



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA-CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE DE DOUTORADO

**SECAGEM COMBINADA DE PEDAÇOS CÚBICOS DE
GOIABA EM LEITO FIXO E DE JORRO**

JOSÉ MARIA DA SILVA

Campina Grande – Paraíba

2011

JOSÉ MARIA DA SILVA

**SECAGEM COMBINADA DE PEDAÇOS CÚBICOS DE
GOIABA EM LEITO FIXO E DE JORRO**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento ao programa institucional.

Orientadora: Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina

Campina Grande – Paraíba
2011



DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586s

Silva, José Maria da.

Secagem combinada de pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo e de jorro/José Maria da Silva. – 2011.

110f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

“Orientadora: Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina”.
Referências.

1. Fluidodinâmica. 2. Ácido ascórbico 3. Reidratação.
I. Alsina, Odelsia Leonor Sánchez de. II. Título.

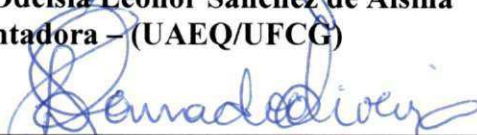
CDU 66.021. 2(043)

BANCA EXAMINADORA

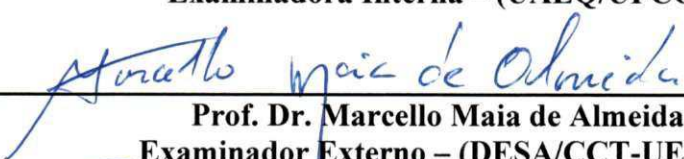
Tese aprovada em 26/08/2011



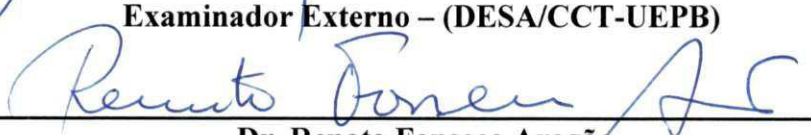
Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
Orientadora – (UAEQ/UFCG)



Profa. Dra. Líbia de Sousa Conrado Oliveira
Examinadora Interna – (UAEQ/UFCG)



Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida
Examinador Externo – (DESA/CCT-UEPB)



Dr. Renato Fonseca Aragão
Examinador Externo – (UAEA/CTRN-UFCG)



Prof. Dr. Álvaro Silva Lima
Examinador Externo – (UNIT/SE)

Campina Grande – Paraíba

2011

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por José Maria da Silva e aprovada pela banca examinadora em 26 de Agosto de 2011.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized cursive letters, positioned above a horizontal line.

Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina

AGRADECIMENTOS

A Deus que pelo seu imenso poder tem permitido até o presente, que eu possa deixar essa contribuição para com a humanidade. Que pela grandiosidade de sua força, tem concedido trajetórias longas, mas caminhos promissores. Sua imensurável misericórdia tem concedido certamente, capacidade nas horas mais incertas.

Aos meus pais Heleno Guedes da Silva e Terezinha do Nascimento Silva que com enorme simplicidade, trabalharam de forma incansável, para que significantes passos por mim tivessem sido alcançados. Em outros tempos por exemplo, fizeram quase o impossível mais jamais deixaram de sustentar a possibilidade de que um dia, eu pudesse avançar tanto.

Aos meus irmãos Maria Lucia da Silva; Ronaldo Guedes da Silva (*in memória*); Maria José da Silva; Maria Bernadete da Silva Bezerra; José Marcos da Silva; Maria Josinete da Silva; João Evangelista da Silva; Luis Carlos Guedes da Silva; Luzia Guedes da Silva; Roberto Guedes da Silva; Luciana de Fátima Silva e Luciano Guedes da Silva. Estes para mim representam as sementes de uma árvore que entre inverno, verão, outono ou primavera produzem de forma sustentável, laços de companheirismo e fraternidade.

As minhas filhas Bruna Regina dos Santos Silva e Aline Regina dos Santos Silva que sem elas, jamais entenderia o profundo amor da criação e consequência maior dos meus esforços.

A minha tia Maria Vitorino de Jesus Nascimento (*in memória*), que mesmo em tempos tão difíceis, aprimorou os seus conhecimentos e enquanto vida, foi exemplo de inspiração e incentivo ao conhecimento.

A minha noiva Edilene dos Santos Silva que neste último ano, conviveu com essa esperançosa alegria e incansável corrida. A você o meu eterno carinho e a mais nobre esperança de que juntos possamos justificar o conceito de amor e cumplicidade.

A Universidade Federal de Campina Grande que investiu e confiou em mim sob a orientação da minha nobre e inesquecível Professora, Odélsia Leonor Sánchez de Alsina que me incentivou e me acolheu durante esta convivência, sendo para mim um eterno exemplo de coragem, de trabalho e expoente maior de difusão do conhecimento.

A lei gravitacional explica o movimento contínuo do sistema planetário, mas não pode explicar quem os colocou em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito. A maravilhosa disposição e harmonia do universo só pode ter tido origem segundo o plano de um ser que tudo sabe e tudo pode. Isso fica sendo a minha última e mais elevada descoberta.

Isaac Newton

RESUMO

SILVA, J. M. Secagem combinada de pedaços cúbicos de goiaba (*Psidium guajava*) em leito fixo e de jorro.

O comportamento dinâmico do leito de jorro constituído de partículas deformáveis é de difícil predição devido às mudanças que acontecem durante a secagem desse tipo de material. Forma, tamanho, densidade e inclusive as propriedades térmicas afetam as variáveis fluidodinâmicas e a estabilidade do jorro. Neste trabalho foi estudada a evolução de importantes parâmetros fluidodinâmicos tais como: altura da fonte, altura do leito, variação de pressão, velocidade do ar e circulação de sólidos, durante a secagem de pedaços de goiaba em leito de jorro. No final dos experimentos foi realizada análise de vitamina C e a percentagem de reidratação. Os pedaços de goiaba, com forma inicial cúbica, e dimensões inicial em torno de 1cm, foram processados em leito de jorro cônico-cilíndrico com coluna de acrílico de 0,25m de diâmetro e 1m de altura e orifício de entrada do ar de 0,05m. Inicialmente os cubos de goiaba foram secados em leito fixo de modo a variar a umidade inicial no leito de jorro entre 0,6 e 1,6 na base seca. A temperatura de entrada do ar variou entre 47,9°C e 62,1°C. Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento experimental 2^k mais três pontos centrais e 4 pontos axiais da configuração estrela. Os perfis radiais de taxas de circulação de sólidos foram medidos mediante uma sonda cilíndrica dotada de janelas de coleta de 1,2x2,7 cm. Foi observado que, com a redução da umidade, a circulação de sólidos, a altura da fonte e a velocidade do ar aumentam enquanto que a altura do leito e a variação de pressão diminuem. Os resultados obtidos confirmaram a forte influência na variação das propriedades ao longo do tempo sobre os parâmetros fluidodinâmicos, teor de vitamina C remanescente e percentagem de reidratação. Quanto à qualidade do produto obtido após secagem no leito de jorro foi encontrado que o teor de vitamina C variou entre 97 e 142 mg/g, a umidade (na base seca) entre 0,19 e 0,37, apresentando de 58% a 68% de percentagem de reidratação.

Palavras chaves: fluidodinâmica, ácido ascórbico, reidratação

ABSTRACT

SILVA, J. M Combined drying of cubic pieces of guava (*Psidium guajava*) in fixed bed and spouted.

The dynamic behavior of the spouted bed consisting of deformable particles is difficult to predict due to changes that occur during the drying of such materials. Shape, size, density and thermal properties including fluid dynamics and variables affecting the stability of the stream. In this work we studied the evolution of important fluid-dynamic parameters: font height, bed height, variation of pressure, air velocity and solids circulation during the drying of guava pieces in spouted bed. At the end of experiments was performed to analyze the percentage of vitamin C and rehydration. The pieces of guava, with a roughly cubical, and initial size of around 1cm, were processed in spouted bed cone-cylindrical acrylic column of 0.25 m in diameter and 1m in height and inlet air 0, 05m. The guava pieces were dried in pre-fixed bed so as to vary the initial moisture in spouted bed between 0.6 and 1.60 on dry basis. The air inlet temperature ranged between 47.9 C and 62.1 ° C. The tests were performed according to a 2k factorial design plus three central points and 4 axial points of the star configuration. The radial profiles of solids circulation rates were measured by a cylindrical probe equipped with windows to collect 1.2 x2, 7 cm. It was observed that with the reduction of humidity, movement of solids, the font height and velocity of air increases while the height of the bed and the variation of pressure decrease. The results confirmed the strong influence of the variation of properties over time on the fluid-dynamic parameters, vitamin C and the remaining percentage rehydration. Concerning the product quality dried in spouted bed it was found a vitamin C content between 97 and 142 mg/g, moisture (d.b) between 0,19 and 0,37, showing a good rehydration capability in the range 58% to 69%.

Keywords: fluid dynamics, ascorbic acid, rehydration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Curva de secagem.....	21
Figura 2	Classificação de GELDART (1973) para partículas utilizando ar em condições ambientais.....	29
Figura 3	Diagrama esquemático do leito de jorro convencional.....	39
Figura 4	Curva característica da queda de pressão para trigo onde: $d_p = 0,36$ cm; $D_c = 0,152$ m; $D_i = 1,27 \times 10^{-2}$ m; $\alpha = 60$ °C (MADONNA et al (1961).....	41
Figura 5	Esquema de equipamentos para determinação de atividade de água (a_w) Silva et al. (2002).....	52
Figura 6	Etapas de corte para obtenção dos pedaços cúbicos de goiaba.....	54
Figura 7	Curva de secagem de pedaços de goiaba em camada espessa no leito fixo. $T=60$ °C; $v=3$ m/s; $m_i= 2,8$ kg.....	55
Figura 8	Pré-secagem em leito fixo.....	55
Figura 9	Equipamento do leito de jorro (b) Detalhe da parte cônica com os pedaços de goiaba. (c) Coluna funcionando em regime de jorro.....	56
Figura 10	Sonda de coleta de sólidos.....	58
Figura 11	Massa específica real, aparente e porosidade de pedaços cúbicos de goiaba.....	62
Figura 12	Curva característica da cinética de secagem de goiaba em secador conectivo $5h$, 84 °C e $1,1$ m/s.....	63
Figura 13	Modelos matemáticos utilizando 1, 3 e 6 termos sem encolhimento (fig. 1, 2 e 3) para modelos teóricos e empírico e 6 termos com encolhimento	64
Figura 14	Ajuste da isotermas de dessorção por diferentes modelos matemáticos.....	67
Figura 15	Curvas de secagem em leito de jorro (a), (b), (c); $T=50$ e $X=0,6$; $T=55$ e $X=1,05$, $T=60$ e $X=1,5$	68
Figura 16	Curvas adimensional de água remanescente $X^* = (X-X_e) / (X_i-X_e)$ até 90 minutos.....	69
Figura 17	Comportamento das taxas de secagem em função da umidade, através da variação dx/dt . (a) $T=50$ °C; $X_{bs}= 0,6$ (b) $T=55$ °C; $X_{bs}= 1,05$ (c) $T=60$ °C; $X_{bs}= 1,5$	70
Figura 18	Altura do leito (AL) e Altura da fonte (AF) em função da umidade inicial. (a) $T=50$ °C; $X_{bs}= 0,6$ (b) $T=55$ °C; $X_{bs}= 1,05$ (c) $T=60$ °C; $X_{bs}= 1,5$	73
Figura 19	Variação de pressão e velocidade do ar de secagem. (a) $T=50$ °C; $X_{bs}= 0,6$ (b) $T=55$ °C; $X_{bs}= 1,05$ (c) $T=60$ °C; $X_{bs}= 1,5$	75
Figura 20	Circulação de sólidos em função da variação de umidade nas posições radiais R_1, R_2, R_3 e R_4 . $T=50$ °C; $X_b=0,6$ $T=55$ °C; $X_{bs}= 1,05$ $T=60$ °C; $X_{bs}= 1,5$	77
Figura 21	Cinética da reidratação para da secagem em leito de jorro $T=50$ °C $X_i=0,6$ $X_f=0,25$; $T=55$ °C $X_i=1,07$ $X_f=0,28$; $T= 60$ °C $X_i=1,54$ $X_f=0,34$	79
Figura 22	Diagrama de Pareto e os efeitos de X e T sobre X_f (95%).....	83
Figura 23	Valores observados em função dos valores preditos para X_f	84

Figura 24	Superfície de resposta para a variável X_{final}	85
Figura 25	Diagrama de Pareto e o efeito de X_i sobre a_w (95%).....	86
Figura 26	Valores observados em função dos valores preditos para a_w	86
Figura 27	Superfície de resposta para a variável a_w	87
Figura 28	Diagrama de Pareto e o efeito de X_i sobre V_c (95%).....	88
Figura 29	Valores observados em função dos valores preditos para V_c	89
Figura 30	Superfície de resposta para a variável V_c	89
Figura 31	Diagrama de Pareto e o efeito de X_i e sobre R_h (95%).....	90
Figura 32	Valores observados em função dos valores preditos para R_h	91
Figura 33	Superfície de resposta para a variável R_h	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química centesimal e caracterização física da goiaba Paluma.....	19
Tabela 2	Equações empíricas de secagem.....	25
Tabela 3	Matriz experimental em valores reais e codificados para secagem em leito de jorro..	57
Tabela 4	Comparação dos valores de A; D (difusividade e_f) e R^2 p/modelagem utilizando a 2ª Lei de Fick e R^2 p/modelagem de modelos empíricos.....	64
Tabela 5	Dados experimentais da umidade de equilíbrio em função da atividade de água a 30°C para a goiaba Paluma.....	66
Tabela 6	Parâmetros de ajustes dos modelos testados e coeficientes de determinação a partir dos dados experimentais.....	66
Tabela 7	Parâmetros de ajuste das curvas de secagem de goiaba em leito de jorro.....	69
Tabela 8	Dados de variáveis fluidodinâmicas AL, AF, Δp , V_{ar} e $X_{(b,s)}$ da secagem em leito de jorro nas condições: T=50°C/ $X_i=0,6$; T=55°C/ $X_i=1,05$ e T=60°C/ $X_i=1,50$	71
Tabela 9	Valores médios de circulação de sólidos (C_s) e Aura da fonte (AF).....	76
Tabela 10	Percentagem de reidratação após secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro para as condições: T=50°C/ $X_i=0,6$; T=55°C/ $X_i=1,05$ e T=60°C/ $X_i=1,50$	78
Tabela 11	Umidade final e percentagem de reidratação três condições experimentais da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro após 250 minutos.....	79
Tabela 12	Umidade final e teores de vitamina C em mg/100g relativo às três condições experimentais da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro.....	80
Tabela 13	Variáveis resposta partir da matriz experimental em valores reais e codificados do planejamento fatorial $2^2 + 2.2 + 3$ para secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro.....	81
Tabela 14	Resultados da análise de variância relativa às variáveis de resposta X_f , A_w , V_c e R_h	82

LISTA DE ABREVIATURAS

AF - Altura da fonte
AL - Altura do leito
Ar - Número de Arquimedes
 a_w - Atividade de água
 C_{BET} - Constante de BET
 C_{GAB} - Constante de GAB
 C_s - Taxa de circulação de sólidos
 D_t^* - Coeficiente de difusão do líquido
D - Difusividade térmica
 D_i - Diâmetro do orifício de entrada do ar
F - Fator da solução de DCFI
K - Condutividade térmica
m - Massa da amostra
 m_{eq} - Massa da amostra no equilíbrio
 m_s - Massa da amostra seca
n - Número de camadas moleculares
p - Porosidade
q - Calor dissipado
r - Raio
R - Constante universal dos gases
 Re_p - Número de Reynolds
t - Tempo
T - Temperatura
 V_t - Velocidade terminal da partícula
V - Volume da solução DCFI
 V_{ar} - Velocidade do ar
 V_{mf} - Velocidade de mínima fluidização
 V_t - Velocidade terminal da partícula
 $X_{b.s}$ - Umidade em base seca
 X_e - Umidade de equilíbrio
 X_f - Umidade final
 X_i - Umidade inicial
 X_m - Umidade na monocamada molecular
 X^* - Adimensional de água remanescente
 ρ_a - Massa específica aparente
 ρ_r - Massa específica real
 ΔT - Variação de temperatura
 ΔP - Variação de pressão

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	16
2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 - CULTURA DA GOIABEIRA.....	18
2.2 – SECAGEM.....	20
2.2.1 - Teoria da difusão.....	23
2.3 - SECAGEM DE FRUTAS.....	25
2.4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS.....	28
2.4.1 - Propriedades físicas.....	28
2.5 – ATIVIDADE DE ÁGUA.....	30
2.5.1 – Comportamento higroscópico.....	31
2.6 – VITAMINA C.....	34
2.7 – REIDRATAÇÃO.....	36
2.8 - ENCOLHIMENTO DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS DURANTE A SECAGEM.....	37
2.9 - LEITO DE JORRO.....	38
2.9.1 - Curva característica do leito de jorro.....	40
2.9.2 - Efeito da altura máxima do leito de jorro (H_{max}).....	41
2.9.3 - Velocidade do jorro mínimo (V_{jm}).....	43
2.9.4 - Efeito da geometria da coluna e das propriedades dos sólidos.....	44
2.10 - CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS.....	45
2.11 - MODELAGEM MATEMÁTICA.....	48
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1 - MATÉRIA PRIMA.....	50
3.2 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA GOIABA.....	50
3.2.1 – Umidade em base seca.....	50
3.2.2 - Massa específica real.....	51
3.2.3 - Massa específica aparente.....	51
3.3 - ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO.....	51
3.3.1 – Modelos matemáticos.....	53
3.4 – PREPARO DA AMOSTRA PARA PRÉ-SECAGEM EM LEITO FIXO.....	54
3.5 - LEITO DE JORRO.....	56
3.6 - VARIÁVEIS DE SAÍDA NO LEITO DE JORRO.....	57
3.6.1 – Altura do leito e da fonte, velocidade do ar e variação de pressão.....	58
3.6.2 – Circulação de sólidos.....	58
3.7 – ATIVIDADE DE ÁGUA DO PRODUTO FINAL.....	59
3.8 – DETERMINAÇÃO DE VITAMINA C.....	59
3.9 - REIDRATAÇÃO DOS PEDAÇOS DE GOIABA SECOS EM LEITO DE JORRO....	59
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	61
4,2 - CINÉTICA DE SECAGEM DE GOIABA.....	63
4.3 - ISOTERMAS DE DESSORÇÃO.....	65
4.4 - VARÁVEIS RESPOSTA DA SECAGEM NO LEITO DE JORRO.....	67
4.4.1 - Curvas de secagem de goiaba em leito de jorro.....	67
4.4.2 - Adimensional de água remanescente.....	69

4.4.3 - Curvas da taxa de secagem.....	70
4.4.4 - Altura do leito e altura da fonte.....	72
4.4.5 - Variação de pressão e velocidade do ar de secagem.....	74
4.4.6 - Circulação de sólidos.....	76
4.5 - CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO.....	78
4.6 – VITAMINA C.....	80
4.7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DA SECAGEM EM LEITO DE JORRO OBTIDOS A PARTIR DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL $2^k + 2K$	81
4.7.1 - Umidade final (X_f).....	83
4.7.2 – Atividade de água.....	85
4.7.3 - Vitamina C.....	87
4.7.4 – Reidratação.....	90
5 – CONCLUSÕES.....	93
6 - PERSPECTIVAS.....	95
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE.....	109

1 INTRODUÇÃO

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) é uma fruteira rústica originária da América Tropical sendo encontrada principalmente no Brasil em regiões quentes e úmidas, ocorrendo entre o México e o Estado de São Paulo (MARTINS, et al., 2002). Sua importância no setor econômico se dá não só devido ao seu elevado valor nutritivo, mas pela excelente aceitação do consumo “in natura” e sua grande aplicação industrial (AGRIANUAL, 2004).

Na cadeia produtiva de frutas, na qual a goiaba está inserida, um dos maiores problemas encontrado pelos produtores, é sem dúvida, a venda dos produtos antes da sua decomposição. Por serem muito perecíveis, perdas elevadas pós-colheita de frutas acabam reduzindo significativamente ganhos econômicos ao longo da cadeia produtiva e penalizam, sobretudo, os produtores de baixa renda. (ARRUDA, et al., 2003).

Devido a grande capacidade produtiva de frutas tropicais, a boa aceitação e crescente consumo de produtos desidratados no mercado internacional, a desidratação de frutas, onde o Brasil aparece com grande potencial, surge como uma das alternativas mais promissoras (PINAZZA e ALIMANDRO, 1999).

O processo de secagem é uma operação que se baseia na transferência de um líquido de um sólido úmido para uma fase gasosa não saturada, e é usada freqüentemente para condicionar produtos agrícolas antes do seu armazenamento. A técnica secagem usada com eficiência, pode ser uma das alternativas capaz de aumentar a disponibilidade de alimentos para suprimento das necessidades do mundo atual.

A secagem em leitos fluidodinamicamente ativos de jorro, em pedaços cúbicos do mesocarpo de goiabas *in natura* mostrou-se viável quanto a qualidade do produto final, eficiência energética e tempo de processamento, podendo ser utilizados como uma nova alternativa de secagem de frutas em pedaços (ALMEIDA, et al., 2007). Os mesmos autores sugerem novos estudos incluindo a expansão da matriz experimental e sejam avaliadas outras variáveis fluidodinâmicas importantes como: taxa de circulação de sólidos, diâmetro do jorro, variação de temperatura entre outras.

A considerável produção de goiaba no Brasil associado a alguns fatores principais tais como: alta perecibilidade, manuseio inadequado dos frutos durante a colheita, transporte e armazenamento, contribuem com prejuízos que se acumulam. O conhecimento e o processamento industrial deste produto é portanto, a melhor opção para minimizar os grandes

prejuízos que ocorrem por ocasião das grandes safras e que coincidem também, com preços muito baixos no mercado de fruta frescas.

Desta forma o presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito das variáveis umidade inicial e temperatura do ar de secagem sobre as variáveis fluidodinâmicas altura do leito, altura da fonte, adimensional de água remanescente, variação de pressão, velocidade do ar de secagem, taxa de secagem, taxa de circulação de sólidos, umidade do produto final, atividade de água, teor de vitamina C e reidratação de pedaços cúbicos de goiaba *Psidium guajava* L. (variedade Paluma) em leito de jorro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CULTURA DA GOIABEIRA

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) pertence ao gênero *Psidium*, da família *Mitaceae*, e compreendem mais de 70 gêneros e 2.800 espécies, das quais 110 a 130 são naturais da América Tropical e Subtropicais. Os frutos da goiabeira são bagas que tem tamanho, forma e coloração branca ou vermelha dependendo da variedade (GONGATTI NETTO et al., 1996).

Sua enorme dispersão no continente americano teria ocorrido, provavelmente, por pássaros e animais de pequeno porte. Da América do Sul e Central, a goiaba teria sido conduzida pelos navegantes europeus para as colônias africanas e asiáticas, espalhando-se por todas as regiões tropicais do globo. No nordeste brasileiro, existem hoje, estudos com a cultura em fase de conclusão que apontam sua origem na América, restando saber especificamente a região, embora haja evidências de que esta região esteja compreendida entre o México, Colômbia, Peru e Brasil (GONGATTI NETTO et al., 1996). No Brasil a primeira referência à goiabeira, foi feita por Gabriel de Souza, no tratado descritivo do Brasil (HOEHNE, 1946).

A produção em escala industrial no Brasil, teve início nos anos 70. Desde então, foi cultivada em grandes pomares voltados especificamente para o comércio de doces, sucos e exportação. Sua produção aumentou consideravelmente nos últimos anos e em termos comerciais, tem sido direcionada e adequada comercialmente, para atender as exigências do mercado internacional (SOUSA NETO, 2002).

Sendo o terceiro maior produtor de goiaba no mundo antecedido por Índia e Paquistão, o Brasil produz praticamente em todas as regiões. Em termos interno é importante destacar os estados de São Paulo, Minas Gerais, e as grandes áreas irrigadas no vale do São Francisco, mais especificamente, nos estados da Bahia e Pernambuco. Estes respondem juntos pela maior parte da produção nacional. As características em termos de sabor, aroma e elevado valor nutritivo, faz da goiaba um dos frutos tropicais mais apreciados (CHITARRA et al., 1996).

A goiaba é um alimento de grande valor nutricional, pois possui quantidade razoável de sais minerais, como cálcio e fósforo. Sendo rica em vitaminas A, B₁ (Tiamina), B₂ (Riboflavina), B₆ (Piridoxina), apresentando-se ainda como fonte de licopeno, potássio, cobre e fibras, a goiaba é uma fruta de clima tropical que se destaca principalmente, por ser considerada como uma elevada fonte de vitamina C (QUEIROZ, 2004). Para se ter uma idéia a ingestão de um único fruto, ou cerca de 150 g de goiaba é suficiente para suprir

integralmente a necessidade diária de vitamina C que é em torno de 90mg segundo o Instituto Americano de Medicina (I.O.M., 1999).

Algumas variedades nacionais possuem em média 80 mg por 100 gramas de ácido ascórbico, sendo em geral as variedades brancas e amareladas mais ricas em relação às vermelhas. Comparativamente o limão por exemplo, contém cerca de 40 mg por 100g de ácido ascórbico, o que corresponde à metade da concentração da goiaba branca (GONZAGA NETO e SOARES, 1994). Essa diferença faz com que alguns mercados externos tenham preferência pelas variedades que produzam frutos com polpa branca. Entretanto, no mercado interno, tanto o consumo *in natura*, como as indústrias, preferem as variedades que produzam frutos de polpa avermelhada. Apesar de alguns estudos apresentarem outras variedades com importante potencial agrônomo para cultivo nas áreas irrigadas do Nordeste brasileiro, a variedade Paluma ocupa hoje cerca de 80 a 90% da área cultivada na região do baixo e médio São Francisco (GONZAGA NETO e SOARES, 1996). A Tabela 2.1 apresenta a composição química centesimal e a caracterização física da goiaba vermelha da variedade Paluma

Tabela 1 Composição química centesimal e caracterização física da goiaba Paluma

Composição química centesimal		Caracterização física	
Análise	Valor médio (%)	Característica	Especificação
Umidade (base úmida)	87,3 ± 0,48	Peso médio (g)	152,0 ± 7,8
Cinzas	0,54 ± 0,03	Diâmetro médio (cm)	6,7 ± 0,200
Proteínas	1,42 ± 0,06	Comprimento médio (cm)	7,8 ± 0,400
Lipídeos	0,31 ± 0,05	Espessura média (cm)	1,0 ± 0,100
Açúcares totais	2,80 ± 0,31	Sólidos solúveis (°Brix)	7,2 ± 0,300
Fibras	6,91 ± 0,00	pH	3,8 ± 0,000
Acidez	0,76 ± 0,01	Atividade de água	0,99 ± 0,002

Fonte: Pereira et al. (2003)

No mercado Internacional de frutas onde a goiaba encontra-se inserida, existe grandes perspectivas de crescimento. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação que é o órgão responsável pela manutenção dos níveis de segurança alimentar, nutrição e aumento da produtividade agrícola de forma sustentável, o Brasil e a fruticultura brasileira onde a goiaba está inserida podem dar uma contribuição relevante (FAO, 2005).

Dados do Instituto Brasileiro de Frutas - IBRAF (2005), mostram que a fruticultura nacional movimentou US\$ 5,8 milhões somente com produtos frescos e US\$ 12,2 bilhões quando se consideram todos os derivados da fruta. Sendo este setor responsável por 11,5% do PIB agrícola, e 0,625% nacional. Segundo o IBGE (2009), o Nordeste produziu 135,016 mil toneladas de goiaba sendo no setor da fruticultura um dos principais geradores de renda, emprego e desenvolvimento sustentável do agro-negócio no Brasil.

O conhecimento de tecnologia como a secagem entre outras, no processamento de frutas e de goiaba é cada vez mais eminente em função do elevado crescimento produtivo e consumo. Segundo Tibola e Fachinelo (2004), nos os últimos 10 anos, por exemplo, a produção mundial aumentou em 35%. As mesmas pesquisas mostram um crescimento *per capita* de frutas entre 1990 a 1997, a uma taxa geométrica média anual de 2,14%.

2.2 SECAGEM

A secagem é hoje um dos processos mais empregados na conservação de alimentos, pois a redução da quantidade de água presente limita a atividade microbiana. Além disso, é possível aumentar o tempo de conservação de produtos agroindustriais sem uso de conservantes e ainda proporcionar modificações das características sensoriais como: textura, cor, sabor, aroma e outros (MADEIRA, 2008).

A secagem pode ser definida como uma das operações unitárias mais antigas, e utilizadas em diversos processos agroindustriais, cerâmicos, químicos, alimentícios, farmacêuticos, papel e celulose, mineral e de polímeros PARK et al. (2004). Para estes é uma das operações mais difíceis de ser entendida devido a complexidade na modelagem matemática dos fenômenos de transferência mútua de calor, massa e quantidade de movimento envolvidos

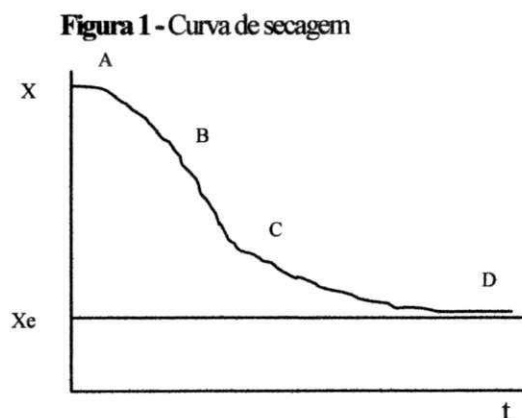
Heck (2008) descreve a secagem como sendo um tratamento que consiste em remover a água livre de uma substância. Neste processo observa-se que quando a temperatura do sólido e a temperatura do bulbo úmido do gás se equilibram, o sistema adquire bastante estabilidade e a taxa de secagem permanece constante durante certo tempo. Por essa razão, esse período é usualmente denominado de período de secagem a taxa constante.

De fato a secagem é uma operação de transferência de massa envolvendo a retirada de água de um sistema sólido ou semi-sólido. Assim, líquidos podem ser removidos de sólidos mecanicamente ou por vaporização térmica. Durante a secagem é necessário que haja o fornecimento de calor para que ocorra a evaporação ou remoção de água do material. Um material sólido imediatamente após entrar em contacto com uma corrente gasosa sob temperatura e umidade fixas, tende a estabelecer o equilíbrio, embora ocorram certos diferenciais em função do movimento relativo à transferência de calor e massa.

De acordo com Nicoletti (2001) os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e as características dos equipamentos de secagem. Dos fatores citados, o que mais influencia a taxa de secagem é a

natureza da matéria-prima, fator relacionado a constituição química e física das paredes celulares.

Park et al. (2007), descreveram bem, a maneira usual e encontrada na literatura para a secagem e sua respectiva divisão em períodos. Assim sendo, o período 1 é o estágio em que ocorre elevação ou diminuição gradual da temperatura do material até que a transferência de calor, seja equivalente à transferência de massa. O período de velocidade constante onde a transferência de calor e massa são equivalentes em virtude da quantidade de água suficiente na superfície, é definido como período 2. Por fim o período 3 consiste no estágio de velocidade de secagem decrescente devido à deficiência de água na superfície. A partir deste ponto, a temperatura superficial do sólido se eleva, e a taxa de secagem cai bruscamente. Nesse período, apesar de bastante prolongado, a remoção do conteúdo de umidade é bastante pequeno. A umidade de equilíbrio é atingida quando a taxa de secagem se aproxima de zero, ou seja; quando o menor valor possível é atingido para as condições desenvolvidas. A Figura 1 define e mostra o comportamento característico da curva de secagem e taxa de secagem em função da umidade.



AB, BC e CD = períodos da secagem

X = teor de umidade inicial

X_e = teor de umidade de equilíbrio

t = tempo

A taxa de secagem é usualmente definida conforme equação (1).

$$X_s = \frac{1}{A} \frac{dX}{dt} \quad (1)$$

No início do processo ocorre a acomodação térmica do material ao meio, sendo representado na Figura 1 pelo segmento AB. Neste período a temperatura do sólido atinge o

regime quase permanente. O segmento BC representa o período de secagem à taxa constante onde a superfície sólida encontra-se saturada de água e ocorre a tendência de ajuste entre a superfície e as condições ambientais. A taxa de secagem independe do teor de umidade, assim a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa líquida sem haver, portanto, a influência direta do sólido na taxa de secagem. O final desse período ocorre quando o sólido alcança o teor de umidade crítico (C). A partir daí a temperatura da superfície aumenta e a taxa de secagem decresce rapidamente. O seguimento CD representa o período onde ocorre este decréscimo. Este período se modifica continuamente durante todo o processo de secagem sendo reduzido também a cada instante. Nesse período, a superfície, fica cada vez menos úmida em função do tempo já que a velocidade do movimento do líquido para a superfície é inferior à taxa de transferência de massa da superfície.

Sabe-se que a técnica de secagem reduz as características sensoriais e nutricionais dos produtos biológicos, mais como vantagem melhora o manuseio, baixa o custo de transporte de matérias primas e aumenta o tempo de conservação. Para otimização dessa tecnologia são usados diversos tipos de secadores. A escolha de um determinado tipo é, portanto definido pela natureza do produto que vai ser desidratado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operações. Este tipo de secador tem se mostrado como boa alternativa em relação ao Spray Dryer, por fornecer produtos de qualidade similar, e custos significativamente, inferiores (PHAM e POOLEY, 1981; PASSOS, 1998; MEDEIROS et al., 2009).

O leito de jorro tem se mostrado eficiente na secagem devido à possibilidade que esse oferece de se estabelecer um íntimo contacto entre o fluido e partículas, mesmo quando razoavelmente grandes. Esta técnica tem sido usada com eficiência para secagem de grãos, pastas, suspensões e granulações, além do recobrimento de partículas. Foi usado no Canadá em 1963 para secagem de ervilhas, lentilhas, fibras de linho, granulação de materiais, revestimento de partículas, cristalização entre outras aplicações industriais (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Entretanto, pouco se conhece acerca da utilização do leito de jorro para secagem de frutas tropicais em pedaços. Almeida et al. (2004) estudaram a secagem de pedaços cúbico de goiaba em leito de jorro avaliando o efeito da variação das propriedades das partículas deformáveis com a evolução da umidade sobre a fluidodinâmica.

2.2.1 Teoria da difusão

Para o coeficiente de difusão efetivo de água no sólido, a lei de Fick pode expressar tal mecanismo da seguinte maneira:

$$\frac{dx'}{dt} = D_t^* \nabla^2 X \quad (2)$$

D_t^* é o coeficiente de difusão do líquido e como muitos sólidos variam suas características durante o processo de secagem este raramente é constante. Assim se faz necessário se conhecer as características do mesmo (BROOKER et al., 1974).

Estudos sobre a movimentação de umidade no interior de produtos submetidos ao processo de secagem revelaram que, o transporte de umidade ocorre por difusão de líquido ou difusão de vapor ou, ainda, pela combinação destes mecanismos, que predominantes um sobre outro, durante o processo (ALVARENGA et al., 1980). Em determinada fase do processo de secagem, o movimento de umidade é, basicamente, determinado pela difusão de líquidos (FORTES e OKOS, 1981).

Sobre a cinética de secagem de sólidos, muitas pesquisas foram desenvolvidas por SHERWOOD (1929a; b) entre outras e mostram todas que, o movimento de água em um sólido acontece pelo mecanismo de difusão em fase líquida. Assim a lei de Fick pode ser aplicada para prever a velocidade do movimento de água e pode ser representada considerando apenas o fluxo unidirecional segundo a Equação 3.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial \psi^2} + \frac{q}{\psi} \frac{\partial X}{\partial \psi} \right) \quad (3)$$

A equação acima apresenta varias soluções para diferentes geometrias: placa plana ($q = 0$), cilíndrica ($q = 1$) e esférica ($q = 2$), com as seguintes condições iniciais de contorno,.

- Para placa plana: $\psi = x$

- Para cilindros e esferas: $\psi = r$

Condição Inicial,

$$C_1 \quad X(\psi, 0) = X_0$$

Condição de Simetria,

$$CC_1 \quad \frac{\partial X}{\partial \psi} /_{\psi=0} = 0$$

Condição de superfície

$$CC_2 \quad X(L, t) = X_e$$

Para as três geometrias (placa plana, cilindros e esferas), soluções foram apresentadas por CRANK, (1975).

Placa plana:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{4l^2}\right) \quad (4)$$

Cilindro infinito;

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(\mu_n^2 n \frac{D_{ef} t}{R_\rho^2}\right) \quad (5)$$

Esferas:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(- \frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R_\rho^2}\right) \quad (6)$$

Para o estudo quantitativo das características de secagem em relação às variáveis experimentais controladas como fluxo de ar e temperatura quando a secagem é controlada pela difusão, é importante a determinação dos coeficientes difusivos. Verifica-se na literatura, que vários estudos desconsideram a umidade de equilíbrio e estabelecem apenas a razão U/U_i (OLIVEIRA e BESSA, 1999; ROMERO-PEÑA e KIECKBUSCH, 2003).

Deve ser considerado que algumas condições que são assumidas para o uso da lei ou equação de Fick, não condizem à realidade. O sólido, por exemplo, não possui uma estrutura celular homogênea; a transferência de calor não é unidirecional; a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos como: fase gasosa ou líquida e porosidade variada, além disso, a temperatura do material aumenta durante o processo de secagem, e com a evaporação da água, ocorre encolhimento.

De acordo com a literatura, uma das formas mais usadas para obtenção da taxa de secagem é por meio de investigações experimentais em camadas finas. Nestes experimentos, o ar é mantido em condições constantes de umidade e temperatura sobre uma camada delgada do material úmido. Isoladamente estes estudos não descrevem adequadamente o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas mais podem representar um elemento de volume desses leitos (BARROZO et al., 1998). Assim é de fundamental importância o conhecimento das equações de secagem para o sucesso de projetos e construção de secadores. A tabela 2 apresenta algumas equações empíricas ou semi-empíricas encontradas na literatura e que descrevem o comportamento da cinética de secagem de materiais sólidos.

Tabela 2 - Equações empíricas de secagem

Referências	Equações de Secagem	
LEWIS, (1921)	$X^* = e^{-kt}$	$K = a.e^{\frac{-b}{T}}$
HENDERSON & HENDERSON (1968)	$X^* = A.e^{-kt}$	$K = a.e^{\frac{-b}{T}}$
PAGE, (1949)	$X^* = A(e^{-kt} + 19.e^{-kt})$	$K = a.e^{\frac{-b}{T}}$
BROOKER <i>et al.</i> , (1974)	$X^* = e^{-kt}$	$K = a.e^{\frac{-b}{T}}$
OVERHULTZ <i>et al.</i> , (1973)	$X^* = e^{-kt}$	$K = a.e^{\frac{-b}{T}}$

Fonte: Barrozo et al. (1998)

As equações puramente empíricas são em geral, boas opções para predizer o processo de secagem dentro das condições de operações que forem pré-estabelecidas. Assim o maior problema está na segurança que se deve ter quanto à determinação dos coeficientes de transferência de calor e de massa, bem como o conhecimento a respeito das propriedades físicas dos produtos que se deseje secar (FARIAS, et al.,1999).

2.3 SECAGEM DE FRUTAS

A retomada da discussão da recuperação da qualidade da vida, que inclui cada vez mais a importância no preparo de refeições saudáveis, mas com limitações do tempo imposto pela vida moderna, fortalece entre outras técnicas de conservação, a secagem de produtos agroindustriais.

Outro fator que deve ser considerável é a crescente demanda das indústrias que produzem os chamados alimentos instantâneos (prontos e semi-prontos) e que utilizam alimentos secos como matéria-prima. Assim a facilidade de manuseio e de armazenagem dos produtos secos, também é um fator considerável no mundo atual (PARK et al., 2002).

Neste segmento, a secagem pode ser uma das alternativas promissora especialmente para as frutas tropicais, onde o Brasil aparece com grande potencial não apenas pela sua grande capacidade produtiva de frutas, mais também pela boa aceitação, e consumo crescente destes produtos no mercado internacional (PINAZZA e ALIMANDRO, 1999).

Outro aspecto que deve ser considerado é o fato de que a fruticultura brasileira é marcada por enorme diversidade de produtos dos quais apenas uma pequena parcela é comercializada internacionalmente em grande escala como é o caso da manga, maçã, mamão papaia, melão, uva e banana. Para se ter uma idéia, o Brasil é o terceiro maior produtor de

frutas no mundo depois da China e Índia, mas apenas o 15^o exportador. Em 2007 suas exportações foram na ordem de 818 mil toneladas (GAZETA MERCANTIL, 2008).

Segundo Aguilera (1992), as frutas em particular, então dentro de um grupo de alimentos bastante perecíveis, isso faz com que haja perdas significativas antes de sua total comercialização. Lamentavelmente dentro desta cadeia, quem produz, é quase sempre o mais prejudicado. Essa realidade faz com que nossos produtos sejam menos competitivos, pois este fato implica em aumento considerável de custos que sobrecarrega o preço final.

Devido ao alto teor de água em sua composição, as frutas são altamente perecíveis, e em função das práticas de manejo inadequados durante a colheita e pós-colheita, a decomposição desses produtos são quase sempre acelerados. Este aspecto, afeta sensivelmente a qualidade do alimento, e limita ainda mais o período de comercialização (AGRIANUAL, 2010).

Por outro lado a crescente exigência do mercado consumidor tem feito com que produtos que possam preservar o máximo de suas características originais, sejam preferidos. Em nível industrial, isto significa a necessidade permanente de operações que minimizem os efeitos adversos de qualquer processamento. Contudo é extremamente difícil, pois em geral o processamento de produtos, consiste em práticas que visam impedir que os alimentos sofram ataques por microrganismos, mas para isso, quase sempre ocorre alterações indesejáveis. De uma forma ou de outra, a necessidade de se minimizar prejuízos é evidente, pois em climas tropicais e temperados existem relatos de que, até 40%, da produção de frutas e hortaliças pode ser perdida nos centros de produção. A justificativa é de que, não se dispõe de técnicas eficientes de processamento que assegurem um tempo maior de conservação. Nas feiras livres e supermercados, o desperdício de frutas além de uma dura realidade é também, uma prática bastante comum, sendo responsável também, por consideráveis prejuízos ao longo de toda cadeia produtiva (GONZAGA NETO, 1994).

De forma específica a conservação de alimentos através da remoção de água, tem como objetivo minimizar a atividade microbiana. Entre as medidas que se fazem necessárias para uma adequada conservação, a mais importante é o emprego da tecnologia de refrigeração. Sem desconsiderar evidentemente tal afirmação, sabemos que outras tecnologias de processamento de produtos agrícolas podem reduzir significativamente esses prejuízos. Para (CORTEZ et al., 2000).

Atualmente vários estudos têm sido realizados, visando avaliar o processo de secagem, considerando variáveis importantes como: temperatura, umidade do material, umidade de entrada do material em equipamentos de secagem, umidade relativa do ar, velocidade de

entrada de fluido, mecanismos fluidodinâmicos entre outras; todos visando avaliar os efeitos sobre produtos.

A cinética de secagem de frutas e o uso de secadores tem sido objeto de estudo entre vários pesquisadores. Alsina et al. (1996) estudaram a cinética de secagem de acerola a 60 e 80 °C e velocidade do ar variando entre 0,7 e 1,5 m/s e verificaram que não houve influência significativa da velocidade do ar mas que o aumento da temperatura foi favorável para o aumento das taxas de remoção de água. O uso de equação difusional usada para descrever a cinética de secagem considerou os efeitos do encolhimento e houve bom ajuste aos dados experimentais.

Vasquez et al. (1999), estudando o efeito de tratamentos químicos na cinética de secagem sob temperatura de 60 °C em uvas de Moscatel, observaram que os dados experimentais tiveram bom ajustamento ao modelo que levou em consideração o tamanho da uva e o coeficiente de difusão efetivo em função da umidade do produto.

Krokida et al. (2000), em estudos para avaliar a cinética de secagem convencional e a vácuo de maçã, banana, cenoura e batatas, constataram que a taxa de decomposição da coloração foi alterado com a elevação da temperatura.

Tsami e Katsiot, (2000) em pesquisas sobre a cinética de secagem de ameixa seca, figo e morango, propuseram um modelo matemático simples envolvendo um parâmetro denominado K como função das variáveis de processo. O modelo foi avaliado com dados produzidos em secador não convencional e em laboratório e também foi observado mudança de cor em abacate, ameixa seca e morango a temperatura de 70 °C.

Kiranoudis et al. (1997), estudaram a cinética de secagem de maçã, pêra, kiwi e banana, apresentando um modelo empírico de um parâmetro de transferência de massa e constante de secagem como funções das variáveis de processo. Os modelos apresentaram grandes influência do tamanho característico da amostra e temperatura do ar de secagem.

Sousa et al. (2004), desenvolveram estudos relacionados a desidratação de manga cortadas em forma de cubos em secador de bandejas numa faixa de temperatura entre 40 e 70 °C e velocidade do ar de secagem fixa em 1,5 m/s. Os autores propuseram um modelo exponencial de secagem e verificaram que com o aumento da temperatura e taxa de secagem também aumenta.

Alsina et al. (2003), estudaram a modelagem de secagem de acerola pré-tratada osmoticamente e verificaram que o modelo difusional para a esfera com quatro termos considerando também o encolhimento, apresentou um bom ajuste dos dados experimentais. O

coeficiente de difusão efetivo diminuiu com o aumento da temperatura de secagem com valores variando entre $0,6.10^{-4}$ e $1,8.10^{-4}$ cm^2/min .

Na literatura são encontrados diversos trabalhos realizados para obtenção de informações usando técnicas de secagem e secadores. A escolha de um ou outro determinado tipo é, portanto, definido pela natureza do produto que vai ser secado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operações. (PARK et al., 2007).

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS

2.4.1 Propriedades físicas

O conhecimento sobre as propriedades físicas dos produtos agrícolas é considerado relevante para que se possa otimizar o processo de secagem e armazenagem. Para o desenvolvimento de máquinas e equipamentos de secagem de produtos agrícolas é também de fundamental importância o conhecimento das propriedades físicas do que se deseja secar.

A massa específica real do produto, por exemplo, é necessária, pois a partir desse conhecimento pode se estabelecer relação importante com a porosidade do leito mediante o conhecimento de sua massa específica aparente.

Como propriedade física a porosidade também tem influência na queda de pressão e pode variar em função do tamanho das partículas, forma de distribuição, geometria, rugosidade superficial e da maneira como as partículas podem estar empilhadas.

Ribeiro et al. (2005), estudaram a determinação das propriedades físicas de alguns produtos agrícolas comparando os resultados com dados experimentais obtidos por outros autores verificaram eficiência da metodologia usada quando comparado com outros resultados encontrados na literatura.

Resende et al. (2008), mostraram que a redução do teor de água influencia as propriedades físicas dos grãos de feijão proporcionando a diminuição da porosidade e o aumento da massa específica aparente. Assim o teor de água de um produto agrícola pode alterar algumas propriedades físicas.

Araújo et al. (2001), realizaram estudos sobre o efeito da temperatura sobre a massa específica de polpa de cupuaçu e mostraram variações na densidade específica quando submetidas a temperaturas 10 e 50°C. Verificaram também redução da massa específica com a redução de sólidos solúveis, mas aumento com a redução de sólidos insolúveis.

Pinto et al.(1998), estudaram a variação da massa específica de alimentos fibrosos com alto teor de umidade durante a secagem em condições de ar constante. Os autores ajustaram os dados experimentais de massa específica e umidade adimensional pela correlação de Lozano et al. (1983), onde obtiveram bons resultados para diferentes faixas de temperatura.

Quanto ao tamanho e densidade e seus efeitos na dinâmica de leitos fluidodinamicamente ativos, Geldart (1973) sugeriu uma classificação de partículas definida em quatro categorias distintas: C, A, B e D assim definidas:

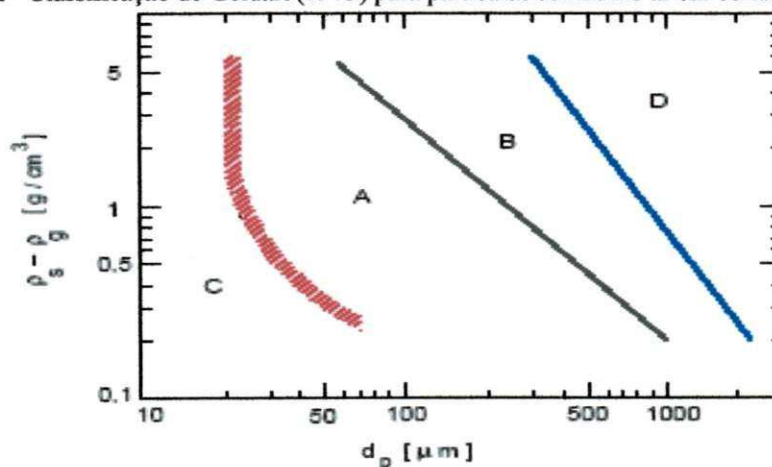
CATEGORIA A: Compreende as partículas que apresentam velocidade mínima de fluidização e velocidade do surgimento de bolhas diferentes e também apresentam como características as seguintes condições: $\rho_p < 1,4 \text{ g/cm}^3$ e $20\mu\text{m} < d_p < 100 \mu\text{m}$.

CATEGORIA B: Nesta categoria a velocidade mínima de fluidização e velocidade de aparição de bolhas das partículas, se confundem. Isto é, as bolhas se iniciam ao mesmo tempo em que a velocidade mínima de fluidização ou ligeiramente acima. Suas características são: $1,4\text{g/cm}^3 < \rho_p < 4,0 \text{ g/cm}^3$ e $40\mu\text{m} < d_p < 500\mu\text{m}$. Para a separação das zonas A e B pela curva de Geldart temos: $(\rho_p - \rho_g)d_p = 225 \text{ (g/cm}^3\text{)}.\mu\text{m}$.

CATEGORIA C: São caracterizadas por pequenas partículas em forma de pó, e devido suas dimensões possuem forte tendência a aglomeração isto é; em torno de $d_p < 30\mu\text{m}$.

CATEGORIA D: Ocorre fluidização instável, e na maioria dos casos são recomendadas para leito de jorro já que as partículas possuem tamanho bastante elevado, isto é; $d_p > 600\mu\text{m}$. A Figura 2 mostra a classificação de Geldart para partículas.

Figura 2 - Classificação de Geldart (1973) para partículas utilizando ar em condições ambientais.



Outra classificação foi proposta por Saxena e Mathur, (1984) e baseia-se na análise do escoamento de uma partícula isolada. As transições são traduzidas pelo número de

Reynolds em mínima fluidização onde Re_{mf} é obtido em função do número de Arquimedes (Ar) onde a partir desses valores essa classificação é estabelecida.

2.5 ATIVIDADE DE ÁGUA

Os macros e micros nutrientes que compõem os produtos destinados a alimentação humana e animal dependem essencialmente da presença de água. A água sem dúvidas confere a qualquer produto características como textura, palatabilidade, maior peso, entre outras. O conteúdo de água de um alimento pode ser o principal fator causador da sua decomposição pelo ataque de microrganismos além de alterações por reações químicas e enzimáticas; entretanto não deve ser visto como sendo o único fator de instabilidade, pois alguns alimentos são instáveis apesar de seus baixos conteúdos de água (CELESTINO, 2010).

Em um alimento a água existe sob duas formas distintas: água livre e água combinada sendo a água total a soma das duas parcelas. A água livre ou água não ligada, esta presente nos espaços intergranulares e entre os poros do alimento. Essa água mantém suas propriedades físicas e serve como agente dispersante para substâncias coloidais e como solventes para compostos cristalinos. Unida por forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio, a água está presente na superfície das macromoléculas como amido, pectina, celulose e proteínas. O seu conteúdo é usualmente determinado pelo método da estufa. (GAVA, 2000). A água de hidratação ou água ligada por sua vez, está associada quimicamente com outras substâncias presentes no alimento e por isso, não pode ser eliminada facilmente pela maioria dos métodos de determinação de umidade.

A atividade de água é um dos fatores mais importantes para a indústria de alimentos, pois o conhecimento sobre a quantidade de água disponível para o crescimento de microrganismos. Esse teor é designado como a_a ou a_w e é definido em termos de equilíbrio termodinâmico. É um número adimensional resultado da pressão de vapor de água do produto pela pressão de vapor da água pura à mesma temperatura. Varia numericamente de 0 a 1 e é proporcional à umidade relativa do ar em equilíbrio com o alimento.

Em alimentos, isto significa a relação entre a pressão de vapor da água no alimento e a pressão de vapor da água pura medida a mesma temperatura. Seu valor é extremamente importante, pois isto está ligado diretamente ao desenvolvimento dos microrganismos, velocidade das reações enzimáticas, oxidação de lipídios, hidrólise e escurecimento não enzimático e cristalização de alimentos. O conhecimento sobre a atividade de água de um alimento permite quantificar o grau de liberdade de água que o mesmo pode conter e indicar o

tipo de tratamento que o mesmo pode ser submetido para a sua conservação (SANCHEZ, 1994).

A atividade de água de um determinado alimento não é função apenas do conteúdo de água, mais também de outras substâncias que influenciam no efeito de ligação da água em sua estrutura. A relação entre a umidade de equilíbrio de um sólido e a atividade de água em uma dada temperatura é expressa graficamente através das conhecidas isotermas de sorção (LABUZA, 1999).

Nos alimentos ricos em água ou com valores de atividade superior a 0,9; ocorre a formação de soluções diluídas com componentes do alimento que serve de substrato para os microrganismos. Nessas condições, reações químicas e enzimáticas podem ter velocidade considerável a baixas concentrações dos reagentes e acarretar contaminações. Entre 0,4 e 0,8 ocorre possibilidade de reações química e enzimáticas rápidas pelo aumento da concentração dos reagentes. Na faixa de 0,6 ocorre pequeno crescimento de microrganismos. Para valores inferiores a 0,3 é atingida a chamada zona de absorção primária; nesta faixa, as moléculas de água estão fortemente ligadas ao alimento, e não são usadas para dissolver componentes; são portanto, próximas de zero e praticamente não acontece ataque por microrganismos.

Em geral, o comportamento de microrganismos frente à atividade de água é bastante variável. As bactérias são geralmente mais exigentes e se desenvolvem bem, na faixa de 0,91 seguido de leveduras e fungos com 0,88 e 0,80 respectivamente.

A redução do conteúdo de água é uma das maneiras de se conservar um alimento mesmo considerando que, em geral, quanto maior a umidade final de um produto, maior a sua maciez e consistência; o que é sem dúvidas, uma das qualidades das mais apreciáveis em um produto desidratado. Recomenda-se que um equacionamento seja estabelecido com o objetivo de manter a qualidade e também prever uma vida útil mais prolongada. (CELESTINO, 2010).

2.5.1 Comportamento higroscópico

De forma bem geral pode-se dizer que a higroscopicidade é a propriedade que certos materiais possuem de absorver água. Quando o grau de absorção de água é extremamente elevado, o material começa-se a dissolver na própria água absorvida. Se um material possui esta característica ele é dito deliquescente. O oposto da higroscopia é a eflorescência, propriedade de certos materiais de libertarem umidade no ambiente. Assim a relação existente entre a água e outros componentes de um produto, definem a sua higroscopicidade que é característico nos produtos alimentícios e influencia no manuseio, processamento e estocagem de produtos biológicos, (PRADO et al.,1999).

O comportamento higroscópico de produtos desidratados pode ser visualizado a partir da construção de curvas denominadas isotermas de sorção de umidade. Esse tipo de curva relaciona a quantidade máxima de água absorvida por uma substância, com a pressão de vapor de equilíbrio ou a atividade de água, numa dada temperatura mantida constante. O conhecimento a respeito das isotermas de equilíbrio relacionando com a umidade do alimento e a umidade relativa do ar ambiente, é de suma importância. Para determinada temperatura, esse conhecimento possibilita a obtenção do teor de água presente no material. Assim, a umidade de equilíbrio do alimento em função da umidade relativa do meio, fornece informações muito úteis para os processos de secagem, preservação e acondicionamento de materiais (MARTINS et al., 2004).

Segundo Roa e Rizvi (1977), o teor de umidade de equilíbrio é particularmente importante no processo de secagem já que ela representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa em dadas condições de temperatura. Assim umidade de equilíbrio pode ser definida como sendo o teor de umidade apresentado quando a pressão de vapor de água em sua superfície se iguala a pressão de vapor do ar de secagem que o envolve. Em termos quantitativos, a umidade de equilíbrio pode ser entendida como sendo a quantidade em massa de água por unidade de massa total (b.u), que um produto contém quando é submetido a condições controladas de temperatura e umidade do ar.

Apesar de ser proposto um número elevado de equações teóricas, empíricas e semi-empíricas, para o cálculo da umidade de equilíbrio, nenhuma delas é capaz de prever com exatidão em uma faixa ampla de umidade e temperatura (BROOKER et al., 1974). Entre os modelos matemáticos mais usados para isotermas de equilíbrio, encontra-se a equação de BET (Brunauer-Emmer-Teller), GAB e Henderson.

Brunauer et al. (1938), fundamentado nos conceitos de Langmuir (1918) sobre adsorção na camada monomolecular, propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas molecular cujo modelo diz que a capilaridade define o limite superior do número de monocamadas (CHIRIFE e IGLESIAS, 1978). A partir das contribuições importantes dos modelos de LANGMUIR e BET obteve-se uma equação tri-paramétrica conhecida como equação de GAB que o referencia, e apresentamos a seguir seus detalhes A equação geral de GAB para isotermas pode ser escrita da seguinte forma.

$$X_e/X_m = C_{GAB}K_{GAB}a_w/(1 - K_{GAB}a_w)(1 - K_{GAB}a_w + C_{GAB}K_{GAB}a_w) \quad (7)$$

Onde:

a_w = atividade de água

C_{GAB} = constante de GAB dada por: $C_{GAB} = K \exp(Q_s/RT)$

X_e = Teor de umidade de equilíbrio expressa em base seca

X_m = teor de umidade na monocamada molecular

Esta equação é matematicamente adequada para aplicações em engenharia e permite um ótimo ajuste de dados de sorção de quase todos os alimentos para a faixa de atividade de água até 0,9. Segundo Gouveia (1999), a equação de GAB tem sido usada em grande escala com ajustes satisfatórios na maior parte das situações em laboratórios da Europa e Estados Unidos.

Sendo C_{GAB} e K_{GAB} as constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes camadas de um dado sitio de sorção. Assim quando K_{GAB} for igual à unidade, então as equações de BET e GAB são equivalentes. Segundo Rao e Rizvi, (1986) dessa maneira, o modelo de GAB equivale ao de BET assumindo a adsorção física localizada nas multicamadas sem interações laterais, porém com as seguintes vantagens: descreve bem a sorção de água de todos os alimentos com atividade entre 0,0 e 0,9; apresenta três parâmetros relativamente simples; no processo de sorção os parâmetros possuem significados físicos e ainda descreve bem o efeito da temperatura no processo de sorção.

Outra equação bastante conhecida foi desenvolvida por HALSEY. Nesta equação ele assume a condensação da multicamada a uma distancia relativamente grande da superfície e apresenta os parâmetros a e b como a seguir:

$$a_w = \exp[-a / RT(X_e/X_m)^b] \quad (8)$$

Onde:

a_w = atividade de água

X_e = Teor de umidade de equilíbrio expressa em base seca

X_m = teor de umidade na monocamada molecular

a e b = parâmetros de ajuste

R = constante universal dos gases

T = temperatura correspondente aos ensaios experimentais

Nesta equação, HALSEY assume que a magnitude do parâmetro b caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Assim se b é grande, isso significa que a atração entre o

vapor e o sólido é muito específica e não se estende para muito distante da superfície. Sendo b é pequeno, quer dizer que a presença de força de atração de Van der Waals que são capazes de agir a grandes distâncias da superfície.

Também o modelo empírico proposto HENDERSON é freqüentemente usado para obtenção de isotermas de equilíbrio e apresentado pela seguinte equação;

$$1 - a_w = \exp \left[-(B_2 \cdot U^{B_1}) \right] \quad (9)$$

Onde:

B_1 e B_2 são parâmetros que dependem da temperatura.

Oliveira e Bessa (2006), estudando isotermas de sorção do resíduo agro-industrial de casca do abacaxi verificaram que tanto o modelo de GAB como o de Henderson ajustaram-se bem aos dados experimentais para a_w abaixo de 0,5.

Alexandre et al. (2007), estudando isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó verificaram alta higroscopicidade, sendo este equilíbrio atingidos entre tempos mínimos e máximos de 2 e 30 dias respectivamente. O modelo de Peleg resultou nos melhores ajustes aos dados experimentais, seguido pelo modelo de GAB onde ambos representaram bem as isotermas de adsorção de umidade classificadas como sendo do Tipo II.

2.6 VITAMINA C

Em análise de alimentos, é de suma importância a determinação de um componente específico do alimento que é a composição centesimal. Tal procedimento consiste em fornecer informações sobre a composição química de produtos e pode ter diferentes finalidades como: avaliação nutricional em geral, controle de qualidade do alimento, desenvolvimento de novos produtos e monitoração da legislação entre outros PEREIRA et al. (2003).

Neste contexto a vitamina C é considerada um parâmetro muito importante e é genericamente definida como ácido ascórbico, sendo um importante fator na nutrição dos seres humanos. Isto se deve principalmente a sua capacidade como antioxidante, porém é extremamente sensível a destruição quando é exposto a condições adversas de manipulação ou de armazenamento. Outros estudos atribuem à vitamina C, importantes atributos fisiológicos de síntese e de conversão de compostos. Segundo Rebouche, (1991), ela é essencial nos processos de síntese de colágeno, L-carnitina e de conversão de dopamina em norepinefrina, esta última, possui atuação no neurotransmissor do sistema nervoso central.

É extremamente sensível a oxidação especialmente em soluções aquosas ou alcalinas. Assim técnicas para evitar suas perdas são de extrema importância, pois em alimentos, o ácido ascórbico ou vitamina C é usualmente tido como índice da qualidade nutricional durante o processo de armazenamento.

De acordo com Alves (2004) o nome de ácido ascórbico surgiu devido a sua eficiência na prevenção e cura do escorbuto, uma das mais antigas doenças que afetava significativamente a humanidade. Ocorre naturalmente em alimentos sob duas formas: a forma reduzida (ácido L-ascórbico) e a forma oxidada (ácido L-desidroascórbico). Ambas as formas são fisiologicamente ativas uma vez que, a forma oxidada do ácido é novamente reduzida a ácido L-ascórbico no corpo humano.

O ácido L-ascórbico ou vitamina C é uma substância cristalina de coloração branca e sem odor. Sua molécula é altamente polar e por isso é solúvel em soluções aquosas, levemente solúvel em etanol, ácido acético, acetonitrila e insolúvel em solventes de baixa polaridade. (GREGORY III, 1996).

Muito presente nas frutas, a vitamina C faz parte de grupo orgânicos que não possuem funções estruturais como as proteínas, e nem são fontes diretas de energia como é o caso dos carboidratos e lipídeos. De acordo com a sua solubilidade, ela faz parte do grupo dos hidrossolúveis (BALL, 2004).

Em sua forma pura e cristalina, a vitamina C é estável quando exposta a ar, presença da luz e à temperatura ambiente por um período prolongado (BALL, 1998). Em soluções aquosas e quando presente em alimentos, sua estabilidade está relacionada diretamente com as condições de armazenagem ou composição de soluções quando é o caso.

Uma das maneiras que podem manter os níveis de vitamina C é a incorporação de solutos. Os efeitos do pré-tratamento osmótico na instabilidade do ácido ascórbico em goiabas desidratadas foram estudados por (ARGANDOÑA et al., 2004). Os resultados encontrados mostraram que o tempo de desidratação osmótica não influenciou na velocidade de degradação do ácido ascórbico, mas a incorporação de açúcares nas goiabas pré-tratadas osmoticamente favoreceu entre 30 e 35% a sua retenção.

Dependendo de alguns fatores como ph, temperatura, luz, presença de enzimas, oxigênio ou catalisadores metálicos; o ácido L-ascórbico pode ser facilmente oxidado e degradado. (MOSER, 1991; SZENT-GYÖRGYI, 1999).

Diversos trabalhos que envolvem o processamento e armazenamento de produtos alimentícios têm verificado que a reação de degradação da vitamina C segue um

comportamento cinético de primeira ordem (KIRK et al., 1977; LEE et al., 1977; KAREL, 1977): Novos modelos vêm sendo aplicados e ajustados também de forma que possa ser melhor esclarecido seu comportamento de degradação.

Estudos para avaliar os teores de vitamina C de 10 marcas de polpa de frutas comercializadas na cidade de em Salvador-BA e comparados com os níveis exigidos pelo Ministério da Agricultura, mostraram que 10% das polpas de acerola e 57% das polpas de goiabas apresentaram níveis inferiores ao mínimo pré-estabelecidos por lei. Ao contrário, 100% das polpas de caju pesquisadas, apresentaram valores satisfatórios (MIRANDA et al., 2004).

Raimundo et al , (2004), estudaram a degradação do teor de ácido ascórbico em suco de laranja durante o período de 30 dias e verificaram uma redução desses conteúdos. Dependendo das condições de secagem, a degradação do ácido ascórbico, por exemplo, pode chegar a cem por cento (TORREGGIANE e BERTOLO, 2001).

Quantidades de ácido ascórbico em diversas frutas comparando a metodologia que utiliza o 2,6 DFI (titulométrico) e o método enzimático verificaram que tais quantidades podem ser subestimadas pelo método DFI em relação à outra metodologia. Para a goiaba vermelha os valores encontrados foram 271,37 e 133 mg/100g para os métodos enzimáticos e DFI respectivamente (CARNEIRO et al., 2004).

2.7 REIDRATAÇÃO

A reidratação é um processo complexo baseado na reconstituição das propriedades da matéria prima quando um material seco está em contato com uma fase líquida. O método pode ser considerado como uma medida de contornar os danos causados ao material pela secagem. O estudo da cinética de reidratação pode ser muito útil para aperfeiçoar estes processos. Nesse sentido, é interessante conhecer a velocidade como fenômeno de absorção de água ocorre e como pode ser o efeito das variáveis de processamento. Esse conhecimento permite, por exemplo, saber o tempo de saturação provável.

Atualmente é muito grande a quantidade de produtos desidratados disponíveis no mercado consumidor, e se faz necessário portanto, informações à respeito também, da cinética de reidratação de produtos submetidos a processos anterior de remoção de água. Devido a necessidade de armazenamento, muitos destes, são submetidos a umidade final reduzida, e em muitos casos, apresentam dureza considerável, sendo portanto necessário a sua reidratação para ser consumido . Assim, não somente o processo de desidratação ou secagem,

mais também a reidratação desses produtos, são de suma importância na indústria de produtos do gênero.

Reidratação pode ser definido como sendo a medida entre a água absorvida nessa etapa e a água pré-existente no material biológico submetido anteriormente ao processo de desidratação (Mc MINN e MAGEE, 1997). A mudança relativa ao volume da água absorvido ou inchaço dos materiais biológicos em geral, depende das suas características, sendo que o volume ou inchaço de materiais biológicos são frequentemente proporcionais à quantidade de água absorvida (STEFFE e SINGH 1980). Fan, et al. (1962) constataram que, em alguns materiais, o aumento desse volume pode ser duas vezes o volume de água absorvida. Por outro lado, a umidade induzida ou inchaço em grãos de soja e guandu foi sempre menor que o volume de água sorvida (SINGH e KULSHRESTHA,1987).

Alguns estudos realizados por Bhattacharya (1995) com uso de Semolina e soja mostraram que a temperatura de reidratação tem efeito sobre o aumento do volume. Krokida e Marinos-Kouris, (2002) contataram que a temperatura tem influencia sobre a reidratação e que dependendo do material biológico, o nível de água absorvida pode ser superior em quatro vezes.

A modelagem matemática é de fundamental importância tanto nos processos de desidratação, como nos processos de reidratação. Este conhecimento simultâneo, permite a otimização de operações em grandes projetos, pois descreve com precisão os mecanismos e influências durante os dois processos (MULET, et al., 1989; PARRY, 1985)

2.8 ENCOLHIMENTO DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS DURANTE A SECAGEM

Durante o processo de secagem de alimentos, é comum ocorrer o fenômeno do encolhimento que é caracterizado pela contração do produto, ou mais especificamente, pela redução nas dimensões de partículas sólidas. Este fenômeno é consequência das alterações da microestrutura do tecido úmido que proporciona aumento de cavidades, alongamentos das células, dentre outras modificações promovidas principalmente, pela remoção de umidade. A geometria do produto em observação é um fator dependente (BORGES et al., 2008).

O conhecimento a respeito desse fenômeno durante a secagem, bem como a possibilidade de controle do mesmo, tem sido estudado nos últimos anos de maneira que se produzam materiais secos com características de porosidade pré-definidas. A atmosfera modificada pode ser aplicada ao processo de secagem sem deixar, entretanto, de considerar o

encolhimento como um dos fenômenos responsáveis pela obtenção de novas características sensoriais no final da secagem de determinado produto (BICUDO et al., 2007).

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de água inicial, como frutas e vegetais em geral, produz um efeito considerável de encolhimento. Esse fenômeno deve ser incluído no tratamento teórico dos modelos com a finalidade de melhorar a representação física do processo, e permitir melhor exatidão nos coeficientes calculados, como é o caso do coeficiente de difusão por exemplo. O encolhimento tem sido tratado sob diversas abordagens na literatura. Alguns autores consideram proporcional ao volume de água removido durante o processo de secagem (KECHAOU e ROQUES, 1989; BALABAN, 1989; MULET et al. 1989; VAGENAS, 1991; SOKHANSANJ, 1996; LIMA, 1999).

Além da redução do volume devido à perda de umidade, outros autores têm proposto também as forças mecânicas intercelulares, como sendo mais um dos fenômenos repensáveis pelo processo do encolhimento (MISRA e YOUNG, 1980; KETELAARS et al. 1992). O componente mecânico do encolhimento é atribuído à retração elástica das células adjacentes; entretanto ele pode ser considerado desprezível se a análise for focada na cinética de secagem (KETELAARS et al., 1992).

2.9 LEITO DE JORRO

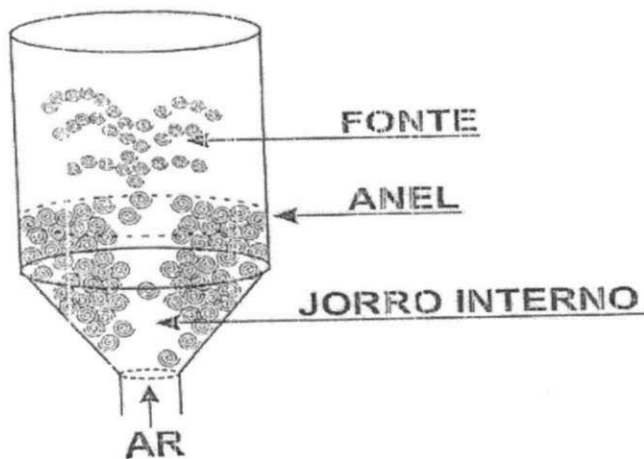
O estudo fluidodinâmico de partículas em leitos de jorro encontra inúmeras aplicações na indústria química, farmacêutica e recentemente, na área agrícola. A necessidade do aumento da produtividade agrícola tem contribuído para o desenvolvimento de novos projetos visando promover condições para um possível armazenamento, se necessário. Quando bem definidos, a otimização desses processos, permite reduzir de forma significativa o custo de produção (TAYLOR e HARMAN, 1990).

Entre outros, o leito de jorro se destaca entre as operações que envolvem partículas sólidas, relativamente grandes, que necessitam de contacto íntimo e apresentam fluidização deficiente. Esta técnica é bastante aplicada com eficiência na secagem de materiais granulares, pastas e suspensões, granulação e recobrimento de partículas. Em 1963 este tipo de secador já se mostrava com grandes perspectivas e foi implantado no Canadá em unidades industriais para secar ervilhas, lentilhas e fibras de linho. Unidades de resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização entre outras aplicações também são citadas por (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Este equipamento como mostra a Figura 3 consta basicamente de uma coluna cilíndrica de base cônica ou plana onde na extremidade inferior possui um orifício de entrada por onde penetra o fluido que provoca a formação do jorro. Quando a vazão do fluido é suficiente para provocar o movimento ascendente das partículas sólidas, a circulação se inicia formando-se uma região central de partículas e fluido com alta porosidade e velocidade, chamada de jorro. Nesta região as partículas sólidas são arrastadas pneumáticamente formando no topo uma região de sólidos que se empilham radialmente e desce em seguida pelo espaço anular que envolve o jorro em corrente contrária ao movimento do fluido. Esta região, entretanto, é caracterizada pela baixa porosidade e movimento descendente das partículas que deslizam e retornam novamente ao jorro. Segundo Mujumdar (1989) o leito de jorro apresenta algumas limitações como:

- alta perda de carga até atingir o jorro
- faixa operacional com limitações
- dimensões geométricas limitadas para uma operação eficiente
- capacidade por unidade de espaço físico limitado
- dificuldade para mudança de escala

Figura 3 - Diagrama esquemático do leito de jorro convencional



Apesar destas limitações apresentadas por Mujumdar (1989) o leito de jorro convencional tem aplicações em processos que não necessitam de unidades de grande dimensões como é usado na indústria farmacêutica e química fina.

2.9.1 Curva característica do leito de jorro

Os estudos fluidodinâmicos do leito de jorro com obtenção das curvas características são muito importantes para se determinar parâmetros operacionais tais como: vazão mínima de jorro, queda de pressão em jorro estável, queda de pressão máxima e altura máxima da fonte. Esses parâmetros juntos, são utilizados para definir por exemplo, a capacidade do soprador (vazão e potência), cargas de material à ser processado e condições de estabilidade do leito (PARK, et al., 2007).

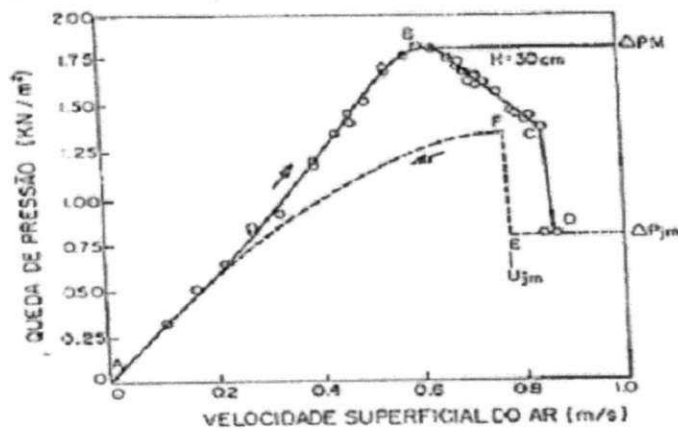
Inicialmente com a vazão baixa, o fluido circula sem perturbar as partículas, assim o sistema funciona como se fosse um leito fixo. Com o aumento da vazão, as partículas próximas do orifício de entrada do fluido se deslocam formando uma camada sólida compacta e mais resistente a passagem do fluido, isso acarreta uma maior perda de pressão no leito. Com o aumento da vazão a cavidade vai se alongando e formando um jorro interno. A queda de pressão, entretanto continua crescendo até atingir o valor máximo no ponto (ΔP_{\max}) no ponto B. A partir deste ponto o efeito do jorro interno é maior do que o da camada sólida que limita a cavidade e a queda de pressão conseqüentemente se reduz. No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas do núcleo central já é suficiente para proporcionar uma expansão do leito que é acompanhada também por contrações alternadas do leito interno. Esta expansão tem algumas conseqüências como: instabilidade, flutuações na queda de pressão, formação de bolhas e fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno, no caso de cargas mais acentuadas. A partir de então, um pequeno incremento da vazão além do ponto C provoca queda de pressão até o ponto D e o jorro aflora para a superfície o que é chamado de jorro incipiente. Neste ponto a queda de pressão (ΔP_{jes}) torna-se constante e um aumento da vazão gasosa provoca apenas a elevação da fonte. Devido à instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito ocorre que os pontos C e D (que correspondem respectivamente as vazões do jorro incipiente e início do jorro estável) não serem exatamente reprodutíveis, recomenda-se trabalhar com o processo inverso. Nestas condições o fluxo de gás é reduzido lentamente até o ponto E, onde se tem a menor velocidade (V_{jm}) e assim é possível a obtenção de um jorro estável. Prosseguido uma redução da vazão a queda de pressão aumenta e atinge o ponto máximo em F, localizado bem abaixo do ponto B. A partir desse ponto a queda de pressão decresce com a vazão.

A obtenção do jorro estável também está relacionado com a altura máxima do leito (H_{\max}) onde neste ponto ainda é possível se obter um sistema estável, isto é; sem a ocorrência de fluidização heterogênea ou movimento pistonado. Assim a altura da carga dos sólidos é um

fator limitante, além da influencia de outros parâmetros geométricos da coluna como: ângulo do cone, relação entre a parte cilíndrica e orifício de entrada de fluido, propriedade e dimensões das partículas envolvidas.

Apesar dos estudos fluidodinâmicos em leito de jorro sempre partirem da obtenção de experimentos para se determinar ΔP_{max} , ΔP_{je} , V_{jm} e H_{max} uma previsão é de suma importância no projeto de um secador e sobretudo para o dimensionamento do soprador. Muito embora estudos mostrem contradições em diversas correlações empíricas na sua maioria e em condições restritas de operação, essas informações fornecem para o leito de jorro convencional principalmente, uma previsão das variáveis hidrodinâmicas e possibilita uma estimativa razoável dos parâmetros para um projeto de secador. A figura 2.4 ilustra a queda de pressão em leito de jorro convencional (PARK, et al., 2007).

Figura 4 - Curva característica da queda de pressão para trigo onde: $d_p = 0,36$ cm; $D_c = 0,152$ m; $D_i = 1,27 \times 10^{-2}$ m; $\alpha = 60^\circ$ C, MADONNA et al. (1961)



2.9.2 Efeito da altura máxima do leito de jorro (H_{max})

A compreensão do mecanismo de determinação do jorro é de fundamental importância, pois o mesmo está relacionado com a altura máxima capaz de manter um jorro estável H_{max} . Qualquer equação obtida para o cálculo de H_{max} deve vir acompanhada da descrição deste mecanismo. Silva e Nebra (1991) demonstraram que qualquer que seja a geometria do leito, o mecanismo de terminação pode ser identificado por faixas distintas do parâmetro A. Esse parâmetro definido inicialmente por Morgan e Littman (1982) para geometrias conecilíndricas representa a relação entre a energia mínima para formar o jorro e aquela requerida para manter o leito nas condições de jorro mínimo, isto é: $H/H_{max} = 1$, onde:

$$A = \rho_g V_t \cdot V_{mf} / \rho_s - \rho_g \quad g D_i \tag{10}$$

Onde,

V_t - velocidade terminal da partícula (m/s)

V_{mf} = velocidade de mínima fluidização (m/s)

ρ_g = massa específica do ar (kg/m^3)

ρ_i = massa específica da partícula (kg/m^3)

D_i = diâmetro do orifício de entrada do ar (m)

Sendo a velocidade de mínima fluidização (V_{mf}) obtida através de ensaios experimentais ou calculada a partir de correlações empíricas.

Baseados em dados experimentais Morgan e Littman, (1982) concluíram que para o leito de jorro convencional, o mecanismo de terminação do jorro é o de fluidização no topo da região anular ($A > 0,02$) e de pistonagem ($A < 0,014$). Assim nota-se que o mecanismo de pistonagem ocorre com baixíssimos valores de A . Isso acontece porque o jato do fluido na entrada do leito ($H = 1$) não possui energia suficiente para formar o jorro.

Mathur e Epstein (1974) definem e classificam em dois os mecanismos de terminação do jorro de partículas: fluidização no topo da região anular e pistonagem do jorro. A fluidização no topo da região anular é considerada como mecanismo de terminação do jorro em leito convencional formado de partículas grandes ($d_p > 1 \text{ mm}$). Para tal mecanismo, o jorro termina devido à fluidização no topo da região anular. Neste ponto a velocidade mínima do jorro torna-se igual à velocidade mínima de fluidização para $H = H_{\max}$, (MORGAN e LITTMAN, 1982).

A pistonagem ocorre, entretanto, em leitos de jorro convencionais de partículas pequenas ($d_p < 1 \text{ mm}$). Este mecanismo de finalização ocorre quando a cavidade interna se decompõe em bolhas que se movimentam de forma ascendente em direção a região anular. A condição de contorno é o pré-requisito mínimo necessário para que ocorra o jato estável nestes sistemas. Este mecanismo de obstrução do jorro estável é descrito por Epstein e Chandanani, (1987), da seguinte forma:

$$D_i/d_p < 25 \text{ e } 0,55 < V_{mj}/V_{mf} < 0,70 \text{ para } h = 1$$

A velocidade terminal da partícula pode ser estimada segundo Kuni e Levenspiel, (1969), e pode ser determinado considerando a partícula esférica a partir das equações seguintes para os valores respectivos de Reynolds.

$$Re_p < 0,4 \text{ (Regime laminar)} \Rightarrow V_t = \frac{g \cdot (d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{18 \cdot \mu} \quad (11)$$

$$0,4 < Re_p < 500 \text{ (Regime transitório)} \Rightarrow V_t = \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 \cdot g^2}{\rho_g \cdot \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot dp \quad (12)$$

$$500 < Re_p < 200000 \text{ (Regime turbulento)} \Rightarrow V_t = \left[\frac{3 \cdot 1 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot dp}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Onde:

Re_p é o número de Reynolds da partícula calculado a partir da equação abaixo;

$$Re_p = \rho_f dp U / \mu_f \quad (14)$$

2.9.3 Velocidade do jorro mínimo (V_{jm})

É a mínima velocidade necessária de gás capaz de manter o jorro estável e depende das propriedades do sólido, do fluido e das características geométricas do leito e principalmente de seu diâmetro (D_c). A velocidade de jorro mínimo assume valor máximo quando a altura do leito é máxima. (Mathur e Epstein, 1974) desenvolveram uma correlação empírica para velocidade V_{jm} baseado na análise diferencial. Os resultados foram obtidos considerando uma faixa restrita de tamanhos de partículas, em diferentes leitos cujos diâmetros variam numa faixa compreendida entre 7,6 e 30,5cm tendo o ar como fluido. A correlação encontrada pelos autores é dada pela expressão a seguir e é válida para vasos cônicos cilíndricos.

$$V_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_l}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[2gH \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Outra correlação importante é a de Abdelrazek, (1974) definida para vasos cilíndricos com base cônica utilizando esferas de vidro e aço com tamanhos uniformizados ($dp = 0,5 - 0,8$ mm, $\rho_p = 2,46$ Mg/m³ a 7,07 Mg/m³) e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$V_{jm} = \frac{1}{1,74} \left[\left(\frac{D_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_l}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right] \quad (16)$$

Para fertilizantes e sílica gel Goltsiker (1976) estudou a seguinte correlação com diâmetro da partícula variando entre: $dp = 1,0 - 3,0$ mm.

$$(Re_i)_{jm} = 73(Ar)^{0,14} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,47} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,9} \quad (17)$$

2.9.4 Efeito da geometria da coluna e das propriedades dos sólidos

A altura máxima do leito (H_{\max}) em uma dada coluna tende a decrescer com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do fluido (D_i). Baseado em dados de diversos materiais para colunas cilíndricas, (Becker, 1987) sugeriu um valor crítico para obtenção do jorro estável de: $D_i / D_c = 0,35$.

A seção cônica inferior da coluna facilita o fluxo de sólidos da região anular para dentro da região de injeção do gás. O limite do ângulo do cone depende da fricção interna característica dos sólidos, sendo que para a maioria dos materiais a inclinação mínima é para uma boa circulação dos sólidos é de 40%.

Manuring (1976) demonstrou que uma máxima estabilidade é obtida com um projeto de entrada do ar que não permita que o jorro seja desviado do caminho vertical antes que este penetre no leito de partículas. (Geldart, 1973) verificou que o comportamento de um leito depende essencialmente da natureza das partículas que o constitui e sugeriu uma classificação destas partículas em quatro categorias. Como partículas classificadas na categoria D possuem diâmetros elevados, e apresentarem conseqüentemente fluidização instáveis, estas são adequadas para leito de jorro. Geralmente estas partículas são maiores que 600 μm , isto é; grandes valores do número de Arquimedes.

$$Ar = d_p^2 g \rho_g (\rho_p - \rho_g) / \mu_g^2 \quad (18)$$

A uniformidade do tamanho das partículas favorece a estabilidade do jorro, assim como a presença de partículas finas mesmo em quantidade pequenas, pode prejudicar sensivelmente esta estabilidade. Sólidos em uma ampla faixa de densidades têm sido usados em leitos de jorro sem nenhuma restrição em relação a esses limites (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A geometria e as características superficiais das partículas também possuem influencias quanto a estabilidade do jorro. Uma equação empírica de (Malek e Lu, 1965) sugere que para a altura máxima do jorro estável partículas não esféricas podem jorrar mais facilmente em leitos profundos, do que partículas esféricas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Oliveira (2006) estudando a Secagem de *Spirulina platensis* em leito de jorro verificou que este tipo de secador apresentou um comportamento estável para determinadas condições operacionais, onde a melhor condição encontrada sendo para temperatura de entrada de 90°C, vazão de alimentação de 200g/h e taxa de circulação de 100%. Nestas condições a umidade comercial foi atingida e o produto final apresentou solubilidade superior quando comparado com o produto seco em bandeja.

Secagem de polpas de frutas misturadas em leite de jorro foram usados por Sousa Junior et al. (2007) para verificar o desempenho do secador e as concentrações ideais de lipídios, amido e pectina usando óleo de linhaça, germe de trigo, azeites de oliva, castanha-do-pará, leite de coco, creme de leite e gordura em pó. Os autores verificaram que o rendimento e umidade do pó variaram de 30 a 56%, onde os melhores rendimentos referem-se à secagem com adição de azeite de oliva, cuja polpa apresentou o °Brix mais baixo (9%). A densidade, tensão superficial e o pH das polpas não sofreram variações importantes. Baixos rendimentos e elevadas umidades foram observadas na secagem das polpas com adição de creme de leite e leite de coco.

Medeiros et al., (2001), correlacionando partículas de poliestireno de alta e baixa densidade com escoabilidade, composição química de polpa de frutas e influência do ângulo de repouso sobre o desempenho do secador, no que se refere à produção; verificaram que polpas com elevadas concentrações de gordura, sólidos insolúveis e baixos teores de açúcares redutores, facilitam a escoabilidade.

2.10 CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS

A circulação de sólidos em leite de jorro é uma variável de estudo que deve ser considerado de relevante importância. A vazão de partículas no jorro, entretanto, pode ser determinada quantitativamente através da velocidade das partículas no interior da coluna de duas maneiras diferentes: ou seja; de forma indireta, ou diretamente por meios experimentais.

A avaliação da influência da carga de inertes e vazão do ar no comportamento da circulação de sólidos é importância na secagem pois tais parâmetros estão diretamente relacionados com o consumo de energia e capacidade de produção dos secadores em geral.

A escolha da técnica à ser usada em determinado processo de secagem de pastas, suspensões ou recobrimento em leite de jorro por exemplo, depende sem dúvidas, do movimento sistemático de circulação dessas partículas. Sendo assim, o conhecimento sobre a recirculação das partículas em função dos parâmetros geométricos e de operação do leite é também fundamental. De acordo com Day (1986) e Wildhagen (1993), a recirculação está intimamente relacionada com a distribuição das partículas e com o seu perfil de porosidade nesta região do jorro.

Benkrid e Caram (1989); Rodrigues, (1993) estudaram a circulação de sólidos leite de jorro. A técnica de fotografia estroboscópica e métodos de fibra ótica foram usados para medir a velocidade das partículas na região anular e identificaram velocidades em diferentes regiões a saber: região de fluxo radial. Nesta as partículas apresenta um movimento no

sentido da base do leito; outra região entre a parede do leito e o jorro é formada por uma fina camada de partículas; e uma terceira região denominada de zona morta, formada na superfície plana do fundo do leito.

Mathur e Epstein (1974), citam a técnica piezoelétrica usada para medidas de velocidade do jorro também por pesquisadores soviéticos (MIKHALLIK e ANTANISHIN, 1967). Estes usaram partículas de painço, sílica gel e poliestireno com diâmetros variando entre 1,5 e 7,0mm em uma coluna cone-cilíndrica de diâmetro igual a 94 mm. Em um leito cônico Gorshtein e Mukhlenov, (1974), também usaram essa mesma técnica para determinar a velocidade de partículas na forma de pequenas esferas.

Berruti et al. (1988) utilizaram uma técnica direta e simples para o cálculo da taxa de circulação de sólidos em leito de jorro e em leito de jorro fluidizado, ambos com tubo central acoplado a uma célula de medição tipo peneira colocado na região anular. A partir da massa de sólidos recolhido na peneira em intervalos de tempos predeterminados, a vazão de sólidos foi determinado. Houve um crescimento da taxa de circulação de sólidos com aumento da velocidade do gás. Um valor máximo a uma velocidade máxima foi observado e em seguida iniciou-se um uma fase de decrescimento. O uso dessa técnica mostrou boa reprodutibilidade e foi observado durante todo experimento um erro máximo aproximado de 7% e médio de 3%.

Thorey et al. (1959) determinaram a taxa de circulação de sólidos de forma indireta. Tomando uma série de medidas de velocidade de partículas de trigo em uma parede de coluna semi-circular transparente, ao longo da seção cilíndrica da coluna circular completa ele obteve a vazão de sólidos que atravessava o plano horizontal da parte cilíndrica do leito. Este observou que a velocidade destas partículas foi ligeiramente menor do que na interface jorro-anel no mesmo nível do leito. Essa constatação permitiu a conclusão de que a velocidade pode ser uma boa aproximação da velocidade média das partículas no anel. Em outras palavras, um indicador da vazão dos sólidos que retornam nesta região em contra-corrente com o gás.

Estudos também realizados por Lima et al. (1991), mostraram também o comportamento da taxa de circulação de sólidos em função da vazão do gás em leito de jorro convencional. Os experimentos foram realizadas com polpa de umbu e partículas de poliestireno como material inerte. Os resultados mostraram que o fluxo de circulação de inertes (W_s) cresceu com o fluxo do ar de entrada (Q). Nas mesmas condições de operação observa-se também que, a taxa de circulação de sólidos diminuiu, e afeta por consequencia, o desempenho do equipamento.

Segundo Castro et al. (2006), o comportamento fluidodinâmica do leito de jorro em operações de recobrimento de partículas e secagem de suspensões, por exemplo, podem ser

distintos. Durante o recobrimento, a circulação das partículas e a queda de pressão do leito aumentaram com o aumento da vazão do ar de jorro. No processo de secagem da suspensão, entretanto, a velocidade de circulação das partículas diminuiu com o aumento da retenção de sólidos no leito e a queda de pressão do leito se mantém praticamente constante com o aumento da vazão do ar.

Sobre circulação de sólidos, Rodrigues (1993) comenta estudos realizados por (Thorey et al. (1955, 1959) e a influência de algumas variáveis como: ângulo da base cônica, altura do leito, diâmetro da coluna, velocidade do gás e diâmetro do orifício de entrada do gás. Nestes estudos, foi verificado que o aumento de 45° para 85° no ângulo do cone, a variação na altura do leito de partículas e mudança na velocidade do gás, provocou um aumento da taxa de circulação de sólidos.

Segundo Mathur e Epstein (1974), na região definida como cônica, as linhas de trajetória das partículas são geralmente desviadas pela inclinação do cone. Para este, a afirmação, portanto, de que a velocidade das partículas na parede da coluna (V_w) seja um indicador representativo da taxa de circulação de sólidos, é falsa.

Sobre a circulação de partículas em leitos úmidos, Rodrigues (1993), citou estudos realizados por Patel et al. (1986) onde os dados experimentais mostram que a circulação de sólidos durante a secagem de suspensões, é afetada pela força entre as partículas. Isto se deve as propriedades reológicas particulares das suspensões. Em circulação de sólidos úmidos, este sugere que o leito de jorro seja operado com velocidade de gás entre 20 e 30% acima da velocidade do jorro mínimo.

Wildhagem et al. (1993), estudaram diversos parâmetros na recirculação e na atricção de partículas em leito de jorro convencional, utilizando partículas de polietileno, polipropileno e poliestireno como inertes. Estes verificaram aumento significativo da recirculação e da atricção com a vazão de entrada do ar e com a altura do leito. Observaram também que, para uma mesma altura do leito, quanto maior a esfericidade das partículas maior a recirculação de sólidos.

Reyes et al.(1997), realizaram vários estudos fluidodinâmico em leito de jorro cônico e semi-cônico para avaliar curvas características de queda de pressão em função do fluxo de ar; parâmetros como velocidade de circulação de inertes usando partículas de polietileno de alta densidade e diâmetro do jorro. Uma proveta deslizável com abertura na parte superior foi usada para deter os sólidos descendentes da fonte. A partir de amostras em várias posições radiais observou-se que a maior captação de partícula se produz nas imediações do jorro. O fluxo de circulação de inertes cresce também de forma linear com o aumento da massa e com

o fluxo de ar de entrada. Para uma massa variando entre 5,0 e 7,0 kg, a metodologia usada permitiu determinar a velocidade de circulação de inertes e o ajustamento para a seguinte expressão:

$$W_s \equiv \left[7,95M_i + 0,02 \frac{Q}{Q_{jm}} - 17M_i - 0,2 \right] \quad (19)$$

2.11 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática tem como objetivo a simulação de operações visando evitar o desperdício de matéria prima nos ensaios experimentais, o que permite também uma mudança de escala. Assim para otimização do processo de secagem e necessário o conhecimentos das variáveis que interferem no mecanismo de transporte de calor e umidade, isso permite um melhor e mais rigoroso controle na operação.

A utilização desses recursos onde sejam consideradas as características do sistema de secagem e do produto a ser processado apresenta-se como ferramenta útil no desenvolvimento de secadores eficientes. Este aspecto, permite não somente a melhoria na qualidade do produto mas também otimiza o fator energética do processo. Segundo Rocha et al. (2005), inúmeros modelos matemáticos têm sido estudados com o objetivo de projetar, controlar e aperfeiçoar unidades de secagem.

Segundo Souza et al. (2002), vários modelos foram propostos para prever o comportamento da secagem de produtos agrícolas, pois trata-se de importante ferramenta para os profissionais desta atividade. Segundo estes, para a descrição da secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se com frequência, modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos que são baseados no fenômeno de transferência de calor e de massa.

Podemos descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas através de um modelo fickiano simples, com coeficiente de difusão efetivo constante. No entanto é freqüente encontrar comportamento cinético que se distânciam deste modelo e não é bem adequado para descrever completamente o processo. Muitos autores atribuem o distanciamento do modelo fickiano à ocorrência de outros mecanismos difusionais. Para a maioria das aplicações como é o caso das frutas, esse modelo não considera o efeito do encolhimento mesmo sabendo-se que o mesmo possui influência.

Na cinética de secagem, alguns mecanismos são importantes para o movimento de umidade em sólidos. Segundo Luikov (1966) podemos identificar tais mecanismos como: difusão de líquido devido ao gradiente de concentração, difusão de vapor devido ao gradiente

de pressão, movimento de água devido às forças capilares, fluxo de líquido e vapor devido ao gradiente de pressão total, difusão superficial de fluxos provocados por evaporação e condensações sucessivas.

Apesar das diferentes teorias que tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos, todas têm como objetivo descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para a superfície, e qual mecanismo controla tal processo. Os modelos matemáticos convectivos e difusivos são tradicionalmente os mais comuns e representam de forma mais eficiente, a cinética de secagem. A formulação desses modelos foi desenvolvida a partir do comportamento de secagem de uma única partícula e geralmente é considerado todos os parâmetros de transporte constante, isso possibilita uma descrição similar da taxa de secagem, (MAYTA et al., 1993).

Rodrigues et al. (2002), avaliando a temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba concluíram que: para o mesmo tempo do processo, quanto maior for a temperatura do ar, maior é a taxa de secagem e a perda de umidade da goiaba tende a estabilizar no período de 90 minutos. A velocidade do ar variando entre 1 e 2m/s teve pequena influência, sendo que o modelo empírico de segunda ordem foi estatisticamente mais significativo, sendo recomendado para fins preditivos.

Gouveia, et al. (2004), estudando modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessecção da polpa de banana da variedade Prata, verificaram que as equações de GAB, Oswin, BET, Halsey e Oswin descreveram satisfatoriamente as isotermas de dessecção nos estágios madura e semi-verde.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA PRIMA

Foram utilizadas goiabas vermelhas (*Psidium guajava L.*) da variedade Paluma sendo adquiridas na central de abastecimento de Campina Grande-PB (EMPASA). O transporte dos frutos entre a central de abastecimento e o laboratório, foi realizado em caixas industriais (PVC) de 50L. Os frutos usados foram colhidos entre 90 e 100 dias, período este, que corresponde ao início da maturação em condições de campo. Devido a falta de uniformidade dos frutos encontrados na central de abastecimento já que as condições de cultivo são também diferentes, os mesmos apresentaram uma variação de 120 a 180g. Com o objetivo de minimizar erros experimentais os frutos usados em cada ensaio, apresentaram grau de maturação considerado ótimo para o consumo *in natura* que é em média de 3 a 5 dias pós-colheita.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.2.1 Umidade em base seca

A partir da umidade inicial do produto *in natura* de 85,86% foi determinada a umidade em base seca (b.s) da seguinte maneira: Em estufa a 105^oC foi colocado 10 gramas de pedaços cúbicos de goiaba e sendo retirado ao atingir peso constante (aproximadamente 24 horas após), onde a umidade foi determinada pela equação:

$$X_{b.s} = \frac{m_i - m_f}{m_s} \quad (20)$$

Onde:

X_{b.s} - umidade em base seca

m_i - massa da água inicial na amostra)

m_f - massa da água final na amostra

m_s - sólido seco

Visando avaliar o comportamento da variação da massa específica aparente, massa específica real e da porosidade dos pedaços cúbicos de goiaba, foram, realizados ensaios de secagem em leito fixo sobre quatro condições de umidade em base seca, sendo estas: 6,14; 3,95; 1,55 e 0,15 e a 60^oC.

3.2.2 Massa específica real

A massa específica real (ρ_r) foi determinada com auxílio de balança analítica onde o volume das partículas foi obtido a partir do método de deslocamento de um líquido assim descrito: em uma proveta de 250 mL foi adicionado 100 ml de óleo comestível e em seguida adicionou-se cerca de 50 pedaços de goiaba. Por meio do deslocamento do líquido segundo o princípio de Arquimedes o volume das partículas foi conhecido e assim a densidade real calculado a partir da equação 21.

$$\rho_r = \frac{m}{V} \quad (21)$$

em que,

V - volume da fruta, m³

m - massa da fruta, kg

ρ_r - massa específica da fruta, kg m⁻³

3.2.3 Massa específica aparente

Em uma proveta de 250 mL foi usado 30 gramas de goiaba seca a 60°C e observado o volume correspondente ocupado. A partir da relação entre a massa e o volume aparente obtido (ρ_a), determinou-se a massa específica aparente através da equação 21 onde V agora corresponde ao volume aparente ocupado pelos pedaços da fruta. Da relação entre a massa específica real e massa específica aparente foi determinada a porosidade (p) pela equação:

$$p = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (22)$$

em que,

p = porosidade

ρ_a = massa específica aparente da fruta (kg m⁻³)

ρ_r = massa específica real da fruta (kg m⁻³)

3.3 ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO

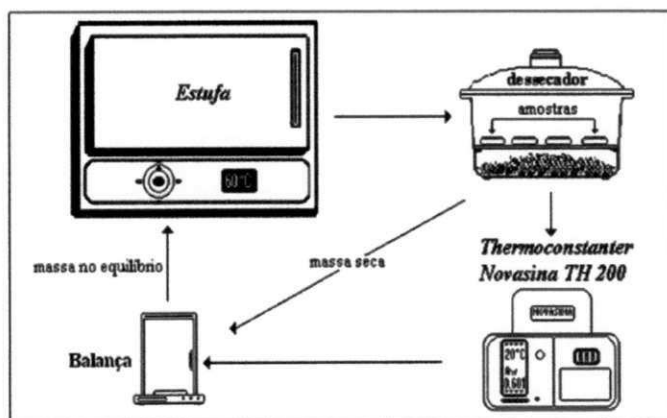
Para a determinação das isotermas de dessecção dos pedaços de goiaba, foi utilizado o equipamento *Termoconstanter Novasina RS 232*, projetado para medir a atividade de água sob temperatura controlada. Nesse equipamento, a temperatura da câmara de medição é regulada para uma variação menor que 0,2 °C, no intervalo de 0 a 50 °C. Essa câmara é um mini-gabinete climático e equipado com sensores de umidade e temperatura.

As isotermas de dessecção foram determinadas pelo método estático-indireto, com base no estudo efetuado por Capriste e Rotstein (1982) assim descrito: inicialmente, 7,0 g da amostra, na forma de cubos foram colocados em célula plástica que acompanha o equipamento e pesados em balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Em seguida, a amostra foi conduzida para secagem em estufa com circulação forçada de ar por três horas a 60 °C. Após esse período, a amostra foi retirada da estufa e colocada no dessecador para esfriar onde em seguida foi conduzida ao *Thermoconstanter Novasina RS-232* para determinação da atividade de água (a_w), à temperatura ambiente.

A amostra permaneceu no equipamento até que a leitura relativa a atividade de água se mostrou estável; em seguida, foi retirada, pesada em balança analítica e colocada na estufa durante 15 minutos, antes de efetuar nova leitura. Esse processo foi repetido até que a última leitura da atividade de água atingisse valor igual ou maior que a penúltima.

Cada leitura obtida para cada temperatura corresponderá a um ponto da curva da isoterma de dessecção da goiaba. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105°C, durante 24 h, para a determinação da massa seca como mostra a Figura 5

Figura 5 – Esquema do equipamento utilizado para determinação de atividade de água Silva et al. (2002)



A umidade de equilíbrio será calculada pela relação entre a massa de água que a amostra apresentou no equilíbrio e a sua massa seca conforme a equação 23.

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (23)$$

em que,

X_e - umidade de equilíbrio (b s).

m_{eq} - massa da amostra no equilíbrio (g)

m_s - massa da amostra seca (g)

Para o ajuste das isotermas de dessecção da polpa de goiaba, mediante análise de regressão não-linear dos dados obtidos, foram testados os modelos de BET, GAB, Halsey, Oswin e Smith como mostra as equações 26 a 30 respectivamente e empregando-se o programa computacional Statistica versão 6.0, com critérios de convergência de 0,0001.

3.3.1 Modelos matemáticos

Modelo de BET (24)

$$X_e = \frac{x_m C a_w}{1 - a_w} \left[\frac{1 - (n + 1)(a_w)^n + n (a_w)^{n+1}}{1 - (1 - C)a_w - C (a_w)^{n+1}} \right]$$

Modelo de GAB (25)

$$X_e = \frac{x_m C K a_w}{(1 - K_{aw})(1 - K_{aw} + C K_{aw})}$$

Modelo de Halsey (26)

$$a_w = \exp\left(\frac{-a}{X_e^b}\right)$$

Modelo de Oswin (27)

$$X_e = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$$

Modelo de Smit

$$Y = a^*(x/(1-x))^b \quad (28)$$

em que:

a_w - atividade de água, decimal

n - número de camadas moleculares

x_e - conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca, decimal

x_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular, decimal

C - constante de BET relacionada ao calor de sorção da camada molecular

a, b, K - parâmetros de ajuste.

Com base na equação 29 a seguir, Lomauro et al. (1985) consideram que valores com erro relativo médio abaixo de 10% indicam um razoável ajuste para as práticas propostas.

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - M_{p_i})|}{M_i} \quad (29)$$

Em que,

E - erro médio relativo;

M_i - valores obtidos experimentalmente;

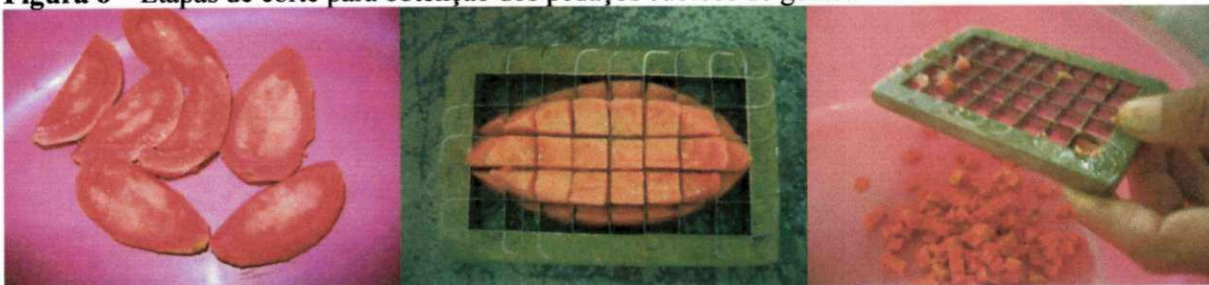
M_{p_i} - valores preditos pelo modelo, e

n - número de dados experimentais.

3.4 PREPARO DA AMOSTRA PARA A PRÉ-SECAGEM EM LEITO FIXO

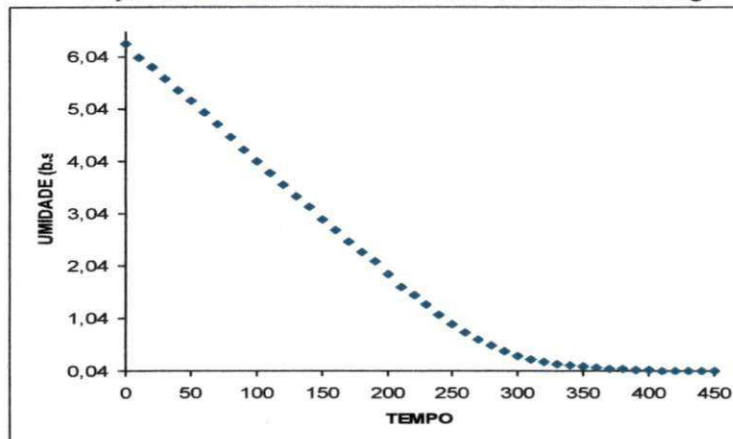
Para cada ensaio experimental, os frutos foram separados das sementes lavados em água corrente de abastecimento e descascados manualmente. A separação do epicarpo (casca) do endocarpo (polpa) foi efetuada com o auxílio de faca inoxidável. Em uma segunda etapa, cada fruto foi cortado longitudinalmente em quatro partes sendo ainda cada parte, subdividida equatorialmente ao meio. Para a obtenção dos pedaços cúbicos desejados para a realização dos ensaios experimentais, foi usado um cortador em aço inoxidável com as medidas respectivas de: 8cm de comprimento, 5cm de largura e 1cm de espessura ou altura; perfazendo um total de 40 cubos de 1cm ou 40cm³ conforme a Figura 3.2.

Figura 6 – Etapas de corte para obtenção dos pedaços cúbicos de goiaba



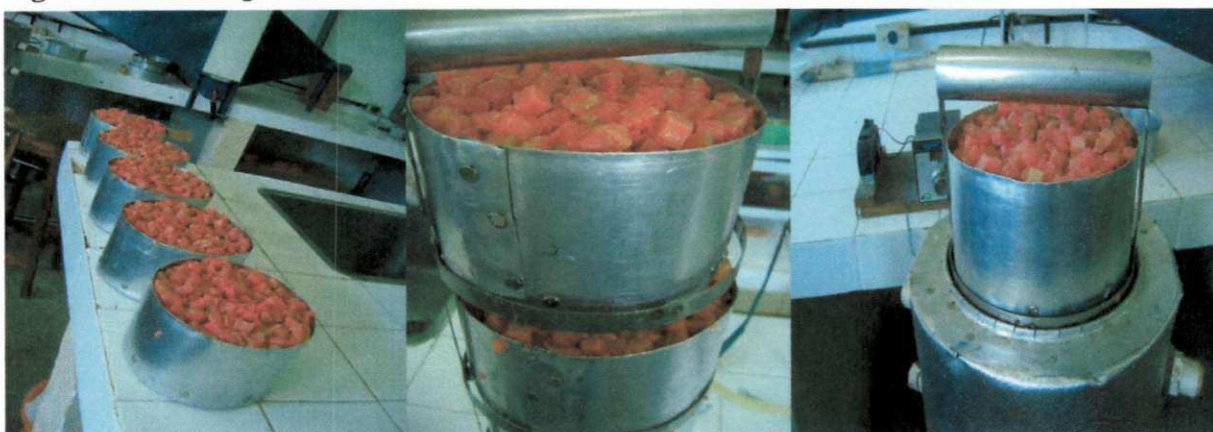
Para permitir condições de jorro já que o teor de água na forma natural da goiaba foi de 85,86% ou 6,06 em base seca ($X_{b,s}$), o material sofreu uma pré-secagem em leito fixo a 60°C e velocidade do ar de 3m/s até atingir os níveis de umidades desejados ou pré-estabelecidos pelo planejamento experimental que apresentamos mais adiante.)

Figura 7 – Curva de secagem de pedaços de goiaba em camada espessa no leito fixo. $T= 60^{\circ}\text{C}$; $v=3 \text{ m/s}$; $m_i= 2,8 \text{ kg}$



A curva de secagem da umidade em base seca em função do tempo para as camadas espessas de pedaços de goiaba como mostra a Figura 7, foi utilizada para pré-definir os tempos de secagem em leito fixo necessários para obtenção das umidades iniciais (X_i) desejadas (para secagem em leito de jorro e que variaram entre 0,41 e 1,69 em base seca ($X_{b,s}$) conforme o planejamento experimental.) A altura da camada inicial no leito fixo foi de 15cm e a cada 15 minutos o material era retirado do leito fixo para ser revolvido o que permitiu uma melhor uniformidade em termos de umidade. Esse procedimento foi realizado até atingir a umidade pré-estabelecida para entrar no leito de jorro. A Figura 8 mostra as etapas da pré-secagem em leito fixo.

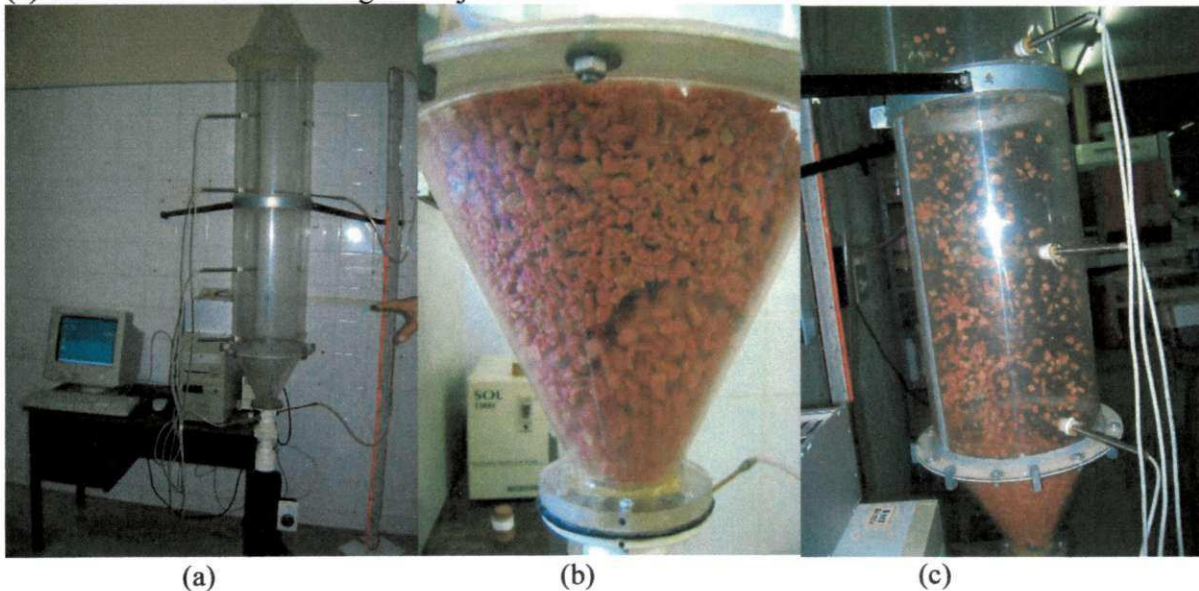
Figura 8 – Pré-secagem em leito fixo



3.5 LEITO DE JORRO

Para os ensaios experimentais em leito de jorro, com o objetivo de observar o comportamento fluidodinâmico durante a secagem dos pedaços de goiaba pré-secos em leito fixo, foi usado o equipamento, mostrado na Figura 9 (a), que consta de uma coluna em acrílico com as seguintes dimensões: altura da parte cilíndrica igual a 1,00 m, diâmetro do cilindro 0,25 m, extremidades cônicas superior e inferior com 0,25 m de altura e orifício de entrada de ar de 0,05m. Para o controle do equilíbrio termodinâmico de pressão e temperatura bem como para o acesso ao material circulante dentro da coluna ao longo dos ensaios experimentais, a coluna apresenta 4 furos laterais com 0,025m de diâmetro distribuídos a cada 0,2m onde o ponto 0 coincide com o orifício de entrada. Por outro lado a Figura 9 mostra respectivamente a coluna com suas extremidades cônicas acopladas com sistema de armazenamento de dados a partir de sensores de temperatura e umidade (a); detalhe da parte cônica inferior carregada de pedaços cúbicos de goiaba (b) e coluna funcionando em regime de jorro (c).

Figura 9 – (a) Equipamento do leito de jorro (b) Detalhe da parte cônica com os pedaços de goiaba. (c) Coluna funcionando em regime de jorro.



De acordo com o planejamento experimental fatorial com configuração estrela $2^K + 2K$ sendo foi avaliado no leito de jorro o comportamento fluidodinâmico e a qualidade final dos pedaços de goiaba em função das variáveis de entrada: umidade inicial e temperatura do ar. Sendo K o numero de variáveis operacionais (temperatura de entrada do ar e umidade inicial da goiaba) assim discriminados: $2^2 + 2 \cdot 2$ mais 3 pontos centrais perfazendo um total de 11

experimentos conforme matriz experimental em valores reais e codificados apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz experimental em valores reais e codificados para secagem em leito de jorro

N ^o EXPERIMENTO	Variáveis de entradas			
	Valores reais		Valores codificados	
	T (°C)	X (b.s)	T (°C)	X (b.s)
01	50,0	0,60	-1,00	-1,00
02	50,0	1,50	-1,00	1,00
03	60,0	0,60	1,00	-1,00
04	60,0	1,50	1,00	1,00
05	47,9	1,05	-1,41	0,00
06	62,1	1,05	1,41	0,00
07	55,0	0,41	0,00	-1,41
08	55,0	1,69	0,00	1,41
09 (C)	55,0	1,05	0,00	0,00
10 (C)	55,0	1,05	0,00	0,00
11(C)	55,0	1,05	0,00	0,00

As temperaturas de entrada do ar no leito de jorro conforme definida previamente por meio do planejamento experimental (Tabela 3)), foram controladas em cada ensaio com auxílio de termostato sendo aferidas ou calibradas com termômetro de mercúrio. Um sistema de aquisição de dados acoplado ao equipamento, permitia medir a temperatura e umidade do ar na entrada e em quatro posições ao longo da coluna. Para atingir as umidades iniciais (X_i) dos pedaços de goiaba a serem secos no leito de jorro, foi utilizada a curva de secagem no leito fixo obtida previamente por meio de ensaio experimental. Assim, o tempo necessário de pré-secagem em leito fixo de forma a atingir a umidade inicial no leito de jorro conforme o planejamento pré-estabelecido foi determinado conforme a Figura 7.

(A massa total de entrada para pré-secagem em leito fixo e posterior secagem em leito de jorro foi igual para todos os experimentos e equivalente a 2,8kg. No leito de jorro, entretanto, devido à pré-secagem, a massa dos pedaços cúbicos de goiaba em cada ensaio experimental variou entre 0,2 e 0,8Kg. A altura inicial do leito de partículas no jorro para essa variação da massa de entrada variou em média de 2 cm. Como referência para a altura foi usado o limite superior da parte cônica que possui volume aproximado de 5L (Figura 9b))

3.6 VARIÁVEIS DE SAÍDA NO LEITO DE JORRO

Para cada ensaio experimental no leito de jorro foram feitas observações entre 0 e 90 minutos da seguinte forma: a primeira leitura no tempo zero, ou seja; imediatamente após

entrada do material no leito de jorro; a segunda e terceira leitura com 5 e 15 minutos respectivamente; as demais, a cada 15 minutos até o tempo final de observação que foi de 90 minutos. Foram observadas ao longo de cada ensaio em leito de jorro as seguintes variáveis: altura do leito (AL), altura da fonte (AF), variação de pressão (ΔP), velocidade do ar na saída (V_{ar}), circulação de sólidos (C_s), umidade final em base seca (X_f) e atividade de água (a_w).

3.6.1 Altura do leito e da fonte, velocidade do ar e variação de pressão

Para as avaliações da altura do leito e altura da fonte foi usada régua graduada como instrumento de medição. A velocidade do ar de entrada (V_{ar}) considerando o sistema vazio, foi de 22,5m/s, e sua variação ao longo do tempo devido à presença do material, foi medida com auxílio de anemômetro. As variações de pressão (ΔP), foram obtidas com uso de manômetro em “U” acoplados a coluna e tendo como fluido manométrico óleo de densidade igual a $0,86 \text{ g/cm}^3$.

3.6.2 Circulação de sólidos

Para a taxa de circulação de sólidos (C_s), foi usada uma sonda de coleta com 12,5 cm de comprimento, 2 cm largura e 1 cm de profundidade radial, perfazendo um total de 25cm^2 . Dividida em quatro células e subtraindo as divisões, cada unidade possui $5,5\text{cm}^2$ conforme a Figura 10.

Figura 10 – Sonda de coleta de sólidos



Em cada intervalo de tempo, conforme a cinética de secagem, foi coletado amostra mediante a sonda em quatro posições radiais (R_1 R_2 R_3 e R_4) sendo R_1 no centro da coluna e

R₄ na extremidade lateral. Assim a taxa de circulação de sólidos (g/s/cm²) foi calculada em minutos nos tempos: 0; 5; 15 e a partir de então, a cada 15 minutos até 90 (tempo máximo de observação).

3.7 ATIVIDADE DE ÁGUA DO PRODUTO FINAL

Foi determinada nos pedaços de goiaba após secagem em leite de jorro para cada ensaio experimental da seguinte maneira: Visando evitar possíveis variações, a mesma amostra coletada para medir a umidade do produto final foi usada. A descrição instrumental está apresentada no item 3.4 (isotermas de equilíbrio).

3.8 DETERMINAÇÃO DE VITAMINA C

Foi determinada pelo método de Tillmans modificado (IAL,1985a) por meio de titulação da amostra com solução de 2,6-diclorofenolindofenol-sódico (DCFI), para o qual os resultados são expressos em miligramas de ácido ascórbico/100g de amostra conforme a equação 32 e a metodologia com detalhes, se encontra em anexo.

$$\text{ácido ascórbico/100g} = \frac{V.F.100}{A} \quad (30)$$

onde:

V = volume da solução DCFI utilizada para titulação da amostra

F = fator da solução de DCFI

A = quantidade em gramas da amostra usada

F = massa (mg) de ácido ascórbico usado na titulação/volume (ml) da solução de DCFI gastos na padronização.

3.9 REIDRATAÇÃO DOS PEDAÇOS DE GOIABA SECOS EM LEITO DE JORRO

Foi usada a metodologia, descrita por Krokida et al. (2003) que observou o comportamento da reidratação sobre várias frutas e vegetais em diferentes condições de temperaturas. Neste estudo, entretanto a reidratação foi realizadas em condições de temperatura ambiente (26°C) e os tempos de avaliação observados foram respectivamente 50, 100, 150, 200 e 250 minutos. Para cada ensaio experimental e em cada intervalo de tempo foi usado cinco Beckeres contendo em cada um destes 30 g de goiaba desidratada e sendo adicionadas 50 ml de água, sendo este volume, a quantidade necessária para manter as amostras submersas durante o período de reidratação.

De acordo com determinação prévia o teor de umidade natural do material usado foi de 85,86%, isto é 25,7 gramas de água para cada amostra (P_1). Ao completar cada tempo de observação, a amostra era separada da água, seca em papel toalha e imediatamente pesada obtendo-se a massa de água após o processo de reidratação (P_2). Assim a percentagem de água absorvida (%) foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Água absorvida} = (P_1 - P_2).100 \quad (31)$$

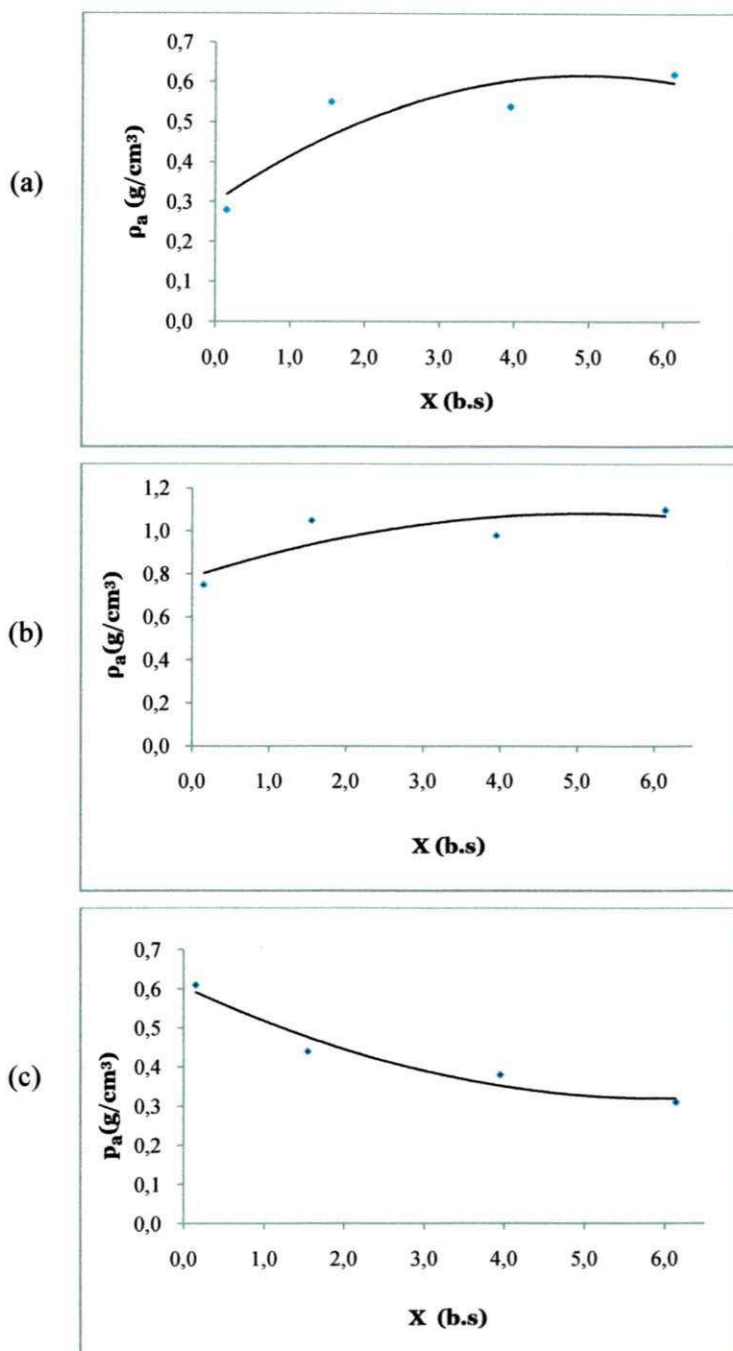
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item apresentamos os resultados e as discussões relativos aos seguintes itens: caracterização física; cinética de secagem de pedaços de goiaba em secador conectivo a 84°C com aplicação de modelos matemáticos, e cinética de dessecção com seus respectivos ajustes para as isotermas por diferentes modelos em pedaços de goiaba secos a 46°C. Em leito de jorro, apresentamos a cinética de secagem e a avaliação das variáveis fluidodinâmicas: Altura do leito, altura da fonte, variação de pressão, velocidade do ar de secagem e circulação de sólidos para as temperaturas de 50, 55 e 60°C com as umidades em base seca respectivamente de 0,6; 1,05 e 1,5. As variáveis respostas: umidade final, atividade de água, teor de vitamina C e percentagem de reidratação foram avaliadas através de análise estatística dos resultados a partir dos dados experimentais conforme planejamento experimental realizado em leito de jorro.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Conforme a Figura 11 (a), a massa específica aparente apresentou um decréscimo entre a umidade em base seca 6,14 e 0,15 de 44,26%. Corrêa et al. (2006) verificou em estudos relativos as propriedades físicas do trigo durante a secagem que, independentemente da metodologia utilizada para essas determinações, ocorre redução da massa específica aparente e real com o aumento do teor de água, afirma ainda que, tal comportamento é comum na maioria dos produtos agrícolas.

Figura 11 – Massa específica aparente, massa específica real e Porosidade de pedaços cúbicos de goiaba secos em estufa a 60°C.



De maneira contrária ao comportamento da densidade aparente, como mostra a Figura 11 (b), nas mesmas condições a massa específica real aumentou com a redução de umidade entre 6,14 e 0,15 (b.s), atingindo ponto máximo de 1,1g/cm³ e decrescendo no final da secagem ao nível mínimo de 0,67g/cm³. Comportamento semelhante foi observado por Prado e Sartori (2002) em estudos para observar o fenômeno do encolhimento em sementes; Alsina et al. (2004) avaliando as propriedades térmicas da goiaba (*Psidium guajava* L.) e do caju (*Anacardium occidentale* L.) e Wang e Brennam, (1995) em pesquisas com batata. Para estes,

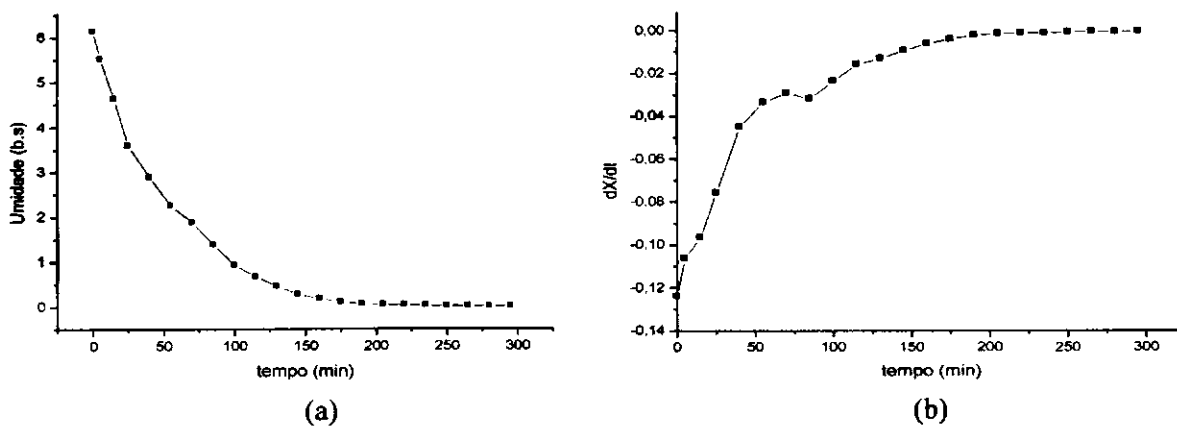
tal comportamento da massa específica pode ser explicada pelo fenômeno do encolhimento, em outras palavras, em níveis baixos de umidade, o volume da matriz sólida sofre alterações e a densidade tende a diminuir.

O acréscimo da porosidade com a redução da umidade, observado na Figura 11(c), foi de 55% entre as umidade 6,14 a 0,15 em (b.s). O aumento da porosidade se justifica pelo decréscimo da densidade real e acréscimo da densidade aparente das amostras à medida que a água é removida durante o processo de secagem.

4,2 CINÉTICA DE SECAGEM DE GOIABA

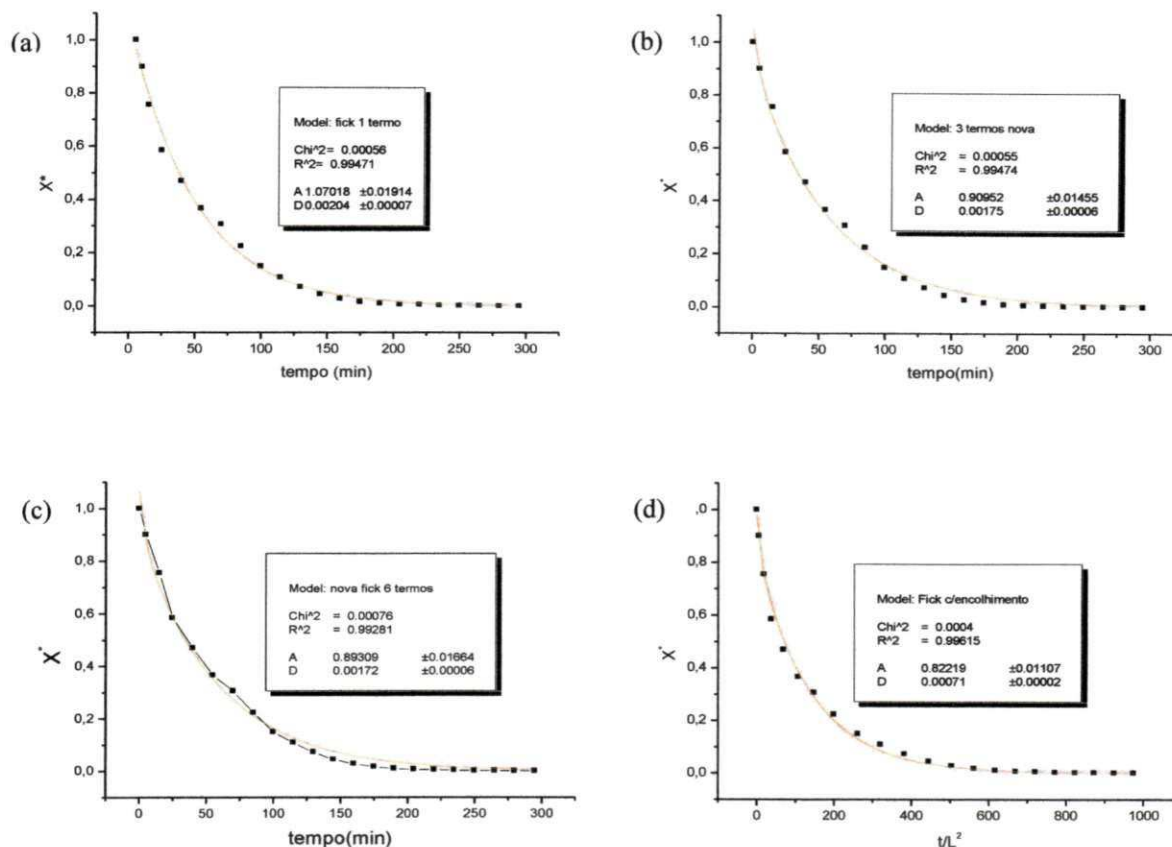
Na Figura 12 (a) e (b) são apresentadas as curvas de secagem e taxa de secagem respectivamente para experimento realizado a 84°C em leito fixo e camada de 1 cm de altura. Observa-se que não foi identificado a fase inicial e o período de taxa de constante foi muito reduzido (aproximadamente 30 minutos). As amostras atingiram a umidade de equilíbrio de 0.0041 (b.s) em 280 minutos, com perda de água durante a secagem de 99,93%. A partir de 220 minutos observa-se nítida tendência de estabilidade ou equilíbrio. Por meio do gráfico da cinética de secagem representada pela derivada da umidade em função do tempo e da massa em função do tempo, verifica-se também tal comportamento, ou seja, curto período de taxa constante.

Figura 12 - Curva característica da cinética de secagem de goiaba em secador conectivo 5h, 84°C e 1,1m/s.



Conforme a Figura 13 (a), (b), (c) e (d) e resumo contido na Tabela 4 os valores das constantes de difusividade efetiva decresceram de acordo com o aumento do número de termos na equação atingindo valores na ordem de $10^{-9}(\text{m}^2/\text{s})$, sendo que, o menor valor determinado para difusividade e do parâmetro A foi aquele considerando o encolhimento.

Figura 13 - Modelos matemáticos utilizando 1, 3 e 6 termos sem encolhimento (fig. a, b e c) para modelos teóricos e empírico e 6 termos com encolhimento (fig d).



Park et al. (2001) avaliou a secagem de pêras em diferentes temperaturas e velocidades e utilizou para o cálculo da difusividade a segunda lei de Fick com 1, 3, 5, 10 e 15 termos, e observou que, não houve diferenças no valor de difusividade com o uso de 3 termos ou mais. O menor erro relativo foi observado com a utilização de 15 termos da equação.

Tabela 4 – Comparação dos valores de A; D (difusividade e_f) e R^2 p/modelagem utilizando a 2ª Lei de Fick e R^2 p/modelagem de modelos empíricos

Valores de A; D (difusividade e_f) e R^2 p/modelagem utilizando a 2ª Lei de Fick				Valores de R^2 p/modelagem de modelos empíricos	
s/encolhimento	A	$D_{ef}(m^2/s)$	R^2	Modelos	R^2
1 termo	1,07018	$4,00 \times 10^{-9}$	0,9947	HENDERSON e PABIS	0,9902
3 termos	0,90952	$2,98 \times 10^{-9}$	0,9947		
6 termos	0,89309	$2,86 \times 10^{-9}$	0,9960		
c/encolhim. (6 term.)	0,82219	$1,18 \times 10^{-9}$	0,9962	PAGE	0,9944

Valores semelhantes foram descritos por Park et al. (2004) que estudou o processo de secagem do caqui Giombo levando em consideração a cinética de secagem. Em seus experimentos para análise da influência dos processos de secagem do fruto foi observado que sem considerar o encolhimento os valores de difusividade efetiva variaram de $2,59 \times 10^{-10}$ a

$4,29 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ e erro relativo médio de 3,90 a 8, 27%. Considerando o encolhimento entretanto, os valores de difusividade efetiva foram de $2,24 \times 10^{-10}$ a $3,88 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ para um erro médio relativo de 2,54 a 4,91%. Os valores de difusividade considerando o encolhimento demonstram que, o fato de não incluir este parâmetro pode superestimar o coeficiente difusional.

Os valores encontrados para os coeficientes de correlação (R^2) para os modelos utilizando a 2ª Lei de Fick com e sem encolhimento foram superiores a 0,99 o que mostra boa correlação dos dados experimentais. Desse modo, para as condições usadas, isto é, 3 ou 6 termos os ajustes foram bons como visto na Tabela 4.

Para se compreender e controlar, portanto, sistemas complexos deve-se obter modelos matemáticos e quantitativos dos mesmos. Uma análise das relações entre as variáveis do sistema e a obtenção de uma modelagem matemática é de suma importância. Vários estudos têm sido desenvolvidos nesse sentido para melhor entendimento. Entre outros, Ferrari et al. (2005) avaliaram a cinética de transferência de massa em melão desidratados osmoticamente, no qual determinou o coeficiente de difusão para a água por meio de modelo empírico, baseado na equação de Fick, o qual ajustou adequadamente aos dados experimentais.

Silva et al. (2003) aplicaram dois modelos matemáticos (Page e Thompson) também no estudo de desidratação osmótica de banana da terra. O modelo de Page se ajustou melhor aos dados experimentais, constatando-se uma variação do coeficiente de correlação de 98,7% a 99,8%, enquanto que, para o modelo de Thompson o coeficiente de correlação teve variação entre 83,7% a 98%.

Brasileiro, (1999) estudou a cinética de secagem da acerola acompanhando o encolhimento e a degradação da cor por método fotográfico e propôs equações empíricas para descrever a cinética de secagem. Em seus estudos o mesmo não levou em consideração o encolhimento, apenas representou os dados por uma relação exponencial simples incluindo o fator de correlação. Contudo este considera que a inclusão do encolhimento representa maior segurança deste comportamento.

4.3 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

Os dados da Tabela 5 obtidos experimentalmente representam a umidade de equilíbrio em função da atividade de água na temperatura de 30°C para a goiaba Paluma. Observando a Figura 14 é possível constatar que os pontos experimentais apresentam forma sigmóide e tal comportamento segundo a literatura, é usual para as frutas. Silva, et. al. (2002) por exemplo, encontrou dados semelhantes para manga.

Tabela 5 - Dados experimentais da umidade de equilíbrio em função da atividade de água a 30°C para a goiaba Paluma.

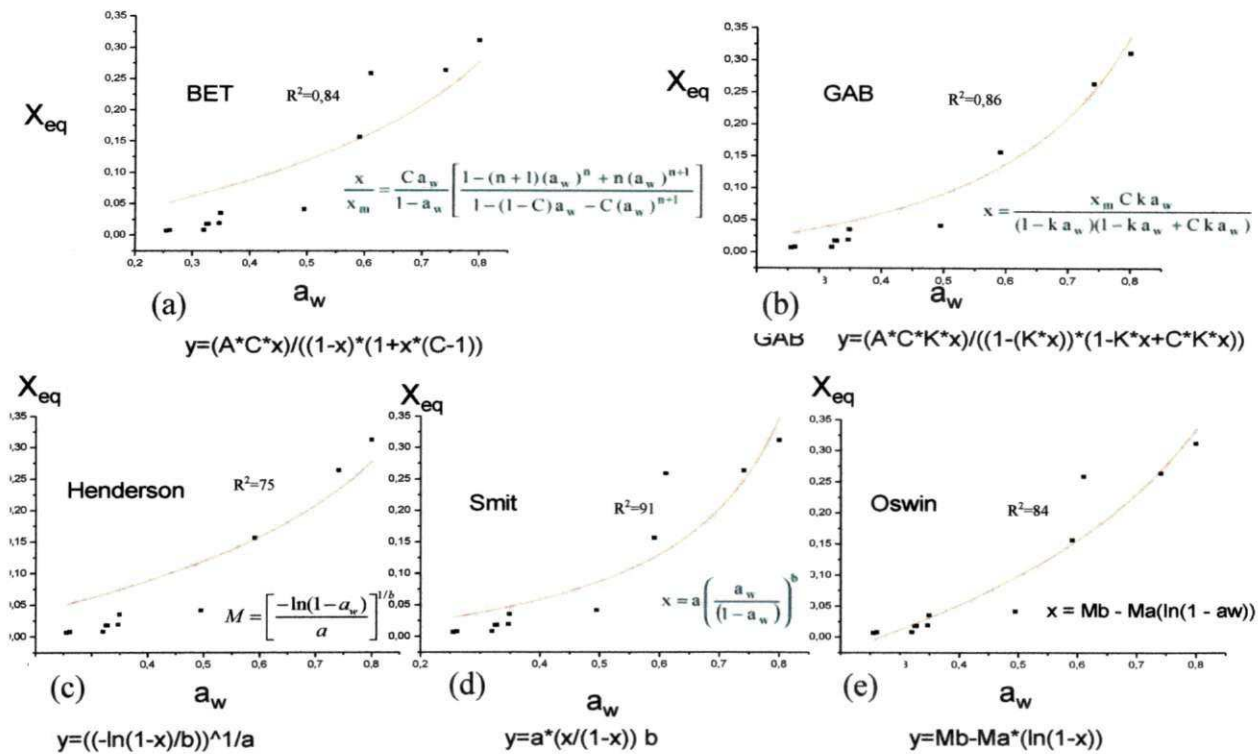
Variáveis	Dados experimentais em ordem decrescente									
X_e	0,312	0,263	0,258	0,156	0,041	0,035	0,019	0,017	0,017	0,007
a_w	0,801	0,742	0,611	0,592	0,496	0,350	0,348	0,329	0,326	0,321

De acordo com os resultados, verifica-se todos os modelos descreveram razoavelmente bem as isotermas de sorção para a atividade de água variando entre 0,321 a 0,801, com valores do coeficiente de determinação variando de 0,77 a 0,91 e desvios médios menores do que 1 estando de acordo com Lomauro et al. (1985) e Barros Neto et al. (1995). Os quais afirmam que os valores de R^2 devem ser próximos da unidade e os desvios médios relativos (P) devem ser menores do que 0,10. (Tabela 6 e Figura 14).

Tabela 6 – Parâmetros de ajustes dos modelos testados e coeficientes de determinação a partir dos dados experimentais.

Modelo	Parâmetros		R^2
BET	X_m	$C = 0,949$	0,845
	0,088	$N = 1,000$	
GAB	X_m	$C = 0,560$	0,861
	0,162	$K = 0,897$	
Handerson	A	B	0,775
	0,087	0,993	
Oswin	A	B	0,847
	0,087	0,993	
Smith	Ma	Mb	0,913
	0,258	0,079	

Figura 14 – Ajuste das isotermas de dessorção (a), (b), (c), (d), (e) da goiaba a 46°C por diferentes modelos matemáticos.



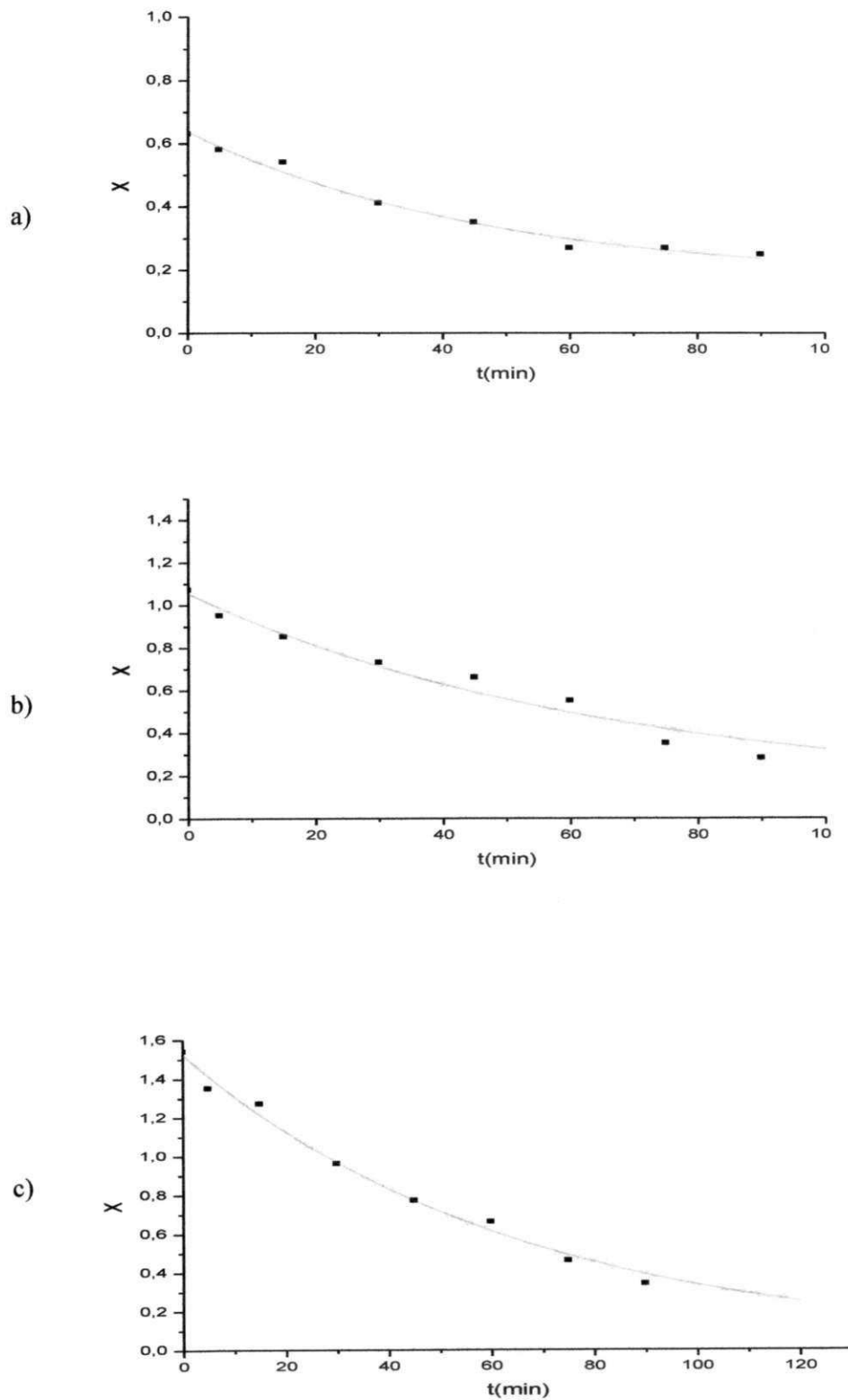
4.4 VARÁVEIS RESPOSTA DA SECAGEM NO LEITO DE JORRO

Neste item apresentamos resultados e discussões referentes às curvas de secagem; adimensional de água remanescente (X^*); taxa de secagem (dx/dt), altura do leito (AL); altura da fonte (AF); variação de pressão (Δp); velocidade do ar de secagem (V_{ar}) e circulação de sólidos (C_s). Os resultados foram obtidos durante a secagem em leito de jorro e serão apresentadas discussões referentes às temperaturas de, 50; 55 e 60°C com as umidades respectivas de 0,6; 1,05 e 1,50 em base seca ($X_{b,s}$).

4.4.1 Curvas de secagem de goiaba em leito de jorro

Algumas maneiras convencionais são empregadas para avaliar a cinética de secagem de materiais. Entre estas, as curvas de umidade em função do tempo fornece informações relevantes. Outra forma de análise é através da curva adimensional de água remanescente no sólido em função do tempo, ou ainda, em função da taxa de secagem. Esta última relaciona a derivada da umidade em base seca ($X_{b,s}$) pelo tempo (dx/dt), e a umidade absoluta. Vejamos a seguir cada caso.

Figura 15 - Curvas de secagem de goiaba em leito de jorro (a), (b), (c). $T=50^{\circ}\text{C}$ e $X_i=0,6$ (a); $T=55^{\circ}\text{C}$ e $X_i=1,05$; $T=60^{\circ}\text{C}$ e $X_i=1,50$.



Conforme a Figura 15(a), verifica-se que o ensaio experimental realizado com menor umidade inicial de entrada ($X_i = 0,6$) apresentou também, uma menor umidade final. Esse fato

já era previsto, porém vale destacar que, enquanto as umidades de entrada entre 0,6 e 1 representam uma diferença absoluta de 60% a umidade do produto final após 90 minutos de secagem no leito de jorro teve variação apenas de 26%. Assim é possível concluir que, independentemente da temperatura, a umidade aos 90 minutos é pouco diferente. Este comportamento justifica o fato de que devido o íntimo contato entre as partículas e o fluido durante o processo de secagem em leito de jorro, proporciona uma melhor eficiência no processo de secagem MATHUR e EPSTEIN, (1974).

Foi usado o modelo de primeira ordem conforme a equação 34. A Tabela 7 mostra os parâmetros usados e um bom ajuste para os dados experimentais nas três condições estudadas. Os coeficientes de correlação foram respectivamente 0,98; 0,97 e 0,99 sendo também um indicador de que o modelo usado pode ser considerado bastante significativo.

$$X - X_e / X_i - X_e = \exp (-kt) \quad (32)$$

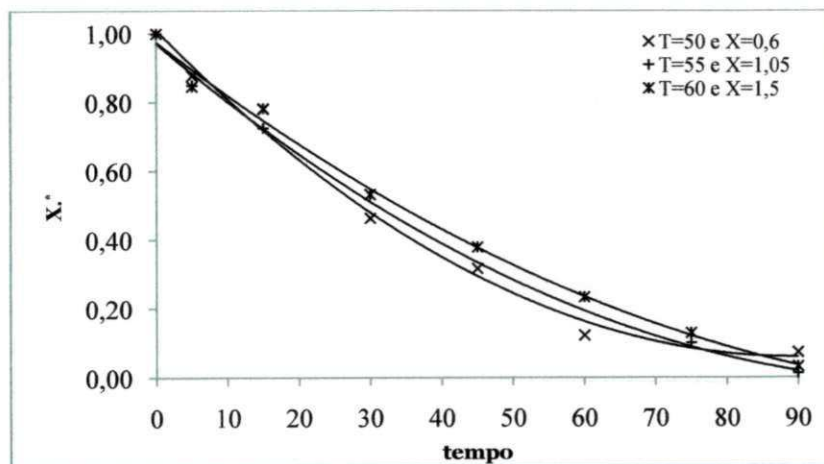
Tabela 7 - Parâmetros de ajuste das curvas de secagem de goiaba em leito de jorro

Condições	T = 50°C; X _i = 0,6	T = 50°C; X _i = 0,6	T = 50°C; X _i = 0,6
X _e	0,1690	0,1120	0,0060
k	0,0213	0,0149	0,0152
R ²	0,9860	0,9730	0,9920

4.4.2 Curvas adimensional de água remanescente

A Figura 16 mostra o adimensional de água remanescente no sólido e é notável a pouca influência da temperatura sobre as curvas de secagem. A ausência do período de taxa secagem constante pode ser atribuída ao fato de que os pedaços cúbicos de goiaba usados, sofreram uma pré-secagem em leito fixo com o objetivo de reduzir o teor de umidade e permitir o jorro.

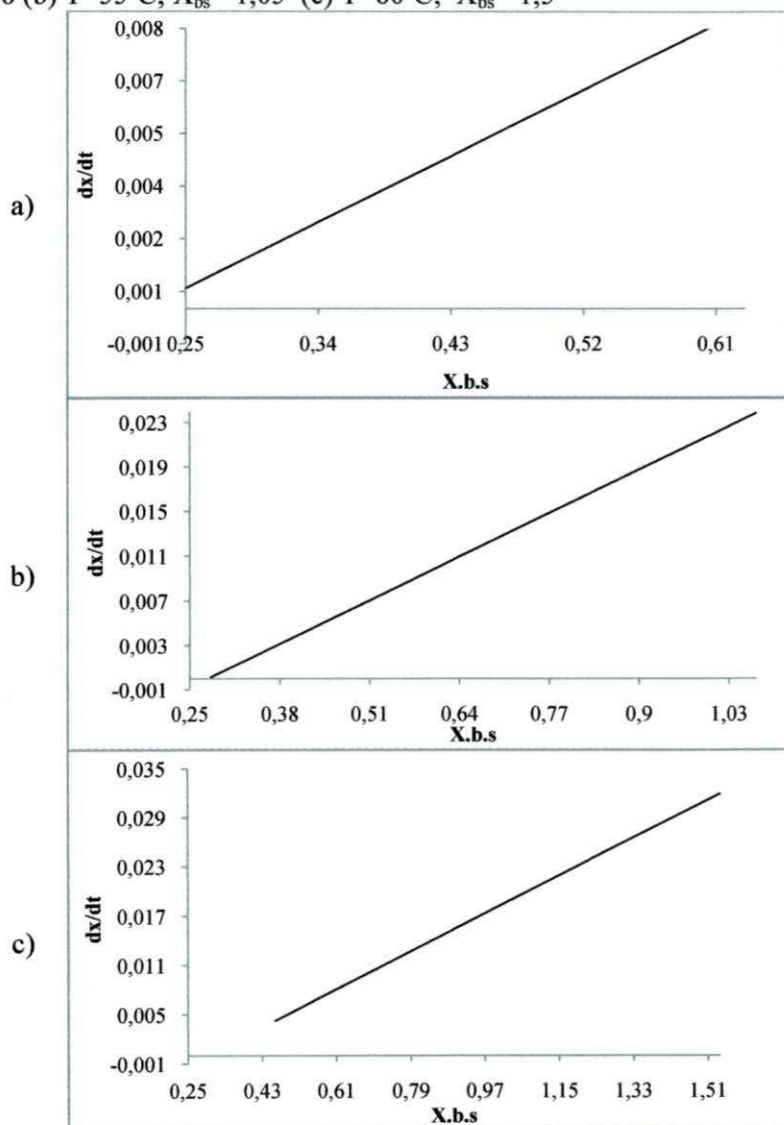
Figura 16 - Curvas adimensional de água remanescente $X^* = (X - X_e) / (X_i - X_e)$ até 90 minutos



4.4.3 Curvas da taxa de secagem

A Figura 17 apresenta as taxas de secagem representadas pela derivada da umidade em relação ao tempo, e a umidade. De inclinação com as regressões lineares para as três condições é possível observar que, onde a umidade é menor (Figura 17a) ocorre menor velocidade de secagem. Em geral a temperatura teve pouco efeito sobre as taxas de secagem.

Figura 17 – Comportamento das taxas de secagem em função da umidade, através da variação dx/dt . (a) $T=50^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 0,6$ (b) $T=55^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 1,05$ (c) $T=60^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 1,5$



Silva, et. al. (2008), observaram que, o incremento da temperatura do ar afeta significativamente a taxa de secagem. Em estudos para avaliar a influência da temperatura e da velocidade do ar nas taxas de secagem da polpa de cupuaçu (*theobroma grandiflorum*) usando as temperaturas 40, 60 e 80°C constataram que a menor temperatura apresentou

maior redução da taxa de secagem. O forte efeito da temperatura também é relatado pela maioria dos autores, no caso de leito fixo. O fato de não ter sido observado no presente trabalho pode estar relacionado com as altas taxas de transferência que pode ter diminuem o efeito da temperatura para o intervalo aqui utilizado no leito de jorro.

Vale lembrar que curva de taxa de secagem fornece informação com relação ao término do período de taxa constante e, conseqüentemente o valor da umidade crítica, bem como, para determinar os valores médios da taxa constante por unidade de massa de sólido seco, mais dependendo do material biológico e das condições de operação adotadas estes limites não sejam tão visíveis. Esta análise em leito de jorro deve levar em consideração que, os níveis de umidade inicial já são significativamente reduzidos quando comparados com o produto na forma natural.

A Tabela 8 apresenta dados das variáveis fluidodinâmicas Altura do leito (AL), Altura da fonte (AF), Variação de pressão (Δp), Velocidade do ar de secagem (V_{ar}) e Umidade final X_f (b.s) da secagem de goiaba em leito de jorro para as condições: $T=50^\circ\text{C}/X_i=0,6$; $T=55^\circ\text{C}/X_i=1,05$ e $T=60^\circ\text{C}/X_i=1,50$.

Tabela 8 – Dados de variáveis fluidodinâmicas AL, AF, Δp , V_{ar} e $X_{(b.s)}$ da secagem em leito de jorro nas condições: $T=50^\circ\text{C}/X_i=0,6$; $T=55^\circ\text{C}/X_i=1,05$ e $T=60^\circ\text{C}/X_i=1,50$.

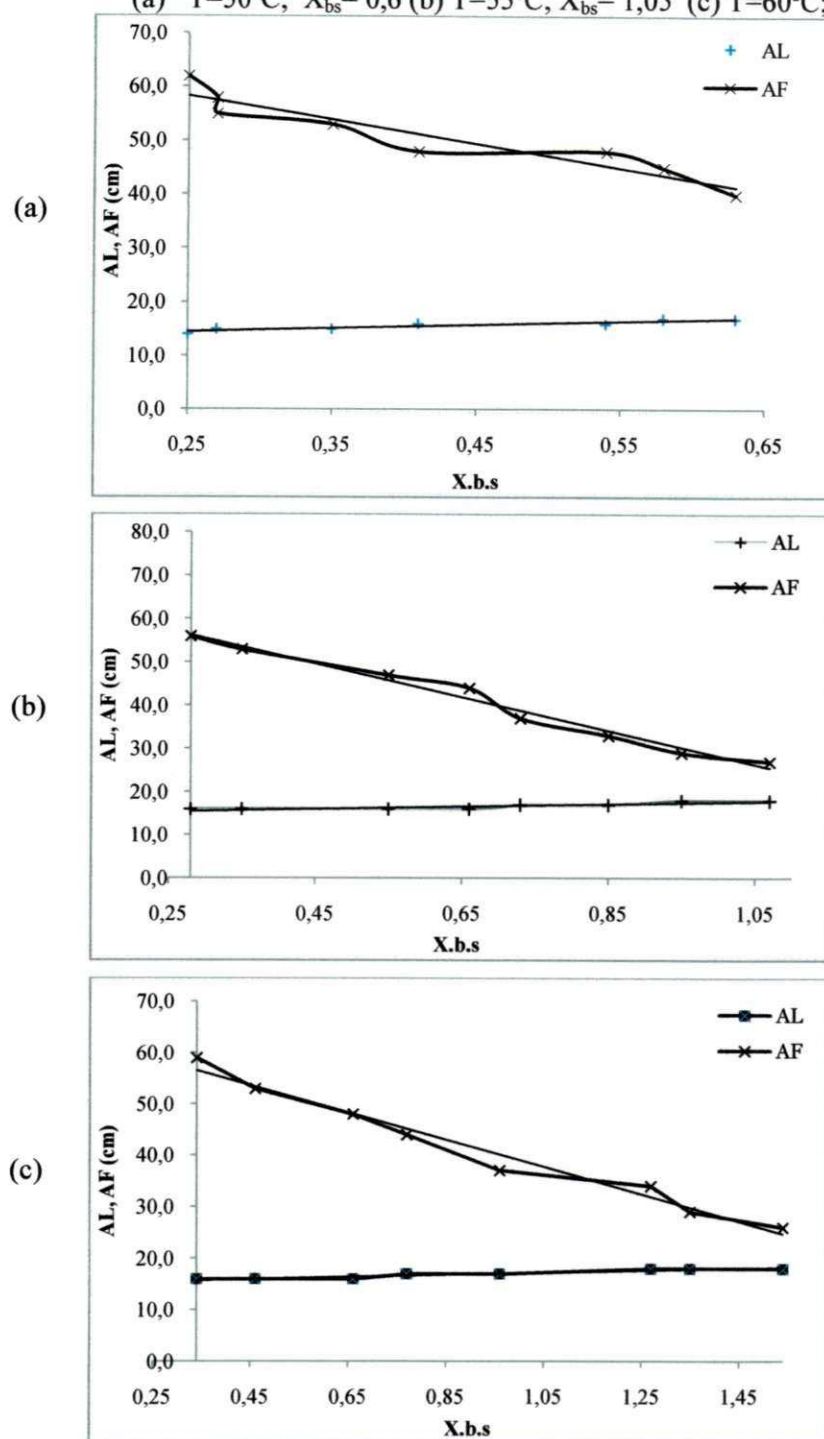
Variáveis	Condições		Tempos (min)							
	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Umid. (b.s)	0	5	15	30	45	60	75	90
AL (cm)	50	0,60	17,0	17,0	16,0	16,0	15,0	15,0	15,0	14,0
	55	1,05	18,0	18,0	17,0	17,0	16,0	16,0	16,0	16,0
	60	1,50	18,0	18,0	18,0	17,0	17,0	16,0	16,0	16,0
AF (cm)	50	0,60	40,0	45,0	48,0	48,0	53,0	55,0	58,0	62,0
	55	1,05	27,0	29,0	33,0	37,0	44,0	47,0	53,0	56,0
	60	1,50	26,0	29,0	34,0	37,0	44,0	48,0	53,0	59,0
Δp (Kg/m^2)	50	0,60	49,6	49,6	48,8	48,8	48,1	48,1	48,1	47,4
	55	1,05	51,0	51,0	50,3	49,6	48,8	48,1	47,4	47,4
	60	1,50	54,0	53,1	51,7	49,6	48,1	46,0	44,5	43,8
V_{ar} (m/s)	50	0,60	20,2	20,2	20,4	20,5	20,6	20,6	20,7	20,9
	55	1,05	19,8	20,1	20,2	20,4	20,4	20,5	20,7	20,7
	60	1,50	19,3	19,3	19,5	19,6	19,8	19,9	20,1	20,3
X (b.s)	50	0,60	0,63	0,58	0,54	0,41	0,35	0,27	0,27	0,25
	55	1,05	1,07	0,95	0,85	0,73	0,66	0,55	0,35	0,28
	60	1,50	1,54	1,35	1,27	0,96	0,77	0,66	0,46	0,34

4.4.4 Altura do leito e altura da fonte

A Figura 18 (a,b,c) mostra a evolução da altura do leito e da altura da fonte com a variação da umidade para três condições experimentos realizados. Nota-se que a altura do leito (AL) de partículas, diminui moderadamente, na medida em que a umidade diminui sistematicamente com a evolução do processo de secagem. A pequena redução observada na altura final do leito em relação à altura inicial pode ser justificado pela maior circulação de partículas com a evolução do processo pela redução do conteúdo de água. O encolhimento das partículas pela redução da umidade deve ser também uma das razões para que este comportamento seja fisicamente explicado já que, com a diminuição da umidade ocorre a contração das partículas e o volume conseqüentemente se reduz. O comportamento linear e decrescente com a redução da umidade para AL mostrou-se bem representativo.

Por outro lado, a magnitude da altura da fonte associado às variações de pressão e velocidade do ar é um indicativo das condições de estabilidade leito de jorro. Pela Tabela 8 foi verificado que as diferenças entre 40-62; 27-56 e 26-59cm de altura respectivamente entre o início e o final da secagem, isto é, entre 0 e 90 minutos para as três condições no que se refere a AF, representam um aumento de 55, 107 e 126%. Essas variações expressivas são provocadas principalmente, pelas mudanças das propriedades físicas, especialmente tamanho e densidade das partículas associadas às perdas de umidade. As diferenças bastante significativas na medida em que a temperatura aumenta de 50 para 60°C, mesmo com a umidade aumentando de 0,6 até 1,5, é uma justificativa de que a variável temperatura foi a que teve maior influencia nesta variação.

Figura 18 - Altura do leito (AL) e Altura da fonte (AF) em função da umidade inicial.
 (a) $T=50^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}=0,6$ (b) $T=55^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}=1,05$ (c) $T=60^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}=1,5$



Os decréscimos para as três condições de operações entre as umidades inicial e final (0,6 e 0,25; 1,05 e 0,28; 1,50 e 0,34) em base seca, foram de 18%, 11% e 11% respectivamente para temperaturas de 50; 55 e 60°C . Embora pequenas, essas diferenças mostram também que, onde as umidades iniciais foram mais elevadas, houve maior redução na altura do leito, fato este que ocorre devido o maior valor de massa específica Figura 18(c).

A altura da fonte (AF), entretanto, conforme a mesma figura apresenta diferenças consideráveis no início do processo de secagem em função do conteúdo de umidade inicial. Nota-se que, para a umidade 0,6 contido na Figura 18 (a) a altura da fonte teve o maior valor no processo inicial da secagem, isto ocorreu devido a menor umidade inicial e por consequência, menor valor da massa específica e maior influencia da velocidade do ar de secagem.

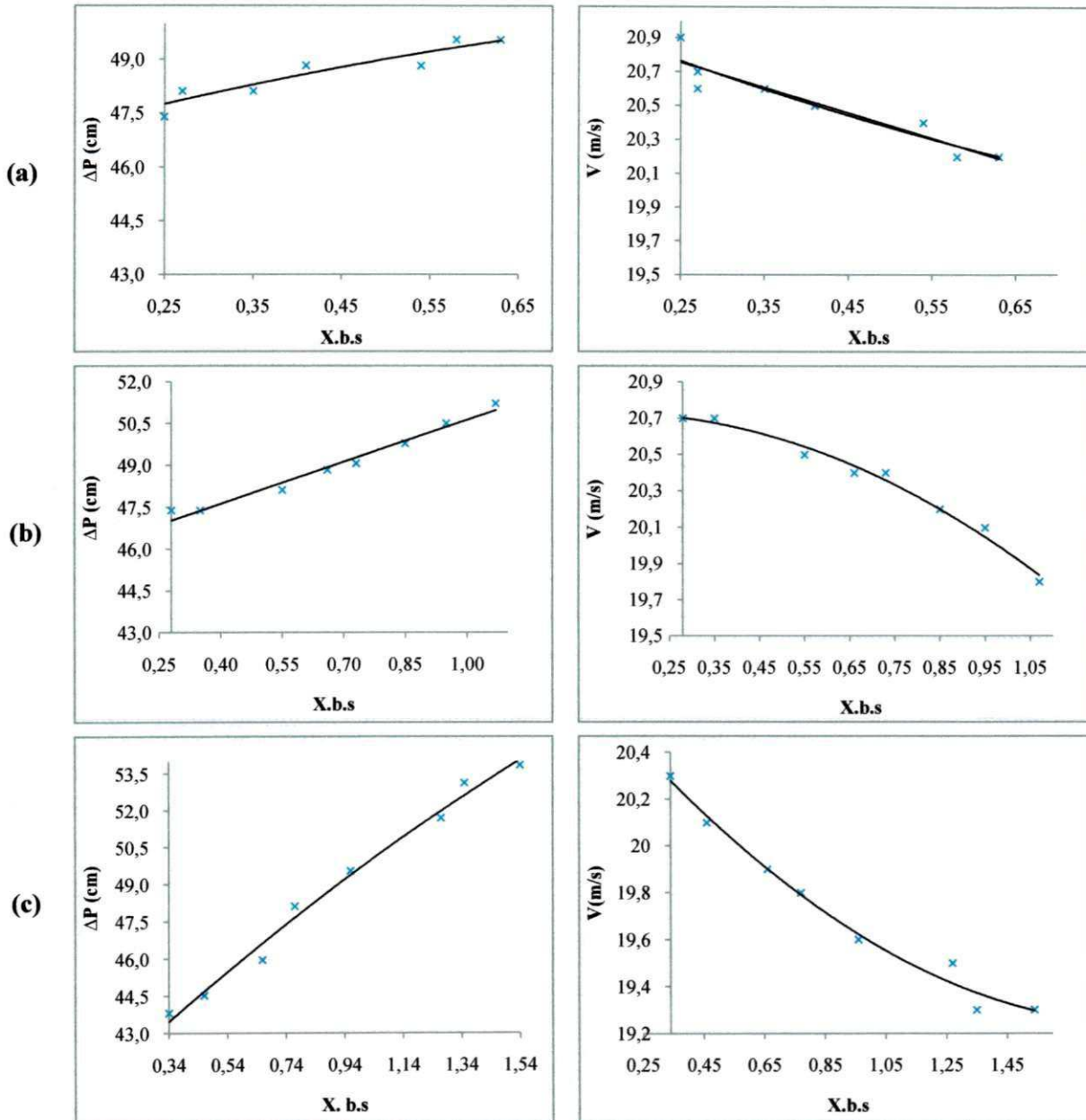
Pelas equações lineares encontradas verifica-se também que as variações para AF foi bastante significativa entre as três condições de operação. A intensidade das variações encontrados na altura da fonte mostra o efeito da umidade sobre esta variável. Para as umidades de entrada correspondente a 1,05 e 1,5 os valores de altura da fonte no início do processo foram praticamente iguais, 27 e 26 cm respectivamente (Tabela 8). Um valor bem mais significativo (40 cm), verifica-se no caso de baixa umidade inicial como observa-se também pela Figura 18a. No final do processo, entretanto, para os três experimentos, observa-se que, apesar das umidades de entrada serem bastante diferentes, a variável AF apresentou valores próximos (62, 56 e 59 cm respectivamente) mesmo com as temperaturas variando entre 50 e 60°C (Tabela 8). Esse comportamento é justificável, pois a umidade final também apresentou diferenças pequenas. Entretanto, a expansão da altura da fonte, em termos de altura final sobre altura inicial foi de 1,55; 2,07 e 2,27 vezes, crescente com o aumento da umidade inicial. O movimento permanente e íntimo das partículas no jorro conforme descreve MATHUR e EPSTEIN, (1974), deve ser responsável por esse comportamento.

4.4.5 Variação de pressão e velocidade do ar de secagem

Como mostra a Figura 19, a variação de pressão (ΔP) é mais acentuada quando a umidade é mais elevada, esse comportamento pode ser observado tanto dentro do mesmo experimento pela evolução do processo de secagem, como pela comparação entre as três condições onde a Figura 19 (c) mostra o maior valor inicial de ΔP para a umidade de entrada ($X = 1,5$). Os valores de ΔP iniciais correspondentes e crescentes de 49,6; 50,0 e 54,0 respectivamente para as umidades de 0,6; 1,05 e 1,5 em base seca (Tabela 8) mostram que o maior nível de umidade teve a maior variação e conseqüentemente a maior influencia sobre esta variável. Os decréscimos calculados de 26,99; 49,29 e 93,12% entre o início da secagem e o final para cada uma das condições, mostram também este comportamento. A elevação de pressão para a maior umidade pode ser justificada pela necessidade de maior energia requisitada pelo fluido para romper o leito de partículas que no início do processo de secagem

se encontra com massa específica mais elevada. O comportamento linear para as três condições foi o que apresentaram melhor ajuste para os dados experimentais.

Figura 19 - Variação de pressão e velocidade do ar de secagem. (a) $T=50^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 0,6$ (b) $T=55^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 1,05$ (c) $T=60^{\circ}\text{C}$; $X_{bs}= 1,5$



Enquanto a variação de pressão diminui com a redução da umidade, a velocidade do ar de secagem, entretanto, aumenta com a redução da umidade. Para a umidade inicial de 1,5 conforme a Figura 19 (c), foram observados os menores valores iniciais e finais de velocidade do ar (19,30 e 20,28 m/s); e para a menor umidade inicial de acordo com a Figura 19 (a) os maiores valores (20,19 e 20,75 m/s) respectivamente. Assim é possível verificar que para a variável velocidade do ar, as umidades iniciais correspondentes, exerceram maiores efeitos do

que as temperaturas equivalentes. As variações para as três condições entre o início e o fim do processo, foram de 3; 4 e 5% respectivamente, isso mostra um efeito menos expressiva para a condição de menor umidade. Devido as umidades iniciais mais elevadas como mostra a Figura 19 (b,c) o comportamento quadrático foi mais representativo.

Silva, (2002) em estudo para avaliar o efeito da velocidade do ar de secagem sobre a secagem de frutas com geometria esférica, concluiu que a velocidade do ar de secagem isoladamente apresenta pequeno efeito sobre a secagem. Para o mesmo a resistência externa não influencia consideravelmente nas condições de operações utilizadas e que o controle da secagem pode depender da difusão interna do fruto.

4.4.6 Circulação de sólidos

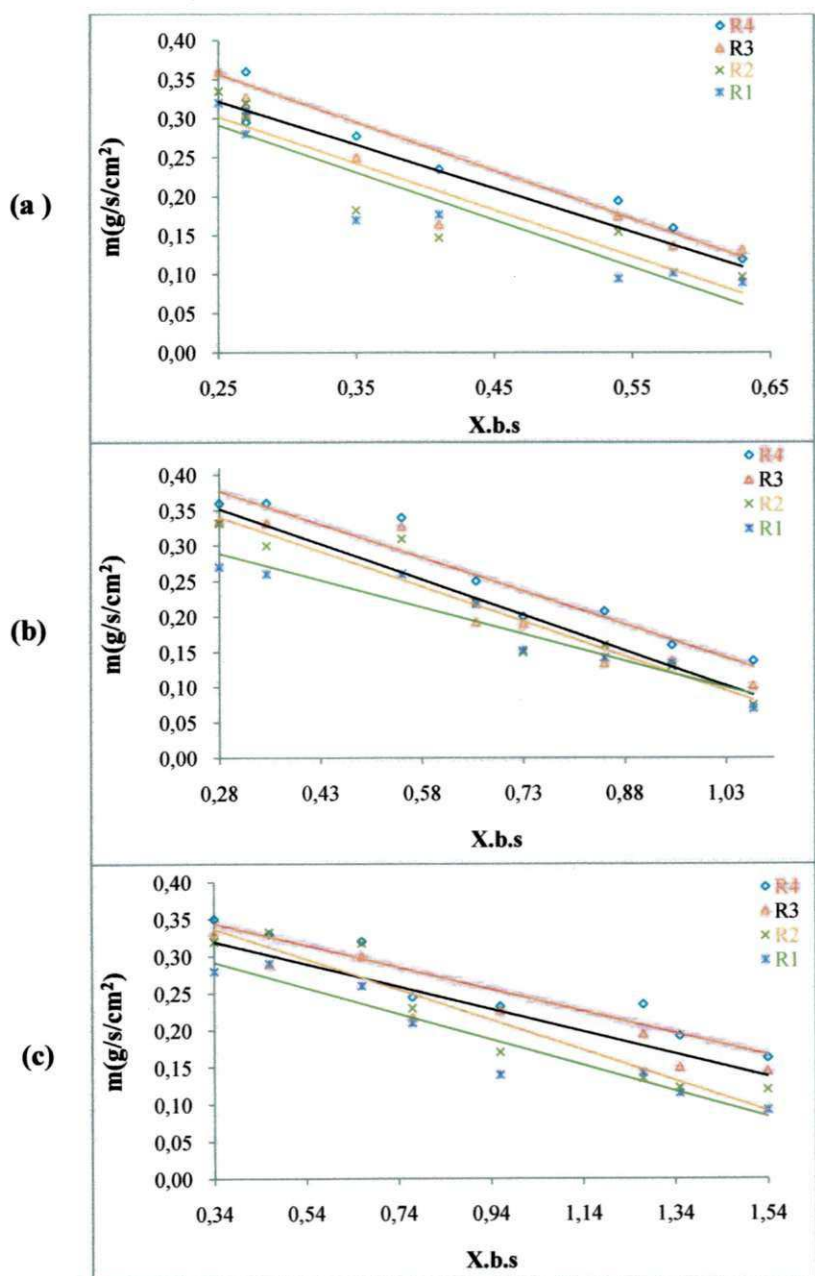
De acordo com a Tabela 9, para umidade inicial de 0,6 (b.s), os valores médios de material circulante encontrados no início e no final foram respectivamente 0,11 e 0,36 g/s/cm³ sendo a umidade final possivelmente responsável pela elevada da circulação de sólidos no final da secagem neste ensaio experimental. Para a umidade inicial de 1,5 estes valores correspondem a uma circulação de 0,13 e 0,32 g/s/cm³. Quando comparado as duas condições, verifica-se também pela Figura 20 que, no início da secagem para a umidade inicial superior (1,5) os valores de taxa de circulação de material foram mais elevados apesar da umidade também superior o que deveria apresentar o efeito contrário. O fato é que, devido à baixa altura alcançada pelo material no início do processo possibilita que, mesmo em condições de umidade maior, quantidade de sólidos nessa região circule em quantidade superior.

Tabela 9 - Valores médios de circulação de sólidos (C_s) e Aura da fonte (AF)

T=50°C; X_{bs}= 0,6			T=55°C; X_{bs}= 1,05			T=60°C; X_{bs}= 1,5		
X(b.s)	M(g/s/cm ²)	AF(cm)	X(b.s)	M(g/s/cm ²)	AF(cm)	X(b.s)	M(g/s/cm ²)	AF(cm)
0,63	0,11	40,0	1,07	0,10	27,0	1,54	0,13	26,0
0,58	0,13	45,0	0,95	0,14	29,0	1,35	0,15	29,0
0,54	0,16	48,0	0,85	0,16	33,0	1,27	0,18	34,0
0,41	0,18	48,0	0,73	0,17	37,0	0,96	0,19	37,0
0,35	0,22	53,0	0,66	0,22	44,0	0,77	0,23	44,0
0,27	0,30	55,0	0,55	0,31	47,0	0,66	0,30	48,0
0,27	0,33	58,0	0,35	0,31	53,0	0,46	0,31	53,0
0,25	0,36	62,0	0,28	0,32	56,0	0,34	0,32	59,0

Pela Figura 20 observa-se que a circulação de sólidos aumenta com o tempo devido à redução da umidade e com a posição radial. Em geral os maiores valores relativos à taxa de circulação de partículas sólidas foram encontrados na posição R₄, isto é, nas proximidades da parede cilíndrica. Este fato evidencia provavelmente que, grande parte das partículas sólidas circulantes, chocam-se com as paredes do cilindro e deslizam verticalmente proporcionando nesta posição radial, maior acúmulo de partículas.

Figura 20 - Circulação de sólidos em função da variação de umidade para as posições radiais R₁, R₂, R₃ e R₄. (a) T=50°C; X_{bs}= 0,6 (b) T=55°C; X_{bs}= 1,05 (c) T=60°C; X_{bs}= 1,5



De fato, em condições de umidade mais elevada a altura da fonte é mais reduzida e a maior parte das partículas acaba circulando na região mais próxima ao jorro. Por outro lado, a região de amostragem foi situada a uma altura de 20 cm da superfície do leito e isso favoreceu esse comportamento. Para o caso de leito cônico REIS, et al.(1997) observaram que a maior parte das partículas circularam nas proximidades do jorro. Para Lima, (1996), mesmo no leito cônico a maior quantidade de massa circula na região da fonte (região cilíndrica) e apresenta valores mais elevados no sentido centro-parede com o aumento da vazão.

4.5 CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO

De acordo com a Tabela 10 nota-se que houve pequenas variações na percentagem de reidratação entre as três condições de secagem no leito de jorro. Apesar das diferenças significativas de temperatura que teve variação entre 50 e 60°C e umidades de entrada respectivas de 0,6 a 1,5 em base seca, o que deve ser considerado mais relevante é que as umidades finais foram muito próximas sendo respectivamente de 0,25; 0,26 e 0,34 o que provavelmente proporcionou pequenas variações no processo de reidratação entre as três condições. Por outro lado o tempo de reidratação nas condições ambientais e que variou entre 50 e 250 minutos conforme a Tabela 10, apresentou diferenças bem mais significativas nas três situações e seus acréscimos foram de 15,1; 15,2 e 13,2%.

Tabela 10 – Percentagem de reidratação após secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro para as condições: $T=50^{\circ}\text{C}/X_i=0,6$; $T=55^{\circ}\text{C}/X_i=1,05$ e $T=60^{\circ}\text{C}/X_i=1,50$.

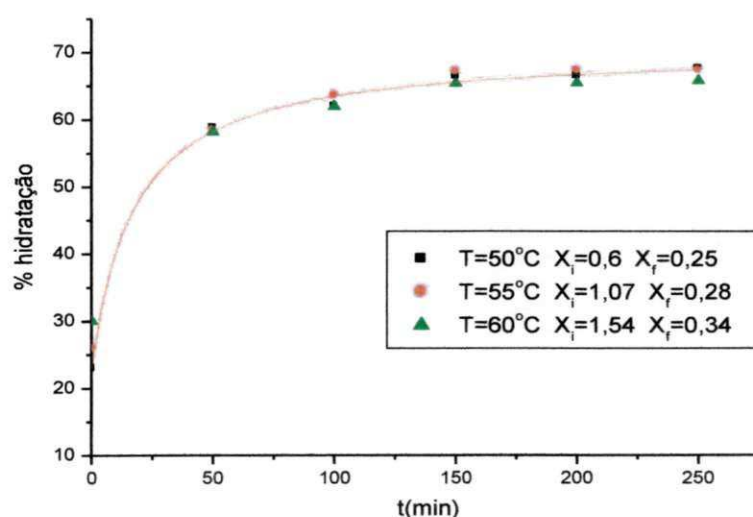
Tempo (min)	Percentagem de reidratação		
	$T=50^{\circ}\text{C}$ e $X_i=0,6$	$T=55^{\circ}\text{C}$ e $X_i=1,05$	$T=60^{\circ}\text{C}$ e $X_i=1,50$.
50	58,79	58,56	58,20
100	61,99	63,65	61,99
150	66,49	67,15	65,45
200	66,59	67,34	65,56
250	67,71	67,52	65,89

A Figura 21 mostra também o comportamento da cinética de reidratação dos pedaços cúbicos de goiaba após secagem em leito de jorro para três condições experimentais. Verifica-se também de acordo com os pontos experimentais, que a porcentagem de reidratação para as três condições de secagem no leito de jorro foram muito semelhante. Sabe-se que a reidratação é um processo complexo e baseado na reconstituição das propriedades de determinado material seco em contato com uma fase líquida. Assim a velocidade e a

quantidade de água absorvida neste processo, dependem de cada material e dos procedimentos aos quais estes pode ser submetidos como por exemplo, o processo de secagem.

Krokida e Marinos-Kouris, (2002), estudando a cinética de reidratação em banana, abóbora, maçã e outros vegetais como: milho, batata, cenoura, tomate, pimentão (vermelho, verde e amarelo), cebola e alho, verificaram que a reidratação pode variar entre 1 e quatro vezes dependendo do material. Segundo o mesmo, este comportamento acontece devido ao efeito da histerese proveniente do processo de secagem pelo rompimento das estruturas celulares.

Figura 21 - Cinética da reidratação para três condições de secagem em leito de jorro.
 $T=50^{\circ}\text{C}$ $X_i=0,6$ $X_f=0,25$; $T=55^{\circ}\text{C}$ $X_i=1,07$ $X_f=0,28$; $T=60^{\circ}\text{C}$ $X_i=1,54$ $X_f=0,34$



Para ilustrar, a Tabela 11 mostra apenas os níveis de reidratação final para as três condições frente a suas respectivas umidades finais (0,25; 0,28 e 0,34) e verifica-se que após 250 minutos, foi alcançado o grau de hidratação máximo e superiores a 65% quando comparados com os pedaços de goiaba na forma natural que é em torno de 94%.

Tabela 11 – Umidade final e percentagem de reidratação relativo às três condições experimentais da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro após 250 minutos

Variáveis de entrada		Respostas	
T (°C)	X _i (b.s)	X _f (b.s)	Rh (%)
50,0	0,60	0,25	65,89
55,0	1,0,5	0,28	68,41
60,0	1,50	0,34	66,33

Para as três condições é possível verificar pela mesma tabela que as umidade finais no leito de jorro (X_f), foram relativamente semelhantes. De fato a reidratação é um fenômeno que

depende do nível de umidade pré-existente no material, e como para as condições apresentadas a diferença do conteúdo de água em termos absolutos é pequena, a reidratação após 250 minutos se comportou de forma muito próxima. A temperatura de secagem não parece ter afetado a capacidade de reidratação da fruta desidratada.

Para as três condições foi aplicado o modelo matemático desenvolvido por Krokida, (2002) que estudou a cinética de reidratação de frutas e vegetais desidratados (Figura 21). Quando comparados com os vários materiais estudado pelo mesmo autor, observa-se que o comportamento da cinética de reidratação dos pedaços cúbicos de goiaba em leite de jorro reidratados em condições ambientais, apresentou um comportamento mais semelhante com os materiais: milho e ervilha verde, reidratados a 40°C.

4.6 VITAMINA C

A Tabela 12 apresenta os níveis de vitamina C após secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leite de jorro. Nota-se que onde a temperatura foi mais baixa (50,0°C) foi encontrado o maior valor de vitamina C (142,0 mg/100g). Analogicamente para a temperatura de 60,0°C o menor valor de vitamina C (97,5 mg/100g). A mesma Tabela mostra que dentre as condições apresentadas, as maiores temperaturas são também, as maiores umidades de entrada no leite de jorro e isso certamente resultou em uma umidade de equilíbrio final crescente. Para a temperatura de 60°C a umidade final foi de 0,34; isso é justificável em razão da sua maior umidade inicial (1,5). Mesmo assim o teor de vitamina C nessa condição foi consideravelmente inferior (0,97 mg/100g). Este comportamento é um indício de que a temperatura foi a variável que proporcionou maior influencia nos níveis finais de vitamina C.

Tabela 12 – Umidade final e teores de vitamina C em mg/100g relativo às três condições experimentais da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leite de jorro.

T (°C)	X _i (b.s)	X _f (b.s)	Vitamina C
50,0	0,60	0,25	142,00
55,0	1,05	0,28	112,60
60,0	1,50	0,34	97,50

Na forma natural a polpa de goiaba apresentou um valor médio de 211, 14 mg/100g de ácido ascórbico. Werner. et. al. (2009) em estudos para verificar o efeito do cloreto de cálcio na pós-colheita de goiaba Paluma verificou entretanto, teores de ácido ascórbico mais elevado nas cascas. As reduções de vitamina C para as condições apresentadas foram respectivamente de 32,7; 46,8 e 53,8% quando comparado com a forma natural. Se considerarmos as condições da secagem, esses níveis de vitamina C remanescentes, podem ser considerados bem razoáveis.

4.7 ANALISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DA SECAGEM EM LEITO DE JORRO OBTIDOS A PARTIR DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL $2^K + 2K$.

Os resultados foram avaliados com uso do software Estatística 7.0. A matriz experimental para as variáveis independentes umidades de entrada no leito de jorro (X_i) e temperatura do ar de secagem (T) em valores reais e codificados estão apresentados na Tabela 13. As variáveis de resposta umidade final (X_f); atividade de água (a_w); teor de vitamina (Vc) e reidratação (Rh) constam também na mesma tabela e serão avaliados, mas adiante por meio da análise de variância. Deve ser levada em consideração que os resultados finais da secagem em leito de jorro para cada variável, é também consequência da pré-secagem em leito fixo que teve como objetivo reduzir a umidade de entrada e permitir o jorro.

Tabela 13 - Variáveis resposta partir da matriz experimental em valores reais e codificados do planejamento fatorial $2^2 \cdot 2.2 + 3$ para secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro.

EXPERIMENTO	Variáveis de entrada				Variáveis resposta			
	Val. reais		Val. codificados		X_f	a_w	Vc	Rh
	T (°C)	X_i (b.s)	T (°C)	X_i (b.s)				
01	50,0	0,60	-1,00	-1,00	0,34	0,48	142,00	65,89
02	50,0	1,50	-1,00	1,00	0,19	0,33	84,50	68,41
03	60,0	0,60	1,00	-1,00	0,33	0,45	126,60	66,33
04	60,0	1,50	1,00	1,00	0,25	0,39	97,50	67,71
05	47,9	1,05	-1,41	0,00	0,20	0,34	87,60	68,17
06	62,1	1,05	1,41	0,00	0,37	0,56	156,20	64,13
07	55,0	0,41	0,00	-1,41	0,34	0,53	142,00	64,24
08	55,0	1,69	0,00	1,41	0,22	0,38	89,10	67,92
09 (C)	55,0	1,05	0,00	0,00	0,28	0,43	112,60	67,52
10 (C)	55,0	1,05	0,00	0,00	0,27	0,39	104,10	67,72
11(C)	55,0	1,05	0,00	0,00	0,25	0,39	97,50	67,79

Para as variáveis de resposta que passamos a apresentar, os resultados obtidos foram realizadas dentro de um nível de confiança correspondente a 95%. Como permitido pelas ferramentas da estatística, os termos não significativos foram desconsiderados. A Tabela 14 (ANOVA) apresenta o resumo dos resultados obtidos para a variável umidade final (X_f); atividade de água (a_w), teor de vitamina C (Vc) e reidratação (Rh).

Tabela 14 - Resultados da análise de variância relativa às variáveis de resposta X_f , a_w , Vc e Rh.

Variáveis respostas	Variáveis de entrada	p	Teste F			Ajuste	R ²
			F _{cal}	F _{tab}	F _{cal} /F _{tab}		
X_f	X_i (b.s); T (°C)	0,01	17,713	6,608	2,68	0,70	0,85
a_w	X_i (b.s); T (°C)	0,03	8,463	6,608	1,28	0,50	0,75
Vc	X_i (b.s); T (°C)	0,02	11,299	6,608	1,71	0,52	0,76
Rh	X_i (b.s); T (°C)	0,03	9,006	6,608	1,36	0,49	0,75

Para as variáveis; a_w , Vc e Rh apenas a umidade de entrada (X_i) apresentou efeito linear significativo ao nível de 5% de probabilidade. Para a variável resposta X_f , tanto a umidade quanto a temperatura exerceram efeitos de regressão significativa. De acordo com a Tabela 14, os valores de p foram respectivamente 3, 2 e 3% para as variáveis respostas a_w , Vc e Rh. A umidade final (X_f), entretanto, foi afetada tanto pela temperatura quanto pela umidade (variáveis de entrada no leito de jorro).

Neste estudo as percentagens de 75, 76 e 75% respectivamente para R² relativas as variáveis a_w , Vc e Rh apesar de não serem tão elevadas pode ser relevantes se levamos em consideração as propriedades físicas e suas diferenças provável em se tratando de produto biológico e as condições de processamento como é caso do material usado.

Os valores de F calculado para as variáveis de resposta a_w , Vc e Rh conforme dados apresentados na Tabela 14, mostram o efeito da umidade de entrada X_i e a relação de 1,28; 1,71 e 1,36 vezes respectivamente o valor de F tabelado. Para a umidade final essa mesma relação foi de 2,68 vezes. Para os dados experimentais relativos às quatro variáveis (X_f , a_w , Vc e Rh), a hipótese nula em prol da hipótese alternativa ao risco de 5%, foi rejeitada já que os valores de F calculados foram superiores aos valores de F tabelados.

Sendo importante também verificar se o modelo é adequado, ou seja; se o nível de ajuste ou a variância aos dados experimentais é satisfatório, a Tabela 14 mostra também dados relativos ao ajuste, e a exemplo de R² este parâmetro seguiu uma tendência similar. Os valores obtidos foram de 70; 50, 50 e 49% respectivamente para X_f , a_w , Vc e Rh. Observa-se que para a variável X_f houve um melhor ajuste do modelo (70%).

A seguir apresentamos análise dos efeitos das variáveis independentes X_i (umidade inicial) e T (temperatura) sobre as variáveis dependentes umidades final (X_f), atividade de água (a_w); teor de vitamina C (Vc) e reidratação (Rh) por meio do diagrama de Pareto e mostraremos também os valores preditos e as superfícies de resposta.

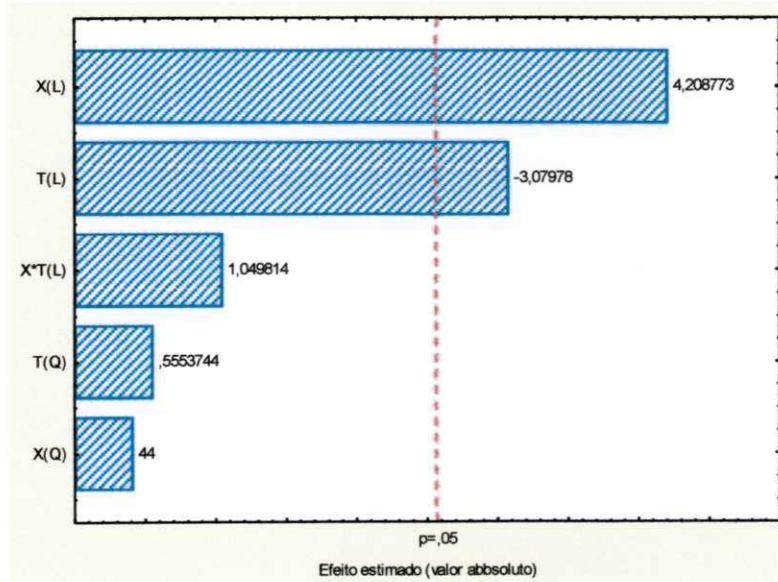
4.7.1 Umidade final (X_f)

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 22) observa-se os níveis dos efeitos causados pela variáveis independentes temperatura (T) e Umidade (X_i) sobre a variável X_f . Ao nível de 95% de confiança, os modelos de primeira ordem provocados por X_i e T sobre X_f , foram estatisticamente significativos. Quando comparadas os efeitos das variáveis independentes (temperatura e umidade), nota-se que a umidade foi mais significativa sobre a umidade final.

Do ponto de vista físico esse fato é perfeitamente explicado, pois quanto maior a temperatura maior é a tendência de que a umidade final seja reduzida. De forma análoga, quanto maior a umidade inicial aqui representada por X_i , mais elevada são também, os valores de umidade final (X_f).

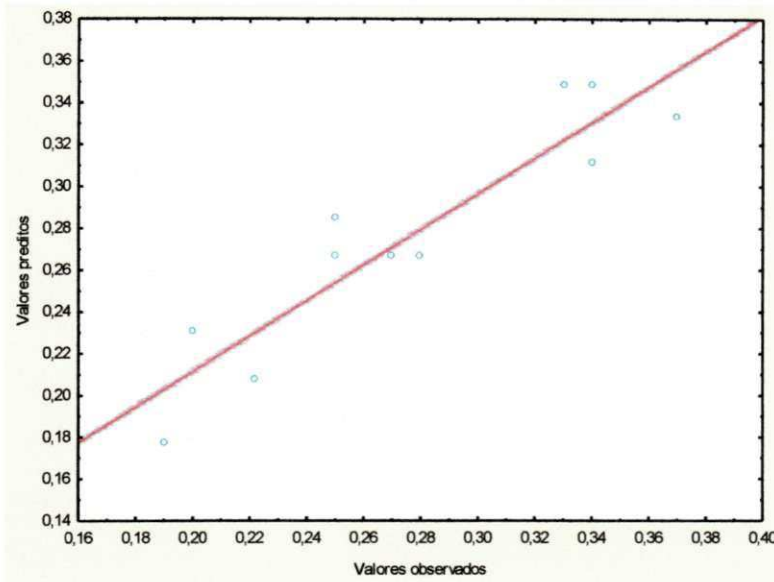
De acordo com as análises apresentadas, observa-se a ausência de efeito interativo das duas variáveis independentes sobre a variável dependente em questão. Assim os efeitos apresentados de acordo com a análise de Pareto foram independentes e peculiares a natureza da cada variável.

Figura 22 – Diagrama de Pareto e os efeitos de X e T sobre X_f (95%)



A Figura 23 apresenta o estudo da dispersão entre os valores observados experimentalmente e os valores preditos pelo modelo, para a variável umidade final do produto. Apesar da regressão linear explica 85,15% dessa variação, os resultados encontrados inicialmente, indicam um ajustamento apenas de 70,31% para essa variável de acordo com o modelo estatístico. Sendo F calculado equivalente a 2,68 vezes o valor de F tabelado esses valores são considerados não preditivos de acordo com o modelo (Tabela 14).

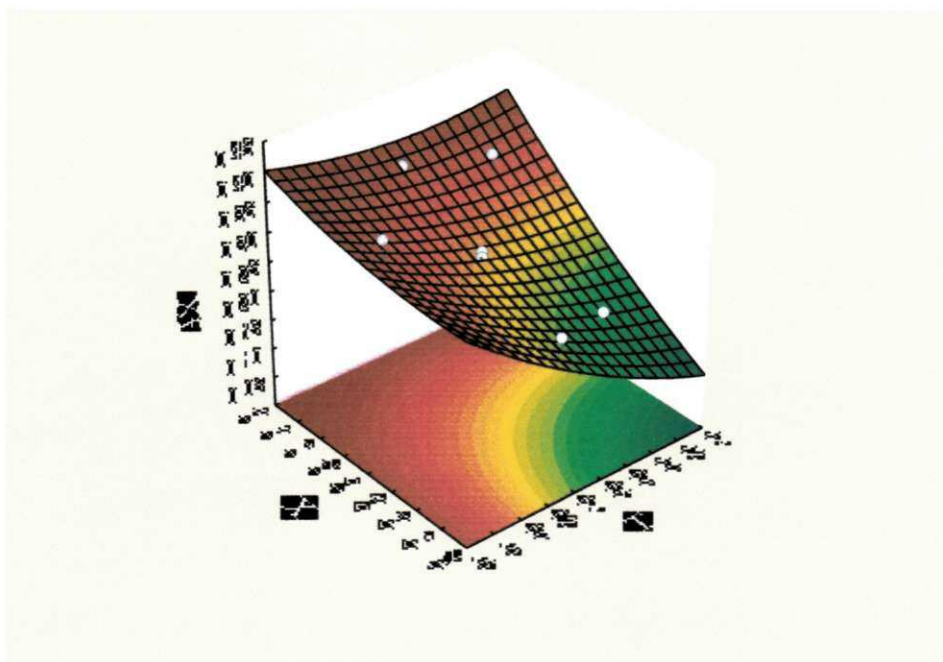
Figura 23 – Valores observados em função dos valores preditos para X_f



Apesar de os modelos estatísticos encontrados não serem preditivos, o que invalidaria a análise das superfícies de resposta, a apresentação a seguir foi feita com o intuito de verificar as tendências das variáveis. Assim a Figura 24 mostra a superfície de resposta e seu efeito relativo a variável X_f , após secagem em leito de jorro em função das variáveis independentes temperatura e umidade.

Observa-se que os menores valores de umidade do produto final ocorrem a partir de 47°C com umidade menor que 0,8. Quando comparados os efeitos das variáveis de entrada (temperatura e umidade), observa-se, entretanto que, a umidade influenciou mais sobre os níveis de umidade final do produto. De fato o diagrama de Pareto (Figura 22), apresenta efeito positivo da umidade na ordem de 4,2 e da temperatura efeito negativo de -3,07 e consequentemente, a umidade final do produto diminui com o aumento da temperatura e com a diminuição da umidade inicial, como se observa na Figura 24.

Figura 24 – Superfície de resposta para a variável X_f

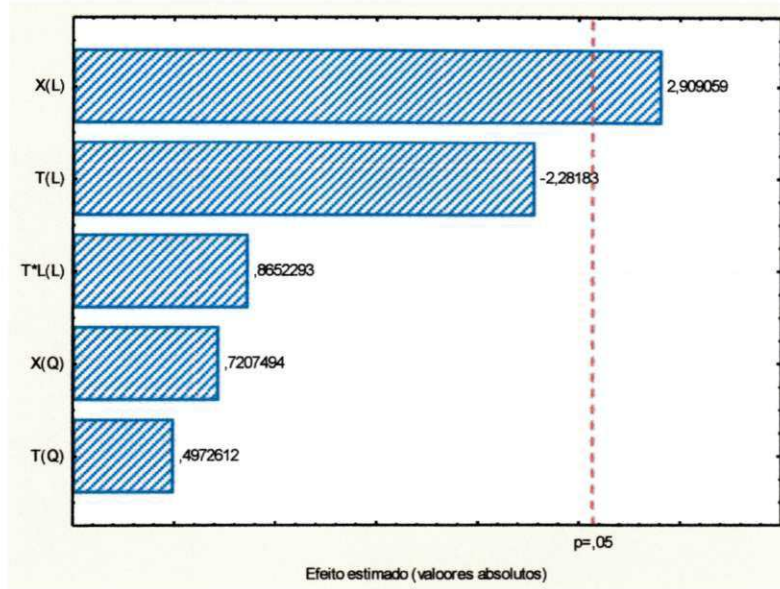


4.7.2 Atividade de água

Para a variável atividade de água pelo diagrama de Pareto (Figura 25), apenas a umidade inicial (X), exerceu efeito de regressão linear significativo a 95% de confiabilidade. De acordo com a análise de regressão o valor médio final dos pedaços cúbicos de goiabas secados no leito de jorro foi de 0,403. Em condições ambientais, este produto, pode ser considerado de baixo risco à possibilidade de sofrer ataque por microrganismos é pouco provável.

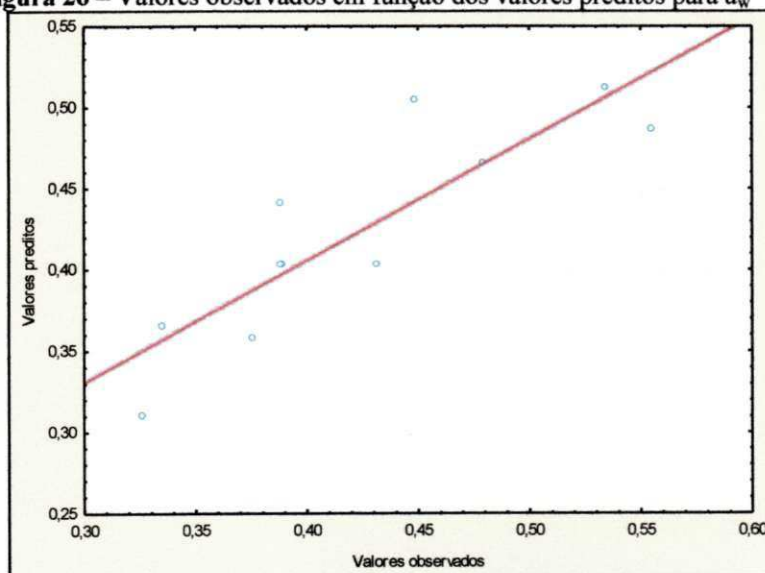
Sousa, et al. (2003) em estudos com goiabas desidratadas osmoticamente seguidas de secagem em estufa, observaram atividade de água inferior a 0,75. Segundo Karel, (1975), alimentos que apresentam atividade de água entre 0,65 e 0,85 são considerados de nível intermediário. Assim valores de atividade de água inferior a 0,65 podem ser considerados de baixos riscos quanto ao processo de decomposição por microrganismos.

Figura 25 – Diagrama de Pareto e o efeito de X_i sobre a_w (95%)



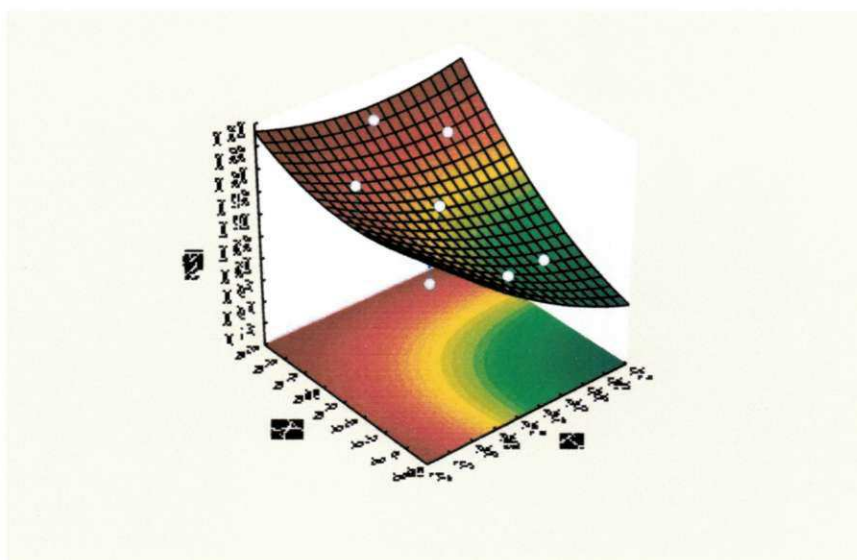
De acordo com a Figura 26 que representa os valores observados experimentalmente e os valores preditos pelo modelo para a variável atividade de água, apresentou dispersão aceitável. De acordo com a tabela 4.8 o valor do termo de ajuste foi pouco superior a 70% o que justifica essa tendência dos dados experimentais. Essa variação provavelmente está relacionada com as características físicas e químicas dos pedaços cúbicos de goiaba e com outros fenômenos fluidodinâmicos com, por exemplo, o encolhimento ocorrido durante a secagem no leito de jorro. De acordo com a Tabela 11 o F calculado foi de 1,28 vezes maior do F tabelado e indica a não predição apesar da significância da análise de regressão.

Figura 26 – Valores observados em função dos valores preditos para a_w



Apesar da temperatura (T) não ser estatisticamente significativa de acordo com a Tabela 10, nota-se que os valores maiores de atividade de água foram observados na faixa de temperatura inferior a 52°C para umidade de aproximadamente 1,05 (Figura 27). A atividade de água é função da umidade final, assim já era evidente esperar que as temperaturas mais elevadas e os menores valores de umidade inicial proporcionassem os menores valores de atividade de água como se observa na mesma figura.

Figura 27 – Superfície de resposta para a variável a_w



4.7.3 Vitamina C

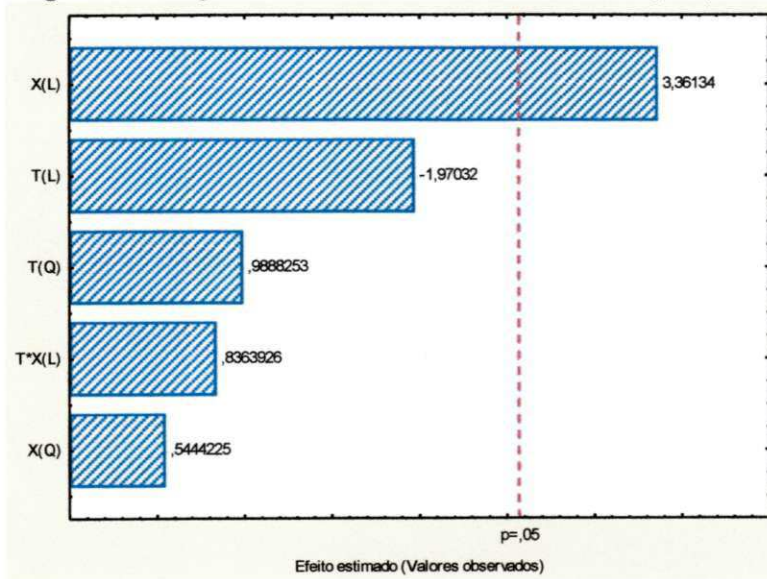
De forma semelhante ao comportamento da atividade de água o teor de vitamina C também foi afetado pela umidade inicial X_i . Conforme a Tabela 10 observa-se que onde a temperatura foi mais baixa (47,9°C) foi encontrado o maior valor de vitamina C (156,2 mg/100g). De acordo com a análise de regressão o valor médio final para os pedaços cúbicos de goiabas secados no leito de jorro foi de 104,73 mg/100g. Na forma natural a polpa de goiaba apresentou um valor médio de 211, 14 mg/100g de ácido ascórbico. Werner. et. al. (2009) em estudos para verificar o efeito do cloreto de cálcio na pós-colheita de goiaba Paluma, verificou teores de ácido ascórbico mais elevado nas cascas. O presente estudo entretanto, avaliou os níveis de ácido ascórbico apenas na polpa.

Segundo Rathore, et al. (1976) a goiaba apresentando conteúdo de ácido ascórbico que pode variar entre 55 a 1.044 mg de ácido ascórbico por 100g de polpa. Esta variação está relacionada com a variedade, local e condições de manejo.

Ribeiro, (2005) estudando o processo de armazenamento de goiabas paluma sob refrigeração e em condição ambientais verificou que para o segundo caso a polpa apresentou

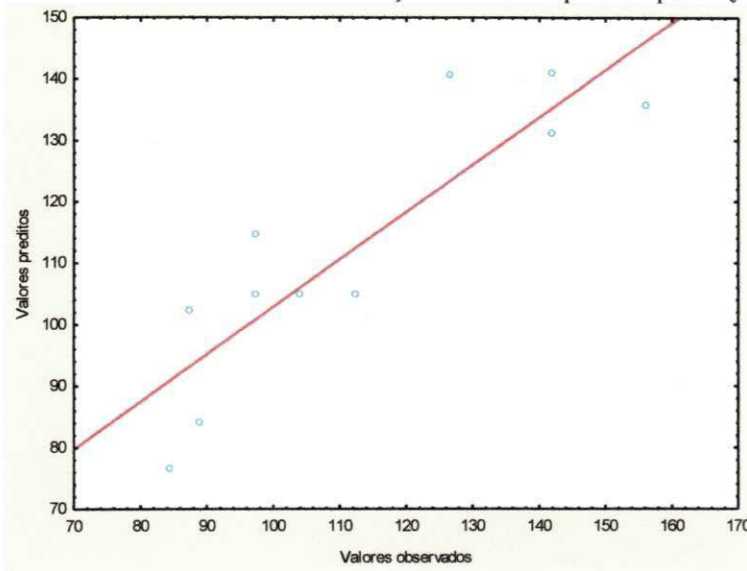
236,33 mg/100g de vitamina C. Os valores remanescentes de 49,6% após secagem em leito de jorro no presente estudo, podem ser considerados bons diante das condições operacionais. Almeida (2004), estudando a secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo e de jorro observou variações percentuais relativos a perda de vitamina C entre 3,26 e 49,8%. O mesmo autor constatou que a secagem de goiaba com uso do mesocarpo apresentou bons resultados quanto à qualidade do produto final e considera que essa tecnologia pode se tornar uma alternativa na secagem de frutas em pedaços, sobretudo se usar condições adequadas de carga e umidade inicial do produto.

Figura 28 – Diagrama de Pareto e o efeito de X_i sobre V_c (95%)



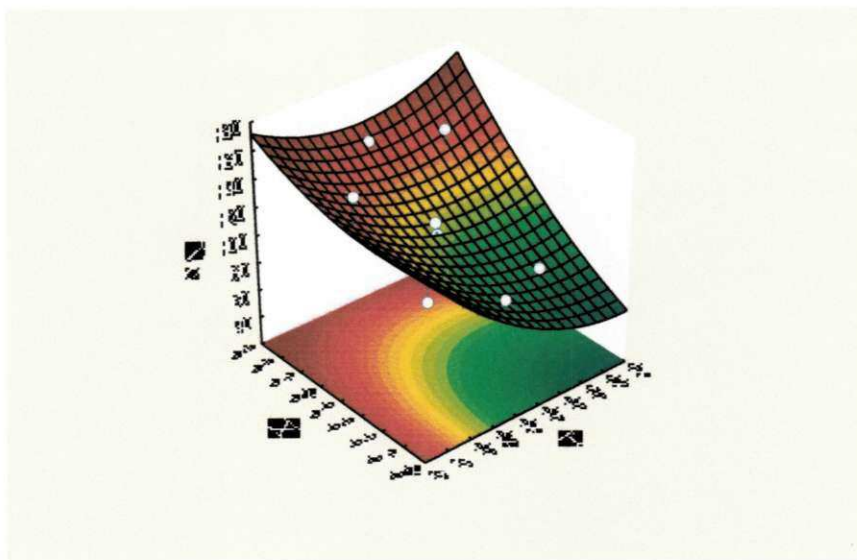
A Figura 29 apresenta a predição para o teor de vitamina C remanescente após secagem em leito de jorro. A relação F calculado e F tabelado foram de 1,78 vezes e conseqüentemente pelas abordagens já apresentadas, a não predição é observada, apesar da sua significância em termos de regressão.

Figura 29 – Valores observados em função dos valores preditos para V_c



A Figura 30 mostra o comportamento da vitamina C para as condições operacionais apresentadas. Conforme análise de regressão a temperatura não foi estatisticamente significativa sobre os níveis remanescentes de vitamina C, mas deve-se salientar que as maiores temperaturas e menores umidades de entrada reduziram de forma considerável esses valores. Conforme a Tabela 10 o maior valor de vitamina C foi de 156,2 e o menor foi de 84,5mg/100g de ácido ascórbico ou uma redução de 45,9%. Apesar das perdas apreentadas durante o processo de secagem, não devemos aqui deixar de salientar que os níveis remanescentes podem ser considerados bons em termos de vitamina C.

Figura 30 – Superfície de resposta para a variável V_c

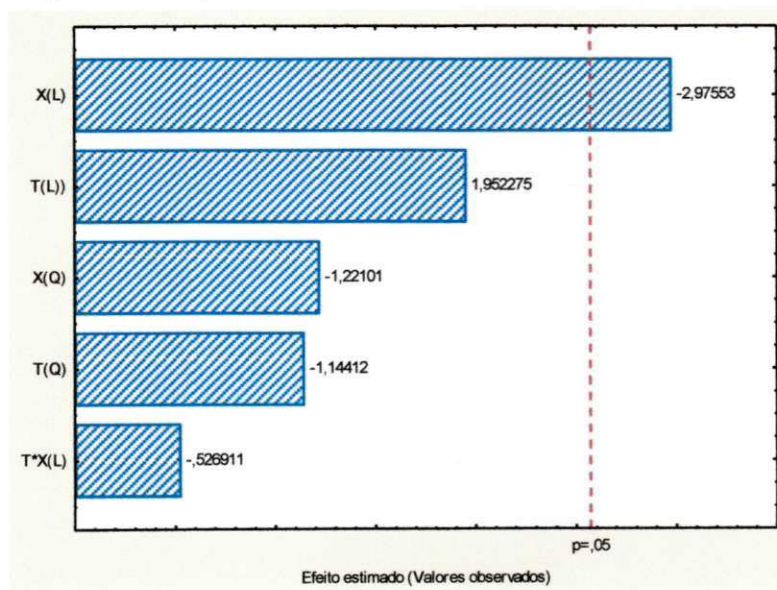


4.7.4 Reidratação

De acordo com a Tabela 9 os valores finais relativos à percentagem de água absorvida (reidratação) em relação à unidade do produto natural possuem desvios relativamente pequenos. O efeito significativo negativo sofrido para esta variável é mostrado na Figura 31. Por outro lado, se observarmos a umidade final em base seca apresentada da mesma Tabela constatamos também diferenças pouco expressivas o que justifica a quantidade de água absorvida. A íntima relação fluidodinâmica das partículas no leito de jorro deve ser provavelmente, a causa dessa pequena diferença na umidade final apesar das diferentes temperaturas e umidades iniciais aplicadas e isso refletiu na percentagem de reidratação. Desse modo a absorção de água durante a reidratação até 250 minutos sofreu pouca variação.

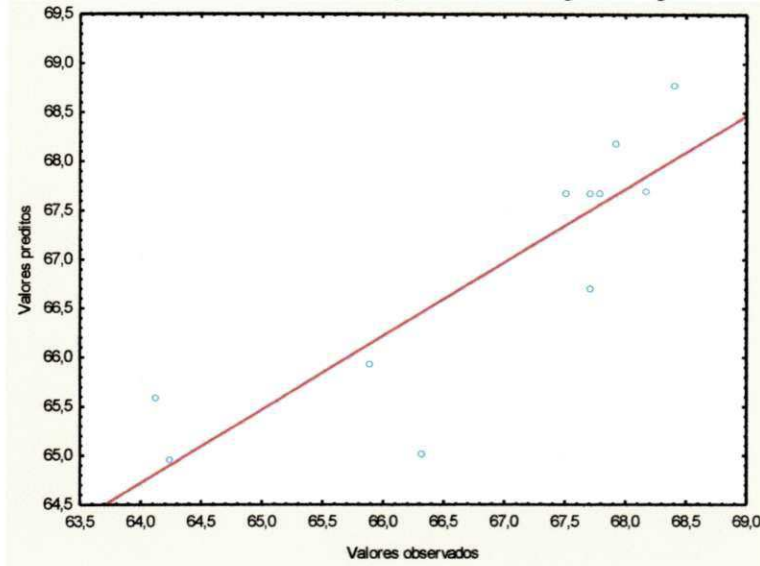
Krokida e Marinos-Kouris, (2002), estudando a cinética de reidratação de maçã e banana e dos vegetais: ervilha, milho, cenoura, abóbora, cebola, cogumelos, batata, pimenta e alho verificaram que a reidratação pode variar entre 1 e quatro vezes. Segundo este, tal fenômeno ocorre devido ao efeito da histerese proveniente do processo de secagem pelo rompimento das estruturas celulares.

Figura 31 – Diagrama de Pareto e o efeito de X_i e sobre R_h (95%)



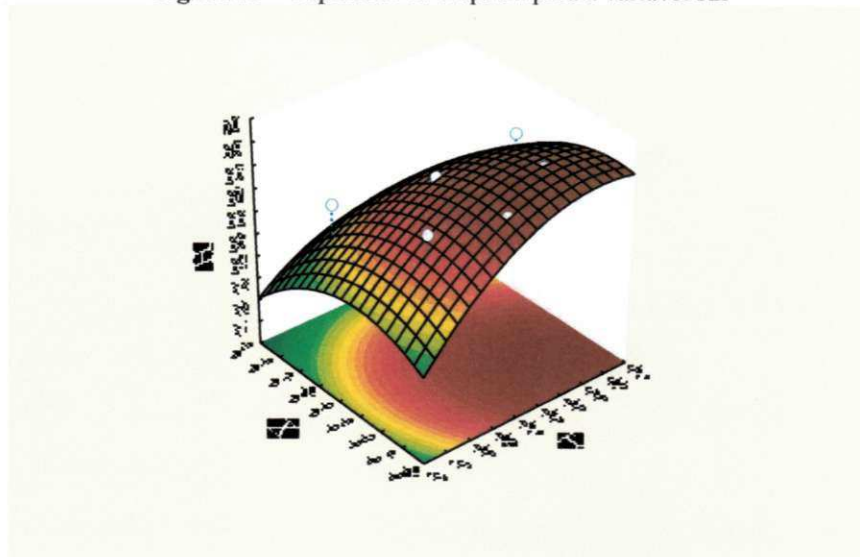
De acordo com a Figura 32 observa-se o nível de dispersão entre os valores observados e calculados dos pedaços cúbicos de goiabas após secagem em leito de jorro e reidratados durante 250 minutos. Isto confirma a análise de variância onde o valor da relação entre os valores de F calculados e tabelados não são preditivo também para a esta variável.

Figura 32 – Valores observados em função dos valores preditos para Rh



A exemplo de a_w e V_c o processo de reidratação não foi influenciado pela temperatura e pouco influenciado pela umidade durante a secagem no leito de jorro (Tabela 10). Conforme análise de regressão linear, a umidade inicial foi também a causa mais visível sobre os efeitos sobre a reidratação. Pela Tabela 9 observa-se que a absorção de água durante o processo apresentou pequenas variações. Pela mesma Tabela verifica-se que as diferenças entre as umidades de entrada dos pedaços cúbicos de goiaba no leito de jorro são bem consideráveis. Em termos quantitativos ao final da secagem verifica-se entretanto, pequenas diferenças entre um e outro ensaio. Assim a quantidade de água absorvida parece depender diretamente da umidade final que apresentou também diferenças menores e não das condições iniciais.

Figura 33 – Superfície de resposta para a variável Rh



De acordo com a superfície de resposta (Figura 33) a tendência observada é de que as melhores condições de reidratação forma obtidas quando se operou nas maiores temperaturas iniciando a secagem em leito de jorro com uma umidade menor.

5 CONCLUSÕES

A massa específica aparente apresentou um decréscimo de 44,26% pela remoção de água durante o processo de secagem e a massa específica real aumentou com a redução de umidade

O acréscimo da porosidade com a redução da umidade foi de 55% entre os teores de umidade de 6,14 a 0,05 e justifica o decréscimo da densidade real e acréscimo da densidade aparente durante a secagem.

Os valores das constantes de difusividade efetiva decresceram de acordo com o aumento do número de termos na equação e para o menor valor determinado para difusividade e parâmetro A foi o considerando o encolhimento.

Os valores encontrados para os coeficientes de correlação (R^2) para os modelos utilizando a 2ª Lei de Fick com e sem encolhimento foram superiores a 0,99 quando utilizados 6 termos, bem como quando analisados pelos modelos empíricos de Page e Henderson.

Todos os modelos usados descreveram razoavelmente bem as isotermas de sorção para a atividade de água variando entre 0,321 a 0,801

Pela correlação de R^2 (coeficiente de determinação) o modelo que melhor representou os dados experimentais foi o modelo sugerido por Smith

A altura do leito de partículas diminuiu de forma moderada com a redução da umidade após 90 minutos de secagem no leito de jorro.

Devido o conteúdo de umidade inicial e conseqüentemente a variação da massa específica, a altura da fonte foi influenciada de forma considerável principalmente no início de cada ensaio experimental.

Os decréscimos relativos de 26,99; 49,29 e 93,12% entre o início da secagem e o final para cada uma das condições apresentadas mostram a magnitude da umidade inicial sobre a variação de pressão.

Para a maior umidade (1,5) foi observado os menores valores de velocidade do ar de secagem, tanto no início quanto ao término do ensaio e para a menor umidade (0,6) os maiores valores caracterizando maior efeito da umidade.

A taxa de circulação de sólidos aumenta com a redução da umidade e com a posição radial sendo os maiores valores encontrados na posição R₄, isto é, nas proximidades da parede cilíndrica.

Devido a altura de coleta da amostra, umidade inicial proporcionou maior influência sobre a quantidade de material circulante dentro da coluna.

Mesmo em condições de umidades mais elevadas o tempo relativo à taxa de secagem foi inferior isso mostra que para a taxa de secagem a temperatura teve efeito mais significativo do que a umidade.

A umidade do produto final foi estatisticamente influenciada tanto pela temperatura quanto a pela umidade inicial de entrada no leito de jorro após 90 minutos.

No final do processo às variáveis; atividade de água, teor de vitamina C e percentagem de reidratação não sofreram efeito significativo da temperatura mais efeito de regressão linear da umidade.

Dentro das condições operacionais o valor médio remanescente de vitamina C foi 49,6% e portanto pode ser considerado relativamente bom.

O valor médio final de atividade de água dos pedaços cúbicos de goiabas secados no leito de jorro foi de 0,403 e em condições ambientais o que indica um produto de baixo risco quanto ao ataque de microrganismos.

Devido as pequenas diferenças relativas da umidade final as diferenças entre os valores quanto as percentagens de água absorvida (reidratação) também apresentaram desvios relativamente pequenos.

6 PERSPECTIVAS

Realizar análise sensorial do produto final dentro destas condições de operação já que a baixa umidade proporciona dureza considerável mesmo considerando a manutenção de outras qualidades físicas como.

Estudar a vida de prateleira dos pedaços de goiaba secos em leito de jorro a partir dos conteúdos finais de umidade.

Realizar mais detalhadamente a cinética de reidratação dos pedaços de goiabas reduzindo os intervalos de tempo e realizar análise sensorial.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAZEK, I.D. **An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds**. Ph.D. thesis, University of Tennessee Knoxville, 1969.
- AGRIANUAL. Anuário da agricultura brasileira. 10^a.edição. São Paulo: FNP Consultoria e Agroinformativos, 2004. 520p.
- AGRIANUAL. Anuário da agricultura brasileira. 10^a.edição. São Paulo: FNP Consultoria e Agroinformativos, 2010.
- AGUILERA, J. M. Temas en tecnología de alimentos. Washington: **American Public Health Association**, 2^a.edição., 1992. 1219p.
- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Propriedades térmicas dos grãos de café. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2, 2000, Poços de Caldas. **Resumos**, Brasília: Embrapa Café, 2000. v.2, p.1142-1146.
- ALEXANDRE, H.V.; FIGUEIREDO, R.M.F de.; QUEIROZ, A.J.de M.; Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó **Rev. de Biologia e Ciências da Terra**, v.7, n. 1, 2007.
- ALMEIDA, M.M. **Processamento de urucum em leito de jorro: Estudos fluidodinâmicos**. 1993, 90p.(Dissertação de Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, C. Grande, 1993.
- ALMEIDA, M. M.: **Secagem de Fatias e Pedacos Cúbicos de Goiaba** (*Psidium Guajava* L) 2004, (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2004.
- ALMEIDA, M. M.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, O. S. **Secagem de pedaços cúbicos de goiaba** (*Psidium guajava* L.): Sistema combinado leito fixo/leito de jorro. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2007, p. 215-215.
- ALMEIDA, M. M.; SILVA, O. S.; ALSINA, O. L. S.; Fluid-dynamic study of deformable materials in spouted bed dryer. **Drying Technology**, p.499-508, 2006.
- ALSINA, O. L. S; SILVA, O. S.; ALMEIDA, M. M.; Distribuição radial de pressão em leito de jorro. Determinação do diâmetro do jorro e da velocidade média do gás na região anular. In: XXIV ENEMP, 1996. **Anais**, Unicamp, São Paulo 1996. v.1. p.75-80.
- ALSINA, O. L. S; SILVA, O. S.; BRASILEIRO, I. M. N.; **Drying kinetics of Indian cherry**. In: Proceedings of the Inter-American conference - IADC, Proceeding, São Paulo, p.434-440, 1997.
- ALSINA, O.L.S.; PEREIRA, J.A.; SILVA, V.A.; **Efeito das condições do pré-tratamento osmótico da acerola** (*Malpighia Emarginata*, DC), sobre os coeficientes de difusão na secagem convectiva. In: GIBIA IV-IIV CONGRESSO Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, 2003, Valparaíso. Programa y Libro de Resúmenes. GIBIA IV-IIV CONGRESSO Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, p.85-85, 2003.
- ALSINA, O.I.S.; **Estudos das propriedades térmicas da goiaba** (*psidium guajava* l.) e do caju (*anacardium occidentale* l.) Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Curitiba, PR, v.15, p. 44-49, 2004.

ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão-preto sob condição de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.5, n.1, p.5-18, 1980.

ALVES, V.F; **Cinética da degradação do ácido ascórbico em suco de laranja concentrado** – Universidade Estadual Paulista- Araraquara, São Paulo, 2004.

AOAC – Association of Official Analytical Chemistry. **Official Methods of Analysis of the Association of Analytical Chemistry**. 12 edição. Washington, 1015.p, 1992.

ARAÚJO, J. L. et al. **Determinação das propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.)**. 2001. 85 f. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande, 2001.

AREGBA, W.; JOMAA, W.; PUIGALLI, J.R. Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. **Revue Physique Appliquée**, v.25, n.11, p.1161-75, 1990.

ARGANDONA, E.J.S.; CUNHA, R.L.; HUMBINGER,M.D.; **Efeito do pré-tratamento osmótico na estabilidade do ácido ascórbico em goiabas desidratadas**. XIV- CBTCA, Recife – PE, 2004.

ARRUDA, M.C.; JACOMINO, A.P.; SARANTÓPOULOS, C.I.G.L.; MORETTI, C.I. Qualidade de melão minimamente processado armazenado em atmosfera modificada passiva. **Horticultura Brasileira**, v.21, n.4, 2003.

BALABAN, M. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. **Journal of Food Process Engineering**, v.12, n.1, p. 67-88, 1989.

BALL, G. F. M. **Bioavailability and analysis of vitamins in foods**. Londres: Chapman e Hall, p. 518-555, 1998.

BALL, G. F. M. **Vitamins: their role in the human body**. Oxford: Blackwell Science Ltda., p. 393-415, 2004.

BHATTACHARYA, S. Kinetics of hydration of raw and roasted corn semolina. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.21–30, 1995.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. v.1, 1ª.edição, Série Manuais, Campinas, São Paulo, 302p. 1996.

BARROZO, M. A. de S.; SARTORI, D. J. M.;FREIRE, J. T. **Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados**. São Carlos – São Paulo, cap. 4, p. 119-159, 1998.

BORGES,S.V.;MANCINI,M.C.;CORREA,J.L.G.;NASCIMENTO,D.A. Secagem de fatias de abóboras (*Curcubit moschata*,L.) por convecção natural e forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, São Paulo; v.28,p.245-251, 2008.

BECKER, T.E. **Correlations for Drill-Cuttings Transport in Directional Well Drilling**, (Doctoral Thesis) U. of Tulsa, 1987.

BENKRID, A. e CARAM, H.S. Obtenção da curva característica de jorro usando CFD **Aiche Journal**, 35, p. 1328-1336, 1989.

BERRUTI, F.; MUIR, J.R. e BEHIE, L.A. Solids circulation in a spout-fluid bed with draft tube – **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.66, p.919-923, 1988.

BICUDO, G.P de A; SILVA, M.A; **Estudo do encolhimento do abacaxi submetido à secagem em atmosfera modificada pela adição de etanol** - XV Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP – PIBIC, 2007.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S.; **Statistics for experiments**. An introduction to design, data analysis and model building; Wiley: New York, 1978.

BRASILEIRO, I.M.N. **Cinética de secagem de acerola in natura em monocamada**.1999. 80p. (Dissertação Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

BRUNAUER S, EMMETT P H.; TELLER E.; Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society** 60:309-19, 1938.

BROOKER, D. V., BAKKERARKEMA. F. W. HALL, C. W. Drying Cereal Grains, **The Avi Publishing Company**, USA. Inc., Westport,1974.

CAPRISTE, G.H.; ROTSTEIN, E. Prediction of sorption equilibrium data for starch-containing foodstuffs. **Journal of Food Science**, Chicago, v.47, p.1501-1507, 1982.

CARNEIRO, P. C. F.; MIKOS, J. D.; BENDHACK, F.; IGNÁSIO, S. A. Processamento do jundiá (*Rhamdia quelen*) rendimento de carcaça. Revista Acadêmica: **Ciências Agrárias e Ambientais**, v.2, n. 3, p. 11-17, 2004.

CARPINETTI, L.C.R.; GALDAMEZ, E.V.C.; **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica gestão e produção**, v.11, n.1. p.121-134, 2004.

CARVALHO, V.D. Qualidade e conservação pós-colheita de goiabas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte - Minas Gerais, v.17, n.179, p.48-54, 1994.

CASTRO,B.D.;DONIDA,M.W.;ROCHA, S.C.S.; MARQUES, A.M.M, **fluidodinâmica do leite de jorro em operações de recobrimento de partículas e secagem de suspensões com atomização na base** - VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 1/6, Campinas, São Paulo, 2006.

CELESTINO; S.M.C, **Princípios de Secagem de Alimentos** Embrapa/Cerrados Planaltina, Distrito Federal.51p (Documentos/Embrapa Cerrado ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081;276, 2010.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R.; Physical and thermal properties of coffee. **Journal of Agricultural Engineering**, New Delhi, n. 73, p.227-234, 1999.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B.; CARVALHO, V. D. Characteristics Fruit juices. **Journal of Food Engineering**. v. 27, p. 423-430, 1996.

- CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of food: Part 1 - a review. **Journal of Food Technol.**, v. 13, n. 3, p. 159-174, 1978.
- CORTEZ L A B; ROSSI L.A; NEVES FILHO, L.C **Subsídios técnicos na rede e instalações elétricas** AGRENER 3º Encontro de Energia no Meio Rural, 2000.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. Drying characteristics and kinetics of coffee Berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8,n.1, p1-10. 2006.
- COSTA FILHO, P.A.; POPPI, R.J.; Algoritmo genético em química, Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas – São Paulo. **Química Nova**, v.22 n.3, p.14-18, 1999.
- CRANK, J.; **The mathematics of diffusion**, Oxford: Claredon Press. 2.edição. 414p, 1975.
- HAWLADER, M.N.A., UDDIN, M.S., HO, J.C., TENG. A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v.14, p.259-268. 1991.
- DAY, J. **Spout voidage distribution and particle circulation rates** in: Spouted Beds – 1986, 255.p (Tese de Doutorado), Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 1986.
- EINSTEIN, A. What is a vitamin . In: COMBS JR., G. F. The vitamins: fundamental aspects in nutrition and health. 2. ed. San Diego: **Academic Press**, p.3-7, 1999.
- EPSTEIN, N. e CHANDNANI, P.P; **Gás spouting Characteristics of Fine Particles** Chem. Eng. Science, v.42, p.2977-81, 1987.
- FAN, L. T., CHUN, P. S., & SCHELLENBERGER, I. A. Volume increase of kernels of corn and sorghum accompanying absorption of liquid water. **Biotechnology and Bioengineering**, v.4, 311–322, 1962.
- FAO **Current situation end medium-term outlook for tropical fruits**. Roma, 2005. Disp. em:http://www.fao.org/es/esc/em/23953/21038/highlight_108849_en.html acesso em 13 de abril de 2007.
- FARIAS, R. F. DE; OLIVEIRA, O. A.de; MEDEIROS, J. V. de; AIROLDI, C.; **Thermochim Acta**,1999, 328, 241. **Química Nova** v.23, n.5, 2000.
- FERRARI, C.C.; RODRIGUES L.K.; TONON R.V.; HUBINGER, M.D. Cinética de transferência de massa de melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n3,p. 564-570, 2005.
- FICHE, A.; OLIVEIRA, L.F.; CORRÊA, J.L.G. **Desidratação osmótica de goiaba sob pressão atmosférica e sob pulso de vácuo** In: XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP, Lavras, Minas Gerais, 2009.
- FORTES, M.; OKOS, M.R. Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. **AIChE Journal, St. Joseph**, v.27, n.2, p.102-113, 1981.

- GAVA, A.J., **Princípios de tecnologia de alimentos**. São Paulo:Nobel, 200.p,2000.
- GEKAS, V., e LAMBERG, I. Determination of diffusion coefficients in volume changing systems-application in the case of potato drying. **Journal of Food Engineering**, v.13, p.317-326, 1991.
- GELDART, D; **Types of gas fluidization**, Powder Technology, v.7, p.285-292, 1973.
- GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. Wiley, New York, 468p., 1986.
- GOLTSIKER, A.D., Doctoral Dissertacion, **Lencolvet Technol**. Istitute Leningrad Quoted by Romankov and Rashkovskaya, 1976.
- GONGATTI NETTO, A.; GARCIA, A. E.; ARDITO, E. F. G. **Goiaba para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita**. Brasília, Distrito Federal/Embrapa-SPI, Série Publicações Tecnicas FRUPEX. n.20, 35.p.1996.
- GONZAGA NETO, L.; SOARES, J.M. **Acerola para exportação: aspectos técnicos da produção**. EMBRAPA-SPI, Distrito Federal, 43.p, 1994.
- GORSHTAIN, A.E. e MUKHLENOV,I.P. **The movement of solid material in the spouting bed**. Zh. Prikl. Khim., 40, 2469, Leningrad, 1967 apud MATHUR, K.B. e EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, p.303,1974.
- GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F.A.C.; FONSECA, K.S.; FERNANDEZ, F.R.; MURR, F.E.X. Estudo das isotermas de sorção e calor isostérico do gengibre em casca. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1999. **Anais: Jaboticabal, São Paulo, CD Rom.1999**.
- GREGORY III, J. F. Vitamins. In: FENNEMA, O. R. **Food Chemistry**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., p.559-567,1996.
- GRBAVCIC, A.B.; VUCOVIC, D.U. & ZDANSKI, F.K. Fluid flow pattern, minimum spouing velocity and pressure drop in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemicam Engineering**, vol. 54, p.33, 1976.
- GOUVEIA, J.P.G.; NASCIMENTO, J.; AUMEIDA, F.A.C.; SILVA.M.M.de; FARIAS, E.S.; SILVA, F.L.H.; Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessorção da polpa de banana prata **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.24, n.3, p.799-806, 2004.
- HENDERSON, J.M.; HENDERSON, S.M. A.; Computacional procedure for deep-bed drying analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.13, p.87-95, 1968.
- HECK,N.C. **Secagem**. DEMET – Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre. 2008.
- HOEHNE, F.C.; **Frutas indígenas**; Instituto Botânico - Secretaria da Agricultura Indústria e Comércio (Publicação série D), São Paulo-SP, 88.p.,1946.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz., 3ª-edição. São Paulo, v.1, p.21-22. 1985a.

I.O.M. - Institute of Medicine of The National Academy Of Sciences. Dietary Reference Intake (DRI). **Food and Nutrition Board**. Washington: National Academy Press, (1999).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Anuário Estatístico/Consumo de Frutas e derivados, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Anuário Estatístico/Consumo de Frutas e derivados, 2009.

IBRAF - Instituto Brasileiro de Frutas - Frutas e Derivados – Revista do Instituto Brasileiro de Frutas –FRUPEX, 2005.

KAREL, M. Water activity and food preservation. In: O.R Fennema (ed) Principles of **Food Science Parte 2**, Marcel Dekker New York, p-237-266, 1975.

KECHAOU, N.; ROQUES, M.A.; A variable diffusivity model for drying of highly deformable materials, In: MUJUMDAR, A.S.; ROQUES, M. Drying'89. **Hemisphere Publishing Corporation**, New York, 562.p.,1989.

KETELAARS, A.A.J.; JOMAA, W.; PUIGALLI, J.R.; COUMANS, W.J.; Drying shrinkage and stress, In: MUJUMDAR, A.S. Drying 92.: **Elsevier Science Publishers**, Amsterdam p.293-303,1992.

I.O.M. - Institute of Medicine of the National Academy of Sciences. **Dietary Reference Intake (DRI)**. Food and Nutrition Board. Washington: National Academy Press, 1999.

KIRANOUDIS,C.T.;TSAMI, E.,MAROULIS, Z.B.E; MARINOS-KOURIS, D. **Drying kinetics of some fruits**. Drying Technology, v.15, .p.1399-1418, 1997.

KIRK, J.; DENNISON, D.; KOKOCZKA, P.; HELDMAN, D. Degradation os ascorbic acid in a dehydrated food system, **Journal of Food Science**, v. 42, n.5, p. 1274-1279, 1977.

KROKIDA,M.K; MARINOS-KOURIS.D Rehydration kinetics of dehydrated products **Journal of Food Engineering**; v.52, p.1–7, 2003.

KROKIDA, M.K; KARATHANOS,V.T.; MAROULIS,B.;MARINOS-KOURIS.D. **Efect of osmotic dehydration on color and sorption characteristics of apple and banana**. Drying Technology, v.18,n.6,p.397-950, 2000.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York, J. Wiley e Sons, c1969, xix p.534. Latham, R., Hamilton, C., Potter, O., E., British. Chemical.Engineering., v.13, p.666.1968.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O., **Fluidization engineering**, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 1969.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. **Butterworth-Heinemann**, 2 ed., 491p., New York, USA, 1991.

LABUZA, T.P.; Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, n.22. v.3. p.263-272, 1989.

LEE, Y. C.; KIRK, J. R.; BEDFORD, C. L.; HELDMAN, D. R. Kinetics and computer simulation of ascorbic acid stability of tomato juice as functions of temperature, pH and metal catalyst, **Journal of Food Science**, v. 42, n.3, p. 640-644, 1977.

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. **Evaluation of food moisture sorption isotherm equations**. Fruit vegetable and meat products. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, v. 18, n. 2, p.111-117, 1985.

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

LEWIS, W.K.; The rate of drying of solid materials. **Journal of Ind Eng. Chemical**. v.5, p.427-432, 1921.

LIMA, M.F.M.; SOUSA, F.M.F; ALSINA, O.L.S.; Influência da vazão do ar e carga de inerte na taxa de circulação de sólidos no leito de jorro. In: 43^o Reunião anual da SBPC. **Anais...** Rio de Janeiro, v.43, p.97-98. 1991.

LIMA, M.F.M.; SOUSA, F.M.F; ALSINA, O.L.S.; Secagem de polpa de Umbu em Leito de jorro – Variáveis fluidodinâmicas do leito. In: XIX Encontro sobre escoamento em meios porosos **Anais...** Campinas,São Paulo, v.1, p.367-377, 1991.

LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de Umbu em Leito de jorro** - Estudos fluidodinâmicos e térmicos 1992, 118.p (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.

LIMA, L.M.R. **Estudo das variáveis fluidodinâmicas na secagem de polpa de Acerola em Leito de jorro convencional**. 1996, 117.p (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos**. Estudo de caso: secagem de banana. 1999. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1999.

LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**. v. 48, n. 5, p. 1497-1553, 1983.

LUIKOV,A.V.; **Heat and mass transfer in capillary - Porous Bodies**. Pergamon Oxford, London, 392p., 1966.

MADONA. L.A.; LAMA. R.A.; AND BRISSON,W.L.; Solids-air jets. **Brit. Chemical Engineering**, 524p,1961.

MALEK. M.A & LU, B.C.Y.; **Pressure drop and suitable bed height in spouted beds**. I and EC Process Design and Development v,4, p.123-128, 1965.

MANURING, F., **Studies in the spouted beds technique with particular reference to low temperature coal carbonization**. Ph.D thesis, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia, 1976.

- MARTINS, L.; COUTINHO, E.L.; PAMZANI, C.R.; XAVIER DIAS, N.J; **Fruteiras nativas do Brasil e exóticas**, CATI, 2002. 112.f - CATI/Boletim Técnico (Impressão Especial) Campinas, São Paulo, 2002.
- MARTINS, P.C; PORTO, P.S.da; PINTO, L.A.A Estudo das propriedades físicas e de transporte na secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.24 n.3 Campinas, São Paulo, 2004.
- MATHUR, K.B. e EPSTEIN, N.; **Spouted Beds**. New York, Academic Press, 1974.
- MAYTA, M. A.; PINTO, J. C.; MASSARANI, G.; Estudo de coeficiente de transferência de massa na secagem de grãos em leito deslizante e fluxos cruzados, **Anais... XXI ENEMP**, Ouro Preto, Minas Gerais, v.1,p.396-407, 1993.
- MCMINN, W. A. M., & MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes-Part II. **Journal of Food Engineering**,; v.33, p.49-55. 1997.
- MEDEIROS, M.F.D, ALSINA, O.L.S, ROCHA,S.C, JERÔNIMO, C.E.M, Escabilidade de leito de partículas inertes com poupa de frutas tropicais. Efeito na secagem em leito de jorro. **Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v.5,n.3, p.475-480, 2001.
- MIKHALLIK, V.D. e ANTANISHIN, M.V.; **The speed of particles and voidage in the core of the spooling bed**. Vest. Akad. Nauk. BSSR. Ser. Fiz. Tankhn. Nauk., n.3-81, 1967 apud MATHUR e EPSTEIN, Spouted Beds. New York: Academic Press, p.303. 1974.
- MIRANDA, M.D; MOTA, D.R, OLIVEIRA, E.M; SANTOS,N.S; SCHETTINI, M.C.M **Avaliação do teor de vitamina C e rotulagem de polpa de frutas comercializadas em Salvador-BA- XIX CBCTA**, Recife, Pernambuco, 2004.
- MISRA, R.N.; YOUNG, J.H. **Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean drying**, Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.23, n.5, p.1277-82, 1980.
- MOHSENIN, N. N. Thermal properties of food and agricultural materials. New York, USA, **Science Publishers**, 742 p., 1980.
- MORGAN, N.H. & LITMAN, H.; **Predicting the maximum spouted height in spouted beds of Irregularly shaped particles**. Ind. Engineering Chemistry Fundamentals., v.21, p.23-26, 1982.
- MOSER, U.; BENDICH, A. Vitamin C. In: MACHLIN, L. J. Handbook of vitamins. 2. ed. Nova York, USA: Marcel Dekker, Inc., p.195-224, 1991.
- MUJUMDAR, A.S.; Spouted Beds: Principles and recent developments. **Anais..XVII ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, v.1, p.03-13, São Carlos,São Paulo, 1989.
- MULET, A.; BERNA, A.; ROSSELÓ, C. Drying of carrots. I. drying models. **Drying Technology**, New York, USA. v.7, n.3, p. 537-57, 1989.

NETO, L. G; SOARES, J.M. **Goiaba para exportação:** Aspectos técnicos da produção Embrapa-SPI/FRUPEX Brasília, Distrito Federal, 49p, 1994.

OLIVEIRA, D. T.; BESSA, J. A. A., Tensão superficial de compostos puros a várias temperaturas. **Anais...** III Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Belo Horizonte – Minas Gerais, v.1., p.378-3781999.

OLIVEIRA,R.A.;PARK,K.J.B. Estudo da secagem de caqui Giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande Paraíba, v.6,n.1,p.7186, 2004.

OLIVEIRA, E.G.; **Secagem de *Spirulina platensis*:** Viabilidade da técnica em leite de jorro 92.p, 2006 (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Rio Grande - RS, 2006.

PADULA, M.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Characterisation of the carotenoids and assessment of the vitamin A value of Brazilian guavas (*Psidium guajava* L.). **Food Chemistry**, v. 20, n. 1, p. 11-19, 1986.

PAGE, C. **Factors Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**, IN Unpublished MS Thesis, Purdue University Lafayette, 1949.

MADEIRA, N.R; REIFSCHNEIDER, F.J.B; GIORDANO, L.B. **Horticultura Brasileira.**, v.26, n.4, 2008.

MEDEIROS, M. F. D.; AZEREDO, H. M. C. Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids. **LWT-Food Science and Technology**, Zurich, v. 42, n. 2, p. 641-645, 2009.

MOTTA LIMA, O.C. e MASSARANI, G. Estudo sobre a secagem de papel III: Uma análise das equações de secagem. **Anais...** do XXIII COBRASP, v.1, ed. DEQ/CTC-UEM, Maringá-PR, 1996.

NICOLETTI, J.F. **Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi.**(Dissertação de Mestrado), 2001.60 p.Universidade Estadual de São Paulo, São José do Rio Preto, SP, 2001.

PARK, K.J., YADO, M.K.M., BROD, F.P.R. Isotermas de dessecção para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) – **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, São Paulo v.21 n.1, 2000.

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. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.1, n.1, 2001.

PARK, K.J.; TUBONI, C.T.; OLIVEIRA, R.A de; PARK, K.J.B. Estudo da secagem de Caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Paraíba, v.6, n.1, p.69-84, 2004.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B.,. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CTEA – UNICAMP. Campinas, São Paulo 2007, Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1985; 32, 1-29.2001;accepted 24 April 2002.

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

PASSOS, M. L.; **Mecânica dos sólidos aplicada à modelagem do escoamento em leitos de jorro**. In:Tópicos Especiais em Sistemas Particulados, p.1-39, São Paulo, 1998.

PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C.G.J.; SCHNEIDER, T. **Spouting behavior of solids - Drying 86**, New York, Hemisphere-Publ. v.1, p.415-420, 1986.

PATEL,K.BRIDGWATER,J.,BAKER,C.G.J.,SCHNEIDER,T. **Spouting behavior of wetsolids**. Drying 86, Ed.A.S.Mujundar,Hemispher e Publishing Corp, New York, p.183-189,1986.

PEREIRA, L. M.; RODRIGUES, A. C. C.; SARANTÓPOULOS, C. I. G. de L.; JUNQUEIRA, V. C. A.; CARDELLO, H. M. A. B.; HUBINGER, M. D. Vida de prateleira de goiabas minimamente processadas acondicionadas em embalagens sob atmosfera modificada. **Ciência e tecnologia de Alimentos**. Campinas, v.23, n.3, p.427-433, 2003.

PIMENTEL, R.M.A; **Qualidade pós-colheita de goiaba vermelha (*Psidium guajava* L.) submetida ao tratamento quarentenário por irradiação gama**, 2007,112p, (Tese de Doutorado).Universidade de São Paulo-USP, Piracicaba, São Paulo, 2007.

PHAM, Q. T.; POOLEY, E. J.,A spouted bed dryer using inert particles,**Proceedings of Australasian Chem. Eng. Conf.9th** Chisistechurch, New Zeland, p.57. 1981.

PINAZZA, L. A.; ALIMANDRO, R **Reestruturação no agribusiness brasileiro: agronegócios no terceiro milênio**. Abag, Agroanalysis e FGV, Rio de Janeiro, 1999.

PINTO, M.L.M.; SILVA, J.D.; BACELO, L.R.; PINTO, L.A.A. Influências da umidade e da temperatura na difusividade efetiva de umidade na secagem de cebola, **Anais... XXVI ENEMP**, Teresópolis, Rio de Janeiro, v.2, p. 462-469,1998.

PRADO, M.E.T.; ALONSO, L.F.T.; SALES, A.F.; PARK, K.J. Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.19, n.1, p.143-146, 1999.

PRADO, M.M.; SARTORI, D.J.M. Estudo do fenômeno de encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais. **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra**, v. 21, n. 1, p. 11-20, 2002.

QUEIROZ, V.A.V. **Teores de Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Se em frutas consumidas na região Norte Fluminense**.73.p, 2004 (Dissertação de Mestrado) Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2004.

RAIMUNDO, E.; BRÜGER, R.L.; CICHOSKI, A.J. **Bactérias lácteas e vitamina C em suco de laranja exposto a luz**. XIX CBCTA, Recife, Pernambuco, 2004.

RATHORE, D.S. Effect of season on the growth and chemical composition of guava (*Psidium guajava* L.) fruits. **The Journal of Horticultural Science**, Ashford Kent, v.51, n.1, p.41-47, 1976.

REBOUCHE, C. J. Ascorbic acid and carnitine biosynthesis, **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 54, p.1147– 1147, 1991.

REYES, A. E.; DIAZ, G.; BLASCO, R. **Experimental study of slurries drying on inert particles in fluid-particles contact equipment**. Inter-american Drying Conference, São Paulo, p.150 – 157, 1997.

RIBEIRO, D. M.; Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Rodrigues, D. H. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Anais...XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2005. CD Rom.

RESENDE, O; CORRÊA, P.C; GONNELE, A.L.D; RIBEIRO,D.M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem **Ciências Agrotecnicas**, Lavras, Minas Gerais, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008.

RIEMER, J.; KAREL, M. Shelf-life of vitamin C during food storage: prediction of L-ascorbic acid retention in dehydrated tomato juice, **Journal of Food Processing and Preservation**, v.1, n.4, p.293-312, 1977.

ROA, G.; VILLA, L.C. **Secagem e armazenamento de grãos e sementes em silos mediante à utilização do ar ambiente com auxílio de coletores solares**. 51p.Campinas, 1977.

ROA,M.A.; Rheological properties fluid food In: M.A.ROA e S.S.H, RIZVI (Eds) **Engineering Properties of food** Basel:Marcel-Dakker, p.1-46, 1986.

ROCHA,D.C.;SANTOS,B.M.;SCHEID,C.M;CALÇADA,L.A, Det. dos coeficientes de difusão e convectivo na secagem de sementes de *Nasturtium officinale* (agrião). **Anais...VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, ,Campinas SP,2005.

RODRIGUES, M.E de A.; AUMEIDA, F.de A.C.; GOUVEIA, J.P.G. de; SILVA. M.M.; Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Paraíba, v.4, n.2, p.141-147, 2002.

RODRIGUES, C.C.; **Análise da secagem de suspensões em leite de jorro com partículas inertes**. p.116. (Dissertação de Mestrado) (1993).

RODRIGUES, A. C. J. **Controle de qualidade para fitoterápicos: estudo para implantação do controle de qualidade em farmácias**, São Carlos, São Paulo, 18.p, 2003.

RODRIGUES.M.L; LEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 1^aed. Casa do Pão. Campinas, São Paulo, 326.p, 2005.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G.; Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian journal of food technology**, , Campinas, São Paulo, v.6, n.1, p.69-76, 2003.

SANCHEZ, C.V.; **Modelagem e predição da atividade de água em produtos alimentícios**. Exame de qualificação de área UNICAMP, Campinas, São Paulo 31p.,1994.

SAXENA, S.C.; MATHUR, A., Hydrodynamic and heat transfer characteristics of Fluidized-Bed Coal Combustors, **1st Annual Pittsburgh Coal Conference**, p.411-426,1984.

SILVA, M. A. ; NEBRA, S. A. . **Drying on cyclones - An experimental study**. In: A.S. Mujumdar; I. Filková. (Org.). DRYING'91. AMSTERDAM: ELSEVIER SCIENCE LTD, v.2, p.281-291, 1991.

SILVA, G.F.; RIBEIRO, V.S.; ALMEIDA, M.M. Propriedades físicas de produtos agrícolas” **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, Paraíba, v.4, n.1., p.1-6, 2002.

SILVA, M.M.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, M.M. Demanda energética envolvida no processo de dessecção da umidade em polpa de manga. **Revista de produtos agroindustriais**, Campina Grande, Paraíba, v.4, n.2, p.107-117, 2002.

SILVA, F. D.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; SOUZA. J. A.; SILVA, Y. C. Desidratação osmótica de banana da terra (*Musa sapientum*) - Aplicação de modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, n.1, p.69-76, 2003.

Silva, R.B; Silva, F.S; Porto, A.G; Influência da temperatura e da velocidade do ar nas taxas de secagem da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) **Anais...IV Congresso de Iniciação Científica – CONIC**, Cácers, Mato Grosso, 2008.

SINGH, B. P. N., & KULSHRESTHA, S. P. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, v.52, p.1541–1544, 1987.

SHERWOOD, T.K.; **The drying of solids (I)**. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, v.21, n.1, p.12-16, 1929a.

SHERWOOD, T.K.; **The drying of solids (II)**. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, v.21, n.10, p.976-80, 1929b.

SOKHANSANJ, S.; PATIL, R.T. **Kinetics of dehydration of green alfafa**. Drying Technology, New York, v.14, n.5, p.1197-234, 1996.

SOUSA, D.O.C., RAMOS, A.M.E., PEREIRA, J.A.M. Curva de secagem de manga (*Mangífera indica* L.) Variedade Tommy Atkins. **Anais...XIX CBCTA**, Recife-PE, 2004.

SOUZA NETO, M.A. **Desidratação osmótica de manga Coité com e sem utilização de vácuo com complemento de secagem em estufa**. 2002. 67p. (Dissertação Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

SOUZA JR., F. E. ; SOUZA, J. S. ; ROCHA, S. C. S. ; MEDEIROS, M. F. D. **Secagem de misturas de polpas de frutas em leite de jorro - influência da adição de gorduras e das propriedades das polpas no desempenho do processo**. In: VII CBEQI. Livro de Resumos do VII COBEQ-Iniciação Científica, São Carlos, São Paulo, 2007.

- SOUZA, A. C. R. Goiabas desidratadas osmoticamente seguidas de secagem em estufa. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, São Paulo, v.25, n.3. p.414-416, 2003.
- STFFE, J. R., e SINGH, R. P. Note of volumetric reduction of short grain rice during drying. **Cereal Chemistry**, v.57, p.148-150.1980.
- SZENT-GYÖRGYI, A. Vitamin C . In: COMBS JR., G. F. **The vitamins: fundamental aspects in nutrition and health**. 2. ed. San Diego: Academic Press, p.3-7,1999.
- TIBOLA, C.S; FACHINELLO, J.C. Tendências e estratégias de mercado para a fruticultura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.10, n.2, p.145-150, 2004
- THOREY,B.; MATHUR, K.B.; KLASSEN, J.; GISHLER, P.E. **The effect of design variables on flow characteristics in a spouted Bed** – Rep. Nat. Res. Council of Can., Ottawa, 1955.
- THOREY,B.; SAUNBY. J.B.; MATHUR, K.B. & OSBERG, G.L. An Analysis of air and solid flow in a spouted wheat Bed, Can. **Journal Chemical Engineerig.**, v.37, p.184, 1959.
- TORREGGIANI, D.; BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruits processing: chemical, physical and structural effects. **Journal of Food Engineering**, v.49, n.4, p. 247-255, 2001.
- TSAMI, E.; KATISIOTI, M., **Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration**, *Drying Technology*, v.18, n.7, p.1559-1581, 2000.
- TAYLOR, A.G.; HARMAN, G.E. Concepts and technologies of selected seed treatments, **Phytopathology**, v.28, p.321-339,1990.
- VAGENAS, G.K.; MARINOS-KOURIS, D.; **Drying kinetics of apricots**. *Drying Technology*, New York, USA, v.9, n.3, p.735-52, 1991.
- VASQUEZ, G.; CHENLO, F.; MOREIRA,R.; COSTOYAS, A., **Efects of various treatments on the drying kinetics of Muscatel grapes**, *Drying Technology*, v.18, n.9, p.2131-2144, 1999.
- VILELA,C. A. A; OLIVEIRA,P.A Secagem do açafrão (*Curcuma longa*L.) em diferentes cortes geométricos.**Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.28,n.2,p.387-394, 1990.
- WANG, N. e BRENNAN, J.G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration; **Journal Food Engineering**, London, v.24, p. 61-76, 1995.
- WERKEMA, C. Estratégia para aumentar a lucratividade. **Revista BQ – Qualidade**, São Paulo, SP: Editora Banas, São Paulo, SP, p.138-143, 2000.
- WERNER, E.T; OLIVEIRA JUNIOR, L.F.G; BONA, A.P. de; CAVATI, B; GOMES, D.U.H; **Efeito do cloreto de cálcio na pós-colheita de goiaba**, Campinas, São Paulo, v.68, n.2, p.511-518, 2009.
- WILDHAGEN, G.R.S. **Estudo da decomposição térmica do nitrato de Uranila e hidróxido de cério em secador spray**. 1993, 118.p (Tese de Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

APÊNDICE

1- MÉTODO E PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES REAGENTES PARA DETERMINAR ÁCIDO ASCORBICO

O ácido ascórbico foi determinada pelo método de Tillmans modificado, que baseia-se na redução do 2,6-diclorofenolindofenol-sódio (DCFI), pelo o mesmo. As soluções reagentes de ácido oxálico, ácido ascórbico e de DCFI para a determinação da quantidade de ácido ascórbico presente nas amostras, foram preparadas de acordo com o seguinte procedimento:

a) Solução de ácido oxálico a 1%

Foram dissolvidos em pequena quantidade de água, a quantidade correspondente a 12 gramas de ácido oxálico mono-hidratado. Em seguida o mesmo foi transferido para um balão volumétrico de 1.000 ml e completado o volume com água destilada.

b) Solução padrão de ácido ascórbico

Foram pesados 0,05g de ácido ascórbico (p.a), transferido para um balão de 100 ml e completado o volume com a solução de ácido oxálico a 1%.

c) Solução de 2,6-diclorofenolindofenol-sódio

Em um Becker foi pesado 0,05g de 2,6-diclorofenolindofenol-sódio (DCFI). Em outro Becker 0,042g de carbonato ácido de sódio, sendo este, diluído em 50 ml de água destilada (solução auxiliar na dissolução do DCFI).

Em seguida a solução foi transferida para o Becker contendo o DCFI e dissolvido ao máximo possível. A nova solução foi transferida para um balão volumétrico de 200 ml, sendo adiciona água destilada aos poucos e sobe agitação, até dissolução do corante. Por fim o volume foi completado e filtrado, sendo esta a solução final titulante.

2 - PROCEDIMENTO DA ANÁLISE

a) Padrão

Em um Erlenmeyer foi colocado 50 ml da solução de ácido oxálico e adiciono-se 10 ml da solução padrão de ácido ascórbico. Foi feito a titulação com a solução de DCFI até coloração rosada persistente durante aproximadamente 15 segundos.

b) Amostra

Segundo a metodologia pode ser usados 10 gramas da amostra para uma alíquota de 50 ml de ácido oxálico e titular com DCFI até a coloração rosada persistente por aproximadamente 15 segundos. Ou ainda, diluir 10 gramas da amostra em 250 ml e tomar uma alíquota de 10ml para ser titulado com 50 ml de ácido oxálico. Por apresentar maior precisão, a determinação do ácido ascórbico neste estudo, foi usado a segunda opção (10 gramas da amostra). Os resultados são expressos em mg de ácido ascórbico por 100g de amostra.