinho e prensa) e armazenado a 10°C. As isotermas de dessorção do resíduo sólido foram determinadas com a finalidade de se conhecer os valores de umidade de equilíbrio, e foram obtidas através do método gravimétrico estático utilizando soluções salinas saturadas, nas temperaturas de 60, 75 e 90°C. Os dados experimentais foram ajustados a diversos modelos sendo que o modelo de GAB foi o que apresentou o melhor ajuste nesta faixa de temperatura. Para a secagem em leito fixo foi realizado um planejamento experimental fatorial completo 2^2 onde as variáveis independentes estudadas foram: velocidade do ar de 0,5, 0,75 e 1m/s e temperatura do ar de 60, 75 e 90°C. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Fick e os valores de difusividade efetiva obtidos variaram na faixa de 4,72 a $14,6.10^{-10}m/s^2$, foi ajustado também o modelo exponencial e os valores da constante de secagem variaram na faixa de 6,49 a $20,90.10^{-4}s^{-1}$. As respostas do planejamento em relação às propriedades tecnológicas de: índice de absorção de água, índice de solubilidade em água, índice de absorção de óleo e volume de intumescimento não apresentaram diferenças significativas ao nível de significância de 5%. Para a secagem no equipamento de leito de jorro foram determinadas as curvas de secagem do resíduo com um conteúdo inicial de umidade de cerca de 40%, em base úmida, fixando-se uma vazão total de ar de $78,53m^3/h$, que corresponde à uma velocidade de 3,89m/s para a região do jorro e de 1,01m/s para a região do ânulo, altura de leito fixo de 15cm e temperatura do ar de secagem de 60, 75 e 90°C. Os dados experimentais obtidos no secador de leito de jorro foram ajustados ao modelo de Fick e os valores de difusividade efetiva observados variaram na faixa de 2,64 a $4,26.10^{-9}m/s^2$, foi ajustado também o modelo exponencial e os valores da constante de secagem variaram na faixa de 3,5 a $5,4.10^{-3}$ s^{-1}.

Palavras-chaves: resíduo, fibras dietéticas, frutas cítricas, leito de jorro, secagem convectiva

ABSTRACT

This work investigated the drying of by-products of citrus juice manufacture in a convective vertical tray dryer and spouted bed dryer with the purpose of producing dietary fiber as a food ingredient. The raw material used was lemon from the sicilian variety, which solid residue was produced in pilot scale by standardized method (extractor, mill and press) and stored at 10°C. Measurement and modeling of sorption isotherms were used to determine equilibrium moisture content. The isotherms were obtained at three different temperatures (60, 75 and 90°C) using the static method with saturated salt solutions. Experimental data was fitted by several models (BET, GAB, Henderson, Peleg and Oswin). The best fitting was obtained with GAB model. The drying in tray dryer was delineated according to a central composite experimental design (2^2) using as factors: air velocity (0,5, 0,75 and 1m/s) and air temperature (60, 75 and 90°C). The drying kinetics experimental data were fitted using diffusional model and the effective diffusivities values were between 4,72 and $14{,}6.10^{-10}$ m/s^2, presenting good fit to the exponential model, and drying constant varied from 6,49 to $20{,}90.10^{-4}s^{-1}$. The experimental design responses evaluated were related to fibres tecnological properties: water-holding capacity, water solubility, oil-holding capacity and swelling. According to the results, they did not show significant differences at 5% of significance level. In the spouted bed, drying curves were obtained with the material at 40% (wet base), fixing total air flow rate of 78,53 m^3/h, which corresponds to an air velocity of 3,89m/s in spout region and 1,01m/s in downcomer, height of fixed bed of 15cm at 60, 75 and 90°C. The experimental data was fitted using diffusional model and the obtained effective diffusivities varied from 2,64 to $4{,}26.10^{-9}m/s^2$ to spouted bed, showing a good fit to the exponential model, and drying constant varied in the range of 3,5 to $5{,}4.10^{-3}$ s^{-1}.

Keywords: by-products, dietary fibre, citrus fruits, spouted bed, convective drying.

1. Introdução e Justificativa

O processamento de suco de frutas cítricas representa um setor de ponta da agroindústria nacional, atua com alta tecnologia e dispõe de excelente sistema logístico apto a abastecer os 5 continentes. É uma atividade econômica essencial para 322 municípios do estado de São Paulo (responsável por 98% da produção nacional) e 11 municípios do Triângulo Mineiro. A produção no Brasil corresponde a 53% do suco de laranja produzido no mundo e por 80% do suco concentrado que transita pelo mercado internacional. O estado de São Paulo, maior produtor brasileiro de frutas cítricas, deverá colher 353,99 milhões de caixas na safra 2006/07 (ABECITRUS, 2007).

Vários subprodutos com valor comercial são obtidos durante o processo de fabricação de sucos de frutas cítricas, dentre esses subprodutos estão: óleos essenciais (principalmente o limoneno), terpenos, líquidos aromáticos e farelo de polpa cítrica. As cascas, bagaços, membranas, vesículas e sementes são alguns dos resíduos do processamento de sucos, gerados em grande quantidade (50 a 60% das frutas), que são subutilizados na composição de rações animais (ABECITRUS, 2007).

Os resíduos do processamento agroindustrial de frutas e vegetais geralmente contêm grande quantidade de sólidos em suspensão, pH elevado e alto conteúdo de umidade (80-90%). São produzidos em grande quantidade e geralmente decompostos e utilizados como fertilizantes, devido ao seu elevado conteúdo de matéria orgânica (THASSITOU & ARVANITOYANNIS, 2001).

Pérez & Sanchez (2001) fazem algumas considerações sobre a utilização de subprodutos industriais para a produção de fibra alimentar como: folhas de laranja, abacaxi, cana-de-açúcar, soja e farelo de cevada. A preparação dos concentrados de fibras, bem como suas características dependem do tipo de resíduo utilizado, proveniente de frutas, vegetais, legumes ou cereais, uma vez que frutas e vegetais apresentam uma relação fibra solúvel/insolúvel mais equilibrada e portanto de melhor qualidade; a época de colheita; a qualidade microbiológica dos subprodutos e possíveis aplicações de tratamentos para reduzir a carga microbiana; e as características organolépticas correspondentes ao subproduto utilizado, como por exemplo, a presença de sabores amargos nas frutas cítricas por causa da presença de flavonóides. Thebaudin *et al.* (1997) descrevem tanto a importância nutricional da ingestão das fibras como algumas propriedades tecnológicas das fibras utilizadas como ingrediente.

A secagem é a etapa mais importante e de maior custo para a produção de fibras alimentares. Esta etapa aumenta a vida de prateleira da fibra além de reduzir os custos com embalagem e transporte (LARRAURI, 1999).

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem do resíduo sólido de limão siciliano com a finalidade de produzir fibra dietética, como ingrediente alimentício.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Estudar a secagem do resíduo sólido industrial do processamento de suco de frutas cítricas, como o limão siciliano, em leito fixo e em leito de jorro.

2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Obtenção das isotermas de dessorção do resíduo de limão siciliano *in natura*;
- ✓ Estudar a cinética de secagem do produto no equipamento de leito fixo e de leito de jorro;
- ✓ Estudar a fluidodinâmica do resíduo no equipamento de leito de jorro.
- ✓ Caracterizar a fibra alimentar obtida em leito fixo através das análises físico-químicas de: umidade, fibra total, solúvel e insolúvel, pH, acidez, atividade de água.
- ✓ Determinar algumas propriedades tecnológicas das fibras obtidas em leito fixo como: índice de absorção de água (*IAA*) e óleo (*IAO*), índice de solubilidade em água (*ISA*) e volume de intumescimento (*VI*).

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Limão e Lima

3.1.1. Considerações Gerais

As frutas cítricas, botanicamente classificadas como bagas, são frutos superiores com todos os seus tecidos derivados do ovário. Os principais componentes dessas frutas partindo-se do exterior para o interior do fruto são: casca, segmentos e eixo central. A casca é formada pela epiderme ou cutícula, flavedo (porção colorida), glândulas de óleo, pigmentos em cloroplastos, albedo (porção branca que é importante fonte de limoneno e material pectínico) e feixes vasculares. O interior dos segmentos é formado por parede celular, vesículas de suco ou polpa e as sementes (ALBRIGO & CARTER, 1977).

Na Figura 3.1 está apresentado um corte transversal do fruto.

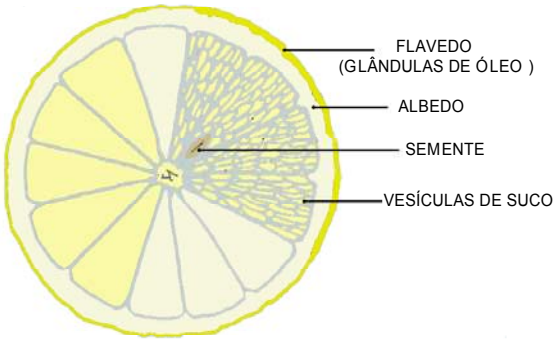


Figura 3.1. Corte transversal do fruto.

O limão siciliano é um tipo de limão da espécie *Citrus limon* L. Burm f. e o limão tahiti é um tipo de lima da espécie *Citrus latifolia* Tan. O limão é caracterizado por sua cor amarela clara e por sua elevada acidez. A fruta limão é geralmente processada em suco bem como são extraídos pectina e óleo de limão. As limas são similares aos limões exceto pelo fruto apresentar coloração verde, ter uma polpa colorida e um distinto aroma e sabor. As limas possuem o maior conteúdo de ácidos de todos as frutas cítricas, no entanto tem menor quantidade de vitamina C e outros nutrientes quando comparados aos limões. Os óleos das frutas cítricas são encontrados em grande quantidade em sacos de

formato oval no flavedo, porção colorida da casca, e age como uma barreira tóxica natural a muitos microorganismos e insetos sendo os óleos compostos primordialmente (mais de 90%) de d-limoneno e em óleos de limão e de lima ocorrem também quantidades significantes de α-pineno (cerca de 5%) (KIMBAL, 1999).

Na Tabela 3.1 é apresentada a composição centesimal da casca do limão.

Tabela 3.1. Composição Centesimal da Casca do Limão.

Composição	***Quantidade (g/100g)***
Carboidratos	16
Proteínas	1,5
Lipídeos	0,3
Cinzas	0,6
Fibra Dietética Total	10,6
Umidade	81,59
Calorias	47kcal

Fonte: Casca de Limão Crua - UNIFESP (2007)

A produção mundial de lima e de limão obteve um crescimento de 8 milhões de toneladas em 1995 para 12,5 milhões de toneladas em 2005. O México é o maior produtor mundial dessas frutas e o Brasil destaca-se no quinto lugar. O estado de São Paulo corresponde a 70% da produção brasileira dessas frutas (CEPEA, 2006). Na Figura 3.2, é apresentado um gráfico com os valores de produção de lima e de limão podendo-se verificar os outros maiores países produtores dessas frutas.

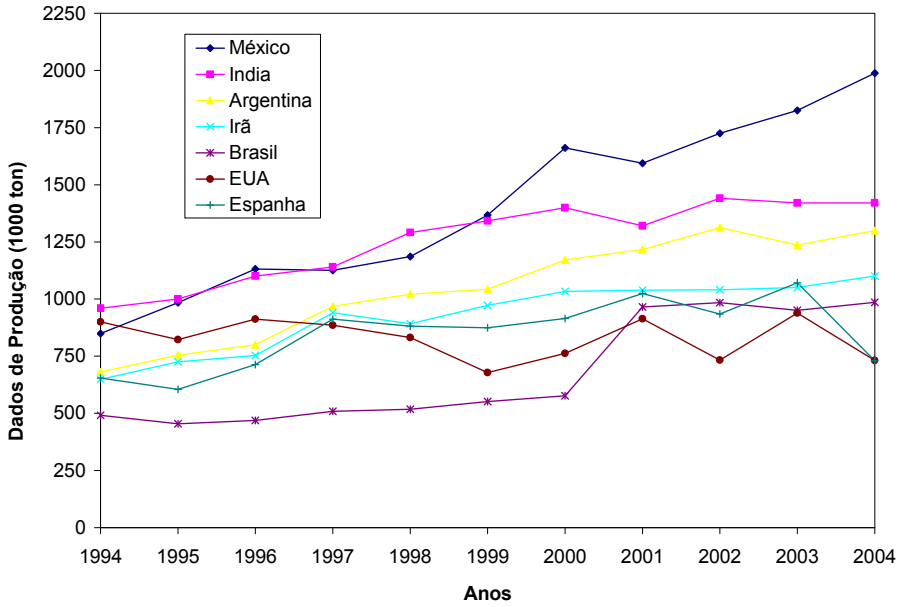


Figura 3.2. Valores de Produção de Lima e de Limão de alguns países (FAO, 2006).

3.1.2. Fibra Alimentar

Fibra dietética é a parte comestível de plantas ou carboidratos que são resistentes à digestão e absorção no intestino delgado dos humanos com fermentação completa ou parcial no intestino grosso. A fibra dietética inclui polissacarídeos, oligossacarídeos, lignina e substâncias associadas à plantas, promovendo efeitos benéficos fisiológicos incluindo laxação, e/ou redução do colesterol, e/ou redução da glicose (AACC, 2001).

As fibras dietéticas são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose e pectina. A celulose é um dos principais constituintes da parede celular dos vegetais superiores, é constituída somente de cadeias não ramificadas de D-glucopiranose ligadas em β(1→4) em número que varia de 100 a 200 resíduos, pode formar regiões de ordem cristalina muito alta o que provavelmente contribui para a sua insolublidade e pouca reatividade. Hemicelulose são polissacarídeos complexos encontrados nas paredes das células vegetais, em estreita associação com celulose e lignina. São moléculas muito menores do que a celulose e são constituídas principalmente por unidades de D-xilose, L-arabinose, D-galactose, D-ramnose e L-ramnose. Pectinas são ácidos pectínicos solúveis em água, com número de metoxilas esterificadas e grau de neutralização variável, encontradas no albedo das frutas cítricas (BOBBIO & BOBBIO, 1995).

Larrauri e colaboradores (1994) determinaram as principais características químicas, físicas e sensoriais de cascas dos seguintes cítricos: laranja valencia (*Citrus sinensis*), grapefruit Marsh sem sementes (*Citrus paradisi*), limão eureka (*Citrus limon*) assim como casca de abacaxi espanhola vermelha (*Ananás comosus*). As cascas dessas frutas apresentaram 65% de conteúdo de fibra dietética total: 30% de fração de fibra dietética solúvel, 10g de água/g matéria seca de capacidade de absorção de água e 4,2KJ/g de valor calórico. A fibra de cítricos apresentou ainda um sabor ligeiramente amargo, com certa acidez e cor amarela com tonalidades claras a esverdeadas.

Grigelmo-Miguel & Martín-Belloso (1999) realizaram a caracterização da fibra da extração de suco de laranja e como resultados verificaram que a fração de fibra solúvel encontrada foi de aproximadamente 13%, a capacidade de absorção de água foi de 10,02, 10,32 e 7,3g de água/g de fibra para as laranjas das variedades navel, salustiana e valencia late, respectivamente. Os valores de capacidade de absorção de óleo foram de 0,863, 1,225 e 1,275g de óleo/g de fibra para as mesmas variedades de laranjas.

Chau & Huang (2003) determinaram a composição química e físico-química de diferentes fibras obtidas da casca de *Citrus sinensis*. Os autores obtiveram como resultado um conteúdo de fibra dietética insolúvel e de fibra dietética solúvel de aproximadamente 476 e de 94,1g/kg respectivamente e, com isso, a fração da fibra dietética insolúvel foi de 83,5% do conteúdo de fibra dietética total. Além disso, o resultado de capacidade de absorção de água e de óleo, da fração insolúvel de fibra, foi de 16,2mL/g e 3,66g/g, respectivamente; isso quer dizer que essas fibras têm aplicação potencial em produtos ricos em fibras que necessitam de boa absorção de água e óleo.

Existem ainda alguns trabalhos relacionados à aplicação de fibra de frutas cítricas em produtos cárneos. Férnandez-Lopes e colaboradores (2004) adicionaram fibras obtidas de albedo de limão, cru e cozido a diferentes concentrações (0, 2,5, 5, 7,5 e 10%) a embutidos (*sausages*) cozidos e curados secos apresentando bons resultados em relação a coloração do produto, isto é, verificou-se um aumento da luminosidade com a adição do albedo, e maior no albedo cru do que no cozido; redução significativa dos níveis de nitrito e conseqüentemente da formação de nitrosaminas (provavelmente devido à reações de nitrito com compostos bioativos presentes no albedo); em uma avaliação sensorial as maiores notas de aceitação foram obtidas pelo produto com adição acima de 5% de albedo cru enquanto que no caso do albedo cozido as maiores notas foram para as amostras com adição de 2,5, 5 e 7,5%. Foi observado também que na presença de

albedo houve uma redução do pH na etapa de secagem que poderia favorecer a liberação de água, diminuindo o tempo de secagem.

Aleson-Carbonell e colaboradores (2005) adicionaram fibra de albedo de limão em hambúrguer e obtiveram bons resultados em relação à retenção de água e gordura, o que reduziu as perdas durante o cozimento. Além disso, o aumento no conteúdo de fibras no hambúrguer constitui um benefício nutricional para o consumidor.

Para a obtenção de produtos com alto teor de fibra alimentar tem-se empregado os mais diversos procedimentos, abaixo na Figura 3.3 está apresentada a metodologia descrita por Larrauri (1999) para processamento de frutas.

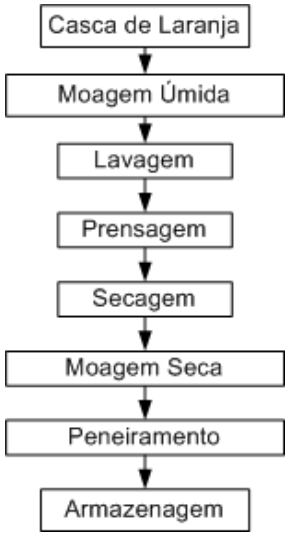


Figura 3.3. Processamento de bagaço para obtenção de Fibra Alimentar (LARRAURI, 1999).

3.2. Isotermas de Sorção

O elevado conteúdo de água presente em frutas e vegetais (cerca de 90%) afeta a manutenção das boas características de qualidade desses produtos porque a água disponível pode servir como solvente para numerosas reações químicas entre os constituintes dissolvidos, além de possibilitar o crescimento de microorganismos. Para a remoção de parte dessa água pode-se utilizar o processo de secagem o qual permite além da preservação desses alimentos, sua redução de peso e volume, diminuindo os custos de armazenamento e transporte (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

A atividade de água, de acordo com a lei de Raoult generalizada, é a relação entre a pressão de vapor do alimento à uma dada temperatura e a pressão de saturação da água pura à mesma temperatura, dada pela Equação 3.1. A atividade de água para qualquer material depende da composição química do produto, do estado de agregação de seus constituintes, do seu conteúdo de água e temperatura (WOLF *et. al*., 1985).

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{UR}{100} \tag{3.1}$$

Onde:

UR = umidade relativa (%)

P = pressão parcial da água no alimento;

P_o = pressão de vapor da água na mesma temperatura.

O valor máximo da atividade de água é 1, para a água pura. Nos alimentos ricos em água, com valores de atividade de água de 0,9, poderão se formar soluções diluídas com os componentes do alimento, que servirão de substrato para microorganismos crescerem; nessa diluição as reações químicas e enzimáticas podem ter sua velocidade diminuída pela redução da concentração dos reagentes. Quando a atividade de água baixa para 0,4-0,8 haverá a possibilidade de reações químicas e enzimáticas rápidas ocorrerem devido ao aumento da concentração dos reagentes, enquanto que a um valor próximo de 0,6, tem-se pequeno ou nenhum crescimento de microorganismos. Em regiões com valores de atividade de água abaixo de 0,3 a velocidade das reações tende à zero, com exceção da oxidação de lipídeos que é mais rápida, e abaixo de 0,3 não há desenvolvimento de microorganismos. Os efeitos da variação da atividade de água também estão relacionados à modificação da consistência dos alimentos, como por exemplo, a compactação de produtos em pó (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

As isotermas de sorção de alimentos mostram a relação de equilíbrio entre o conteúdo de umidade nos alimentos e sua atividade de água à temperatura e pressão constantes (FENNEMA, 1996).

Na Figura 3.4 é apresentada uma curva típica de isoterma de sorção em alimentos.

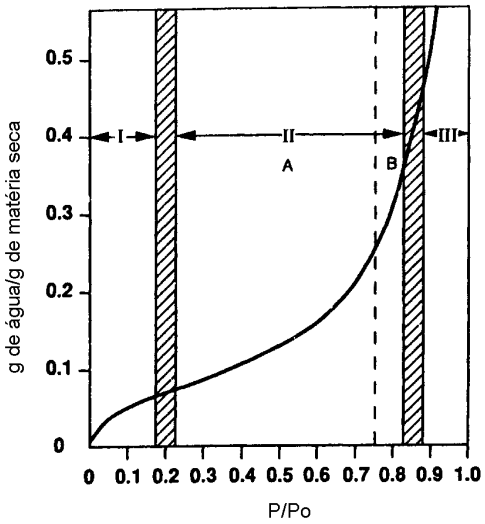


Figura 3.4. Curva típica de Isotermas em Alimentos à temperatura de 20°C (FENNEMA, 1996).

A água presente na Zona I está fortemente ligada e possui pouca mobilidade, não é congelável, não tem capacidade de dissolver solutos e não está presente em quantidade suficiente para ter efeito plasticizante sobre o sólido; simplesmente se comporta como parte do sólido. Entre a Zona I e a II encontra-se a chamada monocamada de BET que corresponde à quantidade de água necessária para formar uma monocamada sobre os grupos altamente polares da matéria seca. A água presente na Zona I geralmente constitui menos de 5% do conteúdo total da água de um alimento. Na junção das Zonas I e II a quantidade de água é suficiente para formar uma verdadeira monocamada de hidratação para as macromóleculas, como as proteínas globulares. Na Zona III a água é congelável, está disponível como solvente e pode promover crescimento de microorganismos; nesta região ela é conhecida como água livre (FENNEMA, 1996).

A forma das isotermas de sorção para a maioria dos alimentos é sigmoidal. Como o comportamento da sorção de água depende de diversos fatores como composição da amostra, estrutura física da amostra (cristalina ou amorfa), pré-tratamentos das amostras, temperatura e metodologia, as isotermas são diferentes para cada tipo de alimento. Por exemplo, frutas e confeitos que possuem grande quantidade de açúcares e outras pequenas moléculas solúveis e não são ricas em materiais poliméricos apresentam isoterma do tipo J (FENNEMA, 1996).

Um produto que alcança sua umidade de equilíbrio pela perda de água está num processo de dessorção, enquanto que um material relativamente seco, quando absorve água de um ambiente com alta umidade, alcança sua umidade de equilíbrio na chamada adsorção. O conteúdo de umidade na dessorção é sempre maior do que os valores na adsorção e essa diferença entre as isotermas é denominada de histerese (BROOKER *et. al*. 1992).

Isotermas de adsorção-dessorção de folhas de *Citrus aurantim* foram determinadas por Ait Mohamed e colaboradores (2005) a 30, 40 e 50°C apresentando forma sigmoidal. A equação modificada de Halsey resultou num melhor ajuste dos dados para as isotermas de dessorção a uma faixa de atividade de água de 0,05-0,9. O modelo de GAB descreveu bem as isotermas de adsorção do produto. A equação de BET resultou num melhor ajuste dos dados tanto para adsorção como para dessorção para valores de atividade de água na faixa de 0,1-0,5.

Isotermas de adsorção-dessorção de folhas de *Citrus reticulata* foram determinadas por Jamali e colaboradores (2006) a 30, 40 e 50°C, apresentando forma sigmoidal. O modelo que melhor se ajustou aos dados de umidade de equilíbrio foi o de GAB, pois apresentou os menores desvios. O modelo de BET modificado teve um bom ajuste aos dados de umidade de equilíbrio para valores de atividade de água abaixo de 0,5.

Isotermas de sorção de casca de limão foram determinadas por Gárcia-Perez e colaboradores (2007) nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C, na faixa de atividade de água de 0,106 a 0,984. A casca do limão foi separada manualmente da polpa, triturada e colocada no secador convectivo de bandeja à temperatura de 40°C. Foram retiradas amostras em diferentes tempos de secagem e armazenadas em potes herméticos até a medida da atividade de água em diferentes temperaturas. O modelo de GAB foi o que obteve melhor ajuste em relação aos dados experimentais.

3.2.1. Modelos Matemáticos

Existem várias equações na literatura que são utilizadas para representar as curvas experimentais de sorção de alimentos, abaixo estão descritas algumas.

- **Modelo de BET** (BRUNAUER *et al*., 1938*)*: Equação baseada no conceito de Langmuir (1918) de adsorção de água na monocamada molecular que foi modificada pelos autores para multicamadas:

$$X_e = \frac{X_m C_{BET} a_w [1-(n+1)(a_w)^n + n(a_w)^{n+1}]}{(1-a_w)[1-(1-C_{BET})a_w - C_{BET}(a_w)^{n+1}]} \quad (3.2)$$

Onde:

n = número de camadas moleculares;

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca (g água/g sólidos secos);

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular (g água/g sólidos secos);

C_{BET} = constante de BET, que está relacionada ao calor de sorção da camada molecular, sendo:

$$C_{BET} = K' \exp\left(\frac{\Delta H_{BET}}{RT}\right) \quad (3.3)$$

Onde:

ΔH_{BET} = entalpia de absorção da monocamada (J/g);

K' = constante da equação;

R = constante universal dos gases (J/mol.K);

T = temperatura (K).

- **Modelo de GAB (Guggenheim – Anderson - De Boer):** constitui uma extensão do modelo de BET, resultando numa equação com três parâmetros, permitindo um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até atividade de água de 0,9. A equação de GAB é descrita como (Van den BERG, 1984):

$$X_e = \frac{X_m C_{GAB} K_{GAB} a_w}{[(1-K_{GAB}a_w)(1-K_{GAB}a_w + C_{GAB}K_{GAB}a_w)]} \quad (3.4)$$

Onde:

C_{GAB} *e* K_{GAB} = constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes, em um dado sítio de sorção:

$$C_{GAB} = c \exp\left[\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right] \quad (3.5)$$

Onde:

H_m = calor da camada molecular da água (J/mol);

H_n = calor de sorção da camada multimolecular da água (J/mol);

c = constante da equação.

$$K_{GAB} = k^* exp\left[\frac{\left(H_L - H_n\right)}{RT}\right] \tag{3.6}$$

Onde:

H_L = calor de condensação do vapor de água (J/mol);

k^* = constante da equação.

- **Modelo de Chung-Pfost:** Modelo baseado na premissa que a variação na energia livre para a absorção está relacionada com o conteúdo de umidade (CHUNG & PFOST, 1967).

$$\ln(a_w) = -\frac{A}{RT}\exp(-BX_e) \tag{3.7}$$

Onde:

A e B = constantes da equação.

Para obter um melhor ajuste Pfost e colaboradores (1976) adicionaram um novo parâmetro ao termo da temperatura, combinado ao parâmetro R. O modelo de CHUNG-PFOST modificado é dado pela Equação:

$$\ln(a_w) = -\frac{A}{T + C}\exp(-BX_e) \tag{3.8}$$

- **Modelo de Henderson:** É uma das equações mais usadas e pode ser escrita como (HENDERSON, 1952):

$$1 - a_w = exp(-k^* \cdot X_e^{\,n'}) \tag{3.9}$$

Onde: k^* e n' = constantes da equação.

Ou sua modificação: $$1 - a_w = exp(-k^* \cdot T \cdot X_e^{\,n'}) \tag{3.10}$$

- **Modelo de Peleg:** Peleg (1993) desenvolveu um modelo com quatro parâmetros para a descrição das curvas de sorção:

$$X_e = K_a a_w^{\,n_a} + K_b a_w^{\,n_b} \tag{3.11}$$

Onde:
K_a, K_b, n_a e n_b = constantes da equação.

- **Modelo de Oswin:** Esse modelo baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal, que é descrita como (CHINNAN e BEAUCHAT, 1985):

$$X_e = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \tag{3.12}$$

Onde:
A e B = constantes da equação.

3.3. Secagem Convectiva

Na secagem térmica de um sólido úmido dois processos ocorrem simultaneamente: o primeiro processo é o de transferência de energia do ambiente para evaporar a umidade da superfície e o segundo processo é o de transferência da água do interior para a superfície do sólido e sua subseqüente vaporização devido ao primeiro processo.

A taxa de secagem é governada pela taxa na qual esses dois processos ocorrem. No primeiro processo, a remoção de água como vapor da superfície do material depende das condições externas de temperatura, umidade do ar, velocidade do ar de secagem, área da superfície exposta e pressão. No segundo processo, o movimento da água internamente dentro do sólido é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e de seu conteúdo de umidade (MUJUMDAR, 1995).

Abaixo, na Figura 3.5 é apresentada a curva típica de secagem para um processo convectivo. No estágio inicial da secagem, a variação do conteúdo de umidade com o tempo é ilustrada pela curva A-B. Depois de um tempo a relação X=f(t) torna-se linear. Nesse período (linha B-C), denominado de período de taxa constante, a taxa de secagem é constante e igual à inclinação dessa curva. A queda linear do conteúdo de umidade com o tempo ocorre até o ponto crítico C. A partir desse ponto, a linha reta se torna uma

curva que se aproxima assintoticamente do conteúdo de umidade de equilíbrio X_e, sendo esta etapa denominada período de taxa decrescente de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

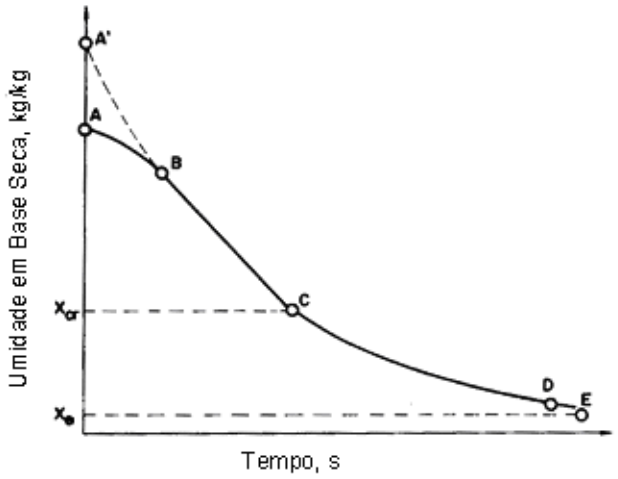


Figura 3.5. Curva típica de secagem convectiva (STRUMILLO & KUDRA,1986).

Os mecanismos de transporte de água no interior dos sólidos durante a secagem, segundo Fortes & Okos (1980) são:

- Difusão líquida devido ao gradiente de concentração;
- Difusão de vapor devido ao gradiente de vapor, causado pelos gradientes de temperatura;
- Movimento líquido devido às forças capilares;
- Fluxo de líquido ou vapor devido à diferença na pressão total, causada pela pressão externa, encolhimento, altas temperaturas e capilaridade;
- Escoamento por efusão que existe quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for compatível com o diâmetro dos poros;
- Movimento líquido em conseqüência da força gravitacional;
- Difusão pela superfície.

Vários métodos de secagem têm sido estudados para obtenção de fibra alimentar. Gonçalves (1996) estudou a secagem ciclônica do resíduo de laranja na faixa de temperatura de 150 a 215°C e vazão de ar de 0,065 a 0,083m^3/s. Como resultado

observou que a secagem utilizando ciclone se apresentou mais eficiente e com menor gasto de energia do que a utilização de um secador pneumático, contudo se fez necessário a recirculação do produto ou a colocação de ciclones em série, o que aumentaria o custo do processo.

Santana (2005) separou algumas frações da laranja (albedo, membrana carpelar e vesícula de suco) e do maracujá (albedo) e realizou a secagem desses produtos em leito fixo (temperatura de 75°C e velocidade do ar de 1m/s) além da desidratação por liofilização. Verificou que as propriedades químicas e físicas das fibras foram influenciadas pelo tratamento térmico e intervalos granulométricos ou distribuição do tamanho das partículas.

Gárcia-Pérez e colaboradores (2006) estudaram a aplicação de ultra-som de alta potência para a desidratação de cubos de cenoura e de cilindros de casca de limão. Realizaram a secagem dos produtos em uma câmara a 40°C e velocidade do ar variando entre 0,6 e 10m/s, combinando também potência ultra-sônica. Para os cilindros de casca de limão (com 19mm de diâmetro e 10mm de espessura) observaram que pequenas velocidades do ar (0,6m/s) não afetaram o campo ultra-sônico que pôde então ser suficiente para aumentar a taxa de secagem do produto, contudo à velocidades do ar maiores do que 7m/s o campo ultra-sônico teve sua intensidade reduzida à um nível abaixo do necessário para produzir efeito significativo na secagem. Os autores concluíram que a influência do ultra-som na taxa de secagem depende, quantitativamente, da velocidade do ar e do tipo, tamanho e forma da amostra; além disso, indicam a aplicação do ultra-som em combinação com secador de leito fluidizado.

A composição final da fibra alimentar é mais dependente do processo industrial utilizado do que do tipo de fruta utilizada (MARÍN *et al*., 2007), isto é, há diferenças entre as fibras obtidas de diferentes resíduos de produção, como por exemplo os resíduos provenientes de indústrias químicas (extração de flavonóides e óleos essenciais), os advindos das indústrias de enlatados (marmelada) e do resíduo gerado na fabricação de sucos.

Larrauri (1999) cita, por exemplo, o uso do cilindro rotativo e do secador de bandeja para a produção de fibra alimentar, contudo para escolher o método de secagem mais adequado é necessário observar o conteúdo de umidade e o teor de açúcar do material, além disso, o custo de operação do processo. De acordo com o autor, o uso do

drum dryer é vantajoso pelo baixo custo operacional, no entanto a qualidade do produto é afetada pela sua aglomeração e excessivo escurecimento.

Um problema levantado por diversos autores é o efeito da secagem nos componentes bioativos (como os carotenóides) presentes em produtos vegetais, cujas propriedades funcionais podem ser reduzidas (LARRAURI, 1999; LARIO *et al*., 2004).

3.3.1. Cinética de Secagem

3.3.1.1. Período de Taxa Constante de Secagem

Neste período, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido e, portanto, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem através da equação de transferência de massa ou da equação de transferência de calor. A pressão de vapor da água na superfície do material é constante e, conseqüentemente, a temperatura do material é igual à temperatura de bulbo úmido. Desprezando-se a transferência de calor por condução e radiação, a taxa de secagem é dada por (CRANK, 1975):

$$N_A = \frac{h(T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \tag{3.13}$$

Onde:

N_A = Fluxo mássico (kg/h.m^2);

h = coeficiente de transferência de calor (kcal/h.m^2.ºC);

T_a = temperatura ambiente (ºC);

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido do ar (ºC);

H_{vap} = calor latente de vaporização da água a T_{bu} (kcal/kg).

As equações existentes para a avaliação do coeficiente de transferência de massa e de calor são empíricas, isto é, são avaliadas através de dados experimentais. Para as transferências em convecção forçada, o coeficiente é obtido a partir de uma relação adimensional de semelhança tendo geralmente a seguinte forma:

$$Nu = n_1 \cdot \mathrm{Pr}^{n_2} \cdot \mathrm{Re}^{n_3} \tag{3.14}$$

As constantes (n_1, n_2 e n_3) adquirem diferentes valores em função da geometria do produto, do modo como se faz o contato ar-produto (partícula empacotada, partícula isolada, etc.), da velocidade do ar e de suas propriedades físicas. Porém, é preciso utilizar estas relações com prudência, pelo menos por duas razões: o coeficiente é avaliado globalmente, já que o escoamento do ar não é homogêneo sobre a superfície do produto; as transferências de calor são influenciadas pela evaporação da água na superfície do produto.

3.3.1.2. Período de Taxa Decrescente de Secagem

Uma das teorias utilizadas para explicar o comportamento da secagem no período de taxa decrescente é a Teoria Difusional. Lewis (1921) e Sherwood (1929) foram os primeiros a analisar a secagem como um fenômeno controlado pelo mecanismo de difusão interna de água líquida, descrito pela 2ª Lei de Fick, e apresentado na Equação 3.15:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{ef} \cdot \nabla X \right) \tag{3.15}$$

Crank (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Em sistemas de coordenadas retangulares (x, y e z), a equação de difusão é expressa como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial z} \right) \tag{3.16}$$

Assumindo a forma geométrica de uma placa plana infinita, onde a transferência de umidade durante a secagem em leito fixo é predominantemente unidirecional e considerando a difusividade efetiva constante, a Equação 3.16 se reduz à Equação 3.17:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \tag{3.17}$$

Desprezando o encolhimento do material durante a secagem e a resistência externa ao transporte de massa, e considerando que na interface a umidade seja

constante e igual à umidade de equilíbrio, as condições de contorno e inicial para a umidade *X* são:

$$X = X_o \qquad \text{em } t = 0 \qquad 0 < y < l$$
$$X = X_e \qquad \text{em } y = l \qquad t > 0$$
$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial \mathrm{y}} = 0 \qquad \text{em } y = 0 \qquad t > 0$$

Assim, a média da solução analítica da Equação 3.17 é dada pela Equação 3.18 (CRANK, 1975):

$$\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \frac{\pi^2 D_{ef}}{4l^2} t \right] \tag{3.18}$$

Onde:

$\overline{X}_t$ = umidade média no tempo (g água/g matéria seca);

X_e = umidade de equilíbrio (g água/g matéria seca);

X_o = umidade inicial da amostra (g água/g matéria seca);

$\left(\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} \right)$ = adimensional de umidade;

D_{ef} = difusividade efetiva (m^2/s);

t = tempo (s);

l = semi-espessura (m).

Para as condições em que *l* é pequeno e *t* é grande, os termos da Equação (3.18) correspondentes a *i* >0 são desprezíveis. Sob estas condições, tem-se a Equação 3.19:

$$\ln\left(\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} \right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4l^2} \tag{3.19}$$

Onde, a difusividade efetiva pode ser obtida através da inclinação da reta do gráfico de $\ln\left(\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} \right)$ *versus t*.

No caso de outras geometrias a média da solução analítica da equação da difusão é:

Para esfera:

$$\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{i=0}^{\infty}\frac{1}{i^2}\exp\left[-i^2 \cdot \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2}t\right] \tag{3.20}$$

Para cilindro:

$$\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{4}{a^2}\sum_{i=0}^{\infty}\frac{1}{b_n^2}\exp\left[-b_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t\right] \tag{3.21}$$

A difusividade efetiva da umidade é uma importante propriedade de transporte, sendo útil na análise das operações de processamento de produtos alimentícios como a secagem. Porém, devido à complexa composição e a estrutura física dos alimentos, não são conseguidas estimativas precisas desta propriedade, sendo assim necessárias medidas experimentais (SARAVACOS & ROUZEOUS, 1984).

Modelos empíricos também têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem de vários produtos. LEWIS (1921) apresentou um modelo exponencial que assume que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre no material:

$$\frac{dX}{dt} = -k\left(X_t - X_e\right) \tag{3.22}$$

Onde: k = constante de secagem (s^{-1}).

Essa equação é a expressão da lei de resfriamento de Newton, se for levado em conta que toda a resistência ao transporte de umidade encontra-se na camada limite, desconsiderando-se os efeitos no interior do material (PINTO e TOBINAGA, 1996). A equação (3.22) é normalmente utilizada na forma integrada e é conhecida como modelo exponencial:

$$\frac{\overline{X}_t - X_e}{X_o - X_e} = exp\left(-kt\right) \tag{3.23}$$

3.3.2. Leito de Jorro

A técnica de secagem em leito de jorro foi desenvolvida inicialmente para a secagem de grãos (MATTHUR & GISHLER, 1955). Mais recentemente, estudos têm sido feitos com o objetivo de secar pastas e líquidos utilizando inertes (CUNHA *et al*., 2000; PASSOS *et al*., 2004) bem como para o uso em processos de recobrimento de sólidos (ROCHA *et al*., 1995).

O leito de jorro é composto por três regiões distintas: o jorro, o ânulo e a fonte (MATHUR & EPSTEIN, 1974). Na Figura 3.6 há uma figura representativa da transição de regime de um leito fixo para um leito de jorro.

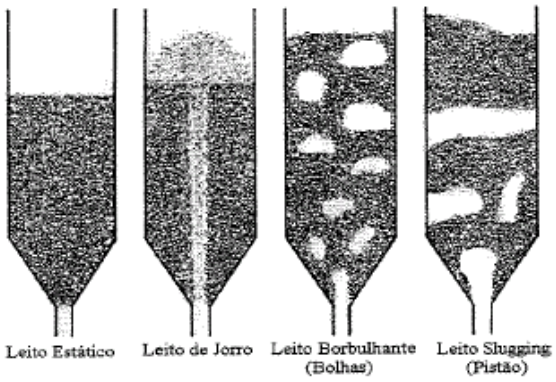


Figura 3.6. Transição de Regimes de Escoamento.

O jorro ou região central (fase diluída) apresenta alta porosidade, em torno de 0,9. Nessa região os sólidos possuem um movimento ascendente concorrente com o fluido. O ânulo ou região anular corresponde à fase densa, com movimento descendente de sólidos e com percolação contracorrente do fluido. A fonte é a região superior ao ânulo onde as partículas movimentam-se em regime desacelerado do jorro, caindo no ânulo.

Principais características desse tipo de leito: altas taxas de recirculação de sólidos, mistura intensa das partículas, contato íntimo gás-partícula, altas taxas de transferência de calor e massa e diâmetro mínimo de partícula para jorro de 1mm.

Na Figura 3.7 está apresentada a curva típica da transição do leito fixo para o leito de jorro. À baixas vazões, o gás simplesmente atravessa sem perturbar as partículas e

desse modo a queda de pressão aumenta com o aumento da vazão de gás (A-B). Ao longo da curva A-B há um ponto no qual a vazão de ar é tão alta a ponto de empurrar as partículas da vizinhança da entrada do ar, formando um arco compactado que oferece grande resistência ao fluxo de gás. Aumentando a vazão de gás a cavidade se alonga para um jorro interno, de forma que a queda de pressão no leito aumente até seu valor máximo no ponto B (Queda de Pressão Máxima no jorro).

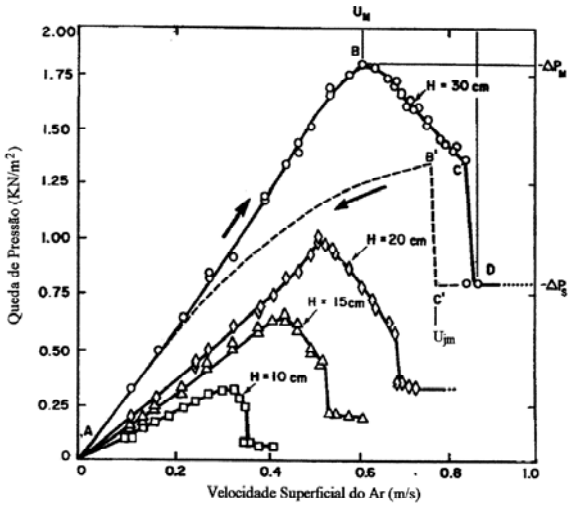


Figura 3.7. Curva típica de transição leito fixo para leito de jorro para distintas alturas de leito estático (H) (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

Quando a vazão é aumentada além do ponto B, a altura da cavidade interna se torna grande em comparação ao leito empacotado acima dela, com isso a queda de pressão diminui segundo a linha B-C. Quando o ponto C é atingido, uma quantidade de partículas já foi tirada da região central e ocorre uma expansão do leito, este ponto C é chamado de jorro incipiente que é o ponto onde o jorro interno rompe a superfície do leito. Neste momento, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno diminui abruptamente causando uma diminuição da queda de pressão até o ponto D, onde o leito se torna móvel e o jorro estável.

Aumentando-se ainda mais a vazão, o gás adicional simplesmente passa pela região do jorro, tornando a fonte mais alta sem qualquer efeito significativo na queda de pressão total, logo a queda de pressão além do ponto D se mantém constante. Os valores da velocidade de jorro incipiente (C) e do início do jorro (D) não são exatamente reprodutíveis. Contudo, pode-se obter a velocidade de jorro mínimo diminuindo-se a velocidade do gás lentamente. O leito se mantém em jorro até o ponto C' que representa

a condição de jorro mínimo. Uma pequena redução da velocidade do gás causa o colapso do jorro e a queda de pressão muda para B'. Diminuindo-se mais a vazão a queda de pressão cai de acordo com B'-A. A curva agora fica abaixo da obtida, visto que a energia requerida pelo gás para penetrar nos sólidos não é mais consumida durante o colapso do jorro.

Os leitos de jorro convencionais (cônico, cilíndrico e cone-cilíndrico) são eficientes como sistemas de contato gás-sólido, mas apresentam problemas de ampliação de escala, ou seja, o jorro estável é obtido para uma faixa pequena de dimensões do equipamento.

Mujumdar (1984) propôs um leito modificado para melhorar o problema de ampliação de escala, o leito de jorro bidimensional, de geometria retangular e com base inclinada. Com esta geometria a ampliação de escala reduz-se a simples extensão de uma dimensão usada em escala piloto, visto que as condições térmicas e hidrodinâmicas são mantidas constantes.

Abaixo são apresentadas algumas equações para descrever parâmetros importantes para o leito de jorro do tipo cone-cilíndrico como: velocidade mínima de jorro, queda de pressão máxima no jorro, queda de pressão no jorro estável e queda de pressão na velocidade mínima de jorro.

Na Tabela 3.2 está apresentada uma equação empírica para a determinação da velocidade mínima de jorro, que é a velocidade acima da qual ocorre o regime fluidodinâmico do jorro.

Tabela 3.2. Velocidade Mínima de Jorro.

Autor	Parâmetro	Equação
Tsvik *et al*. (1967)	$\left(\mathrm{Re}_i\right)_{ms}$	$\left(\mathrm{Re}_i\right)_{ms} = 0{,}4 \cdot \left(Ar\right)^{0{,}52} \cdot \left(\frac{H_0}{D_i}\right)^{1{,}24} \cdot \left(\frac{tg\theta}{2}\right)^{0{,}42}$

Onde as faixas de variáveis são: $\overline{d}_p$ = 1,5 a 4mm, H_0: altura do leito estático = 10 - 50cm, D_i: diâmetro da tubulação de entrada do fluido = 2 a 4,2cm, θ: ângulo do cone = 20 a 50°, U_{ms} = velocidade de jorro mínimo, ρ_b= 780 a 840 kg/m^3 (densidade bulk) e ρ_s= 1650 a 1700 kg/m^3 (densidade real).

O pico da queda de pressão, que ocorre na curva de queda de pressão *versus* vazão de gás, pode ser atribuído à energia requerida pelo gás para romper o leito empacotado e formar um jorro interno na parte inferior do leito. Se este jorro interno vai se desenvolver para um leito de jorro estável ou não dependerá de condições como: tamanho da partícula, diâmetro do orifício de entrada do ar, altura do leito e etc. Na Tabela 3.3 está apresentada uma equação para determinação da queda de pressão máxima no jorro.

Tabela 3.3. Queda de Pressão Máxima no Jorro.

Autor	Parâmetro	Equação
Pallai & Nemeth (1969)	ΔP_m	$\Delta P_m = H_0 \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot (1-\varepsilon) \cdot g = H \cdot \rho_b \cdot g$

Onde as faixas de variáveis são: D_c = diâmetro interno do leito =10 – 30cm e H_0/D_c >1

Na Tabela 3.4 está apresentada uma equação para determinação da queda de pressão no jorro estável.

Tabela 3.4. Queda de Pressão no Jorro Estável.

Autor	Parâmetro	Equação
Pallai & Nemeth (1969)	ΔP_s	$\frac{(\Delta P_s)}{\Delta P_m} = 0{,}8 - 0{,}01 \cdot \frac{D_c}{D_i}$

Onde as faixas de variáveis são: D_c = diâmetro interno do leito = 15,2 – 61cm.

Na Tabela 3.5 está apresentada uma equação para determinação da queda de pressão no mínimo jorro.

Tabela 3.5. Queda de Pressão no Mínimo Jorro.

Autor	Parâmetro	Equação
Malek & Lu (1965) apud Massarani (1987)	$\Delta P_{\min}$	$\Delta P_{\min} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M \cdot g}{A_{cil}}$

Onde as faixas de variáveis são: $\overline{d}_p$ = 4 a 6mm, Θ = 60°, Ψ = esfericidade da partícula para o leito de jorro = 0,8 a 0,9, ρ= 1110 a 1190 kg/m^3, A_{cil} = área da seção cilíndrica do leito (m^2), M = massa de partículas no leito (kg)

As equações apresentadas até o momento foram obtidas para leitos do tipo cone-cilíndrico, contudo, para a geometria bi-dimensional deve-se introduzir a definição de diâmetro equivalente para a entrada de ar e limite do leito, $(D_i)_{eq}$ e $(D_c)_{eq}$, respectivamente onde:

$$D_{eq} = 4 \cdot Rh \tag{3.24}$$

No qual:

$$Rh = \frac{\text{área de escoamento}}{\text{perímetro molhado}} \tag{3.25}$$

Dessa forma a equação para a determinação da velocidade mínima de jorro torna-se (TARANTO, 1992):

$$\left(\mathrm{Re}_i\right)_{ms} = 0{,}4 \cdot \left(Ar\right)^{0{,}52} \cdot \left(\frac{H_0}{(D_i)_{eq}}\right)^{1{,}24} \cdot \left(\frac{tg\theta}{2}\right)^{0{,}42} \tag{3.26}$$

3.3.3. Classificação de Pós

Os pós podem ser classificados em 4 grupos de acordo com suas propriedades (GELDART, 1986).

Grupo A: partículas muito finas, sensíveis às forças externas, com diferenças apreciáveis entre a velocidade mínima de borbulhamento e a mínima de fluidização;

Grupo B: partículas de tamanho intermediário, com formação de bolhas à velocidade incipiente de fluidização. Apresentam mistura moderada de partículas;

Grupo C: partículas de baixa densidade, finas (geralmente menor do que 20μm) e coesivas com fortes forças interparticulares; extremamente difíceis de fluidizar, com formação de canais e sem a formação de bolhas. Proporcionam baixa expansão do leito e pobre mistura dos sólidos os quais conseqüentemente promovem menor transferência de

calor comparando-se aos pós dos grupos A e B. A fluidização pode ser melhorada pelo uso de agitadores mecânicos ou vibratórios.

Grupo D: partículas irregulares e fluidizáveis, de alta densidade, requerem alta velocidade para fluidizar e proporcionam baixa expansão do leito e baixa mistura dos sólidos, produzem leito de jorro.

Na Figura 3.8 está apresentado o gráfico de caracterização de partículas de acordo com Geldart (1986). A Tabela 3.6 apresenta um resumo das propriedades típicas das diferentes classes de pós:

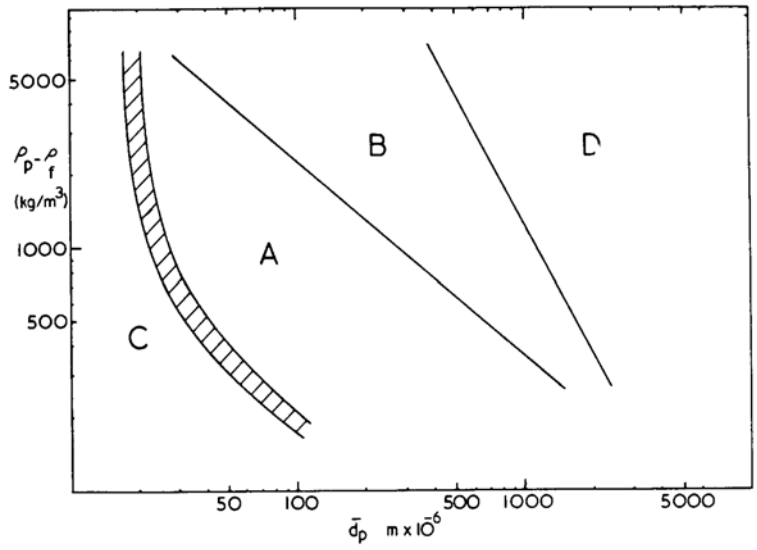


Figura 3.8. Caracterização de Partículas (GELDART,1986).

Tabela 3.6. Classificação de pós de Geldart.

GRUPO → *	**C**	**A**	**B**	**D**
***Característica* mais relevante**	coesivo, difícil fluidização	possui uma faixa de fluidização não-borbulhante	inicia borbulhamento a Umf	sólidos grossos
Sólidos Típicos	farinha de trigo, cimento	craking catalítico	areia de construção	cascalho, grãos de café
Propriedades				
Expansão do leito	baixa devido à canalização, pode se tornar alta quando fluidizado	Alta	Moderada	Baixa
Taxa de de-aeração	Inicialmente rápida, em seguida exponencial	Lenta, linear	Rápida	Rápida
Propriedades das bolhas	Sem bolhas, somente canalização	As bolhas quebram e coalescem, tamanho de bolha máximo	Sem limites de tamanho	Sem limites de tamanho
Mistura de sólidos	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa
Gás backmixing (U-Umf)	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa
Jorro	Não	Não	Somente na superfície	Sim, mesmo em leitos profundos
Efeito nas propriedades				
Tamanho médio da partícula dentro do grupo	Coesividade aumenta com o aumento do d_p	propriedades melhoram à medida que diminui o tamanho	propriedades melhoram à medida que diminui o tamanho	Não conhecido
Distribuição do tamanho da partícula (d_p)	Não conhecido	Aumento < 45 μm fração melhora as propriedades	Nenhum	Aumenta separação
Aumento na pressão, temperatura, viscosidade e densidade do gás	provavelmente aumenta	definitivamente aumenta	incerto, há alguma possibilidade	incerto, há alguma possibilidade

*Aumento de tamanho e densidade

Fonte: Geldart (1986).

3.3.4. Considerações Importantes

Algumas características dos sólidos são importantes para o estudo fluidodinâmico entre gás-partícula como o seu tamanho (ou diâmetro equivalente) e sua esfericidade.

Para partículas não esféricas, define-se o diâmetro da partícula como o diâmetro equivalente ao de uma esfera de igual volume que o da partícula dado pela Equação 3.27 (MC CABE *et al*.,1985).

$$d_p = \left(\frac{6 \cdot V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.27}$$

Onde: V_p = Volume da partícula.

Em muitos casos, além das partículas não serem esféricas, elas possuem tamanhos variados, sendo necessário obter um diâmetro médio de partícula ($\overline{d}_P$) para toda a amostra, para isso realiza-se uma distribuição de tamanho. Um método comumente utilizado é o peneiramento, que consiste em fazer passar a partícula através de malhas progressivamente menores até que a partícula fique retida. O tamanho da partícula estará compreendido entre a medida da malha que a reteve e a da imediatamente anterior, sendo o diâmetro médio (d_i) igual à média aritmética das aberturas das duas peneiras. O diâmetro médio da partícula pode ser calculado através da Equação 3.28.

$$\overline{d}_p = \frac{1}{\sum_{i=1} \frac{x_i}{d_i}} \tag{3.28}$$

Onde: x_i = fração de massa retida entre duas peneiras consecutivas.

Outra característica importante dos materiais particulados é a sua esfericidade (ϕ), supondo o mesmo volume *V*, definida pela Equação 3.29.

$$\phi = \left(\frac{\text{área superficial da esfera}}{\text{área superficial da partícula}} \right)_V \tag{3.29}$$

A esfericidade pode ser determinada com o auxílio do gráfico indicado por Kunii & Levenspiel (1991), conforme Figura 3.9, que relaciona a esfericidade em função da porosidade para leitos com empacotamento frouxo, normal ou denso.

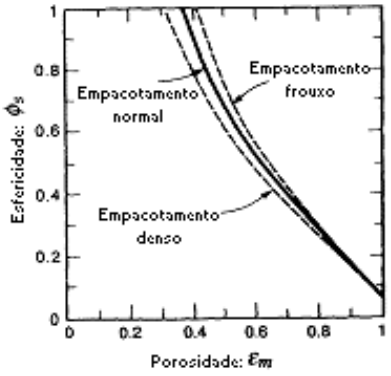


Figura 3.9. Esfericidade em função da porosidade para leitos com empacotamento frouxo, normal ou denso (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

A porosidade do leito, ou fração de vazios, é definida através da Equação 3.30:

$$\varepsilon_m = \frac{V_V}{V_L} = 1 - \frac{V_S}{V_L} \tag{3.30}$$

Onde:

V_V = volume vazio no leito (m^3),

V_S = volume de sólido no leito (m^3) e

V_L = volume do leito fixo (m^3).

4. Material e Métodos

4.1. Matéria-prima

Para a realização desse trabalho foi utilizado limão da variedade Siciliano fornecido pela Fazenda Dois Irmãos S. A., localizada na cidade de Araraquara – SP, em vários lotes.

4.2. Métodos

Na Figura 4.1 está esquematizado o fluxograma para obtenção do resíduo sólido, em planta piloto, em bateladas de 10kg de bagaço. Inicialmente, foram realizadas as determinações analíticas na matéria-prima, conforme está descrito no item 4.3 a 4.5 O estudo da secagem do resíduo sólido foi realizado em um secador de leito fixo e então foram realizadas as determinações analíticas nas fibras de acordo como o item 4.4, 4.5 e 4.7. Em uma segunda etapa foi realizado o estudo da secagem do resíduo de limão siciliano no equipamento de leito de jorro.

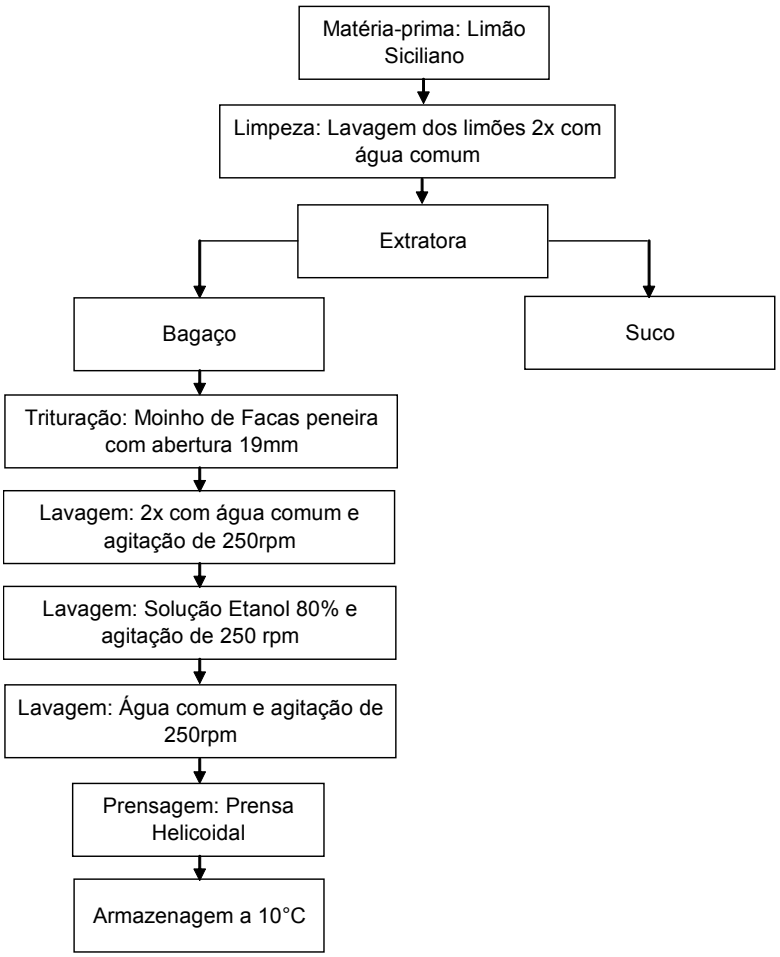


Figura 4.1. Fluxograma para obtenção do resíduo sólido.

4.2.1. Produção das Fibras

Abaixo encontra-se a descrição detalhada dos procedimentos que foram realizados para obtenção das fibras provenientes do limão siciliano.

4.2.1.1. Limpeza das Frutas

Inicialmente as frutas foram lavadas 2 vezes em água corrente para limpeza e remoção de sujidades.

4.2.1.2. Extratora

As frutas foram levadas à extratora modelo OTTO 1800, marca CENTENÁRIO, para separação do suco e do bagaço. A extratora processa uma variedade grande de tamanhos de frutas cujo diâmetro varia de 2-½" a 3-7/8", possui desenho sanitário, não há

partes móveis, a capacidade do reservatório de bagaço é de 18kg e a capacidade do reservatório de suco é de 13 litros. Abaixo na Figura 4.2 encontra-se o desenho da extratora industrial de suco que tem uma capacidade de processamento de 2 a 7 toneladas de frutas cítricas por dia e ao lado o detalhe dos copos que são iguais aos da extratora utilizada no presente trabalho.

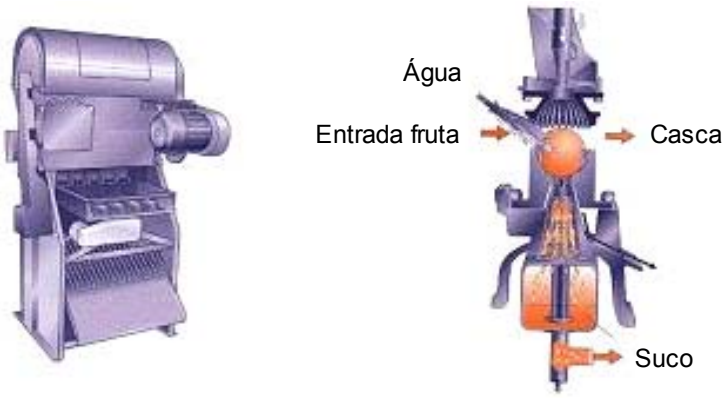


Figura 4.2. Extratora industrial e detalhe dos copos.

4.2.1.3. Trituração Úmida

A moagem úmida foi realizada num moinho de facas marca TIGRE modelo Q4 Inox com peneira de abertura de 19mm.

4.2.1.4. Lavagem do material

O bagaço triturado foi lavado por 2 vezes com água comum e agitação cujo agitador possui um eixo do tipo âncora com pás duplas quadradradas, à velocidade de agitação de 250rpm, essa primeira etapa teve a finalidade de remover açúcares. Uma segunda etapa de lavagem foi feita com solução de etanol 80% e agitação de 250rpm para inativação das enzimas presentes naturalmente na fruta. Um terceira etapa de lavagem foi feita com água para remoção da solução etanólica.

4.2.1.5. Prensagem

A prensagem do bagaço triturado e lavado foi feita numa prensa helicoidal, atingindo um conteúdo de umidade de cerca de 85%, em base úmida, o bagaço foi dividido em lotes de 1kg e armazenado a 10°C até a etapa de secagem.

4.2.1.6. Secagem

A etapa de secagem foi realizada em um primeiro momento em um secador de leito fixo descrito no item 4.8.1 e depois em um secador de leito de jorro descrito no item 4.8.2.

4.2.1.7. Moagem Seca

A moagem do material seco foi feita em moinho facas marca MARCONI, modelo MA-340, através de um passagem pelo equipamento. Este material triturado pode ser chamado de fibra alimentar.

4.2.1.8. Armazenamento

As fibras secas foram acondicionadas em potes de vidro hermeticamente fechados e acondicionadas em dessecadores até as análises posteriores.

4.3. Determinações Analíticas do Resíduo Sólido

4.3.1. Umidade

A umidade da matéria-prima foi determinada em estufa à vácuo a 70°C por 24h, em triplicata, segundo o método 32.1.02 da AOAC (1997).

4.3.2. Cinzas

As amostras foram incineradas em mufla a 550°C por aproximadamente 5 horas (AOAC, 1997).

4.3.3. Proteínas

As proteínas foram estimadas pelo método micro-Kjeldahl (AOAC,1997). Considerando-se que em média as proteínas possuem 16% de nitrogênio, este é convertido para quantidade de proteína usando um fator igual a 6,25.

4.3.4. Lipídeos

A determinação de lipídeos foi realizada de acordo com o método de BLIGH & DYER (1959), que se baseia na extração de gordura a frio, utilizando uma mistura de três solventes: clorofórmio, metanol e água (1:2:0,8).

4.3.5. Atividade de Água

Foi utilizado um analisador de atividade de água (DECAGON, série 3 TE) a temperatura de 25°C.

4.3.6. pH

A determinação da concentração hidrogeniônica (pH) foi realizada com potenciômetro nas amostras em suspensão a concentração de 10% (p/p) em água.

4.4. Caracterização Granulométrica do Resíduo Sólido e das Fibras

Foi feita através do peneiramento do resíduo seco com peneiras da Série Tyler. Foram utilizadas as seguintes peneiras 3/8'',1/4'', 4, 7, 8, 9, 10, 14, 20, 30, 40 e 50mesh) e quando se passou de uma peneira para a imediatamente superior, por exemplo, da peneira de 14 mesh (abertura de 1,19mm) para a de 10 mesh (abertura de 1,68mm), a área da abertura foi multiplicada por dois e, portanto, o lado da malha foi multiplicado por $2^{1/2}$.

4.5. Densidade do Resíduo Sólido e das Fibras

4.5.1. Densidade real por picnometria a gás hélio

O equipamento utilizado para a determinação da densidade real das fibras (obtidas após a moagem do resíduo sólido) e do resíduo sólido foi o picnômetro a gás hélio (MICROMERITICS, modelo AccuPc 1330).

A picnometria a gás consiste em injetar gás hélio em um compartimento de volume conhecido contendo a amostra e depois fazer este gás expandir-se para uma outra câmara, também de volume conhecido. Dois parâmetros são importantes na análise de picnometria a gás: a pressão de injeção do gás no compartimento e a taxa de equilíbrio do gás. Á medida que as moléculas de gás ocupam os espaços vazios no material, a

pressão no compartimento contendo a amostra diminui. Quando a taxa de variação da pressão se torna menor do que o valor estipulado de taxa de equilíbrio, dada em psi/min, o equipamento realiza a medida de pressão. A taxa de equilíbrio do gás representa o tempo de contato do gás com a amostra e essa taxa deve ser pequena pois assim proporcionará maior tempo de contato entre o gás e a amostra, permitindo que as moléculas de gás se difundam pelo material, penetrando nos poros e produzindo melhores resultados. Foram utilizados os seguintes parâmetros: 19,5psig para a pressão exercida na câmara de amostra, 0,001psi.min^{-1} para a taxa de equilíbrio, 20 purgas num total de 10 corridas para cada amostra.

As amostras de fibra e de resíduo sólido, acondicionadas em dessecador, foram pesadas e então colocadas na câmara para a realização das purgas. O gás foi injetado até que o compartimento atingisse a pressão de injeção, definida pelo operador, e essa entrasse em equilíbrio. Ao efetuar-se a medida, foi aberta uma válvula e o gás foi para a câmara de expansão, de volume conhecido. Após isso o gás foi injetado para o ambiente.

O resultado da análise foi apresentado na forma de tabela contendo os valores de volume (cm^3) e densidade da amostra (g/cm^3), bem como seus respectivos desvios padrão.

4.5.2. Densidade bulk e real por porosimetria de Mercúrio

O equipamento utilizado foi o Autopore III (MICROMERITICS), o qual pode detectar poros de no mínimo 6nm.

A técnica de porosimetria consiste na intrusão de mercúrio nos poros de um material com um aumento de pressão. Medindo-se o volume do mercúrio intrudido a cada valor de pressão previamente escolhido, obtém-se uma distribuição do volume dos poros.

O porosímetro por intrusão de mercúrio opera em dois estágios: o primeiro ocorre em baixa pressão (até 30psi) e o segundo, em alta pressão (até 30000psi). A tensão superficial do mercúrio é de 485dyna/cm. Os parâmetros utilizados para baixa pressão foram: tempo de equilíbrio de 30 segundos após cada aumento de pressão, pressão de degaseificação do sistema de 50µm de Hg, pressão de enchimento de 2,08psia. Para a análise de alta pressão foi utilizado um tempo de equilíbrio de 30 segundos e um volume máximo de intrusão de 100cm^{3}g^{-1}.

Para a determinação da densidade bulk foi necessário obter o volume total da amostra cujo valor é dado pelo software, antes do preenchimento com mercúrio, e então dividir a massa da amostra por este volume. O volume da amostra foi encontrado subtraindo-se o volume de mercúrio que ocupa o espaço vazio (V_{Hg}) do volume do penetrômetro preenchido (V_{Pt}). A determinação do volume exige a medida da massa do penetrômetro vazio (M_{pt}), a massa da amostra (M_s) e a massa total do penetrômetro preenchido com mercúrio (M_{total}), dada pela Equação 4.1.

$$V_{Hg} = \frac{M_{Hg}}{\rho_{Hg}} = \frac{M_{Total} - M_{pt} - M_s}{\rho_{Hg}} \tag{4.1}$$

Se o volume bulk da amostra (V_{bulk}) é o volume do penetrômetro menos o volume de mercúrio (V_{Hg}), a densidade bulk (ρ_{bulk}) da amostra pode ser obtida através da Equação 4.2.

$$\rho_{bulk} = \frac{M_s}{V_{pt} - V_{Hg}} \tag{4.2}$$

O volume absoluto da amostra (V_a) é encontrado subtraindo-se o volume de mercúrio que penetra os poros do material (V) do volume bulk (V_{bulk}). Assim a densidade real (ρ_r) da matriz sólida é dada pela Equação 4.3.

$$\rho_r = \frac{M_s}{V_{bulk} - V} \tag{4.3}$$

A porosidade ε da amostra também pode ser obtida através da Equação 4.4.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_r} \tag{4.4}$$

O resultado da análise fornece dados na forma de tabelas contendo: os valores da área total de poros, o tamanho médio dos poros baseado na área e no volume das partículas, a média de tamanho dos poros ($4V_{ol}/A_a$), densidade bulk e aparente, porosidade, uma tabela com os resultados da intrusão do mercúrio na amostra e cinco gráficos: volume de intrusão de mercúrio acumulativo, incremental, diferencial e log diferencial versus o tamanho do poro e o gráfico da área de poro acumulativa versus o tamanho de poro.

4.6. Isotermas de Dessorção do Resíduo Sólido

As umidades de equilíbrio do resíduo sólido do limão siciliano in natura foram determinadas por método gravimétrico estático, utilizando-se soluções salinas saturadas em água destilada, para uma determinada faixa de umidade relativa, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores de umidade relativa relacionada às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 60, 75 e 90°C.

Sal	*UR* ou a_w		
	60°C	75°C	90°C
LiCl	10,95	10,64	10,23
KF	20,77	22,33	-
$MgCl_2$	29,26	26,94	24,12
NaBr	49,66	50,33	-
KI	63,11	61,43	60,21
$NaNO_3$	67,35	65,56	65,00
NaCl	74,50	75,58	-
KCl	80,25	79,17	78,50

FONTE: GREENSPAN (1977).

Amostras de 2g de resíduo foram pesadas, em triplicata, em cadinhos de alumínio previamente tarados e, em seguida, armazenados em potes herméticos com as respectivas soluções salinas para cada valor de umidade relativa desejada. Os potes herméticos foram colocados nas estufas de circulação forçada da marca FANEM, modelo 320-SE com controle automático, e foram ajustadas para as temperaturas de 60, 75 e 90°C. Essas temperaturas foram regularmente verificadas com o auxílio de um termômetro colocado no interior de cada estufa.

As amostras foram pesadas em balança analítica (marca BOSCH, modelo SAE 200) em intervalos regulares de tempo até o ponto de equilíbrio. Alcançado o equilíbrio, as amostras foram levadas para estufa à vácuo da marca SUPRILAB, modelo EST 920, a uma temperatura de 70°C durante 48h para se obter sua massa seca.

As umidades de equilíbrio foram calculadas de acordo com a seguinte Equação:

$$X_e = \frac{m_e - m_s}{m_s} \tag{4.5}$$

Onde:

X_e = umidade de equilíbrio (g água/g massa seca);
m_e = massa da amostra quando atingido o equilíbrio (g);
m_s = massa seca da amostra (g)

Para o ajuste das isotermas do resíduo de limão siciliano, foram testados diversos modelos encontrados na literatura. Os parâmetros destas equações foram determinados através de uma análise de regressão não-linear dos dados experimentais, realizada pelo Software Statistica 5.0, usando como método de ajuste os modelos Quasi-Newton e Simplex. Os critérios de escolha dos melhores ajustes dos modelos aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R^2) entre as respostas observadas e os valores preditos pelo modelo (BARROS NETO *et al*., 2001) e o módulo do desvio relativo médio (E), cuja definição encontra-se descrita pela Equação 4.6 (LOMAURO *et al*., 1985):

$$E = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|V_{pred} - V_0\right|}{V_0} \tag{4.6}$$

Onde:
E = desvio relativo médio (%);
V_{pred} = valores preditos pelo modelo;
V_0 = valores observados experimentalmente;
N = número de pontos experimentais

4.7. Determinações Analíticas das Fibras

4.7.1. Análises Físico-químicas

4.7.1.1. Cinzas

As amostras foram incineradas em mufla a 550°C por aproximadamente 5 horas (AOAC, 1997).

4.7.1.2. Proteínas

As proteínas foram estimadas pelo método micro-Kjeldahl (AOAC,1997). Considerando-se que em média as proteínas possuem 16% de nitrogênio, este é convertido para quantidade de proteína usando um fator igual a 6,25.

4.7.1.3. Lipídeos

A determinação de lipídeos foi realizada de acordo com o método de BLIGH & DYER (1959), que se baseia na extração de gordura a frio, utilizando uma mistura de três solventes: clorofórmio, metanol e água (1:2:0,8).

4.7.1.4. Fibra Total, Solúvel e Insolúvel

As fibras foram determinadas pelo método enzimático-gravimétrico descrito por Prosky *et al*. (1988) e modificado por Céspedes (1999). As amostras de resíduo seco e triturado foram tratadas com α-amilase termorresistente, seguida de protease e amiloglucosidade, com a finalidade de remover proteína e amido. A fibra alimentar insolúvel foi separada por filtração e a fibra solúvel precipitada com etanol a 98%. A solução alcoólica foi filtrada e os precipitados lavados com etanol a 78%, a 95% e com acetona; sendo em seguida secos e pesados. As fibras solúveis e insolúveis foram corrigidas devido à presença de proteínas e cinzas. A fibra alimentar total foi calculada como sendo a soma das fibras insolúveis e solúveis.

4.7.1.5. Umidade

A umidade do produto seco e triturado foi determinada em estufa à vácuo a 70°C por 24h, em triplicata, segundo o método 44 -15 da AACC (1995).

4.7.1.6. pH

A determinação da concentração hidrogeniônica (pH) foi realizada com potenciômetro nas amostras em suspensão a concentração de 10% (p/p) em água.

4.7.1.7. Acidez

A acidez total foi determinada por titulação com NaOH 0,01N utilizando indicador fenolftaleína. O resultado foi expresso em g ácido cítrico/100mL.

4.7.1.8. Atividade de Água

Foi utilizado um analisador de atividade de água (DECAGON, série 3 TE) a temperatura de 25°C.

4.7.2. Propriedades Tecnológicas das Fibras

4.7.2.1. Índice de Absorção de Água (IAA)

O índice de absorção de água e de óleo foi determinado pelos métodos descritos por Anderson *et al.* (1969) e modificados por Céspedes (1999). Amostras de um grama de fibra, pesadas em triplicata, foram suspensas em 25mL de água destilada a 30°C, em tubos de centrífuga de 50mL, previamente pesados, submetidos a agitação por 30min em um agitador de tubos marca PHOENIX, modelo AP-56, e depois centrifugados, centrífuga marca BECKMAN COULTER, modelo ALLEGRA 25-R, a 2500rpm por 10min. O sobrenadante líquido foi transferido para uma placa de petri de peso conhecido, e o tubo contendo polpa foi pesado.

O índice de absorção de água em gramas de água por gramas de matéria seca foi obtido pela Equação 4.7:

$$IAA = \frac{massa\ da\ polpa\ centrifugada}{massa\ da\ amostra\ inicial} \tag{4.7}$$

4.7.2.2. Índice de Solubilidade em Água (ISA)

O índice de solubilidade em água (*ISA*), em porcentagem, foi obtido com a mesma metodologia do *IAA*, o sobrenadante obtido foi levado à evaporação em estufa à vácuo a 70°C e o *ISA* foi calculado pela Equação 4.8:

$$ISA = \frac{massa\ do\ \ sobrenadante\ seco}{massa\ da\ amostra\ inicial} \tag{4.8}$$

4.7.2.3. Índice de Absorção de Óleo (IAO)

Amostras pesadas, em triplicata, contendo cerca de um grama de fibra, foram suspensas em 25mL de óleo de canola a 25°C e colocadas em tubos de centrífugas de 50mL previamente pesados. Em seguida, sofreram agitação permanente durante 30min e

então foram centrifugados, centrífuga marca BECKMAN COULTER modelo ALLEGRA 25-R, a 2500rpm por 10min. O líquido sobrenadante de cada amostra foi descartado e o índice de absorção de óleo, em gramas de óleo por grama de matéria seca foi obtido através da Equação 4.9:

$$IAO = \frac{massa\ do\ polpa\ centrifugada}{massa\ da\ amostra\ inicial} \tag{4.9}$$

4.7.2.4. Volume de Intumescimento (VI)

Foi realizado de acordo com a metodologia estabelecida por Gould *et al*. (1989). O volume de intumescimento reflete a capacidade que o material tem de expandir. Em uma proveta graduada contendo um grama da amostra, foi adicionada água destilada em excesso. A suspensão foi agitada por várias horas, com um agitador magnético marca FISATOM, modelo 752, de modo a atingir uma completa hidratação da amostra, seguida de repouso durante uma noite. O volume ocupado pela amostra na proveta, ao final do intumescimento, foi denominado de VI e foi expresso em mililitros por grama de matéria seca. O cálculo foi feito pela diferença entre o volume inicial da amostra desidratada e o volume final da fibra intumescida.

4.8. Secagem em Leito Fixo e em Leito de Jorro

4.8.1. Leito Fixo

O esquema do secador de leito fixo encontra-se na Figura 4.3.

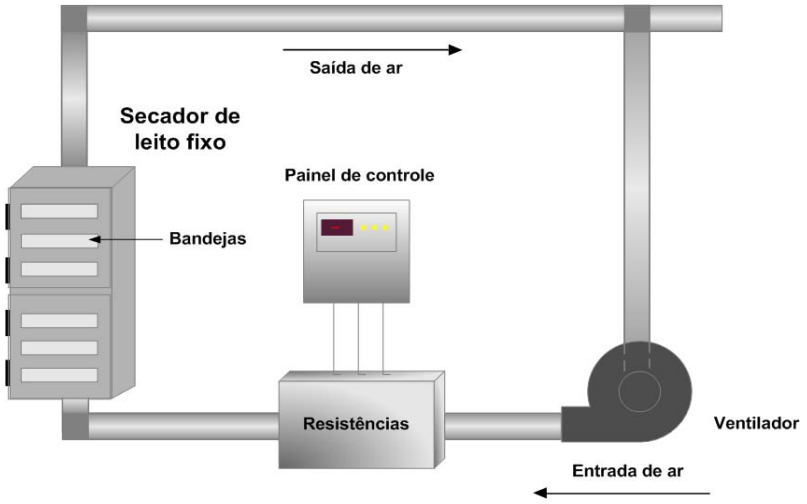


Figura 4.3. Esquema do Secador de Leito Fixo.

O equipamento de leito fixo é formado por uma cabine vertical de aço inox AISI 304 com 2 portas independentes, onde há a possibilidade de serem utilizadas 6 bandejas de 300 x 300 x 50mm com malha quadrada de 3,36mm de abertura (ou 6 mesh). A tubulação de ar possui 100mm de diâmetro, com isolamento de manta de lã de rocha e chapa de proteção em alumínio, havendo a possibilidade de retorno de ar (SUPRILAB).

O sistema de operação do secador consiste da passagem de ar verticalmente através das bandejas, no caso, sem recirculação. O aquecimento do ar foi feito através de um conjunto de resistências, as quais podem ser acionadas independentemente, controladas por um termostato digital. A vazão de ar foi controlada manualmente através de uma válvula borboleta localizada na entrada do ventilador.

Foi utilizado um termohigrômetro da marca TESTO, modelo 635, para medir a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar de secagem e também um anemômetro digital marca LUTRON, modelo AM-4202, colocado na saída da tubulação para medir a velocidade do ar de secagem, utilizou-se a seguinte fórmula para cálculo da velocidade do ar que atravessava a bandeja:

$$v_{an} \cdot A_d = v_b \cdot A_b \tag{4.10}$$

Onde: v_{an}= velocidade do ar medida pelo anemômetro (m/s), A_d = área da secção transversal do duto (m^2), v_b= velocidade do ar que atravessa a bandeja (m/s) e A_b = Área da secção transversal da bandeja (m^2).

Inicialmente, a secagem do bagaço de limão foi realizada em um equipamento de leito fixo (Figura 4.3) para obtenção das curvas de secagem do produto, pesou-se inicialmente 500g de produto úmido e depois foi feita a pesagem da bandeja, em balança semi-analítica marca MARTE modelo AS 2000 com precisão de 0,01g, em intervalos de 5 em 5min até a primeira hora de experimento e depois de 15 em 15min até que o equilíbrio dinâmico entre a amostra e o ar de secagem fosse alcançado.

Foram realizados experimentos de acordo com um planejamento experimental fatorial completo 2^2. A definição dos níveis das variáveis independentes e a tabela dos ensaios dos experimentos estão apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente, onde as variáveis independentes estudadas foram: velocidade do ar de 0,5 a 1m/s e temperatura do ar de 60 a 90°C.

Tabela 4.2. Definição dos níveis das variáveis independentes para o Secador de Leito Fixo.

	Nível		
Variável	**-1**	**0**	**1**
Temperatura (°C)	60	75	90
Velocidade do ar (m/s)	0,5	0,75	1

Tabela 4.3. Ensaios para o planejamento experimental fatorial completo 2^2 do Secador de Leito Fixo, variáveis independentes níveis reais e codificados.

Ensaios	**Temperatura (°C)**	**Velocidade (m/s)**
1	60 / (-1)	0,5 / (-1)
2	90 / (+1)	0,5 / (-1)
3	60 / (-1)	1,0 / (+1)
4	90 / (+1)	1,0 / (+1)
5	75 / (0)	0,75 / (0)
6	75 / (0)	0,75 / (0)
7	75 / (0)	0,75 / (0)

As respostas analisadas foram relativas à qualidade do produto seco após a moagem, assim as variáveis dependentes foram: difusividade efetiva, índice de absorção de água (*IAA*), índice de solubilidade em água (*ISA*) e índice de absorção em óleo (*IAO*).

A otimização do processo de secagem realizado no secador de leito fixo foi determinada através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) a qual permitiu a predição de um modelo e este foi avaliado pela análise de variância (ANOVA) e pelo conceito de p-valor ao nível de significância de 5%. A otimização do processo esteve na obtenção dos maiores índices em relação às propriedades tecnológicas (*IAA*, *ISA*, *IAO* e *VI*).

4.8.2. Leito de Jorro

Os experimentos deste tipo de equipamento foram realizados em um secador de leito de jorro fluidizado bidimensional cujo desenho esquemático está mostrado na Figura 4.4.

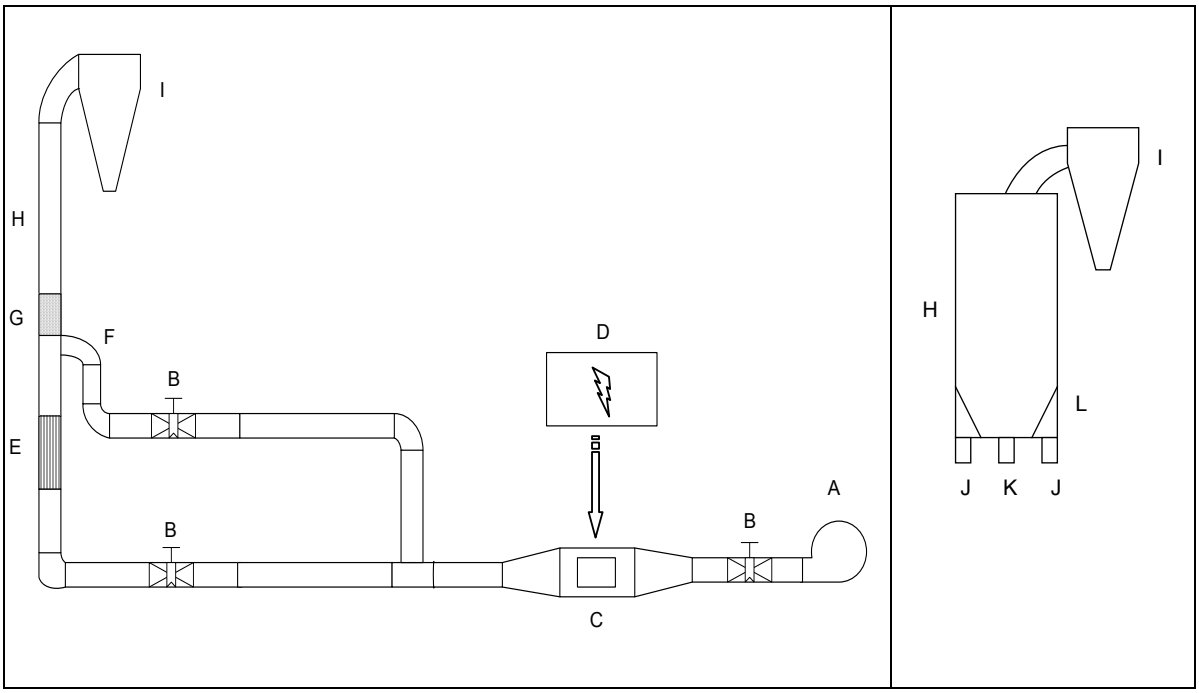


Figura 4.4. Vista esquemática lateral e frontal do leito de jorro. (A) Ventilador centrífugo; (B) Válvula globo; (C) Conjunto de resistências elétricas; (D) Regulador de voltagem; (E) Uniformizador da linha de fluxo de ar; (F) Alimentação de ar para o ânulo; (G) Distribuidor de ar para o jorro e ânulo; (H) Leito; (I) Ciclone; (J) Alimentação de Ar para o ânulo; (K) Alimentação de ar para o jorro; (L) inclinação de 45° da base na região do ânulo.

Este equipamento é constituído de ventilador com 12,5 HP, aquecedor de ar e linha de transporte do ar até o leito de acrílico bidimensional. O aquecedor de ar consiste de cinco resistências aletadas, cada uma delas com potência integrada de 1kW. Quatro

resistências funcionam independentemente com a sua potência integral. A quinta resistência está ligada a um controlador de corrente elétrica Dynasense Modelo 2156 – 40 (COLE PARMER INSTRUMENTS COMPANY, EUA). Este controlador de corrente permite o ajuste da potência dissipada pela resistência e, consequentemente, o ajuste fino da temperatura do ar de secagem. A linha de transporte do ar para o jorro contém um retificador de fluxo instalado imediatamente abaixo da base distribuidora para estabilizar o jorro. Há uma válvula globo para o controle da vazão total do sistema e as vazões das linhas que conduzem o ar para o jorro e para o ânulo também são controladas por duas válvulas globo, de maneira independente. As medidas de vazão de ar são obtidas através de placas de orifício que estão conectadas a manômetros em U, devidamente calibrados (MAIALLE, 1996).

As dimensões da base distribuidora do ar possuem 50mm de largura e 300mm de comprimento. As regiões do ânulo são compostas por placas perfuradas com furos de 2mm de diâmetro somando 2% do total da área da placa, estas placas estão dispostas em ângulos de inclinação de 45°. A entrada do ar no jorro é por secção quadrangular, centralizada na base e possui 50mm de aresta. Foi colocada um tela fina com furos de 2mm de abertura a fim de impedir que partículas menores penetrassem pela tubulação do jorro.

O leito foi construído em acrílico de 10mm de espessura, possui 1m de comprimento, 300mm de largura e 50mm de profundidade. O sistema de fechamento da parte superior do leito consiste de uma tampa de acrílico com dois furos centralizados. Estes furos são para alimentação do resíduo sólido e para a acoplagem do ciclone para coleta do elutriado, nesta última saída foi colocada uma tela fina de 2mm de abertura para impedir que o material mais fino fosse elutriado, compensando o comprimento maior que deveria ter o leito para isso ser evitado.

Para o estudo do secador de leito de jorro não foi possível a realização de um planejamento experimental devido algumas limitações do equipamento e características do material, então foram determinadas as curvas de secagem do produto nas seguintes condições: massa inicial de 330g, com um conteúdo inicial de umidade de 40%, em b.u., para a vazão total de ar máxima, altura de leito fixo de 15cm e temperatura do ar de secagem de 60, 75 e 90°C.

Para a obtenção das curvas de secagem foram coletadas amostras em pesa-filtros previamente tarados em intervalos de 3 em 3min até alcançar o equilíbrio dinâmico entre a amostra e o ar de secagem. Este material foi utilizado para determinação de umidade.

5. Resultados e Discussões

5.1. Matéria-prima

5.1.1. Preparo do Resíduo Sólido

O resíduo sólido foi obtido de acordo com o procedimento mostrado na Figura 4.1 e está apresentado detalhadamente na Figura 5.1.

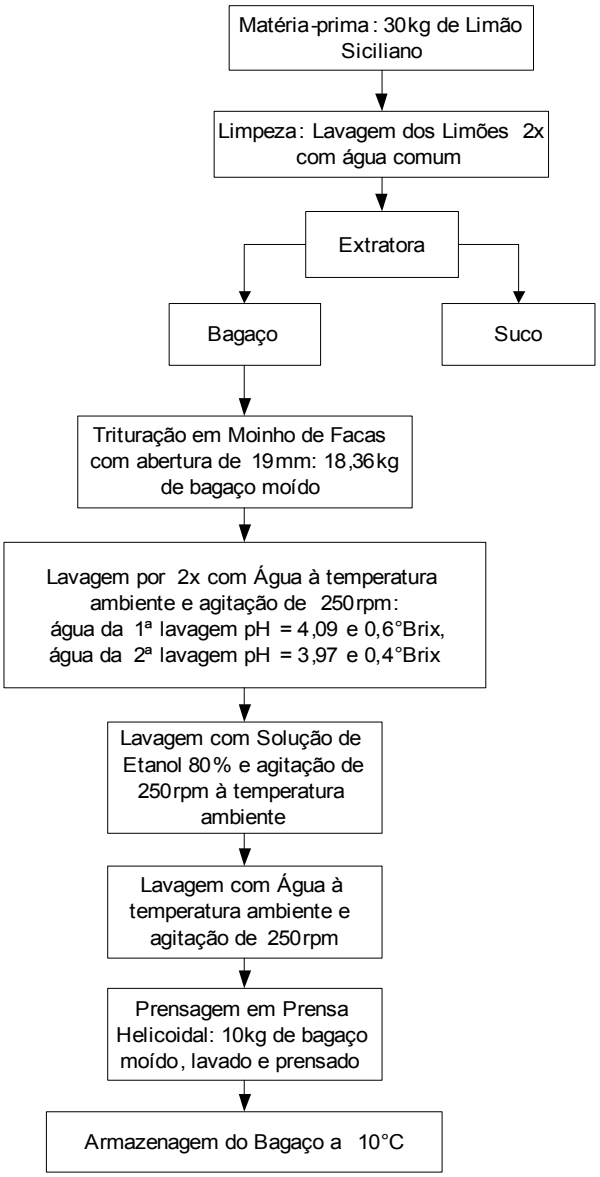


Figura 5.1. Fluxograma para obtenção do resíduo sólido.

5.1.1.1. Caracterização do Resíduo Sólido

A caracterização do resíduo sólido de Limão Siciliano, de acordo com a metodologia descrita no item 4.3, está apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Caracterização físico-química do Resíduo de Limão Siciliano.

Análise	***Valor médio ± Desvio padrão***
Umidade (base úmida, %)	80,32 ± 0,44
Cinzas (base úmida, %)	0,68 ± 0,03
Proteínas (base úmida, %)	1,05 ± 0,01
Lipídios (base úmida%)	0,486 ± 0,002
Atividade de água (a_w)	0,997 ± 0,001
pH	4,51 ± 0,02

Comparando os resultados da Tabela 5.1 aos fornecidos pela UNIFESP (2007) (Tabela 2.1), observa-se que o conteúdo de umidade e o teor de cinzas estão próximos aos da literatura, enquanto que os teores de proteína são valores um pouco menores comparando-se o valor de 1,05g/100g com o valor de 1,5g/100g; e um pouco maiores para os valores de lipídios comparando-se o valor de 0,49g/100g com o valor de 0,3g/100g. Pode-se ainda obter a quantidade de carboidratos totais, por diferença, e o valor encontrado foi de 17,46g/100g, este valor é um pouco maior do que o valor de 16g/100g fornecidos pela UNIFESP (2007). A variabilidade na composição centesimal da fruta pode ser explicada devido a diversos fatores como tipo de variedade, época da colheita, grau de maturação, tipo de solo e etc.

Com relação à atividade de água, o limão siciliano apresentou um valor de 0,997, este valor é muito próximo de 1 e nesta região ocorre o crescimento de microrganismos além de algumas reações de deterioração como: reação enzimática, oxidação de lipídeos, etc, que causam alterações irreversíveis no produto em relação à cor, flavour e estabilidade.

5.1.1.2. Caracterização Granulométrica do Resíduo Sólido

A caracterização granulométrica do resíduo sólido seco foi feita através da peneiragem como descrito no item 4.4. A Figura 5.2 apresenta o histograma da distribuição do tamanho das partículas onde: ΔX_i= fração mássica das partículas retidas em cada peneira e D_i= diâmetro de malha das peneiras.

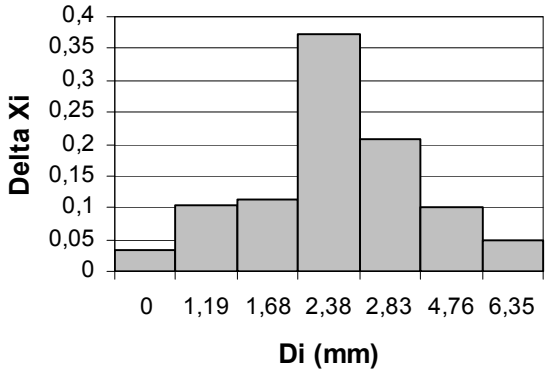


Figura 5.2. Histograma da distribuição do tamanho de partículas.

O diâmetro médio da partícula foi calculado através da equação 3.28 e resultou em um valor igual à 2,99mm.

5.1.1.3. Densidade real por picnometria a gás hélio do Resíduo Sólido e das Fibras

Foi determinada a densidade real do resíduo seco com umidade de 2,75%, em base úmida, através da picnometria a gás e o resultado obtido foi de 1,558g/cm^3 $\pm$ 0,0040g/cm^3.

Foi determinada também a densidade real das fibras, obtidas após a moagem do resíduo seco, com umidade de 1,73%, em base úmida, e o resultado foi de 1,493g/cm^3 $\pm$ 0,0027g/cm^3. Os dados fornecidos pelo equipamento encontram-se no Apêndice A e como o desvio padrão dos resultados de densidade real apresentou-se na ordem de grandeza 10^{-2} pode-se afirmar que houve uma boa reprodutibilidade dos dados.

Santana (2005) observou valores de densidade real, obtida por picnometria a gás hélio, para as frações de albedo, membrana carpelar e vesícula de suco de laranja, na faixa de 1,470 a 1,564g/cm^3, resultados similares ao obtido no presente trabalho.

5.1.1.4. Densidade bulk e real por porosimetria de Mercúrio do Resíduo Sólido e das Fibras

O valor de densidade bulk obtido para o resíduo sólido de limão foi de 1,0468g/cm^3 e para a fibra alimentar foi de 0,8751g/cm^3. Considerando o valor de densidade bulk do resíduo sólido seco igual à 1,0468g/cm^3 e sendo o diâmetro médio da partícula de

2994µm pode-se classificar o resíduo de limão siciliano como do Grupo D através da Figura 3.8 (GELDART, 1986).

O valor da densidade real obtida nesta análise foi de 1,5870g/cm^3 para o resíduo sólido de limão e de 1,6112g/cm^3 para a fibra alimentar. O valor da porosidade obtida pela técnica de porosimetria de mercúrio foi de 34,04% para o resíduo sólido e de 45,69% para a fibra alimentar. Contudo, calculando-se a porosidade através da equação 4.4, utilizando-se o valor de densidade real dada pela picnometria a gás hélio e o valor da densidade bulk, encontra-se o valor de porosidade de 41,4% para as fibras e de 32,80% para o resíduo sólido. Essa diferença entre os valores de porosidade calculados pela equação e os fornecidos pela porosimetria de mercúrio pode ser explicada devido à maior capacidade do gás hélio em penetrar nos microporos dos materiais, portanto, o valor de 41,4% está menos sujeito a erros e é mais confiável do que o valor fornecido pelo porosímetro de mercúrio que possui a limitação de não detectar os microporos.

Os resultados fornecidos pela análise de porosimetria de mercúrio encontram-se na Tabela 5.2 para o resíduo sólido e para as fibras alimentares.

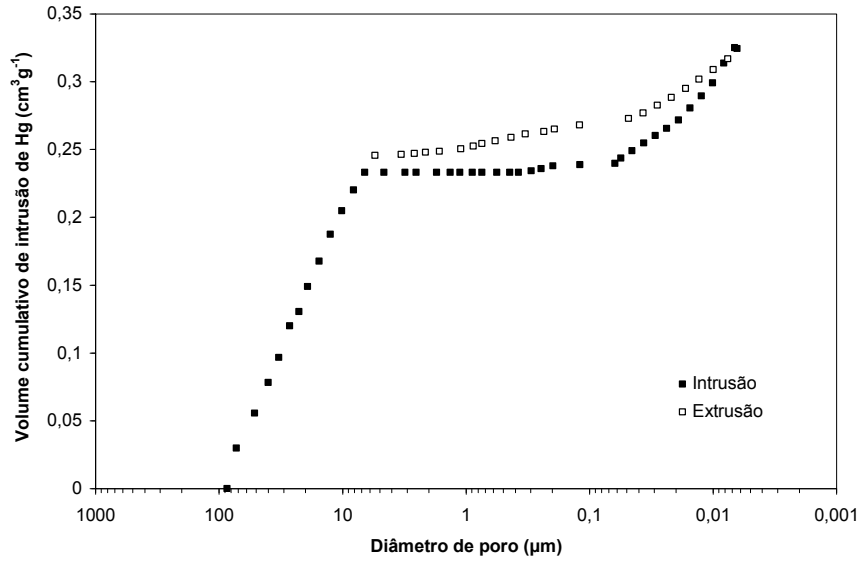
Tabela 5.2. Resultados das análises no porosímetro de mercúrio.

		Resíduo Sólido	***Fibras***
Volume Total de Intrusão (cm^3.g^{-1})		0,3252	0,522
Área Total de poro (m^2.g^{-1})		27,556	36,890
Diâmetro médio de poro (µm) ($4V_{ol}/A_a$)		0,0472	0,0566
Diâmetro mediano	Volume	14,69	24,8
de poro (µm)	Área	0,0090	0,0086
Volume usado da haste (%)		76	18

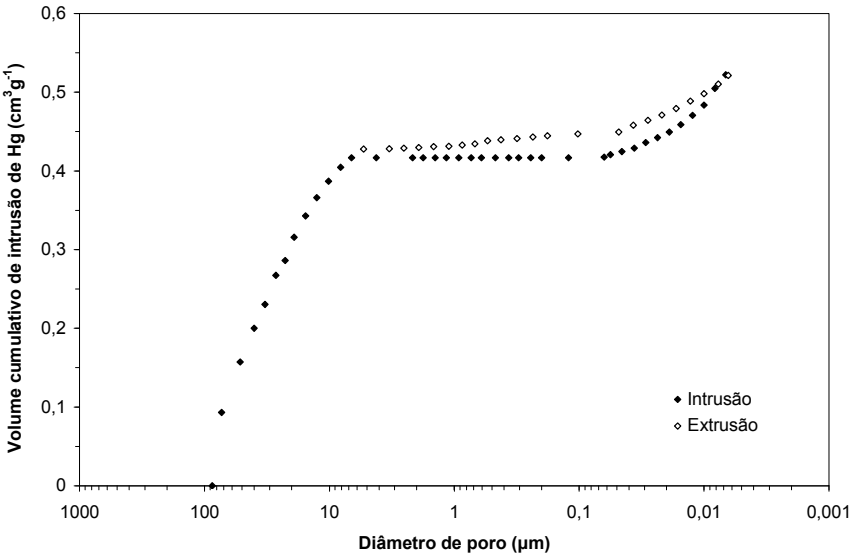
As análises apresentaram volume de intrusão de mercúrio de 76% para o resíduo sólido e de 18% para a fibra, sendo considerada como ideal a faixa de 25 a 90%.

O gráfico básico da porosimetria, dado pelas Figuras 5.3 e 5.4, apresenta a intrusão de mercúrio em função do diâmetro, a mudança na inclinação da curva e na sua forma geral oferece uma visão de como a porosidade está distribuída na amostra, como aconteceu o preenchimento, se ocorreu colapso da estrutura e indica se o material sofreu compressão com a aplicação de alta pressão.

Pode ainda ser observado o fenômeno da histerese que pode ser explicado pela existência de poros do tipo “gargalo” ou “garrafa”, que retém o volume de mercúrio injetado durante a extrusão, por causa da sua forma geométrica dificultando o seu esvaziamento.



(a)



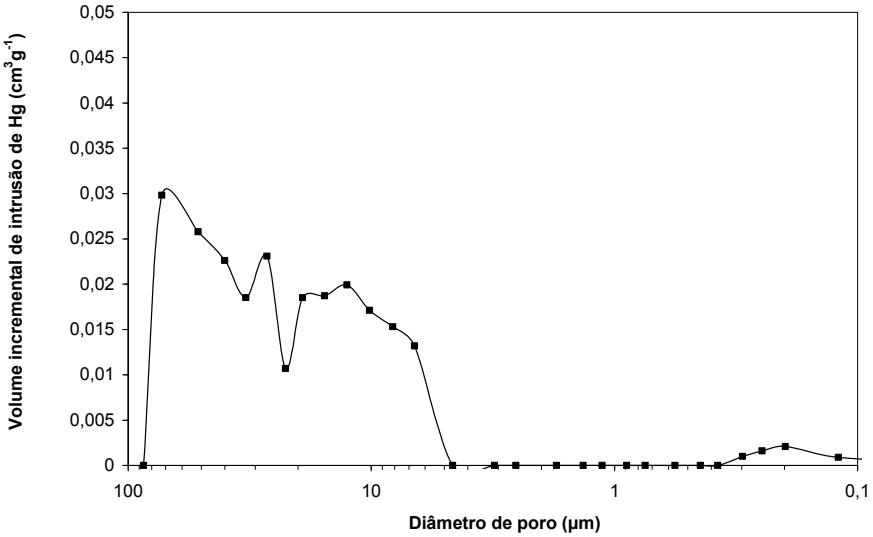
(b)

Figuras 5.3 e 5.4. Curvas de intrusão e extrusão obtidas através da porosimetria de mercúrio para o resíduo sólido (a) e a fibra alimentar (b).

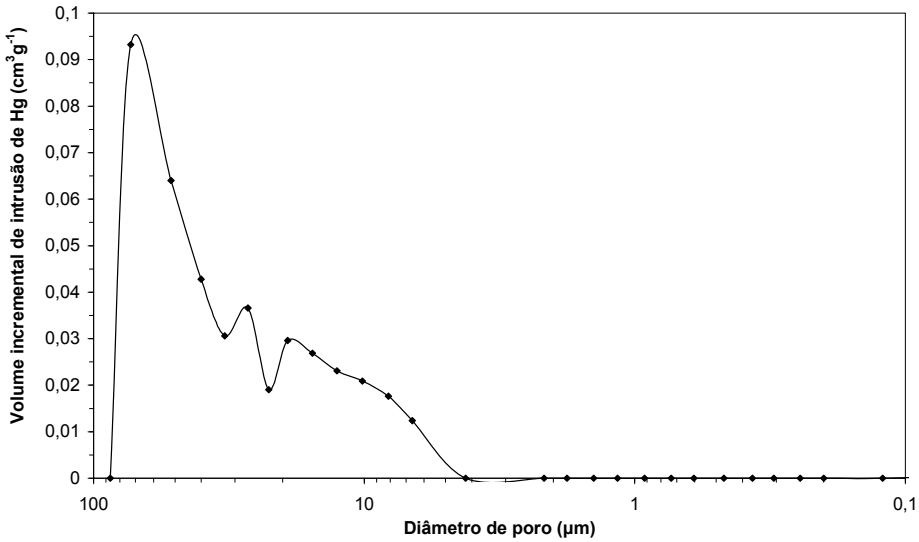
Para o resíduo sólido o volume cumulativo de mercúrio foi no máximo de $0,34 cm^3.g^{-1}$ e para a fibra alimentar o máximo foi de $0,52 cm^3.g^{-1}$. Santana (2005)

encontrou valores de 0,09 a 0,18$cm^3.g^{-1}$ para as fibras obtidas de membrana carpelar de laranja secas em leito fixo e 0,20 a 0,25$cm^3.g^{-1}$ para fibras obtidas da vesícula de suco na mesma condição de secagem em leito fixo.

Nas Figuras 5.5 e 5.6, verifica-se a distribuição de tamanho de poro para o resíduo sólido e para as fibras obtidas. O gráfico revela que o material é macroporoso com maior volume na faixa de 5 a 100μm para o resíduo sólido e de 4 a 100μm para as fibras alimentares, um material é classificado como macroporoso quando o tamanho do poro têm amplitude superior a 50nm ou 0,05μm (SING *et al.,* 1985).



(a)



(b)

Figuras 5.5 e 5.6. Distribuição do tamanho de poro para o resíduo sólido (a) e para a fibra alimentar (b) através da porosimetria de mercúrio.

5.1.1.5. Porosidade do Leito

A determinação da porosidade do leito foi feita com o auxílio de um recipiente cilíndrico de vidro, com 14,2cm de diâmetro interno. Uma massa de 160g resíduo seco de limão siciliano foi pesada e colocada no recipiente marcando-se a altura do leito (6,5cm). Retirou-se o material do leito e adicionou-se água à temperatura ambiente até a altura do leito, que a seguir foi pesada para verificar o volume total ocupado pelo resíduo. A partir daí, com o valor da densidade bulk do sólido igual à 1,0468g/cm^3, obteve-se o volume de sólido no leito. O volume do leito fixo foi obtido com o valor da densidade da água à temperatura ambiente e a massa de água que foi pesada. Com estes valores foi possível calcular a porosidade do leito, ou fração de vazios, através da Equação 3.30.

O valor encontrado para a porosidade do leito, determinada em triplicata, foi de 0,844 $\pm$ 0,001.

5.1.1.6. Esfericidade Média da Partícula

Este parâmetro foi determinado a partir da porosidade do leito obtida experimentalmente e com o auxílio do gráfico indicado por Kunii & Levenspiel (1991) dado pela Figura 3.9, que relaciona a esfericidade média da partícula com a porosidade do leito

para leitos com empacotamento frouxo, normal ou denso. Como resultado observou-se um valor médio de esfericidade ($\bar{\phi}$) de 0,2, obtido através da curva de empacotamento normal.

5.1.2. Isotermas de Dessorção do Resíduo Sólido

A Tabela 5.3 relaciona os valores experimentais médios de umidade de equilíbrio (X_e) com a atividade de água (a_w) determinada pelas soluções salinas saturadas, para a construção das isotermas de dessorção.

Tabela 5.3. Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção nas temperaturas de 60, 75 e 90°C do Limão Siciliano *in natura*.

Solução Salina	60°C			75°C			90°C		
	a_w	X_e	Desvio Padrão	a_w	X_e	Desvio Padrão	a_w	X_e	Desvio Padrão
LiCl	0,1095	0,0031	0,0010	0,1064	0,0038	0,0003	0,1023	0,0017	0,0008
KF	0,2077	0,0199	0,0016	0,2233	0,0195	0,0011	-	-	-
$MgCl_2$	0,2926	0,0247	0,0022	0,2694	0,0270	0,0011	0,2412	0,0118	0,0022
NaBr	0,4966	0,0534	0,0023	0,5033	0,0479	0,0006	-	-	-
KI	0,6311	0,0747	0,0014	0,6143	0,0650	0,0009	0,6021	0,0440	0,0027
$NaNO_3$	0,6735	0,0836	0,0090	0,6556	0,0664	0,0010	0,6500	0,0495	0,0006
NaCl	0,7450	0,0923	0,0040	0,7558	0,0750	0,0013	-	-	-
KCl	0,8025	0,1212	0,0087	0,7917	0,0796	0,0070	0,7850	0,0575	0,0033

Os dados experimentais das isotermas de dessorção do resíduo de limão siciliano foram ajustados para cinco modelos da literatura, obtendo-se também o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio relativo médio (E). A escolha do melhor ajuste foi feita analisando-se o desvio relativo médio para cada modelo e para cada condição estudada. Estes valores, juntamente com os parâmetros das equações, estão descritos na Tabela 5.4, optou-se em retirar os valores experimentais correspondentes à solução salina de LiCl pois como eram valores muito pequenos estavam aumentando os valores dos desvios relativos médios.

Tabela 5.4. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do resíduo de limão siciliano *in natura* dos modelos sem o parâmetro temperatura.

Modelos	Temperatura	Constantes				R^2	E (%)
		X_m	C_{BET}	N			
BET (Equação 3.2)	**60°C**	31,578	0,002	2,122		0,981	6,95
	75°C	0,100	0,747	2,153		0,994	3,25
	90°C	0,049	0,889	3,187		0,992	5,77
		X_m	C_{GAB}	K_{GAB}			
GAB (Equação 3.4)	**60°C**	0,049	2,371	0,823		0,990	4,84
	75°C	0,941	1,156	0,088		0,993	5,54
	90°C	12,095	0,030	0,162		0,981	9,95
		k^*		n'			
Henderson (Equação 3.9)	**60°C**	15,425		1,050		0,986	3,42
	75°C	43,074		1,350		0,982	5,32
	90°C	25,188		1,032		0,972	5,46
		K_A	n_A	K_B	n_B		
Peleg (Equação 3.11)	**60°C**	0,079	1,541	0,079	1,541	0,977	7,98
	75°C	0,051	1,050	0,051	1,050	0,993	3,74
	90°C	0,041	1,303	0,041	1,303	0,991	5,60
		A		B			
Oswin (Equação 3.12)	**60°C**	0,0509		0,6167		0,987	7,74
	75°C	0,0463		0,4497		0,950	10,76
	90°C	0,033		0,496		0,911	20,97

Analisando os resultados da Tabela 5.4 e Figura 5.7, de forma geral as isotermas apresentaram bons ajustes em relação aos modelos testados, com valores de coeficientes de determinação superiores a 95%. Porém, para uma avaliação mais adequada desses ajustes, calculou-se também os desvios relativos médios que foram menores do que 10% para os modelos de BET, GAB, Henderson e Peleg. Analisando-se os resultados obtidos pode-se dizer que o modelo (sem o parâmetro temperatura) que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de GAB.

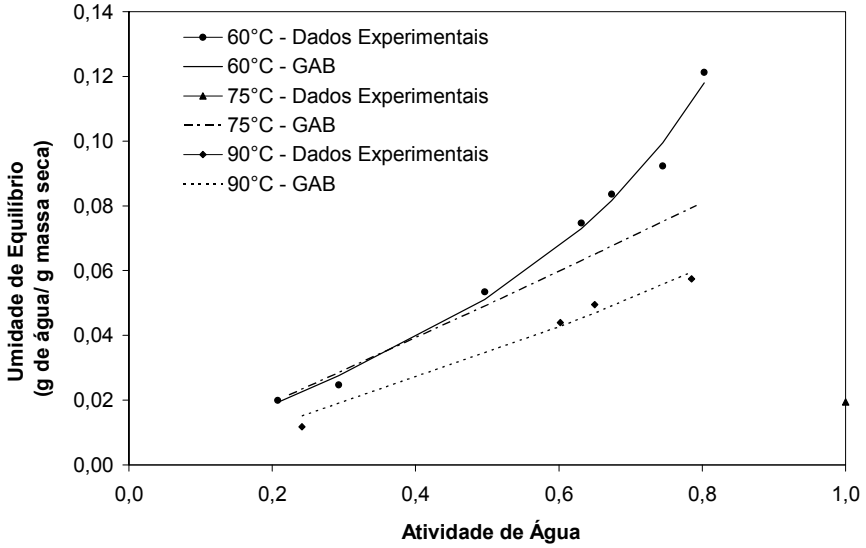


Figura 5.7. Comparação entre os valores observados e preditos das isotermas de dessorção do Limão Siciliano *in natura* utilizando o modelo de GAB.

Procurou-se ainda obter uma equação para predição das isotermas de dessorção do produto, por isso, foi feito um ajuste aos dados experimentais (incluindo os dados experimentais correspondentes à solução salina de LiCl) de modelos da literatura que possuem o parâmetro temperatura, sendo a equação de Chung-Pfost modificado a que melhor se ajustou conforme mostra a Tabela 5.5 e Figura 5.8

Tabela 5.5. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do limão siciliano dos modelos com o parâmetro temperatura.

Modelo	**Constantes**			R^2	***E* (%)**
Henderson modificado (Equação 3.10)	k*		n‘		
	0,044		0,977	0,930	19,05
Chung-Pfost modificado (Equação 3.8)	A	C	B		
	144,095	-284,514	26,206	0,959	14,24

Na Figura 5.8 está apresentado o gráfico com a comparação dos valores observados com os preditos para as isotermas de dessorção do resíduo de limão siciliano.

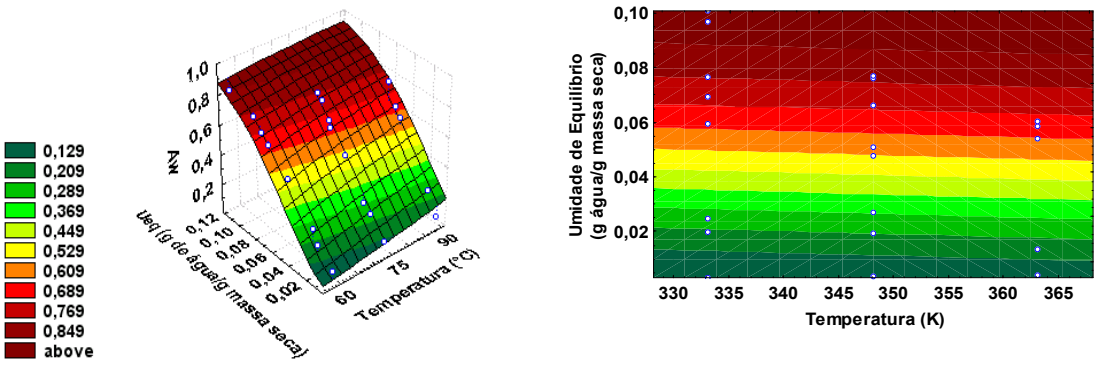


Figura 5.8. Comparação entre os valores observados e preditos para as isotermas de dessorção do limão siciliano (com o parâmetro temperatura).

De acordo com as Figuras 5.7 e 5.8, verifica-se que a umidade de equilíbrio está diretamente relacionada aos valores de atividade de água. Além disso, a umidade de equilíbrio decresceu com o aumento da temperatura. A energia cinética associada às moléculas de água presentes nos alimentos, se eleva com o aumento da temperatura, resultando na diminuição das forças de atração e, conseqüentemente facilitando a saída de água do alimento e conduzindo a um decréscimo da umidade com a elevação da temperatura a uma determinada atividade de água (SHIVHARE *et al.,* 2004). Diversos autores observaram esse comportamento para diferentes alimentos (McLAUGHLIN & MAGEE, 1998; SHIVHARE *et al*., 2004; VISWANATHAN *et al*., 2003; PARK *et al*., 2001).

Como foi observado na Tabela 5.5 e Figura e 5.8, o modelo de Chung-Pfost modificado (dentre o modelos com o parâmetro temperatura) pode ser utilizado para predizer o conteúdo de umidade de equilíbrio do resíduo de limão siciliano *in natura* na faixa de temperatura entre 60 e 90°C. O modelo de Chung-Pfost assume que a mudança de energia livre para sorção é diretamente proporcional ao conteúdo de umidade. Alguns autores indicam este modelo como aquele que melhor descreve os dados de umidade de equilíbrio para grãos amiláceos e materiais fibrosos (CHEN & MOREY, 1989; JAYA & MAZZA, 1993).

Para a escolha dos modelos (sem o parâmetro temperatura) que mais se adequaram aos dados experimentais, foi também obtida a isoterma de dessorção do produto à temperatura ambiente (30°C), sendo que a única diferença na preparação dos potes herméticos foi a colocação de um pouco de formol em cada um para evitar o

crescimento de fungos. Abaixo nas Tabelas 5.6 e 5.7 encontram-se os resultados observados.

Tabela 5.6. Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção na temperatura de 30°C do Limão Siciliano *in natura*.

Solução Salina	30°C		
	a_w	X_e	Desvio Padrão
LiCl	0,1128	0,0285	0,0037
KF	0,2727	0,0676	0,0014
$MgCl_2$	0,3244	0,0757	0,0055
NaBr	0,5603	0,1173	0,0039
KI	0,6789	0,1564	0,0046
$NaNO_3$	0,7314	0,1800	0,0088
KCl	0,8360	0,2626	0,0078

Tabela 5.*7*. Constantes de ajuste da isoterma de dessorção do Limão Siciliano *in natura* para alguns dos modelos sem o parâmetro temperatura para 30°C.

Modelos	Constantes				R^2	E (%)
GAB (Equação 3.4)	X_m	C_{GAB}	K_{GAB}		0,997	5,59
	0,065	8,247	0,911			
Henderson (Equação 3.9)	k^*		n'		0,989	4,87
	12,075		1,304			
PELEG (Equação 3.11)	K_A	n_A	K_B	n_B	0,938	19,04
	0,149	1,361	0,149	1,361		
Oswin (Equação 3.12)	A		B		0,996	6,06
	0,105		0,554			

De acordo com os resultados obtidos de coeficiente de determinação igual à 0,997 e erro relativo médio abaixo de 6%, para a temperatura de 30°C o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de GAB. Este resultado está de acordo com o observado por Garcia-Pérez e colaboradores (2007) que determinaram isotermas de dessorção de limão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C cujo modelo que melhor se ajustou aos dados foi o de GAB. Através dos resultados apresentados na Tabela 5.14 de coeficiente de determinação próximos à unidade e desvios relativos médios inferiores a 10% pode-se afirmar que o modelo de GAB é o que melhor se ajusta aos dados experimentais na faixa de temperatura de 60 a 90°C, considerando os modelos sem temperatura.

Na Figura 5.9 está apresentado o gráfico que compara todas curvas de isotermas de dessorção obtidas.

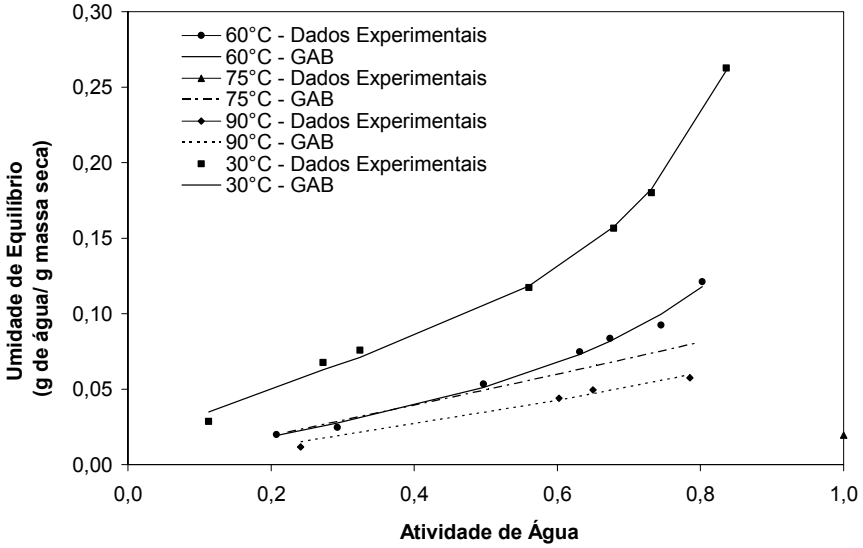


Figura 5.9. Comparação entre os valores observados e preditos da isoterma de dessorção do Limão Siciliano *in natura*.

5.2. Cinética de Secagem

O estudo da cinética de secagem do limão siciliano *in natura* foi realizado em leito fixo, de acordo com o planejamento fatorial completo, no qual foram realizados 7 ensaios a diferentes temperaturas e velocidades do ar conforme a Tabela 4.3.

5.2.1. Taxa de Secagem

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os efeitos da temperatura sobre as taxas de secagem em função da umidade em base seca, para as amostras *in natura* do limão siciliano. As corridas apresentadas correspondem aos valores médios de 2 experimentos nas mesmas condições (Apêndice B).

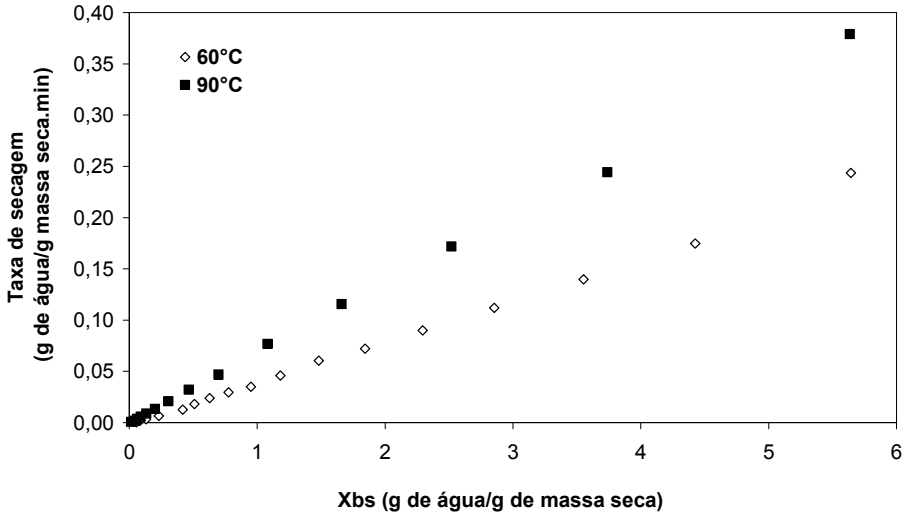


Figura 5.10. Efeito da temperatura na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a velocidade do ar de 0,5m/s.

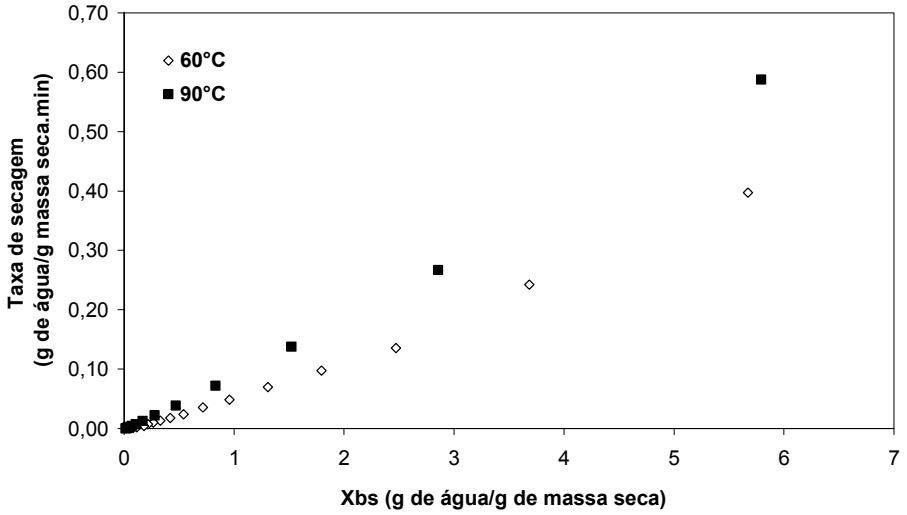


Figura 5.11. Efeito da temperatura na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a velocidade do ar de 1m/s.

Analisando as Figuras 5.10 e 5.11, observa-se um efeito positivo da temperatura sobre a taxa de secagem, ou seja, a taxa de remoção de umidade aumenta com o aumento da temperatura, então, a temperatura de 90°C apresentou uma secagem mais eficiente do que a 60°C.

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os efeitos da velocidade do ar sobre as taxas de secagem em função da umidade em base seca, para as amostras *in natura* do limão siciliano.

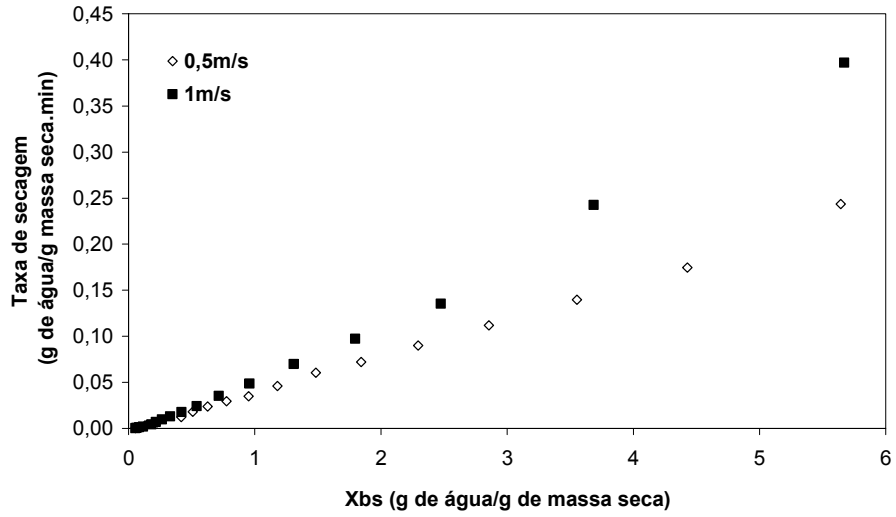


Figura 5.12. Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a temperatura de 60°C.

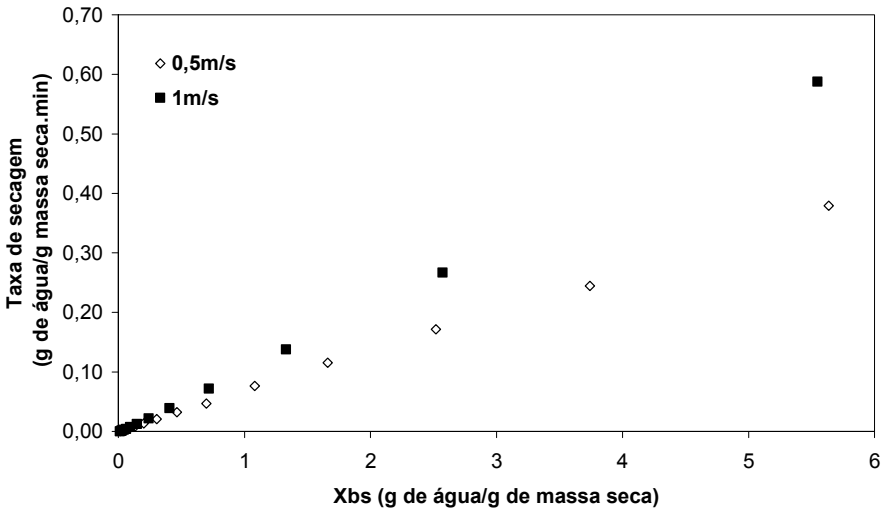


Figura 5.13. Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem do limão siciliano *in natura* a temperatura de 90°C.

Analisando as Figuras 5.12 e 5.13, observou-se o efeito positivo da velocidade do ar na secagem das amostras, isto é, quanto maior a velocidade do ar maior a taxa de remoção de umidade.

Além dos ensaios realizados para o planejamento experimental, foram ainda realizadas corridas para avaliar o efeito da temperatura sobre a taxa de secagem, em função da umidade em base seca, para as amostras *in natura* do limão siciliano, fixando-se a velocidade do ar de secagem em 0,75m/s e variando-se a temperatura do mesmo em: 60, 75, 90 e 105°C (Figura 5.14).

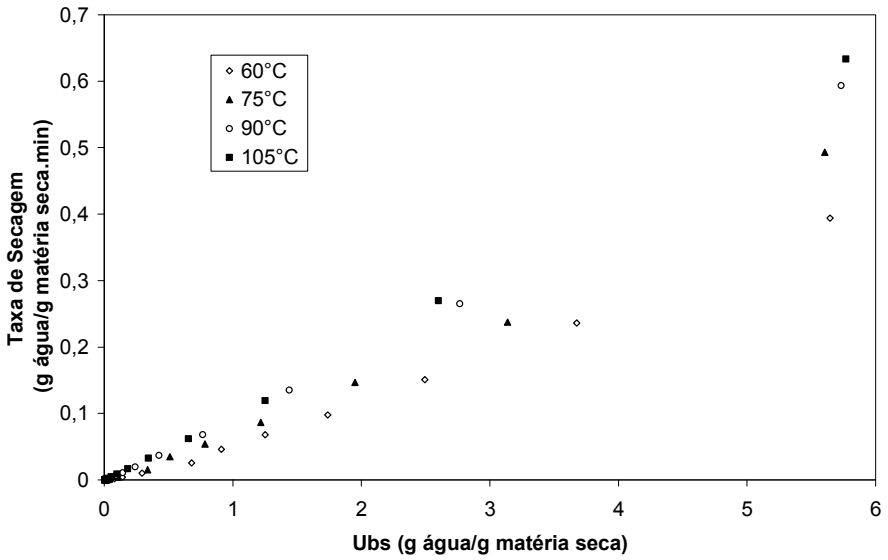


Figura 5.14. Curvas da taxa de secagem do limão siciliano em função da umidade em base seca às temperaturas de 60, 75, 90 e 105°C e v = 0,75m/s.

Observa-se na F igura 5.14 que o maior valor da taxa de secagem, isto é, da taxa de remoção de umidade foi à temperatura de 105°C, seguidas em ordem decrescente das temperaturas de 90, 75 e 60°C, para a velocidade do ar de secagem de 0,75m/s.

5.2.2. Modelagem Matemática

Os dados experimentais de todas as curvas de secagem realizadas em leito fixo foram ajustados pelo modelo de Fick. Para isso, os valores de umidade de equilíbrio foram determinados a partir dos dados de umidade relativa do ar de secagem, aplicados ao modelo de Chung-Pfost modificado, utilizando os valores dos parâmetros conforme Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Valores de umidade relativa do ar de secagem e de umidade de equilíbrio para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar para o limão siciliano *in natura*.

Ensaios	T (°C)	v_{ar} (m/s)	UR (%)	X_e (g água/g massa seca)
1	60	0,5	15,3	0,0174
2	90	0,5	10,3	0,00036
3	60	1,0	16,4	0,0188
4	90	1,0	9,8	0,00036
5	75	0,75	12,4	0,0030
6	75	0,75	12,7	0,0035
7	75	0,75	12,8	0,0036

Como o valor da UR do ambiente para as temperaturas de 90°C encontrou-se muito próximo do menor valor de UR utilizado nos recipientes com as soluções salinas (LiCl a_w - 0,102) utilizou-se a equação de ajuste de Chung-pfost modificado a 90°C com um valor de umidade relativa ambiente de 10,2%, para o cálculo da umidade de equilíbrio do resíduo nessa temperatura.

5.2.2. Modelo de Fick

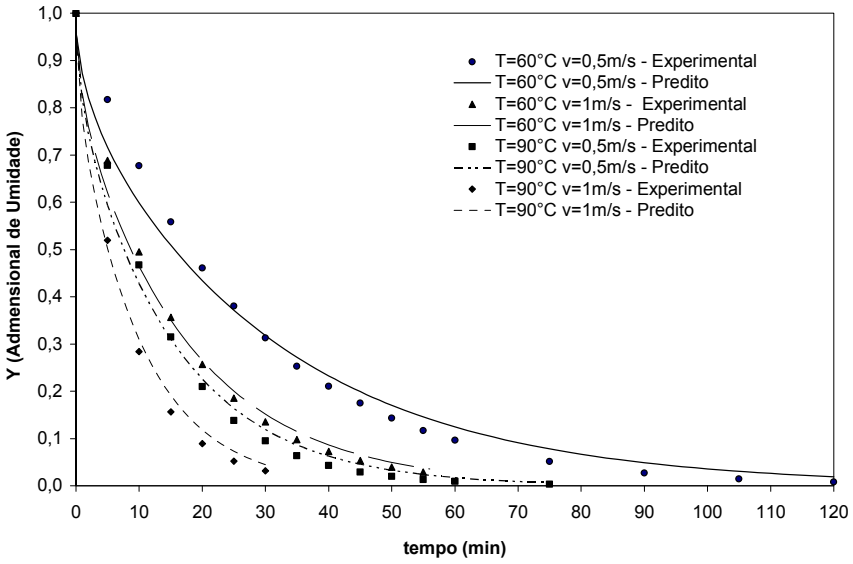
Aproximando o formato da amostra ao de uma placa plana infinita, o modelo de Fick foi utilizado para determinar a difusividade efetiva, através de um ajuste não-linear dos dados experimentais (Apêndice B: 1 - 7 experimentos b). Foram utilizados cinco termos da série infinita cujos valores de difusividade efetiva encontrados estão mostrados na Tabela 5.9, bem como os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios relativos médios (E).

Tabela 5.9. Valores de difusividade efetiva estimados pelo modelo de Fick, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para o resíduo de limão siciliano *in natura*.

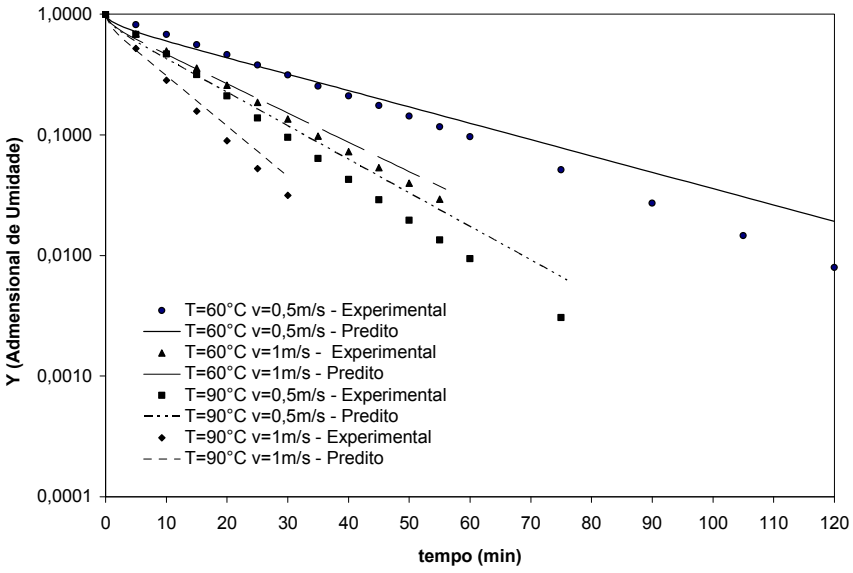
Ensaios	T (°C)	v_{ar} (m/s)	D_{ef} (10^{-10}m^2/s)	R^2	E (%)
1	60	0,5	4,72	0,9813	24,64
2	90	0,5	9,69	0,9891	26,06
3	60	1,0	8,46	0,9930	14,52
4	90	1,0	14,60	0,9949	25,98
5	75	0,75	9,87	0,9920	25,20
6	75	0,75	9,82	0,9931	19,65
7	75	0,75	9,08	0,9931	15,59

Garau e colaboradores (2006) estudaram a secagem convectiva de casca de laranja cortada em fatias (*slabs*) circulares com umidade inicial de 3,66kg de água/kg de matéria seca e 3.10^{-2}m de diâmetro à uma velocidade do ar de 2,5m/s na faixa de

temperatura de 30 a 90°C. Os autores observaram valores de difusividade efetiva da ordem de $0{,}81.10^{-10}$ a $5{,}11.10^{-9}$m/s^2.

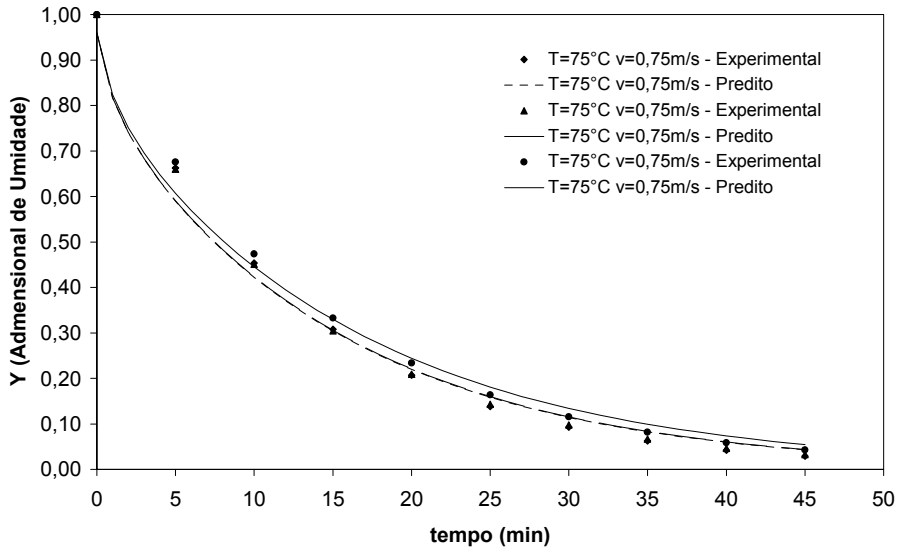


(a)

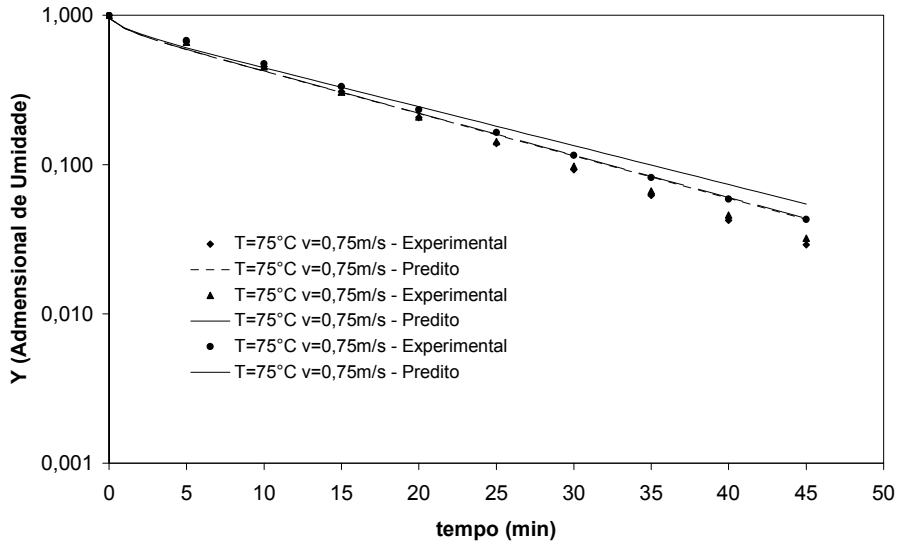


(b)

Figura 5.15. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperaturas de 60 e 90°C.



(a)



(b)

Figura 5.16. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperatura de 75°C.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 encontram-se os dados experimentais ajustados pelo modelo de Fick. Tabela 5.9 observa-se que os valores dos coeficientes de determinação encontram-se próximos de 1, sendo que o ajuste foi feito até o ponto de umidade de 0,10g água/g massa seca, contudo, os valores dos desvios relativos médios são superiores a 20%. Essa falta de ajuste pode ser explicada pelo fato de que o comportamento da transferência de umidade na secagem de alimentos normalmente não satisfaz às

simplificações assumidas na solução da 2ª Lei de Fick, isto é, a difusividade da água não é constante, o sólido possui uma estrutura celular heterogênea, ocorre encolhimento com a evaporação da água, a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos, a temperatura do alimento aumenta durante o processo, além disso, como o produto é um material poroso e está triturado a maior parte da umidade encontra-se na superfície do mesmo e não no interior do sólido.

Na Tabela 5.10 encontram-se os valores dos efeitos estimados para os fatores temperatura e velocidade do ar nos valores de Difusividade Efetiva obtidos experimentalmente.

Tabela 5.10. Efeito estimado, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**9,46E-10**	**1,51E-11**	**6,28E+01**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	**5,56E-10**	**3,98E-11**	**1,39E+01**	**0,0008**
Velocidade do ar (L)	**4,33E-10**	**3,98E-11**	**1,09E+01**	**0,0017**
Temperatura x Velocidade do ar	5,85E-11	3,98E-11	1,47E+00	0,2384

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.10 pode-se afirmar que os parâmetros temperatura e velocidade do ar apresentam um efeito positivo no valor da Difusividade Efetiva, ao nível de significância de 5%, isto é, um aumento em qualquer um desses fatores acarreta em um aumento da difusividade efetiva. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, ela não é intrínseca ao material, e portanto convenciona-se chamá-la de difusividade efetiva (BROD *et al.,* 1999). Na secagem convectiva, a difusividade efetiva é obtida considerando a resistência externa à transferência de massa desprezível, contudo o efeito da velocidade do ar é relevante na transferência de calor (PARK *et al*. 200), por isso, é de se esperar que um aumento da velocidade do ar de secagem aumente a difusividade efetiva.

Na Tabela 5.11 está apresentada a análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para a Difusividade Efetiva.

Tabela 5.11. Análise de variância do modelo ajustado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado	p-valor
Regressão	4,99E-19	3	1,66E-19	104,79	0,00005
Resíduos	4,76E-21	3	1,59E-21		
Total	5,04E-19	6			

% variação explicada (R^2) = 99,05; $F_{3,3,0,95}$ = 9,28

Na Tabela 5.11, verificou-se a significância da regressão, através do teste-F e da análise de variância. O coeficiente de determinação (R^2) para o modelo ajustado foi de 0,9905. O modelo apresentou regressão significativa, ao nível de 95% de confiança, pois o $F_{calculado}$ da regressão com relação ao resíduo foi de 104,79 e superior ao $F_{tabelado}$ de 9,28.

A Tabela 5.12 apresenta os coeficientes de regressão do modelo codificado para D_{ef} e a Figura 5.17 apresenta a superfície de resposta e a curva de nível para D_{ef}. Pode-se verificar que a região que possui os maiores valores de D_{ef} encontra-se nos maiores valores de temperatura e velocidade do ar de secagem.

Tabela 5.12. Coeficiente de Regressão, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para D_{ef} do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**9,46E-10**	**1,51E-11**	**6,28E+01**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	**2,78E-10**	**1,99E-11**	**1,39E+01**	**0,0008**
Velocidade do ar (L)	**2,16E-10**	**1,99E-11**	**1,09E+01**	**0,0017**
Temperatura x Velocidade do ar	2,93E-11	1,99E-11	1,47E+00	0,2380

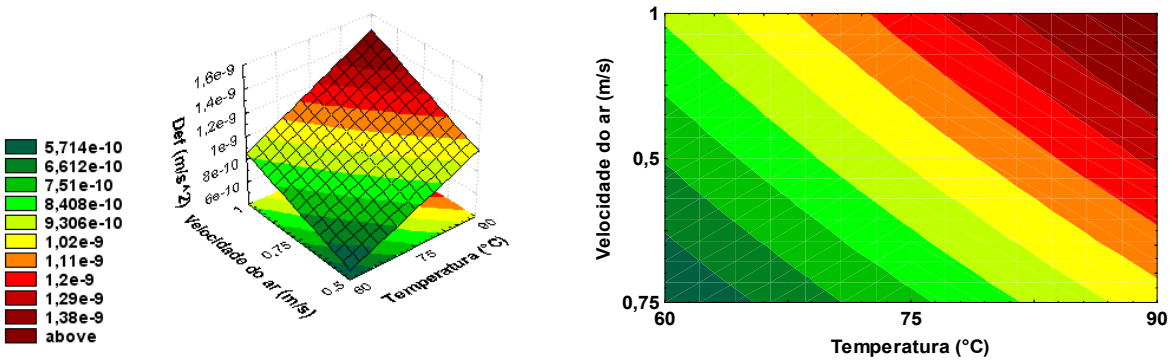


Figura 5.17. Superfície de resposta e curva de nível para Difusividade Efetiva (D_{ef}) do resíduo de limão siciliano para a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u., relacionando temperatura (°C) e velocidade do ar (m/s).

O modelo com as variáveis codificadas que representa D_{ef} em função da velocidade do ar e da temperatura na faixa estudada está apresentada na Equação 5.1:

$$De_f = 9{,}46 \cdot 10^{-10} + 2{,}78 \cdot 10^{-10} T - 2{,}16 \cdot 10^{-10} v + 2{,}93 \cdot 10^{-11} \cdot T \cdot v \qquad (5.1)$$

Onde: T =Temperatura (codificada)
v= Velocidade (codificada)

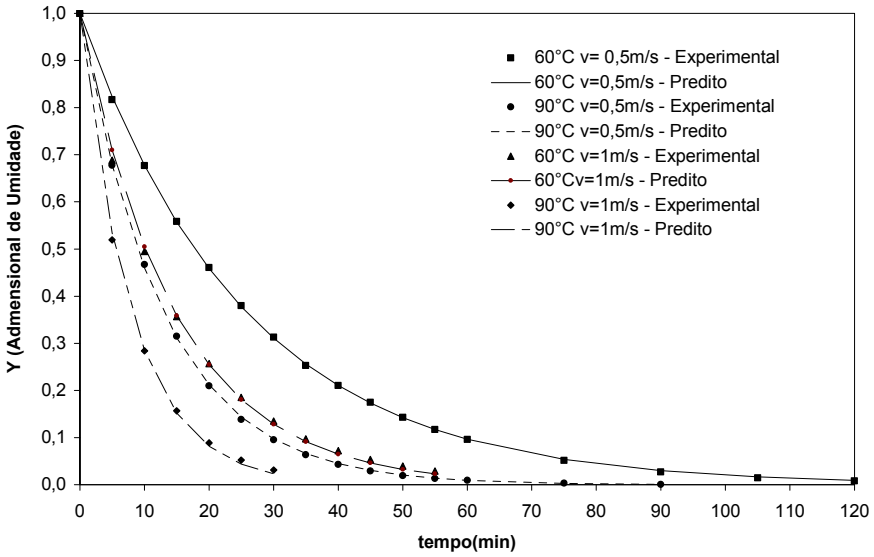
5.2.3. Modelo Exponencial

Os dados experimentais das curvas de secagem, cujo cálculo do desvio relativo médio foi feito até o ponto de umidade de 0,10g água/g massa seca, foram ajustados para o modelo exponencial (Equação 3.23) através de regressão não-linear, obtendo-se a constante de secagem k, o coeficiente de determinação (R^2) e desvio relativo médio (E), que se encontram na Tabela 5.13.

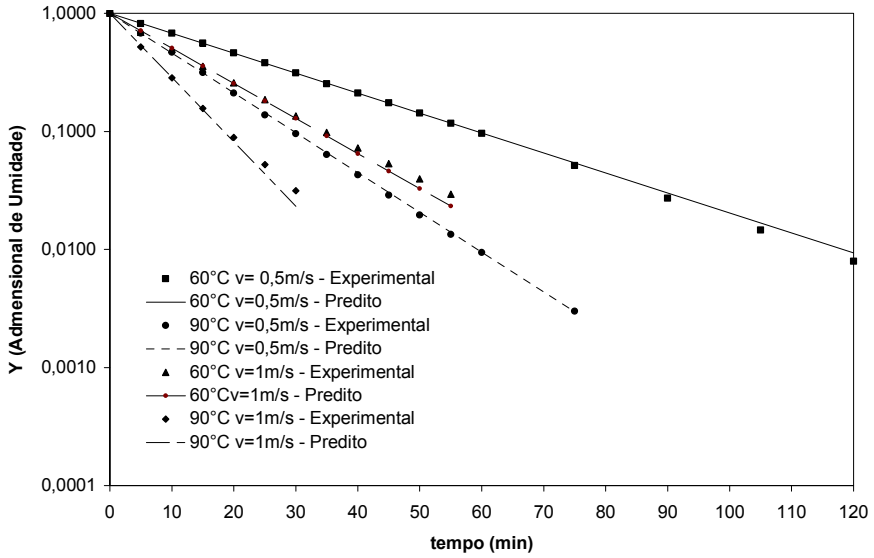
Tabela 5.13. Constante de secagem estimada pelo modelo exponencial, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para o resíduo de limão siciliano *in natura*.

Ensaios	T (°C)	v_{ar} (m/s)	k (x10^4 s^{-1})	R^2	E (%)
1	60	0,5	6,49	0,9999	3,16
2	90	0,5	12,94	0,9999	3,17
3	60	1,0	11,39	0,9993	8,19
4	90	1,0	20,90	0,9994	10,18
5	75	0,75	13,21	0,9999	3,33
6	75	0,75	13,17	0,9999	3,84
7	75	0,75	13,21	0,9999	4,44

Nas Figuras 5.18 e 5.19 encontram-se os dados experimentais ajustados pelo modelo exponencial.

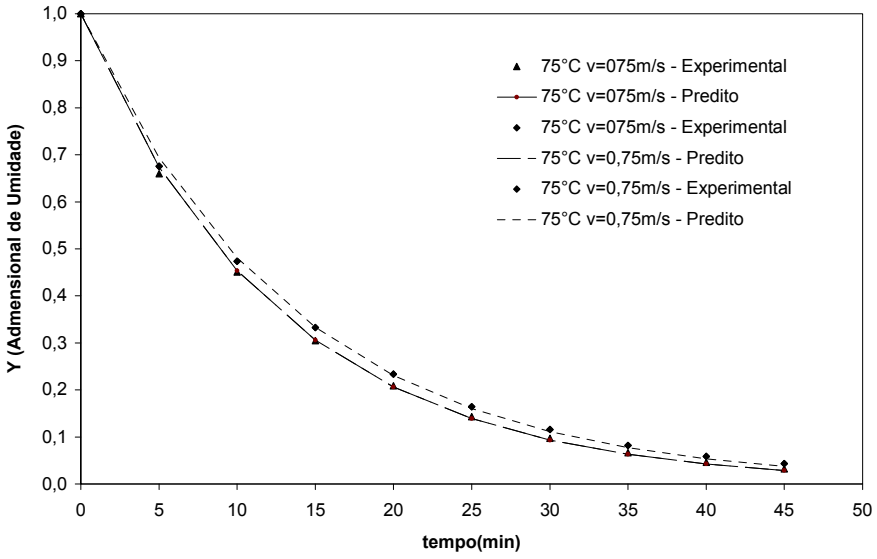


(a)

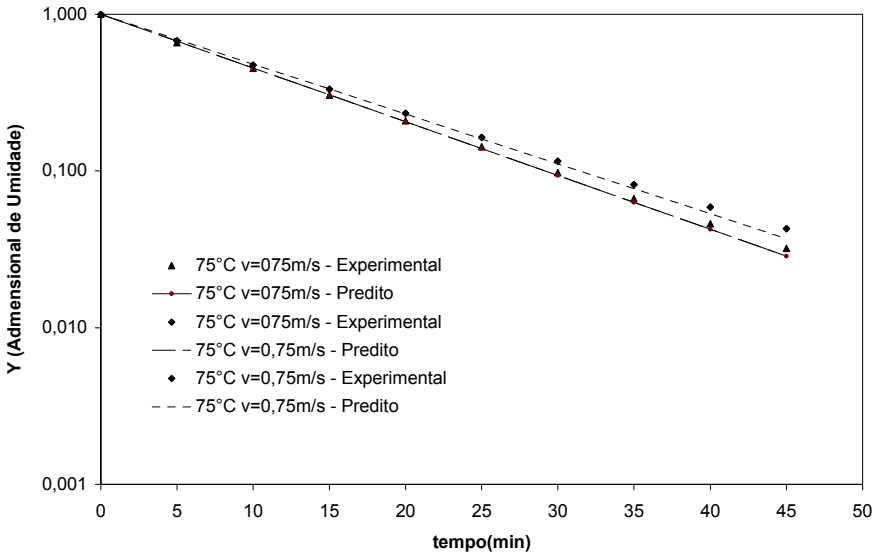


(b)

Figura 5.18. Ajuste do modelo de exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperaturas de 60 e 90°C.



(a)



(b)

Figura 5.19. Ajuste do modelo exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, temperatura de 75°C.

Analisando-se a Tabela 5.13, Figuras 5.18 e 5.19 observa-se que o modelo exponencial ajustou-se melhor aos dados experimentais, apresentando maiores valores de coeficiente de determinação (R^2=0,99) e menores valores de desvio relativo médio (menores do que 10%). Modelos empíricos, como o modelo exponencial, são obtidos de uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem e seus

parâmetros não tem significado físico, contudo, podem descrever a curva de secagem para as condições experimentais do processo (SIMAL *et al.*, 2005).

Na Tabela 5.14 encontram-se os valores dos efeitos estimados para os fatores temperatura e velocidade do ar para a constante de secagem obtida experimentalmente.

Tabela 5.14. Efeito estimado, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para a constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**1,30E-03**	**8,192E-06**	**159,06**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	**8,0E-04**	**1,084E-05**	**37,03**	**< 0,0001**
Velocidade do ar (L)	**6,5E-04**	**1,084E-05**	**29,87**	**< 0,0001**
Temperatura x Velocidade do ar	**1,5E-04**	**1,084E-05**	**6,85**	**0,0064**

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.14 pode-se afirmar que os parâmetros temperatura, velocidade do ar e a interação entre as duas variáveis apresentaram efeito positivo no valor da constante de secagem, ao nível de significância de 5%, isto é, um aumento em qualquer um desses fatores acarreta em um aumento da constante de secagem.

Na Tabela 5.15 está apresentada a análise de variância (ANOVA) do modelo ajustado para a constante de secagem.

Tabela 5.15. Análise de variância do modelo ajustado para constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado	p-valor
Regressão	1,09E-06	3	3,62E-07	770,14	0,00005
Resíduos	1,41E-09	3	4,70E-10		
Total	1,09E-06	6			

% variação explicada (R^2) = 99,87; $F_{3,3,0,95}$ = 9,28

Na Tabela 5.15, verificou-se a significância da regressão, através do teste-F e da análise de variância. O coeficiente de determinação (R^2) para o modelo ajustado foi de 0,9987. O modelo apresentou regressão significativa, ao nível de 95% de confiança, pois o $F_{calculado}$ da regressão com relação ao resíduo foi de 770,14 e superior ao $F_{tabelado}$ de 9,28.

A Tabela 5.16 apresenta os coeficientes de regressão do modelo codificado para constante de secagem e a Figura 5.17 apresenta a superfície de resposta e a curva de nível para constante de secagem. Pode-se verificar que a região que possui os maiores valores de *k* encontra-se nos maiores valores de temperatura e velocidade do ar de secagem. Observa-se que a difusividade efetiva (D_{ef}) e a constante de secagem (*k*), obtidas respectivamente pelos modelos de Fick e exponencial, apresentaram um comportamento similar com a variação da temperatura e velocidade do ar de processo.

Tabela 5.16. Coeficiente de Regressão, Erro Padrão, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para a constante de secagem do resíduo de limão siciliano após a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**1,30E-03**	**8,192E-06**	**159,06**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	**4,01E-04**	**1,084E-05**	**37,03**	**< 0,0001**
Velocidade do ar (L)	**3,24E-04**	**1,084E-05**	**29,87**	**< 0,0001**
Temperatura x Velocidade do ar	**7,43E-05**	**1,084E-05**	**6,85**	**0,0064**

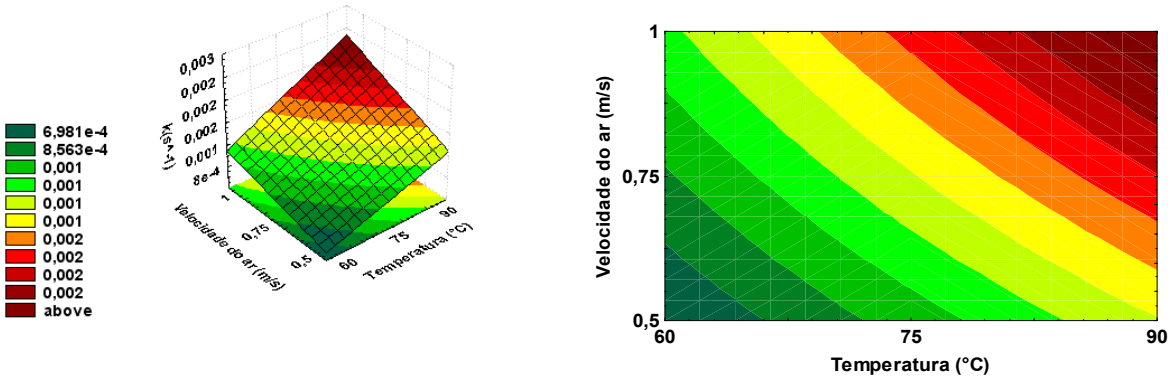


Figura 5.20. Superfície de resposta e curva de nível para a constante de secagem (k) do resíduo de limão siciliano para a secagem convectiva em leito fixo até umidade final de 10% em b.u., relacionando temperatura (°C) e velocidade do ar (m/s).

O modelo com as variáveis codificadas que representa a constante de secagem em função da velocidade do ar e da temperatura na faixa estudada está apresentada na Equação 5.2:

$$k = 1{,}30 \cdot 10^{-3} + 4{,}01 \cdot 10^{-4} T - 3{,}24 \cdot 10^{-4} v + 7{,}43 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot v \quad (5.2)$$

Onde: *T* =Temperatura (codificada)
v= Velocidade (codificada)

5.2.4. Caracterização das Fibras Alimentares

As fibras alimentares foram obtidas após a secagem do resíduo sólido *in natura* nas diferentes condições de secagem realizadas leito fixo, até o valor de umidade de cerca de 10%, em base úmida, e posterior trituração do resíduo sólido seco em um moinho de facas.

5.2.4.1. Composição Centesimal

A Tabela 5.17 apresenta a composição centesimal das fibras obtidas a partir do resíduo de limão siciliano.

Tabela 5.17. Composição Centesimal da Fibra Alimentar.

Análise	***Valor médio ± Desvio padrão****
Cinzas (base seca, %)	2,64 ± 0,03
Proteínas (base seca, %)	4,85 ± 0,02
Lipídios (base seca, %)	0,96 ± 0,06

* Amostras em triplicata

Pode-se obter ainda os valores de carboidratos totais, por diferença, de 91,55%, dos quais 87,36% representam a quantidade de fibra dietética total (Tabela 5.18). Marín *et al.* (2007) observou valores de 2,54% de cinzas, 3,09% de lipídios e 8,72% de proteínas para fibras obtidas de cascas de limão siciliano. Larrauri *et al.* (1994) observou valores de 3% de cinzas, 0,75% de lipídios e 5% de proteínas para fibras obtidas de cascas de limão da variedade eureka; essas diferenças de composição podem ser decorrentes do tipo de solo (localidade do cultivo), tempo de cultivo e época de colheita.

Na Figura 5.21 está apresentado o aspecto visual da fibra alimentar obtida do resíduo de limão siciliano.

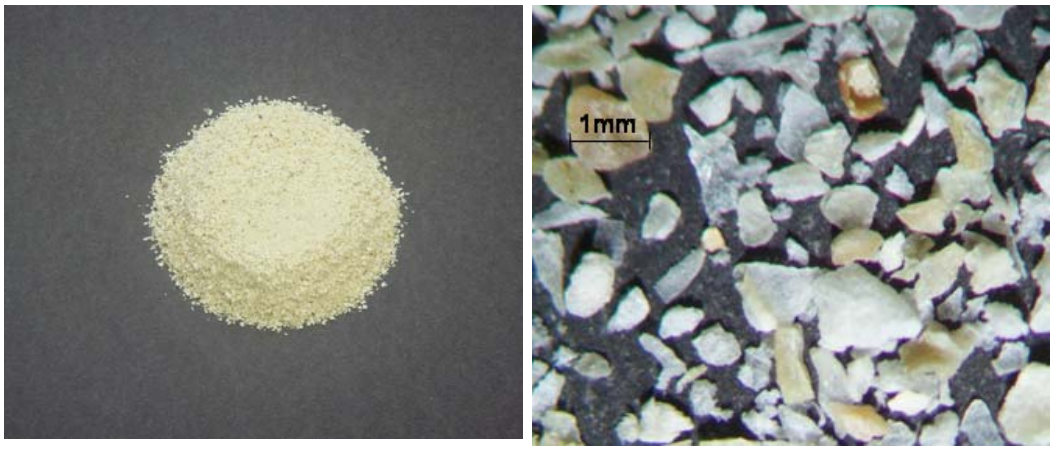


Figura 5.21. Fibra Alimentar obtida do Resíduo de Limão Siciliano.

Na Tabela 5.18 está apresentada a composição da fibra alimentar em relação ao conteúdo de fibra total, solúvel e insolúvel.

Tabela 5.18. Composição da Fibra Alimentar.

Tipo de Fibra	***Valor médio ± Desvio padrão****
Fibra Total (base seca, %)	87,36 ± 0,24
Fibra Insolúvel (base seca, %)	68,92 ± 0,11
Fibra Solúvel (base seca, %)	18,44 ± 0,17
Relação Insolúvel/Solúvel	4:1

* Amostras em triplicata

Segundo Larrauri (1999) um produto para ser aceito com rico em fibras deve ter no mínimo 50% de conteúdo de fibra alimentar total. Foi observado que a fibra alimentar de limão siciliano contém alto teor de fibra total (87,36%) apresentando teores significativos de fibra insolúvel (68,92%) e fibra solúvel (18,44%). Marín *et al.* (2007) obteve uma quantidade de 64,56% de fibra insolúvel e de 17,15% para as fibras obtidas de limão siciliano (*Citrus limon* (L.) Burm f.) obtidos do processamento das indústrias de suco cuja procedência é a mesma das fibras obtidas no presente trabalho.

5.2.4.2. Caracterização Granulométrica das Fibras

A caracterização granulométrica das fibras foi feita através da peneiragem como descrito no item 4.4. A Figura 5.22 apresenta o histograma da distribuição do tamanho das partículas onde: ΔX_i= fração mássica das partículas retidas em cada peneira e D_i= diâmetro de malha das peneiras.

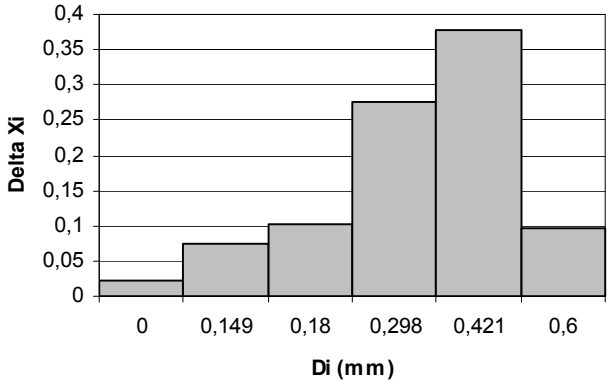


Figura 5.22. Histograma da Distribuição do tamanho de partículas das fibras.

O diâmetro médio das partículas calculado através da Equação 3.28 foi igual à 0,433mm e a faixa granulométrica das fibras obtidas foi de 0,149 a 0,600mm.

5.2.4.3. Análises Físico-químicas das Fibras

5.2.4.3.1. Conteúdo de Umidade

Os resultados da determinação do conteúdo de umidade para as fibras de limão siciliano obtidas após a secagem em leito fixo nas condições determinadas no planejamento experimental (Tabela 4.3) estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19. Conteúdo de Umidade da Fibra Alimentar de limão siciliano.

Experimento	Condições Experimentais	Umidade (em b.u) ± Desvio Padrão*
1	60°C e 0,5m/s	4,98 ± 0,11
2	60°C e 1,0m/s	4,82 ± 0,04
3	90°C e 0,5m/s	5,14 ± 0,16
4	90°C e 1,0m/s	5,70 ± 0,51
5	75°C e 0,75m/s	4,74 ± 0,32
6	75°C e 0,75m/s	4,80 ± 0,06
7	75°C e 0,75m/s	4,86 ± 0,10

* Amostras em triplicata

Tabela 5.20. Estimativa dos efeitos para o conteúdo de umidade da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**5,006**	**0,105**	**47,897**	**<0,0001**
Temperatura (L)	0,200	0,277	0,723	0,522
Velocidade do ar (L)	0,520	0,277	1,881	0,157
Temperatura x Velocidade do ar	0,360	0,277	1,302	0,284

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.20 verifica-se que apenas a média é significativa, a 95% de confiança, para o conteúdo de umidade da fibra alimentar. A média do conteúdo de umidade foi de 5,00%, em base úmida, o que corresponde a 5,26% em base seca. Santana (2005) obteve valores entre 4,5 e 8,5% de umidade, em base seca, para diferentes frações de laranja. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram conteúdo de umidade abaixo de 9%, valor máximo recomendado por Larrauri (1999).

5.2.4.3.2. pH

Na Tabela 5.21 verificam-se os valores de pH encontrados para as amostras de fibra de limão obtidas após a secagem em leito fixo nas condições determinadas na Tabela 4.3 do planejamento.

Tabela 5.21. Medidas de pH para a fibra alimentar de limão siciliano.

Experimento	Condições Experimentais	pH ± Desvio Padrão*
1	60°C e 0,5m/s	4,25 ± 0,02
2	60°C e 1,0m/s	4,35 ± 0,01
3	90°C e 0,5m/s	4,33 ± 0,01
4	90°C e 1,0m/s	4,25 ± 0,00
5	75°C e 0,75m/s	4,24 ± 0,02
6	75°C e 0,75m/s	4,27 ± 0,02
7	75°C e 0,75m/s	4,24 ± 0,01

* Amostras em triplicata

Tabela 5.22. Estimativa dos efeitos para o pH da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**4,276**	**0,014**	**307,075**	**<0,0001**
Temperatura (L)	0,010	0,037	0,271	0,804
Velocidade do ar (L)	-0,010	0,037	-0,271	0,804
Temperatura x Velocidade do ar	-0,090	0,037	-2,443	0,092

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.22 verifica-se que apenas a média é significativa, a 95% de confiança, para o valor de pH das suspensões de fibra alimentar cujo valor médio foi de 4,28. Lario e colaboradores (2004) observaram que o pH das fibras obtidas da casca de limão da variedade mesero foi de 3,98. Os valores superiores encontrados neste trabalho podem ser justificados pela diferença de variedade da fruta, índice de maturação das mesmas, época de colheita entre outros fatores.

5.2.4.3.3. Acidez

Os valores de acidez encontrados para a fibra de limão siciliano obtida após a secagem em leito fixo nas condições do planejamento (Tabela 4.3) encontram-se na Tabela 5.23.

Tabela 5.23. Resultados de acidez, em g de ácido cítrico por 100mL para a fibra alimentar do resíduo de limão siciliano.

Experimento	Condições Experimentais	Acidez (g ácido cítrico/100mL) ± Desvio Padrão*
1	60°C e 0,5m/s	0,134 ± 0,006
2	60°C e 1,0m/s	0,143 ± 0,006
3	90°C e 0,5m/s	0,135 ± 0,006
4	90°C e 1,0m/s	0,131 ± 0,006
5	75°C e 0,75m/s	0,135 ± 0,006
6	75°C e 0,75m/s	0,138 ± 0,002
7	75°C e 0,75m/s	0,135 ± 0,006

* Amostras em triplicata

Tabela 5.24. Estimativa dos efeitos para a acidez da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**0,136**	**0,001**	**251,926**	**<0,0001**
Temperatura (L)	0,002	0,001	1,752	0,178
Velocidade do ar (L)	**-0,006**	**0,001**	**-3,855**	**0,031**
Temperatura x Velocidade do ar	**-0,006**	**0,001**	**-4,556**	**0,020**

(L): linear

Apesar dos efeitos da velocidade do ar e da interação entre as variáveis temperatura e velocidade do ar, serem significativos, ao nível de confiança de 95%, seus valores são muito pequenos (0,006) e representam o desvio padrão da medida da análise. Portanto pode-se considerar somente o valor médio de acidez de 0,136g de ácido cítrico/100mL como significativo, ao nível de confiança de 95%.

5.2.3.3.4. Atividade de Água

Os valores de atividade de água, medidos na temperatura de 25°C, da fibra de limão siciliano obtida após a secagem em leito fixo nas condições do planejamento (Tabela 4.3) encontram-se na Tabela 5.25.

Tabela 5.25. Valores encontrados de Atividade de Água para a fibra alimentar de limão siciliano.

Experimento	Condições Experimentais	Atividade de Água ± Desvio Padrão*
1	60°C e 0,5m/s	0,338 ± 0,001
2	60°C e 1,0m/s	0,324 ± 0,004
3	90°C e 0,5m/s	0,351 ± 0,005
4	90°C e 1,0m/s	0,368 ± 0,003
5	75°C e 0,75m/s	0,370 ± 0,005
6	75°C e 0,75m/s	0,360 ± 0,004
7	75°C e 0,75m/s	0,344 ± 0,003

* Amostras em triplicata

Tabela 5.26. Estimativa dos efeitos para a atividade de água da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**0,351**	**0,005**	**64,407**	**<0,0001**
Temperatura (L)	0,002	0,014	0,104	0,924
Velocidade do ar (L)	0,029	0,014	1,978	0,142
Temperatura x Velocidade do ar	0,016	0,014	1,076	0,361

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.26 verifica-se que apenas a média é significativa, a 95% de confiança, para o valor de atividade de água, das suspensões de fibra alimentar cujo valor médio foi de 0,351. Santana (2005) observou valores de atividade de água entre 0,27 e 0,43 para as fibras obtidas de diferentes frações de laranja obtidas da secagem convectiva. A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que os valores encontrados para atividade de água encontram-se bem abaixo de 0,6 onde há pequeno ou nenhum crescimento de microorganismos.

5.3. Planejamento Experimental

Para avaliar a influência das variáveis de processo (temperatura e velocidade do ar de secagem) sobre algumas propriedades tecnológicas (*IAA*, *ISA*, *IAO* e *VI*) foi utilizado um planejamento fatorial completo 2^2, mais 3 pontos centrais (nível 0). A Tabela 5.27 mostra a matriz do planejamento com os resultados encontrados.

Tabela 5.27. Resultados experimentais de *IAA*, *ISA*, *IAO e VI* obtidos através da secagem do Limão Siciliano *in natura* em leito fixo.

	Variáveis Independentes				Respostas			
	Real		Codificado					
Ensaio	*T* (°C)	v_{ar} (m/s)	*T*	v_{ar}	IAA	ISA	IAO	*VI*
1	60	0,50	-1	-1	14,87 ± 0,22	7,03 ± 0,11	3,10 ± 0,09	13,93 ± 0,04
2	90	0,50	+1	-1	14,55 ± 0,27	6,83 ± 0,03	3,28 ± 0,08	13,91 ± 0,02
3	60	1,00	-1	+1	15,45 ± 0,17	5,78 ± 0,22	3,20 ± 0,10	13,69 ± 0,01
4	90	1,00	+1	+1	14,08 ± 0,20	6,88 ± 0,17	3,24 ± 0,02	13,94 ± 0,08
5	75	0,75	0	0	15,82 ± 0,28	6,43 ± 0,09	3,47 ± 0,05	13,78 ± 0,05
6	75	0,75	0	0	15,31 ± 0,10	6,32 ± 0,05	3,27 ± 0,01	13,87 ± 0,09
7	75	0,75	0	0	15,88 ± 0,03	6,49 ± 0,08	3,41 + 0,08	13,87± 0,03

A seguir analisar-se-á cada resposta separadamente. A Tabela 5.28 mostra a estimativa dos efeitos para o Índice de Absorção de Água (*IAA*), em g de água/ g matéria seca, da fibra alimentar obtida.

Tabela 5.28. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Absorção de Água (*IAA*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**15,136**	**0,284**	**53,228**	**<0,0001**
Temperatura (L)	-0,843	0,752	-1,120	0,344
Velocidade do ar (L)	0,056	0,752	0,074	0,946
Temperatura x Velocidade do ar	-0,525	0,752	-0,698	0,535

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.28 verifica-se que apenas a média é significativa, a 95% de confiança, para o Índice de Absorção de Água (*IAA*) da fibra alimentar, assim o valor médio de *IAA* foi de 15,14g de água/g de matéria seca. Os valores de capacidade de absorção de água são altos indicando que o material poderia ser utilizado como um ingrediente para reduzir calorias, evitando sinerese e modificando a viscosidade e textura dos alimentos (GRIGELMO-MIGUEL & MARTÍN-BELLOSO,1999). Lario e colaboradores (2004) obtiveram um máximo de 15g de água/g de matéria seca para a casca do limão da variedade *Mesero*, com tamanho de partícula maior que 0,9mm. Alguns autores consideram como padrão, níveis de retenção de água acima de 20g de água/g de matéria seca para fibras de frutas e vegetais (ROBERTSON *et al.*, 2000).

A Tabela 5.29 mostra a estimativa dos efeitos para o Índice de Solubilidade em Água (*ISA*), em %, da fibra alimentar obtida.

Tabela 5.29. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Solubilidade em Água (ISA) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**6,536**	**0,068**	**96,043**	**<0,0001**
Temperatura (L)	0,455	0,180	2,525	0,086
Velocidade do ar (L)	**-0,602**	**0,180**	**-3,343**	**0,044**
Temperatura x Velocidade do ar	**0,650**	**0,180**	**3,610**	**0,036**

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.29, observam-se que os efeitos da velocidade do ar e da interação entre as variáveis temperatura e velocidade do ar, são significativos, ao nível de significância de 5%, contudo, como os valores dos resultados de *ISA* são pequenos os desvios aparentemente mostram influência das variáveis no processo de secagem. Contudo, a propriedade *ISA* (que utiliza o líquido sobrenadante) depende da propriedade *IAA* (que utiliza a polpa hidratada) e como está última não apresentou efeito significativo das variáveis, pois possuem valores absolutos bem maiores (15,14g de água/g massa seca), pode-se considerar que para a variável *ISA* também não houve efeito significativo das variáveis, com isso, somente o valor médio de *ISA* de 6,54%, é significativo ao nível de confiança de 95%, analisando a faixa granulométrica de 0,149 a 0,600mm. Santana (2005) observou que o valor desse índice diminuiu com a redução do tamanho da partícula para a fibra de albedo de laranja, obtida através da secagem convectiva, isto é, para a faixa de 0,30 a 0,42mm obteve um valor de aproximadamente 25%, para a faixa de 0,21 a 0,30mm cerca de 15%, e para a faixa granulométrica de 0,14 a 0,21mm o valor de 6% de *ISA*.

A Tabela 5.30 apresenta a estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Absorção de Óleo (*IAO*), em g de óleo/g de matéria seca, da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Tabela 5.30. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Índice de Absorção de Óleo (*IAO*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**3,282**	**0,060**	**54,841**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	0,111	0,158	0,698	0,535
Velocidade do ar (L)	0,025	0,158	0,158	0,884
Temperatura x Velocidade do ar	-0,067	0,158	-0,424	0,700

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.30 verifica-se que apenas a média é significativa a 95% de confiança para o Índice de Absorção de Óleo (*IAO*) da fibra alimentar obtida. O valor do índice de absorção de óleo foi de 3,28g de óleo/g de matéria seca, pois só a média foi significativa, ao nível de confiança de 95%, para a faixa granulométrica estudada de 0,149 a 0,600mm. Essa propriedade é de interesse para produtos cárneos pois melhora a retenção de gordura que é perdida normalmente durante o cozimento, além de aumentar a renteção do flavor e o rendimento tecnológico (THEBAUDIN *et al*., 1997). Lario e colaboradores (2004) obtiveram valores maiores do que os obtidos neste trabalho, isto é, 6,81g de óleo/g de matéria seca para a casca do limão da variedade Mesero com tamanho de partícula maior que 0,9mm. Essa diferença pode ser explicada devido ao fato de que a diminuição do tamanho da partícula das fibras alimentares está associada com a redução dos valores dos índices de absorção de água e de óleo, observados por Sangnark & Noomhorm (2003).

A Tabela 5.31 apresenta a estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Volume de Intumescimento (*VI*), em mL/g, da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Tabela 5.31. Estimativa dos efeitos para a propriedade tecnológica Volume de Intumescimento (*VI*) da fibra alimentar obtida através da secagem em leito fixo.

Fatores	Efeito Estimado	Erro Padrão	t (3)	p-valor
Média	**13,856**	**0,018**	**775,920**	**< 0,0001**
Temperatura (L)	0,115	0,047	2,434	0,093
Velocidade do ar (L)	-0,105	0,047	-2,222	0,113
Temperatura x Velocidade do ar	0,135	0,047	2,857	0,065

(L): linear

Analisando-se a Tabela 5.31 verifica-se que apenas a média é significativa a 95% de confiança para a propriedade Volume de Intumescimento (*VI*) da fibra alimentar obtida. O valor do volume de intumescimento foi de 13,85mL/g, pois só a média foi significativa, ao nível de confiança de 95%, para a faixa granulométrica estudada de 0,149 a 0,600mm. Esta propriedade é importante não somente para a aplicação em alimentos mas também para funções gastrointestinais humanas (PRAKONGPAN *et al.* 2002). Santana (2005) observou um valor máximo de 15mL/g para as diferentes frações de laranja e Céspedes (1999) encontrou valores de 16mL/g para polpa de laranja não extrusada. Os resultados encontrados neste trabalho estão muito próximos dos observados por estes autores.

5.4. Leito de Jorro

O resíduo sólido do limão siciliano por apresentar alta umidade superficial é caracterizado como coesivo. Desse modo, suas partículas se unem formando aglomerados e diante do escoamento do gás se rearranjam originando canais de escoamento preferencial. Foram realizados ensaios fluidodinâmicos, à temperatura ambiente, com cargas de produto de 300, 400 e 500 com um conteúdo de umidade de 85, 60 e 50%, em base úmida, os produtos com umidades menores do que a inicial do resíduo foram obtidos a partir de uma pré-secagem realizada em leito fixo. Verificou-se que com estes valores de umidade o produto se aglomerava mecanicamente formando canais preferenciais, o que dificultou a formação do jorro. Já com o produto com um conteúdo de umidade de cerca de 40%, em base úmida, tentou-se utilizar partículas inertes na proporção de 100g de esferas de vidro para 300g de material úmido, contudo não ocorreu movimentação do material. As esferas de vidro devido à sua alta densidade (aproximadamente 2516kg/m^3 para um diâmetro médio de 3,76mm) aumentaram a dificuldade de formação do jorro. Em outros testes tentou-se utilizar partículas inertes mais leves, como por exemplo, *pellet* de polipropileno (densidade real de 905,3kg/m^3 para um diâmetro médio de 2,91mm) e o ABS que é uma partícula arredondada (cuja densidade real é de 1022,1kg/m^3 para um diâmetro médio de 3,76mm), a movimentação do material foi melhorada havendo a formação do jorro. Contudo, ao final do experimento não foi possível a separação do material inerte do produto seco, por peneiragem, uma vez que o produto seco pela sua heterogeneidade de tamanho apresentou partículas do mesmo tamanho que o material inerte.

A partir de testes preliminares optou-se pela não utilização de partículas inertes e construiu-se a curva fluidodinâmica do produto, dada pela Figura 5.23, com os seguintes dados: carga mássica de produto de 330g com um conteúdo de umidade em torno de 40%, em base úmida, altura do leito estático de 15cm, ar à temperatura ambiente de 27°C. Nestas condições formou-se o jorro e ocorreu uma boa recirculação dos sólidos. Na Figura 5.22, os símbolos preenchidos representam os valores de queda de pressão obtidos à vazão crescente e os símbolos sem preenchimento representam os valores de queda de pressão obtidos à vazão decrescente.

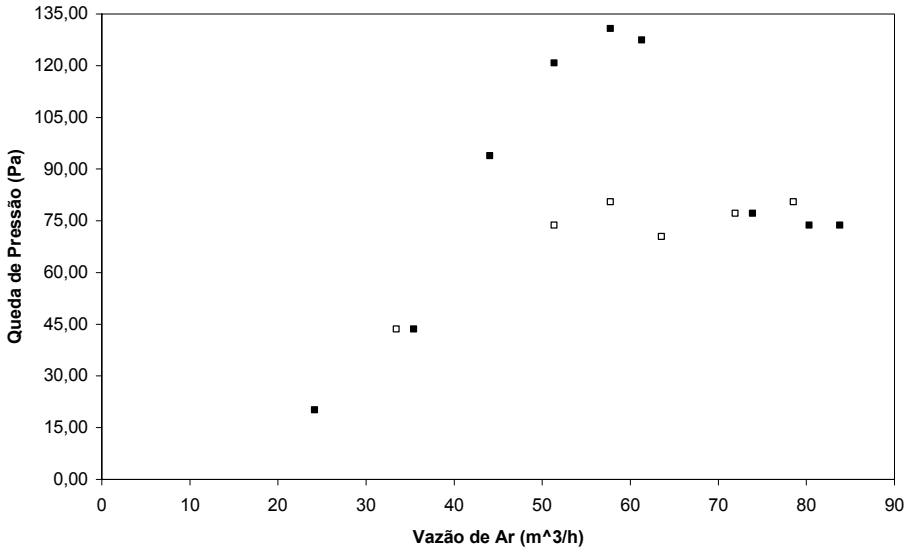


Figura 5.23. Curva fluidodinâmica do resíduo de limão siciliano no leito de jorro.

Comparando-se a curva fluidodinâmica do resíduo de limão, Figura 5.23, com a Figura 3.7 (curva característica de um leito de jorro) pode-se dizer que o valor da queda de pressão aumentou à medida que a vazão de ar aumentava até o ponto correspondente ao da queda de pressão máxima no jorro. Uma nova elevação da vazão de ar além desse ponto permitiu romper a superfície do leito e então formou-se o jorro estável, onde a queda de pressão é constante. A partir desse ponto, diminuindo-se a velocidade do gás lentamente pôde-se determinar a velocidade de mínimo jorro.

A localização do ponto de tomada de pressão na entrada do ar pelo jorro (situada na base do leito) é conveniente para a operação do sistema. Se por acaso a região do ânulo fluidizar a uma determinada altura, este fenômeno pode ser visualizado pois o valor médio da queda de pressão nesta região se manterá constante (ZHONG *et al*., 2006).

A partir da Figura 5.23 pode-se dizer que para as condições dadas, o valor da vazão de jorro mínimo é de aproximadamente 73,86m^3/h, o valor da queda de pressão máxima é de 130,81Pa e o valor da queda de pressão de jorro estável é de 73,79Pa. Utilizando a Equação 3.26 pôde-se calcular a velocidade de mínimo jorro que foi igual à 3,03m/s, como se o leito tivesse a geometria cone-cilíndrica. Uma vez que o leito possui a geometria bi-dimensional e a vazão total de ar divide-se em duas vazões: a do jorro e a do ânulo, calculou-se duas velocidades nas distintas regiões o que resultou em 3,89m/s para a região do jorro e 1,01m/s para a região do ânulo.

Devido à algumas limitações do equipamento e às características do material, não foi possível a realização de um planejamento experimental dada a dificuldade inicial de formação do jorro. O período transiente correspondeu aproximadamente aos dois primeiros minutos do experimento quando a válvula da vazão total foi aberta até a entrada em regime. Com o produto com 40% de umidade, em base úmida, foram realizados experimentos a 60, 75 e 90°C na vazão de 78,53m^3/h, este valor de vazão utilizado corresponde à uma velocidade superficial do ar de U=1,06U_{mj}, caso a vazão total de ar não se dividisse em duas. Esta foi a condição mínima de vazão que proporcionou a formação do jorro, que manteve o jorro estável além de uma boa recirculação da amostra nas regiões do ânulo. Nessas condições determinaram-se as curvas de secagem do produto no leito de jorro.

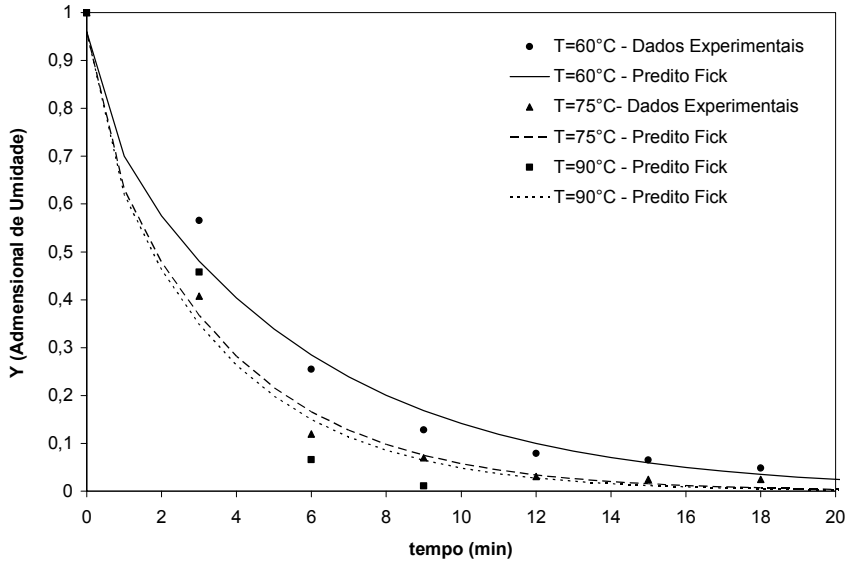
Os dados experimentais das curvas de secagem realizadas em leito de jorro (Apêndice C) foram ajustados pelo modelo de Fick, utilizando-se os valores médios de duas corridas nas mesmas condições. Para isso, os valores de umidade de equilíbrio foram determinados a partir dos dados de umidade relativa do ar de secagem, aplicados no modelo de Chung-Pfost modificado, utilizando os valores dos parâmetros conforme Tabela 5.32.

Tabela 5.32. Valores de umidade relativa do ar de secagem e de umidade de equilíbrio para as diferentes condições de temperatura no leito de jorro.

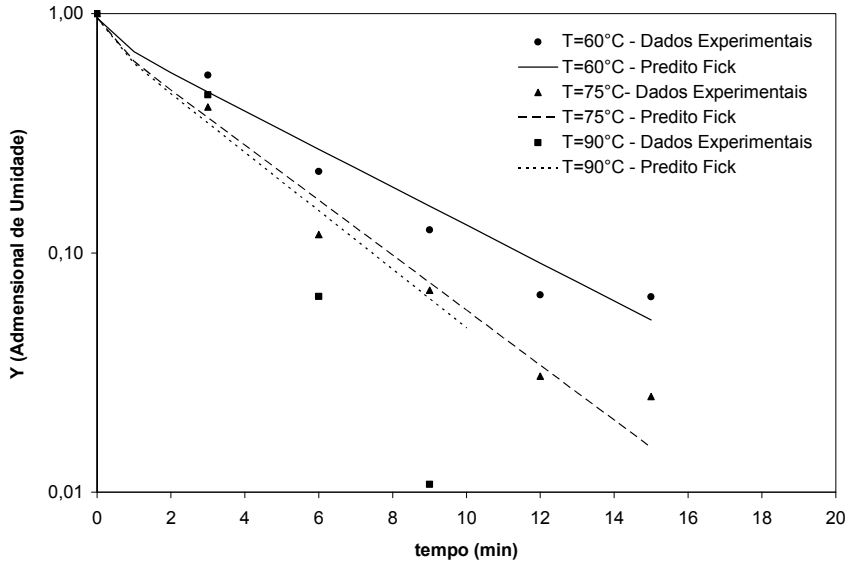
Ensaios	***T* (°C)**	***UR* (%)**	X_e **(g água/g massa seca)**
1 e 2	60	7,79	0,0057
3 e 4	75	3,80	0,0037*
5 e 6	90	2,23	0,0004*

*Obs: Estes valores de X_e foram estimados a partir dos dados da secagem em leito fixo pois não foi possível utilizar a equação determinada para encontrar os valores de X_e uma vez que os valores das umidades relativas do ar de secagem são muito pequenos e encontram-se fora da faixa estudada.

Na Figura 5.24 está apresentado o gráfico dos valores médios experimentais e os valores preditos pelo modelo de Fick para as condições estudadas.



(a)



(b)

Figura 5.24. Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, em leito de jorro, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, nas temperaturas de 60, 75°C e 90°C

Aproximando o formato da amostra ao de uma placa plana infinita, o modelo de Fick foi utilizado para determinar a difusividade efetiva, através de um ajuste não-linear dos dados experimentais. Foram utilizados cinco termos da série infinita cujos valores encontrados estão mostrados na Tabela 5.33, bem como os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios relativos médios (E).

Tabela 5.33. Valores de difusividade efetiva estimados pelo modelo de Fick, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para a secagem em leito de jorro.

Ensaios	T (°C)	D_{ef} (10^{-9}m^2/s)	R^2	E (%)
1	60	2,64	0,9842	17,79
2	75	4,00	0,9942	18,40
3	90	4,26	0,9673	51,99

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) encontraram-se muito próximos de 1 e os desvios relativos médios foram superiores a 10%, esses altos valores podem ser explicados devido ao fato de que a difusividade da água não é constante, o sólido possui uma estrutura celular heterogênea, ocorre encolhimento com a evaporação da água, a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos, a temperatura do alimento aumenta durante o processo, como o produto é um material poroso e está triturado a maior parte da umidade encontra-se na superfície do mesmo e não no interior do sólido, há uma diferença de temperatura entre a base e o topo do leito, uma vez que há perdas de calor pelas paredes do equipamento.

Na Figura 5.25 está apresentado o gráfico da taxa de secagem versus umidade, em base seca, para as médias dos resultados obtidos das curvas de secagem a 60, 75 e 90°C. Pode-se perceber que na faixa de umidade de 40% até 10% a secagem se realizou no período de taxa decrescente de secagem.

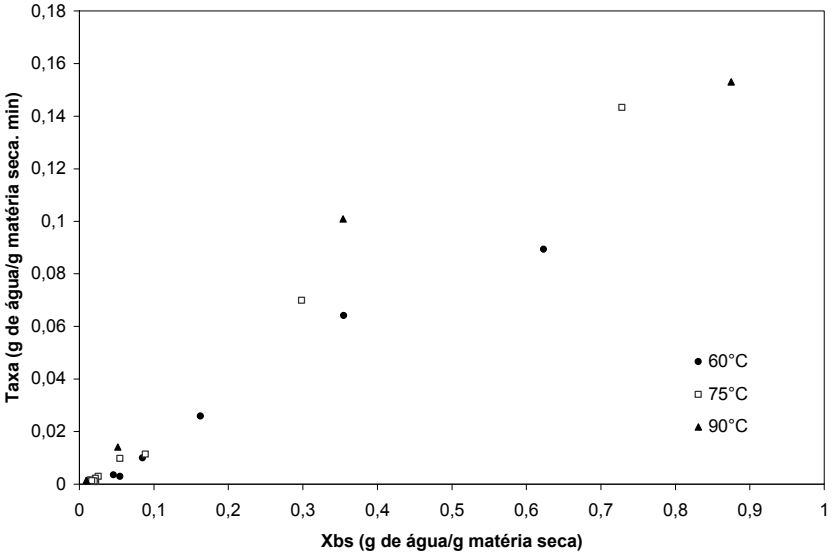


Figura 5.25. Gráfico da taxa de secagem versus umidade, em base seca, da secagem do resíduo de limão siciliano *in natura* no leito de jorro.

Comparando-se os valores de difusividade efetiva obtidos na secagem do resíduo de limão siciliano em leito fixo e de jorro pode-se confirmar as maiores taxas de transferência de calor e massa no equipamento de leito de jorro devido à maior faixa de valores observada de difusividade efetiva de 2,64 a $4,26.10^{-9}m/s^2$ para o leito de jorro comparando-se à faixa de valores encontrada para o equipamento de leito fixo que foi de 4,72 a $14,6.10^{-10}m/s^2$. As diferenças no valores de difusividade efetiva obtidos nos dois processos podem ser explicados devido aos seguintes fatores: a velocidade do ar no jorro é muito maior (3,89m/s) do que a velocidade máxima no leito fixo (1m/s), as geometrias dos leitos são diferentes, diferentes cargas de material foram utilizadas, leito fixo (500g) e leito de jorro (330g) com diferentes conteúdos iniciais de umidade, em base úmida, (85% para o fixo e 40% para o jorro), no leito de jorro há movimentação e recirculação do material o que promove também maior uniformidade na secagem do material.

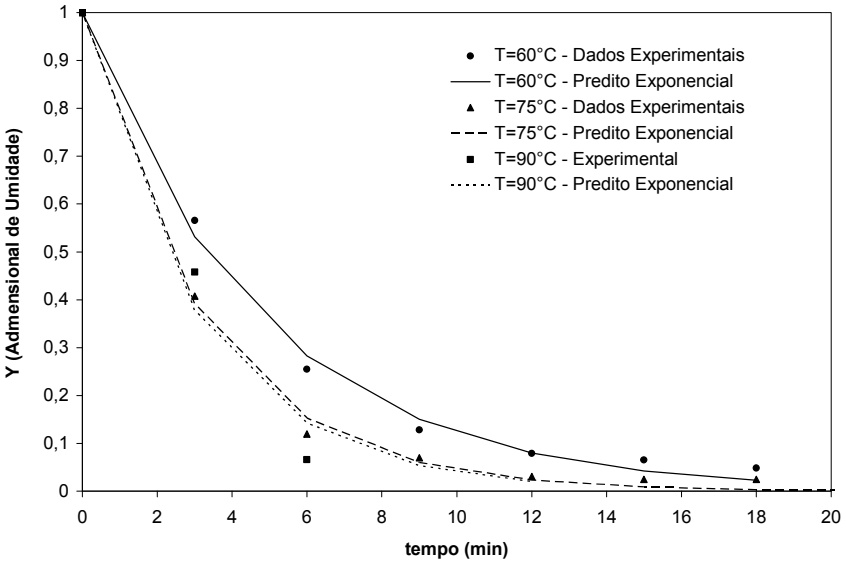
A transferência de calor no leito de jorro é complexa devido principalmentte à formação de pelo menos duas regiões distintas com mecanismos fluidodinâmicos e térmicos bem definidos, o jorro e o ânulo (FREIRE, 1992). A utilização do leito de jorro é adequada para a secagem de materiais sensíveis ao calor, uma vez que o aumento da temperatura do material é limitada devido à recirculação do produto e ao curto tempo de residência na região do jorro, onde ocorre a maior parte da transferência de calor, resultando na evaporação da umidade externa, enquanto que a transferência de umidade interna ocorre principalmente na região do ânulo (TULASIDAS *et al*. 1993).

Os dados experimentais das curvas de secagem, cujo cálculo do desvio relativo médio foi feito até o ponto de umidade de 0,10g água/g massa seca, foram ajustados também para o modelo exponencial através de regressão não-linear, obtendo-se a constante de secagem k, o coeficiente de determinação (R^2) e desvio relativo médio (E), que se encontram na Tabela 5.34.

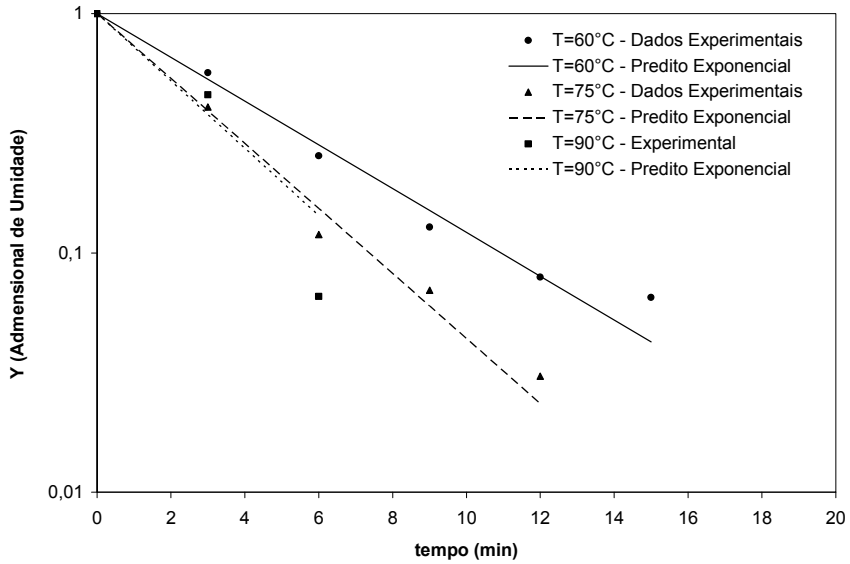
Tabela 5.34. Valores da constante de secagem (k) estimados pelo modelo exponencial, coeficiente de determinação e desvio relativo médio para a secagem em leito de jorro.

Ensaios	T (°C)	k ($10^3 s^{-1}$)	R^2	E (%)
1 e 2	60	3,5	0,9953	7,11
3 e 4	75	5,2	0,9962	13,95
5 e 6	90	5,4	0,9804	44,93

Na Figura 5.25 está apresentado o gráfico dos valores médios experimentais e os valores preditos pelo modelo exponencial para as condições estudadas.



(a)



(b)

Figura 5.25. Ajuste do modelo exponencial aos dados experimentais de secagem do resíduo de limão siciliano, em leito de jorro, cuja ordenada encontra-se em (a) escala linear e (b) semi-log, nas temperaturas de 60, 75°C e 90°C

Observando a Tabela 5.34 e a Figura 5.25 pode-se dizer que o modelo exponencial se ajustou melhor aos dados experimentais relacionados às temperaturas de 60 e 75°C, porém não se ajustou aos dados relacionados à temperatura de 90°C, após 3 min de experimento, isto pode ser explicado pelo fato dos ajustes terem sido feitos até o conteúdo de umidade de 0,10g água/g massa seca, até esse limite os dados experimentais apresentaram um bom ajuste; na temperatura de 90°C e tempo de

secagem de 6min esse ponto está abaixo desse valor, portanto esperava-se essa falta de ajuste, cujo desvio relativo médio foi igual à 44,93%.

Marmo (2007) estudou a secagem do resíduo sólido originado da produção de azeite de oliva em um secador de leito de jorro em batelada e em um outro secador de leito de jorro contínuo com *draft tube*. O material consistia de uma mistura de polpa (material fibroso) e sementes com as seguintes características: densidade bulk de 570kg/m^3, 40% de umidade em base úmida e tamanho das partículas de 2 a 4mm. O autor utilizou uma velocidade superficial do ar de U=1,15U_{mj} e observou que no leito de jorro convencional, em batelada, a secagem do material ocorreu somente no período de taxa decrescente, além disso, a presença de finos diminuiu a velocidade de jorro mínimo. A alta umidade inicial do material, 40% em base úmida, dificultou o começo da secagem devido à aglomeração do resíduo e a coesividade só foi reduzida quando a umidade do material diminuiu o que possibilitou uma melhor mobilidade do produto.

6. Conclusões

- O diâmetro médio das partículas do resíduo sólido seco de limão siciliano foi de 2,994mm, a densidade bulk determinada pela porosimetria de mercúrio foi de 1,0468g/cm^3. Observou-se que este material pode ser classificado como do Grupo D de Geldart.
- Para as isotermas de dessorção do resíduo de limão siciliano *in natura* o modelo de GAB foi o que apresentou melhor ajuste nas faixas de temperaturas estudadas.
- Para a cinética de secagem, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem, podendo ser utilizado para a predição da cinética de secagem do resíduo de limão siciliano *in natura* (até 0,10g água/g massa seca). Foi obtida a constante de secagem da equação, que variou de 6,49 a 20,90 $10^4 s^{-1}$ para a secagem em leito fixo e de 3,5 a 5,4.$10^3 s^{-1}$ para o leito de jorro.
- Os valores de difusividade efetiva calculados através do modelo difusional simplificado, baseado na 2ª Lei de Fick, ficaram na faixa de 4,72 a 14,6.10^{-10}m/s^2 para o resíduo de limão siciliano cuja secagem foi realizada em leito fixo e de 2,64 a 4,26.10^{-9}m/s^2 para a secagem realizada em leito de jorro.
- Através da Metodologia de Superfície de Resposta observou-se que para as condições de secagem estudadas na secagem em leito fixo não houve diferença significativa, ao nível de significância de 5%, entre as respostas estudadas relacionadas às propriedades tecnológicas das fibras de: Índice de Absorção de Água (*IAA*), Índice de Solubilidade em Água (*ISA*), Índice de Absorção em Óleo (*IAO*) e Volume de Intumescimento (*VI*).
- A curva fluidodinâmica para o leito de jorro apresentou perfil típico ao encontrado na literatura.

8. Referências Bibliográficas

AACC. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists**, 9th ed. Saint Paul: Eagen Press, 1995.

AACC. The definition of dietary fiber. **Cereal Foods World**, v.46, n.3, p.112-229, 2001.

ABECITRUS. **Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos**. Disponível em: <http://www.abecitrus.com.br>. Acesso em: 27 abr. 2007.

AIT MOHAMED, L.; KOUHILA,M.; JAMALI,A.; LAHSASNI,S.; MAHROUZ,M. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantim*). **Journal of Food Engineering**, v.67, p.491-498, 2005.

ALBRIGO, L.G.; CARTER. R.D. Structure of citrus in relation to processing. In: NAGY, S.; SHAW, P.E.; VELDHUIS, M.K. **Citrus Science and Technology**. Westport: AVI Book Publishing Company INC 1977. p.33-70.

ALESON-CARBONELL, L.; FÉRNADEZ-LOPEZ,J; PÉREZ-ALVAREZ,J.A; KURI, V. Characteristics of beef burger as influenced by various types of lemon albedo. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.6, p.247-255, 2005.

ANDERSON, R.A.; CONWAY, H.F.; PFEIFER, V.F. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. **Cereal Science Today**, v.14, n.1, p.11-12, 1969.

AOAC. **Official Methods of Analysis.** 16th ed. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 1997.

BARROS NETO, B.; SCARMINO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos – Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Campinas: Editora da UNICAMP, 2001. 401p.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry**, v.37, p. 911-17, 1959.

BOBBIO, P.A; BOBBIO, F.O. **Introdução à química de alimentos**. 2ª ed. São Paulo: Livraria Varela, 1995. 223p.

BOBBIO, P.A; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. 2ª ed. São Paulo: Livraria Varela, 1992. 151p.

BROD, F.P.R.; ALONSO,F.T.; PARK, K.L. **Secagem de produtos agrícolas**. XI Semana de Engenharia Agrícola.Campinas: Unicamp – Feagri, 1999. 121p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL,C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book Published, 1992. 450p.

BRUNAUER, S.; EMMET, T.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of American Chemical Society**, v.60, n.2, p.309-319, 1938.

CEPEA. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada.** Disponível em: <http://cepea.esalq.usp.br/citros>. Acesso em: 04 abr. 2006.

CÉSPEDES, M.A.L. **Otimização do processo de extrusão da polpa de laranja: modificação das propriedades funcionais e sua aplicação como fonte de fibra alimentar**.1999.163p. Tese (Título de Doutor em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CHAU, C.F.; HUANG, Y.L. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of Citrus sinensis L. Cv. Liucheng. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.51, p.2615-2618, 2003.

CHEN, C.; MOREY, R.V. Comparison of four EMC/ERH equations. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.32, p. 983-990, 1989.

CHINNAN, M.S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.18, p.83-88, 1985.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.10, p.549, 1967.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ª ed. S.I. Claredon Press Oxford, 1975. 414p.

CUNHA, R.L.;MAIALLE, K.G. e MENEGALLI,F.C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality. **Powder Tecnology**, v.107, n.3, p.234-242, 2000.

FAO. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em: 30 ago. 2006.

FENNEMA, O.R. **Food Chemistry**. 3rd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1996. 1067p.

FÉRNANDEZ-LOPEZ,J.; FÉRNANDES-GINÉS,J.M. ; ALESONCARBONELL,L.; SENDRA,E.; SAYAS-BARBERÁ E.; PÉREZ-ALVAREZ,J.A. Application of functional citrus by-products to meat products. **Trends in Food Science & Tecnology**, v.15, p.176-185, 2004.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **Advances in Drying**, v.1, p.119-153, 1980.

FREIRE, J.T. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. v.1. São Carlos: UFScar, p.41-85, 1992.

GARAU, M.C.; SIMAL, S.; FEMENIA, A.; ROSSELÓ, C. Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. **Journal of Food Engineering**, v.75, n.2, p.288-295, 2006.

GÁRCIA-PÉREZ,J.V.; CÁRCEL, J.A.; FUENTE-BLANCO,S.; RIERA-FRANCO DE SARABIA, E. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study. **Ultrasonics**, v.44, p.539-543, 2006.

GÁRCIA-PÉREZ,J.V; CÁRCEL, J.A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT – Food Science and Tecnology** (2007), doi: 10.1016/jlwt.2007.02.010.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. Characterization of fluidized powders. John Wiley & Sons Ltd, 1986. p.33-51.

GONÇALVES, E.C. **Secagem ciclônica do resíduo da indústria processadora de laranja**. 1996. 87p. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GOULD, M.J.; JASBERG, B.K.; DEXTER, L.B.; HSU, J.T.; LEWIS, S.M.; FAHEY,G.C. High-fiber, noncaloric flour substitute for baked foods. Properties of alkaline peroxide treated lignocelulose. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v.66, n.3, p.201-205, 1989.

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

GRIGELMO-MIGUEL, N.; MARTÍN-BELLOSO, O. Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. **Food Research International**, v.31, n.5, p.355-361, 1999.

HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v.33, n.1, p. 29-32, 1952.

JAMALI, A.; KOUHILA, M.; AIT MOHAMED, L.; IDLIMAM, A.; LAMHARRAR, A. Moisture adsorption–desorption isotherms of Citrus reticulata leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.77, p.71-78, 2006.

JAYA, D.S.; MAZZA, G. Comparison of five, three parameter equations for description of adsorption data of oats. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, n.36, p.119-125, 1993.

KIMBAL, D.A. **Citrus Processing**, **A Complete Guide**. 2nd ed. Maryland: Aspen Publishers Inc., 450p., 1999.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**, 2nd ed. Butterwoth-Heinemann, 1991. 419p.

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

LARIO, Y; SENDRA, E.; GARCÍA-PÉREZ, J.; FUENTES, C.; SAYAS-BARBERÁ, E.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. Preparation of high dietary fiber powder from lemon juice by-products. **Innovative Food Science & Emerging Tecnologies**, v.5, p.113-117, 2004.

LARRAURI, J.A. New approaches in the preparation of high dietary fibre powders from fruit by-products. **Food Science & Technology**, v.10, p.3-8, 1999.

LARRAURI, J.A.; RODRÍGUEZ, J.L.; FÉRNANDEZ M.; BORROTO, B. Fibra dietética obtenida a partir de hollejos cítricos y cascaras de piñas. **Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos,** v.34, n.1, p.102-107, 1994.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solids materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.13, n.5, p.427-432, 1921.

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equation. Part I: Fruit, vegetables and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 18, p.111-117, 1985.

MAIALLE, K.G.**Construção de um secador de jorro fluidizado bidimensional e análise da sua fluidodinâmica**. 1996.198p. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia de

Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MALEK, M.A.; LU, B.C.Y. Pressure drop and spoutable bed height in spouted bed. **Industrial and Engineer Chemical Process Design and Develop**, v.4, p.123-128, 1965.

MARÍN, F.R.; SOLER-RIVAS, C.; BENAVENTE-GARCÍA, O.; CASTILLO, J.; PÉREZ-ALVAREZ, J.A. By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. **Food Chemistry**, v.100, p.736-741, 2007.

MARMO, L. Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p.1179-1190, 2007.

MASSARANI, G. **Secagem de produtos agrícolas**. v. 2. Rio de Janeiro: Edgard Bucher, 1987. 56p.

MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304p.

MATTHUR, K.B.;GISHLER,P.E. A technique for concerting gases with coarse solids particles. **Academic International Chemical Engineering Journal**, v.1, n.2, p.157-164, 1955.

MC CABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1985. 960p.

McLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. **Journal of Food Engineering**, v.35, p.267-280, 1998.

MUJUMDAR, A.S. Developments in Drying. **Drying' 84**, v.1, p.151-157, 1984.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**. 2nd ed., v.1. New York: Marcel Dekker, 1995. 742 p.

PALLAI, I.; NEMETH, J. Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram. In: **Internacional Congress Chemical Engineer**, Czechoslovak Society for Industrial Chemistry, Praga, 1969.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.1, p.73-77, 2001.

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

PASSOS, M.L.;TRINDADE, A.L.G.;D'ANGELO,J.V.H. e CARDOSO,M. Drying of black liquor in spouted bed of inert particles. **Drying Tecnology**, v.22, n.5, p.1041-1067, 2004.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, n.16, p.21-37, 1993.

PÉREZ, M.F.; SÁNCHES, J.L.R. Tecnología para la obtención de fibra dietética a partir de materias primas regionales. La experiencia em Cuba. In: LAJOLO, F.M.; SAURA-CALIXTO, PENNA, E.W.; MENEZES, E.W. **Fibra dietética en Iberoamérica: tecnología y salud: obtención, caracterización, efecto fisiológico y aplicación en alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, p.211-236, 2001.

PFOST, H.B; MOURER, S.G; CHUNG, D.S.; MILLIKEN,G.A. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. **American Society of Agricultural Engineers.** Paper n° 76-3520; ASAE: St. Joseph, MI, 1976.

PINTO, L.A.A.; TOBINAGA, S. Modelos de secagem em camada fina de alimentos: uma revisão da literatura. **VETOR**, Rio Grande, n.6, p. 33-49, 1996.

POTTER, N.N.; HOTCHKISS, J.H. **Food Science**. 5th ed. New York: Chapman & Hall, 1995. 608p.

PRAKONGPAN,T;NITITHAMYONG, A.;LUANGPITUKSA,P. Extraction and application of dietary fiber and cellulose from pineapple cores. **Food Chemistry and Toxicology**, v.67, n.4, p.1308-1313, 2002.

PROSKY, L.; ASP, N.G.; FURDA, I.; DEVRIES, J.M.; SCHWEEIZER,T.F. Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory Study. **Journal of Association of Official Analytical Chemists**. Arlington, v.71, n.5, p.1017-1023, 1988.

ROBERTSON, J.A.; MONREDON,F.D.; DYSSELER, P.; GUILLON, F.; AMADO, R.; THIBAULT,J.F. Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: a European collaborative study. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.33, p.72-79, 2000.

ROCHA, S.C.S.; TARANTO, O.P.; AYUB, G.E. Aerodynamics and heat-transfer during coating of tablets in two-dimensional spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.73, n.3, p.308-312, 1995.

SANGNARK, A.; NOOMHORM, A. Effect of particles size on fuctional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. **Food Chemistry**, v.80, p.221-229, 2003.

SANTANA, M.F.S. **Caracterização físico-química de fibra alimentar de laranja e maracujá**. 2005.168p. Tese (Título de Doutor em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SARAVACOS, G.; ROUZEOUS, G.S. Diffusivity of moisture in air-drying of starch gels. In: **Engineering and Food**, London and New York: ed. Brian M. Mckenna, Elsevier Applied Science Publishes, v.1, p.493-507, 1984.

SHERWOOD, T.K. The drying of solids II. **Industrial and Engineering Chemistry**, v.21, n.10, p.12-16 / 976-980, 1929.

SHIVHARE, U.S.; ARORA, S.; AHMED, J.; RAGHAVAN, G.S.V. Moisture adsorption isotherms for mushroom. **Lebensmittel – Wissenschaft and Technologie**, v.37, p.133-137, 2004.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M.C.; ROSSELLÓ, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 323-328, 2005.

SING, K. S. W.; EVERETT, D. H.; HAUL, R. A. W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R. A.; ROUQUÉROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure and Applied Chemistry**, v.57, p.603-619, 1985.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design,** Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.

TARANTO, O.P. **Estudo experimental da dinâmica em um leito de jorro bi-dimensional: aplicação em recobrimento de comprimidos.** 1992.114p. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia de Química - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

THASSITOU, P.K.; ARVANITOYANNIS, I.S. Bioremediation: a novel approach to food waste management. **Trends in Food Science & Technology**, v.12, p.185-193, 2001.

THEBAUDIN, J.Y.; LEFEBVRE, A.C.; HARRINGTON, M.; BOURGEOIS, C.M. Dietary fibres: Nutritional and technological interest. **Trends in Food Science & Technology**, v.8, p.41-48, 1997.

TSVIK,M.Z.; NABIEV,M.N.; RIZAEV,N.U.; MERENKOV,K.V.; VYZGO,V.S. The velocity for external spouting in the combined process for production of granulated fertilizers, **Uzbekskii Khimichesk**, v.11, p.50-69, 1967.

TULASIDAS, T.N.; KUDRA, T.; RAGHAVAN, G.S.V. Effect of bed height on simultaneous heat and mass transfer in a two-dimensional spouted bed dryer. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.20, n.1, p.79-88, 1993.

UNIFESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SÃO PAULO. **Tabela de Composição de Alimentos**. Disponível em: <http://www.unifesp.br/dis/servicos/nutri>. Acesso em: 25 jan 2007.

Van der BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: **Engineering and Food**. London: B. M. Mckenna, Elsevier Applied Science, v.1, p.311-321, 1984.

VISWANATHAN, R.; JAYAS, D. S.; HULASARE, R. B. Sorption isotherms of tomato slices and onion shreds. **Biosystems Engineering**, v.86, n.4, p.465-472, 2003.

WOLF, W.; SPIESS, W.E.L.; JUNG,G. **Sorption Isotherms and Water Activity of Food Materials: a Bibliography**. New York: Elsevier Science Publishing Co., 1985. 239p.

ZHONG,W.; XIAOPING,C.;ZHANG,M. Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed: Pressure drop and minimum spouting/spoutfluidizing velocity. **Chemical Engineering Journal**, v.118, p.37-46, 2006.

APÊNDICE A

Valores de Densidade Real do resíduo sólido obtidos pela picnometria a gás hélio.

Massa de Amostra = 0,7781g

Experimento	Volume (cm^3)	Densidade (g/cm^3)
1	0,5018	1,5506
2	0,4997	1,5570
3	0,4995	1,5578
4	0,4986	1,5604
5	0,4980	1,5625
6	0,4978	1,5629
7	0,4993	1,5583
8	0,5014	1,5518
9	0,4996	1,5576
10	0,4991	1,5589

Valores de Densidade Real das fibras alimentares obtidos pela picnometria a gás hélio.

Massa de Amostra = 3,5816g

Experimento	Volume (cm^3)	Densidade (g/cm^3)
1	2,3998	1,4924
2	2,4007	1,4919
3	2,3973	1,4940
4	2,4019	1,4911
5	2,4039	1,4899
6	2,3893	1,4990
7	2,3940	1,4961
8	2,3963	1,4946
9	2,3995	1,4927
10	2,4007	1,4919

APÊNDICE B

Tabelas dos dados da cinética de secagem das amostras *in natura* de Limão Siciliano no secador de Leito Fixo.

Tabela 1a: Dados experimentais de cinética de secagem da amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 0,5m/s. (Ensaio 1a)

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500	5,5211	84,67	1,0000
5	393,94	4,1378	80,54	0,7487
10	321,63	3,1947	76,16	0,5773
15	266,66	2,4778	71,25	0,4471
20	224,03	1,9218	65,77	0,3460
25	190,53	1,4849	59,76	0,2666
30	164,75	1,1487	53,46	0,2056
35	144,78	0,8882	47,04	0,1582
40	128,38	0,6743	40,28	0,1194
45	117,26	0,5293	34,61	0,0930
50	108,48	0,4148	29,32	0,0722
55	101,77	0,3273	24,66	0,0563
60	97,03	0,2655	20,98	0,0451
75	87,89	0,1463	12,76	0,0234
90	83,49	0,0889	8,16	0,0130
105	81,43	0,0620	5,84	0,0081
120	80,28	0,0470	4,49	0,0054
135	79,61	0,0383	3,69	0,0038
150	79,16	0,0324	3,14	0,0027
165	78,8	0,0277	2,70	0,0019
180	78,58	0,0249	2,42	0,0014

Tabela 1b: Dados experimentais de cinética de secagem da amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 0,5m/s. (Ensaio 1b)

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500	5,7681	85,22	1,0000
5	422,2	4,7150	82,50	0,8169
10	362,84	3,9115	79,64	0,6772
15	312,5	3,2301	76,36	0,5587
20	270,84	2,6662	72,72	0,4606
25	236,55	2,2020	68,77	0,3799
30	208,12	1,8172	64,50	0,3130
35	182,65	1,4724	59,55	0,2530
40	164,58	1,2278	55,11	0,2105
45	149,37	1,0219	50,54	0,1747
50	135,91	0,8397	45,64	0,1430
55	124,8	0,6893	40,80	0,1168
60	116,01	0,5703	36,32	0,0962
75	96,97	0,3126	23,82	0,0513
90	86,65	0,1729	14,74	0,0270
105	81,36	0,1013	9,20	0,0146
120	78,54	0,0631	5,94	0,0080

Tabela 2a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C e velocidade do ar de 0,5m/s (Ensaio 2a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,5059	84,63	1,0000
5	351,48	3,5734	78,13	0,6490
10	257,01	2,3442	70,10	0,4257
15	192,62	1,5063	60,10	0,2735
20	150,16	0,9539	48,82	0,1732
25	123,19	0,6029	37,61	0,1094
30	106,11	0,3807	27,57	0,0691
35	95,48	0,2424	19,51	0,0440
40	88,85	0,1561	13,50	0,0283
45	84,68	0,1018	9,24	0,0184
50	82,02	0,0672	6,30	0,0121
55	80,30	0,0448	4,29	0,0081
60	79,20	0,0305	2,96	0,0055
75	77,61	0,0098	0,98	0,0017
90	77,23	0,0049	0,49	0,0008

Tabela 2b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C e velocidade do ar de 0,5m/s (Ensaio 2b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,7652	85,22	1,0000
5	362,77	3,9084	79,63	0,6779
10	273,07	2,6947	72,93	0,4674
15	208,06	1,8151	64,48	0,3148
20	163,43	1,2113	54,78	0,2101
25	132,73	0,7959	44,32	0,1380
30	114,55	0,5499	35,48	0,0953
35	101,03	0,3670	26,85	0,0636
40	92,11	0,2463	19,76	0,0427
45	86,23	0,1667	14,29	0,0289
50	82,26	0,1130	10,15	0,0195
55	79,65	0,0777	7,21	0,0134
60	77,93	0,0544	5,16	0,0094
75	75,23	0,0179	1,76	0,0030
90	74,27	0,0049	0,49	0,0008

Tabela 3a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1m/s (Ensaio 3a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,5832	84,81	1,0000
5	334,38	3,4026	77,29	0,6081
10	234,35	2,0856	67,59	0,3714
15	192,09	1,5292	60,46	0,2714
20	161,36	1,1245	52,93	0,1987
25	139,39	0,8352	45,51	0,1467
30	124,45	0,6386	38,97	0,1114
35	114,00	0,5010	33,38	0,0867
40	106,68	0,4046	28,80	0,0693
45	101,45	0,3357	25,13	0,0569
50	97,58	0,2848	22,17	0,0478
55	94,70	0,2468	19,80	0,0410
60	92,50	0,2179	17,89	0,0358
75	88,11	0,1601	13,80	0,0254
90	85,71	0,1285	11,39	0,0197
105	84,20	0,1086	9,80	0,0161
120	83,10	0,0941	8,60	0,0135
135	82,25	0,0829	7,65	0,0115
150	81,40	0,0718	6,70	0,0095
165	81,18	0,0689	6,44	0,0090
180	80,79	0,0638	5,99	0,0081

Tabela 3b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1m/s (Ensaio 3b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,7588	85,20	1,0000
5	367,58	3,9688	79,87	0,6882
10	285,65	2,8613	74,10	0,4952
15	226,69	2,0643	67,37	0,3564
20	184,52	1,4943	59,91	0,2570
25	154,14	1,0836	52,01	0,1855
30	132,69	0,7936	44,25	0,1350
35	116,80	0,5788	36,66	0,0976
40	106,10	0,4342	30,28	0,0724
45	98,02	0,3250	24,53	0,0533
50	92,18	0,2460	19,75	0,0396
55	87,82	0,1871	15,76	0,0293
60	84,63	0,1440	12,59	0,0218
75	79,09	0,0691	6,46	0,0088
90	76,65	0,0361	3,49	0,0030
105	75,47	0,0202	1,98	0,0002

Tabela 4a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C e velocidade do ar de 1m/s (Ensaio 4a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,5476	84,73	1,0000
5	272,91	2,5738	72,02	0,4639
10	177,93	1,3300	57,08	0,2397
15	131,22	0,7184	41,81	0,1294
20	107,40	0,4064	28,90	0,0732
25	94,71	0,2403	19,37	0,0432
30	87,59	0,1469	12,81	0,0264
35	83,50	0,0935	8,55	0,0168
40	81,09	0,0619	5,83	0,0111
45	79,67	0,0432	4,14	0,0077
50	78,75	0,0312	3,03	0,0056
55	78,25	0,0247	2,41	0,0044
60	77,89	0,0200	1,96	0,0035
75	77,36	0,0130	1,29	0,0023
90	77,12	0,0099	0,98	0,0017

Tabela 4b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C e velocidade do ar de 1m/s (Ensaio 4b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	6,0368	85,79	1,0000
5	293,90	3,1362	75,82	0,5195
10	192,74	1,7125	63,13	0,2836
15	138,25	0,9457	48,60	0,1566
20	109,27	0,5378	34,97	0,0890
25	93,54	0,3164	24,04	0,0524
30	84,57	0,1902	15,98	0,0314
35	79,51	0,1190	10,63	0,0197
40	76,52	0,0769	7,14	0,0127
45	74,74	0,0519	4,93	0,0085
50	73,61	0,0360	3,47	0,0059
55	72,99	0,0272	2,65	0,0045
60	72,52	0,0206	2,02	0,0034
75	71,97	0,0129	1,27	0,0021
90	71,76	0,0099	0,98	0,0016

Tabela 5a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 5a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,3915	84,35	1,0000
5	363,17	3,6424	78,46	0,6754
10	273,48	2,4959	71,39	0,4626
15	211,65	1,7055	63,04	0,3160
20	170,78	1,1831	54,19	0,2190
25	143,2	0,8305	45,37	0,1536
30	124,31	0,5890	37,07	0,1088
35	111,16	0,4209	29,62	0,0776
40	102,03	0,3042	23,33	0,0559
45	96,23	0,2301	18,71	0,0421
50	91,93	0,1751	14,90	0,0319
55	88,78	0,1349	11,88	0,0245
60	86,56	0,1065	9,62	0,0192
75	82,85	0,0591	5,58	0,0104
90	81,17	0,0376	3,62	0,0064
105	80,45	0,0284	2,76	0,0047
120	79,16	0,0119	1,18	0,0017

Tabela 5b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 5b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,8444	85,39	1,0000
5	356,11	3,8747	79,49	0,6628
10	266,9	2,6535	72,63	0,4538
15	204,68	1,8018	64,31	0,3079
20	161,62	1,2124	54,80	0,2070
25	132,34	0,8116	44,80	0,1384
30	112,73	0,5431	35,20	0,0925
35	99,85	0,3668	26,84	0,0623
40	91,3	0,2498	19,99	0,0422
45	85,66	0,1726	14,72	0,0290
50	81,94	0,1217	10,85	0,0203
55	79,3	0,0855	7,88	0,0141
60	77,64	0,0628	5,91	0,0102
75	75,07	0,0276	2,69	0,0042
90	74,09	0,0142	1,40	0,0019
105	73,73	0,0093	0,92	0,0011
120	73,41	0,0049	0,49	0,0003

Tabela 6a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 6a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,5100	84,64	1,0000
5	360,42	3,6927	78,69	0,6700
10	280,56	2,6529	72,62	0,4811
15	221,60	1,8853	65,34	0,3417
20	177,34	1,3090	56,69	0,2371
25	145,80	0,8983	47,32	0,1625
30	124,27	0,6180	38,20	0,1116
35	109,93	0,4313	30,13	0,0777
40	100,26	0,3054	23,39	0,0548
45	93,58	0,2184	17,93	0,0390
50	89,22	0,1617	13,92	0,0287
55	86,14	0,1215	10,84	0,0214
60	84,00	0,0937	8,57	0,0164
75	80,43	0,0472	4,51	0,0079
90	78,95	0,0279	2,72	0,0044
105	78,34	0,0200	1,96	0,0030
120	78,03	0,0160	1,57	0,0023

Tabela 6b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 6b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,8362	85,37	1,0000
5	354,73	3,8500	79,38	0,6595
10	265,74	2,6333	72,48	0,4509
15	203,42	1,7813	64,04	0,3048
20	162,51	1,2219	54,99	0,2089
25	134,37	0,8372	45,57	0,1429
30	114,92	0,5712	36,36	0,0973
35	101,74	0,3910	28,11	0,0664
40	93,03	0,2719	21,38	0,0460
45	87,09	0,1907	16,02	0,0321
50	83,06	0,1356	11,94	0,0227
55	80,1	0,0952	8,69	0,0157
60	78,22	0,0695	6,49	0,0113
75	75,31	0,0297	2,88	0,0045
90	74,14	0,0137	1,35	0,0017
105	73,78	0,0088	0,87	0,0009
120	73,55	0,0056	0,56	0,0004

Tabela 7a: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 7a).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,4393	84,47	1,0000
5	348,52	3,4885	77,72	0,6411
10	257,60	2,3175	69,86	0,4257
15	197,84	1,5479	60,75	0,2841
20	159,48	1,0539	51,31	0,1932
25	133,64	0,7211	41,90	0,1320
30	116,22	0,4968	33,19	0,0907
35	104,96	0,3517	26,02	0,0640
40	96,76	0,2461	19,75	0,0446
45	91,47	0,1780	15,11	0,0321
50	87,59	0,1280	11,35	0,0229
55	84,82	0,0924	8,46	0,0163
60	82,98	0,0687	6,43	0,0120
75	80,00	0,0303	2,94	0,0049
90	78,85	0,0155	1,52	0,0022
105	78,23	0,0075	0,74	0,0007
120	78,04	0,0051	0,50	0,0003

Tabela 7b: Dados experimentais de cinética de secagem de amostra *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C e velocidade do ar de 0,75m/s (Ensaio 7b).

t (min)	$m_{amostra}$ (g)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	500,00	5,9978	85,71	1,0000
5	361,02	4,0527	80,21	0,6755
10	274,58	2,8429	73,98	0,4737
15	214,16	1,9973	66,64	0,3326
20	171,74	1,4036	58,40	0,2336
25	141,89	0,9858	49,64	0,1639
30	121,23	0,6967	41,06	0,1156
35	106,78	0,4944	33,09	0,0819
40	96,84	0,3553	26,22	0,0587
45	90,07	0,2606	20,67	0,0429
50	85,21	0,1926	16,15	0,0315
55	81,83	0,1453	12,68	0,0236
60	79,47	0,1122	10,09	0,0181
75	75,13	0,0515	4,90	0,0080
90	74,29	0,0397	3,82	0,0060
105	73,77	0,0325	3,14	0,0048
120	73,54	0,0292	2,84	0,0043

APÊNDICE C

Tabelas dos dados da cinética de secagem das amostras *in natura* de Limão Siciliano no Secador de Leito de Jorro.

Tabela 1a: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min , massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 25°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 17,5°C.

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,6145	38,06	1,0000
3	0,3578	26,35	0,5783
6	0,1824	15,43	0,2902
9	0,0855	7,88	0,1311
12	0,0617	5,81	0,0919
15	0,0450	4,31	0,0646
18	0,0358	3,46	0,0495

Tabela 1b: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 60°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min, massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 25°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 17,5°C.

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,6318	38,72	1,0000
3	0,3522	26,05	0,5535
6	0,1427	12,49	0,2188
9	0,0839	7,74	0,1249
12	0,0474	4,53	0,0666
15	0,0467	4,46	0,0655
18	0,0348	3,37	0,0466

Tabela 2a: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min, massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 22°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 16°C.

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,7947	44,28	1,0000
3	0,3201	24,25	0,4000
6	0,0796	7,37	0,0960
9	0,0592	5,59	0,0701
12	0,0199	1,95	0,0204
15	0,0255	2,48	0,0275
18	0,0222	2,18	0,0234
21	0,0170	1,67	0,0168
24	0,0235	2,30	0,0250
27	0,0219	2,15	0,0230
30	0,0165	1,63	0,0162

Tabela 2b: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 75°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min, massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 23,5°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 17°C.

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,6621	39,84	1,0000
3	0,2767	21,68	0,4147
6	0,0977	8,90	0,1428
9	0,0495	4,72	0,0696
12	0,0304	2,95	0,0406
15	0,0186	1,83	0,0227
18	0,0211	2,07	0,0265
21	0,0133	1,31	0,0146
24	0,0164	1,61	0,0193
27	0,0112	1,11	0,0114
30	0,0133	1,31	0,0146

Tabela 3a: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min, massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 24°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 18°C

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,6621	39,84	1,0000
3	0,1597	13,77	0,2408
6	0,0406	3,90	0,0608
9	0,0047	0,46	0,0065

Tabela 3b: Dados experimentais de cinética de secagem do resíduo *in natura* de limão siciliano na temperatura de 90°C. Dados: Vazão Total de ar = 1,31m^3/min, Vazão de ar no Jorro = 0,623m^3/min e Vazão de ar no Ânulo = 0,837m^3/min, massa total de amostra = 330g, altura do leito fixo = 15cm, Temperatura de bulbo seco do ar ambiente = 25°C, Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente = 17,5°C.

t (min)	X_{bs} (g água/ g sólido)	X_{bu} (%)	$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e}$
0	0,8750	46,67	1,0000
3	0,4157	29,37	0,4749
6	0,0621	5,85	0,0706
9	0,0136	1,34	0,0151
12	0,0051	0,50	0,0054