



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



TESE DE DOUTORADO

SECAGEM DE FATIAS E PEDAÇOS CÚBICOS DE GOIABA (*Pisidium guajava* L)

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA

Campina Grande, Paraíba , Brasil

Dezembro – 2004

SECAGEM DE FATIAS E PEDAÇOS CÚBICOS DE GOIABA (*Pisidium guajava* L.)

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - Campus I, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Prof. Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina
Orientadora

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Dezembro – 2004

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A447s

Almeida, Marcello Maia de

Secagem de fatias e pedaços cúbicos de goiaba (*Psidium guajava* L.) / Marcello Maia de Almeida.— Campina Grande, 2009.

154 f. : il. color

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

Referências.

Orientadora Prof. Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina.

1. Secagem 2. Goiaba 3. Fluidodinâmica 4. Secagem -
Leito Fixo 5. Secagem - Leito de Jorro 6. Secagem - Leito
Fluidizado I. Título.

634.42(043)

CDU

:634.42(043)

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Marcello Maia de Almeida e aprovada pela banca examinadora em 06 de dezembro de 2004.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Prof^ª Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina (Orientadora)
UFCG/CCT/UAEQ

SECAGEM DE FATIAS E PEDAÇOS CÚBICOS DE GOIABA
(*Pisidium guajava* L.)

Tese aprovada em 06 de dezembro de 2004

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA



Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, DEQ/UFCG
Orientadora




Dra. Maria Laura de Azevedo Passos, DEQ/UFSCar
Examinadora externa



Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros, DEQ/UFRN
Examinadora externa



Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva, DEQ/UFCG
Examinador interno



Dr. Osvaldo Soares da Silva, DEQ/UFCG
Examinador interno

DEDICATÓRIA

A minha família em especial aos meus pais, Osmar e Teomirtes pelo exemplo de dignidade, dedicação e amor.

As minhas filhas Jéssica Ohanna e Karolyne por transmitir tanta paz, amor e alegria nos momentos mais difíceis.

A estes minha eterna admiração, respeito, gratidão e meu amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas graças que vem operando em minha vida.

A Professora e amiga Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, pelas orientações e estímulo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Osvaldo Soares da Silva pela grandiosa contribuição durante a difícil tarefa de obtenção dos dados experimentais.

A minha eterna gratidão a Professora Maria de Fátima Dantas de Medeiros pela valiosa disposição em suas sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Flávio Luiz Honorato da Silva por sua valiosa colaboração.

Aos meus alunos de Iniciação Científica pela grandiosa ajuda na parte experimental.

Aos funcionários do Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química: José Lopes, Nogueira e Cajá pelo auxílio técnico e receptividade.

A todos do grupo de Meios Porosos e Particulados do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

Aos amigos de sempre, Prof. Vimário e Ana Paula.

Estou inscrita em toda minha vida em cada momento da minha vida e a cada instante marco minha presença e identidade. Presença de paz, de ânimo, de coragem, de entrega e de confiança. Não sou exatamente as coisas que tenho nas mãos ou na mente, mas sim essa força íntegra que decide o que abraçar e o que pensar. Essa força que aceita e integra tudo o que me compões, e cria com todo meu ser esta vida maravilhosa!

Rachel H. Salles

RESUMO

Neste trabalho estudou-se inicialmente a secagem de fatias de goiabas cortadas no sentido polar da fruta, os resultados obtidos mostraram que o produto apresentou alterações desfavoráveis a comercialização, apresentando alteração significativa na cor, escurecimento, como também, na textura das fatias. Numa segunda etapa utilizou-se os processos combinados de leito fixo/leito de jorro e de leito fixo/leito fluidizado para a secagem de pedaços cúbicos de goiaba obtidos do mesocarpo da fruta. Inicialmente, fez-se um estudo fluidodinâmico dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado o qual mostrou a viabilidade do uso dessas técnicas, embora as propriedades físicas do material após pré-secagem em leito fixo tenham afetado sensivelmente a fluidodinâmica dos leitos, os quais sofreram modificações estruturais. No estudo fluidodinâmico em leito de jorro foram determinadas a velocidade mínima de jorro e a altura máxima capaz de manter o jorro estável. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com correlações da literatura e mostraram boa concordância. Em leito fluidizado determinou-se a velocidade de mínima fluidização experimental os resultados obtidos apresentaram boa com os determinados através de correlações empíricas. Posteriormente, realizou-se um estudo das propriedades físicas, propriedades térmicas e um estudo do equilíbrio higroscópico dos pedaços cúbicos da fruta. Os resultados encontrados da massa específica e do diâmetro mostraram que estes se enquadram na categoria D, segundo a classificação de Geldart, o que favorece a um jorro e fluidização incipiente. Em relação ao estudo do encolhimento dos cubos observou-se um comportamento linear com o volume par todos os níveis de umidade do produto durante a secagem. Contudo, para umidade de 1,5 em base seca, durante a secagem em leito de jorro, duas regiões bem distintas foram caracterizadas pela mudança na inclinação da curva. Em relação às propriedades térmicas estas apresentaram a mesma tendência, ou seja, aumentando com a elevação da umidade passando por um máximo correspondente ao máximo encontrado na massa específica. No estudo do equilíbrio higroscópico, observou-se que as isotermas, dentro da faixa de temperatura estudada, foram ajustadas ao modelo de Henderson apresentando um ajuste satisfatório, não se observando efeito da temperatura. No estudo da cinética de secagem utilizou-se o modelo difusional para esferas, truncado em quatro termos levando-se em conta o efeito do encolhimento, os resultados obtidos para leito fixo/leito de jorro ajustou bem os dados experimentais. Por outro lado, este modelo não prediz satisfatoriamente o comportamento da secagem em leito fixo/leito fluidizado haja vista o fator encolhimento não ter sido utilizado no modelo. O coeficiente de difusão efetivo para níveis de umidades mais elevados apresentaram a mesma ordem de grandeza para ambos os processos independente da altura do leito. A hipótese de controle difusional externo desprezível foi confirmada a partir do número de Biot de massa que foi muito elevado. O desempenho dos secadores foi realizado a partir da determinação das perdas de vitamina C e da eficiência energética do processo. Verificou-se que a degradação do ácido ascórbico é mais acentuada em leito de fluidizado. Com relação a eficiência energética valores mais elevados foram encontrados em níveis de umidade mais acentuadas. De maneira geral, podemos afirmar que o sistema combinado de secagem de pedaços cúbicos de goiaba aponta de forma promissora para a produção de um novo produto obtido a partir de uma tecnologia simples, obtendo-se produtos com características adequadas à comercialização.

Palavras-chave: Secagem, goiaba, fluidodinâmica, secagem – leito fixo, secagem – leito de jorro, secagem – leito fluidizado.

ABSTRACT

Initially, the objective of this work was to study the drying of whole guava slices cut in the fruit polar direction. The results pointed out that this process introduced adverse aspects for commercialization, such as significant alteration in color, darkness, and slices texture. Looking for a better product quality, studies on combined process fixed bed/spouted bed and fixed bed/fluidized bed for guava cubic pieces drying were performed in a second step. The guava slices were obtained by cutting the fruit pith in approximately 1cm cubic form. A fluid-dynamic study in spouted bed and fluidized bed showed the feasibility of this technique, although the physical properties of guava cubic pieces after pre-drying in fixed bed affected the fluid-dynamics behavior causing structural alteration. The minimum spouting velocity, the maximum spoutable height and the minimum fluidization velocity as well, were determined and the obtained results showed good agreement with literature correlations. In order to characterize the fruit cubic pieces, the physical properties, thermal properties and hygroscopic equilibrium were determined as a function of the moisture content. The results of density and diameter pointed out that the particles were classified as type D according Geldart. In such situation, one may expect a stable spouting with incipient fluidization. In relation to the study of the shrinking and deformation it was observed a linear volume contraction with the moisture reduction at all levels of product moisture content during drying, together with a rapid rounding of the cube vertices. Spite the linear behavior, two distinct regions, limited by 1,5 (db) moisture content, had been observed during the spouted bed drying, characterized by the change in the curve slope. The thermal properties, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat, were measured as a function of moisture content. All three presented the same trend: it was observed a region of increasing value of the property with the moisture content with a maximum in the region of maximum density. The Henderson model was adjusted to the hygroscopic equilibrium isotherms; the results showed a good fitting and little effect of temperature was observed within the studied temperature range. A diffusional model for spheres was proposed to describe the drying kinetics. The Fick's solution, truncated in four terms of the series and including the shrinking effect, was used in the modeling. The fixed bed/spouted bed experimental data showed a good fitting whereas this model does not satisfactorily predict the drying behavior in the fixed bed/fluidized bed system. The failure in this case is probably due to the shrinking factor was not considered in the model for fixed/fluidized bed. The effective diffusion coefficient for high levels of moisture presented the same order of magnitude for both processes, independent of the bed height. The internal diffusional control hypothesis for the mass transfer was then confirmed by the high mass Biot number, calculated for both processes. The driers performance was evaluated by means of analysis of the vitamin C loss and process energetic efficiency. It was verified that the acid ascorbic degradation is more significant in the fluidized bed, probably due to the instable behavior of this configuration. With regard to the energy efficiency higher values were found for the highest moisture content levels. In general, it is concluded that the combined system fixed/spouted or fixed/fluidized bed drying of guava pieces is an expecting suitable process to obtain a new product by a simple technology, getting products with adequate characteristics to the commercialization.

Key-words: Drying, guava, fluid-dynamics, fixed bed drying, spouted bed drying, fluidized bed drying.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Matéria-Prima: GOIABA (<i>Psidium guajava</i> L.)	3
2.2. Caracterização – Propriedades físicas, químicas e térmicas de produtos agrícolas	6
2.3. Secagem	11
2.3.1. Modelos	14
2.3.1.1. Teoria da difusão	15
2.3.2. Curva de Sorção: comportamento higroscópico	18
2.3.3. Secagem de frutas	22
2.3.4. Secagem de goiaba	25
2.3.5. Encolhimento de produtos agrícolas	26
2.3.6. Eficiência energética	29
2.4. Secadores	31
2.4.1. Leito Fixo	31
2.4.2. Leito de jorro	31
2.4.3. Leito fluidizado	40
2.5. Planejamento e otimização de experimentos	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	45
3.1. Matéria Prima	45
3.1.1 Primeira Etapa	45
3.1.2. Segunda Etapa	45
3.2. Caracterização	46
3.2.1. Caracterização física da goiaba	46

3.2.2. Caracterização química	48
3.2.3. Propriedades térmicas	49
3.3. Equipamentos	50
3.4. Encolhimento do pedaço cúbico de goiaba	53
3.4.1. Encolhimento durante a secagem em leito fixo	53
3.4.2. Encolhimento durante a secagem em leito de jorro	54
3.5. Isotermas de equilíbrio	54
3.6. Procedimento Experimental da Cinética de Secagem	56
3.6.1. Cinética de secagem em camada delgada de fatias de goiaba em leito fixo – Primeira etapa	57
3.6.2. Pré-secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo – Segunda etapa	57
3.6.2.1. Secagem em leito de jorro e leito fluidizado	57
3.7. Eficiência térmica da secagem em leito de jorro	59
3.8. Modelagem matemática da cinética de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado	59
3.9. Estudo Fluidodinâmico	61
3.9.1. Leito de Jorro de Pedaços Cúbicos de Goiaba	61
3.9.1.1. Altura Máxima jorrável	61
3.9.1.2. Velocidade de jorro mínimo e velocidade de colapso	61
3.9.1.3. Parâmetro de Littmam	62
3.9.2. Leito Fluidizado	62
3.10. Planejamento Experimental	63
3.10.1. Secagem de Pedaços Cúbicos de Goiaba em Leito de Jorro	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1. Caracterização	65
4.1.1. Caracterização Física	65
4.1.1.1. Massa Específica	65
4.1.1.2. Encolhimento Volumétrico	68
4.1.2. Propriedades Térmicas	71
4.2. Caracterização Química	73

4.3. Isotermas de Equilíbrio	73
4.4. Fluidodinâmica de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fluidizado	75
4.5. Fluidodinâmica de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito de Jorro	75
4.5.1. Altura Máxima Jorrável	80
4.5.2. Velocidade de jorro Mínimo	81
4.5.3. Estudo das Modificações Estruturais na Fluidodinâmica do Leito de Jorro Durante a Secagem	84
4.6. Cinética de Secagem de Fatias de Goiaba em Leito Fixo	87
4.7. Estudo da Pré-secagem em Camada Espessa de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fixo	93
4.8. Secagem em Leito de Jorro e Leito Fluidizado de Pedacos Cúbicos de Goiaba	95
4.8.1. Cinética de secagem em leito de jorro e leito fluidizado	95
4.8.2. Fração de água evaporada	103
4.9. Modelagem Matemática	105
4.9.1. Leito de jorro	105
4.9.2. Leito fluidizado	107
4.10. Desempenho da Secagem em Leito de Jorro e Leito Fluidizado	109
4.10.1. Análise da perda de vitamina C	109
4.10.2. Eficiência térmica	113
4.11. Análise Estatística dos Resultados Experimentais do Planejamento 2 ³ Completo – Secagem em Leito de Jorro	114
4.11.1. Análise de Regressão dos Modelos Estatísticos	114
4.11.2. Análise das Variáveis Respostas: propriedades físicas adimensionalizadas	115
4.11.3. Análise de Regressão das Variáveis Respostas: massa de água evaporada, razão de umidade final e umidade inicial e da perda de vitamina C	121
4.12. Análise das Superfícies de Resposta	127
4.12.1 Análise das superfícies de respostas das variáveis U_f/U_i , m_{evj} e $P_{vit. C}$	129
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
5.1. Massa específica	136
5. 2. Encolhimento volumétrico	136
5.3. Propriedades térmicas	137

5.4. Isotermas de equilíbrio.	137
5.5. Fluidodinâmica de pedaços cúbicos de goiaba em leito fluidizado e leito de jorro	138
5.6. Cinética de secagem de Fatias de Goiaba em leito fixo em camada delgada	139
5.7. Estudo da pré-secagem em camada espessa de pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo	140
5.8. Secagem em leito de jorro e leito fluidizado de pedaços cúbicos de goiaba	140
5.9. Modelagem matemática da cinética de secagem	141
5.10. Desempenho da secagem em leito fixo e leito fluidizado	142
5.11. Análise estatística dos resultados do planejamento experimental 2^3 completo – secagem em leito de jorro	142
5.12. Conclusão	143
5.13. Perspectivas	144
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
Apêndice A	154

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Em climas tropicais e temperados, parte da produção de frutas e hortaliças é perdida nos centros de produção, por não dispor de técnicas eficientes de processamento dos produtos nativos, que assegurem um tempo maior de conservação. As frutas não processadas são bastante perecíveis, suas perdas pós-colheita nos países menos desenvolvidos ultrapassam 20%. (AGUILERA e PARADA, 1992).

Uma das principais razões para a baixa produção e comercialização no mercado internacional de frutas tropicais como a goiaba é a carência de tecnologias adequadas durante o manuseio, transporte e estocagem para preservação e transformação em produtos com boa qualidade e aparência (ARGANDOÑA, 1999).

Pelo exposto, faz-se necessário o desenvolvimento ou adaptação de tecnologias de baixa complexidade e baixo custo, às matérias-primas nacionais para obtenção de produtos que tenham por um lado uma vida de prateleira prolongada em relação à fruta “in natura”, e por outro, que mantenham as propriedades da fruta fresca.

A secagem é uma operação em que há a transferência de um líquido de um sólido úmido para uma fase gasosa não saturada. Esta operação é frequentemente usada para condicionar produtos agrícolas antes de seu armazenamento. Um baixo teor de umidade permite estocar frutas processadas por um longo período, livre da ação de microorganismos e insetos. Nestes produtos, como em outros compostos orgânicos, a umidade é parte integrante da estrutura sólida ou está retida entre fibras ou pequenos poros internos.

Têm sido utilizados secadores não-convencionais para desidratação de produtos agrícolas de baixo custo, devido principalmente:

- a) não depender das condições meteorológicas;
- b) permitir colheita antecipada;
- c) diminuir a incidência de fungos e insetos; e
- d) possibilitar a centralização do beneficiamento dos grãos em cooperativas ou companhias Estaduais de armazenamento.

Alternativas para viabilizar a secagem de frutas tropicais vêm sendo propostas ao longo dos anos por diversos pesquisadores. Entre as alternativas dos métodos não-convencionais, citam-se: secador de leito fixo, secador de leito de jorro, secador de leito fluidizado, entre outros. O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a secagem de fatias de goiaba em leito fixo e a secagem de goiaba em pedaços cúbicos em secador de leito de jorro e leito fluidizado, avaliando o desempenho dos mesmos. Estudou-se especificamente:

- a) a cinética da secagem em camada delgada de fatias de goiaba em leito fixo sob diversas condições operacionais de temperatura e vazão do ar de secagem e espessura das fatias
- b) caracterização físico-química da matéria-prima e do produto;
- c) estudo das isotermas de equilíbrio da goiaba;
- d) pré-secagem de pedaços cúbicos de goiaba em camada espessa;
- e) o comportamento fluidodinâmico de leito fluidizado com pedaços de cúbicos de goiabas;
- f) desempenho da secagem de pedaços de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado.

Neste trabalho, fez-se uma abordagem dos resultados das propriedades físicas e químicas dos pedaços cúbicos de goiaba obtidos do mesocarpo da fruta "*in natura*". Realizou-se um estudo sobre o equilíbrio higroscópico e das propriedades térmicas, para uma melhor compreensão fenomenológica da cinética de secagem de pedaços cúbicos em leito fluidizado e leito de jorro. Os resultados obtidos foram comparados com os estudos da secagem de fatias de goiaba em secador convectivo.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matéria prima: Goiaba (*Psidium guajava* L.)

A goiabeira, natural da América Tropical e Subtropical, pertence ao gênero *Psidium* L. da família *Myrtales*, que compreende mais de 100 espécies de árvores e arbustos, dos quais muitos produzem frutos comestíveis. A espécie *Psidium guajava* L. cujas variedades são a goiaba vermelha e a goiaba branca apresenta maior interesse comercial

Planta rústica que cresce em todo tipo de solo e graças à sua extrema vitalidade e resistência, a goiabeira pode ser cultivada até mesmo em regiões subtropicais. Eurico Teixeira afirma que a diversidade de nomes indígenas existentes para designar o fruto da goiabeira demonstra que a goiaba é planta de distribuição vasta e bastante antiga: xaixocotl, no México; shuinto na língua quéchua do Peru; guayaba ou guava nas Antilhas; aracaiba, araca-guaçu, araca-goiaba ou goiaba no Brasil.

No Brasil, o período de safra ocorre de janeiro a abril, com exceção do Pará, onde a safra vai de maio a agosto e no Paraná, de setembro a março.

A goiaba (*Psidium guajava* L.), fruto de forma ovóide, de coloração verde-amarelada, quando maduro, muito aromático, possui polpa abundante branca ou vermelha.

A goiaba é uma boa fonte de ácido ascórbico, cuja quantidade varia de acordo com a variedade da fruta, geralmente entre 100 a 169 mg/100g. Apresenta também teor de riboflavina, atividade de vitamina A equivalente a 1650 unidades/100g e de teor de ferro de 0,2 a 0,9 mg/100g, além de seu valor energético de 62 a 65 cal/100g citado por ARGANDOÑA (1999).

As características físicas e químicas podem apresentar variações não só em função do estado de maturação das frutas, mas também em função do tipo de goiaba. A composição das frutas frescas pode variar em função da variedade, fertilidade do solo, grau de maturação, entre outros fatores. A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 mostram estas características apresentadas por ARGANDOÑA (1999).

Tabela 2.1 Valores médios das características físicas da goiaba vermelha.

Características físicas	Médias
Comprimento (cm)	5,110
Diâmetro (cm)	4,983
Peso (g)	67,956
Massa específica real (g/cm ³)	0,877
Massa específica aparente (g/cm ³)	0,477

Fonte: ARGANDOÑA (1999)

Tabela 2.2 Composição química da variedade vermelha.

Análises químicas	Médias
Sólidos totais (%)	15,73
Açúcares totais (%)	6,21
Açúcares redutores (%)	4,50
Fibras (%)	5,06
Cinzas (%)	0,53
pH	5,90

Fonte: ARGANDOÑA (1999)

Além de ser uma fonte rica em Vitamina C, a goiaba é uma boa fonte de niacina e β - caroteno. A pectina é encontrada na fruta madura em torno de 1%. Os ácidos não voláteis encontrados foram identificados como láctico, málico, cítrico, ascórbico e galacturônico. Os aromas da fruta são estáveis ao tratamento térmico. É provável que os constituintes aromáticos sejam do tipo éster e carbonílico (ARGANDOÑA, 1999).

A goiaba, além de ser consumida ao natural, tem grande importância na indústria de doces, onde seus produtos se enquadram no grupo dos produtos denominados exóticos (ARGANDOÑA, 1999).

Foi nos anos 70 que se iniciou, no Brasil, a produção de goiabas “in natura” em escala industrial. Cultivada em grandes pomares voltados para o comércio, para a exportação e para a indústria de doces e sucos, a produção de goiaba se sofisticou.

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de goiaba juntamente com o México, Paquistão, Colômbia, Egito, África do Sul e Índia. Os principais Estados produtores do Brasil são: São Paulo, Pernambuco, Rio Grande do Sul e Paraíba,

produzindo juntos de 1988-1994 mais de 90% da produção nacional (ARGANDOÑA, 1999).

A produção de goiaba gera empregos e é certeza de bons negócios no Vale do São Francisco, em Pernambuco. A região é responsável por mais de 30% da produção nacional.

A goiaba brasileira encontra-se em momento especial neste começo de século, com a perspectiva de, finalmente, conseguir melhor posição no universo de comercialização de frutas e seus derivados. Sendo um produto tradicional no mercado do País, a goiaba já não tem representado um atrativo de consumo, sobretudo em uma época em que produtos estrangeiros são também oferecidos a preços convidativos e com o apelo de um exotismo explorado pela publicidade. Em outras palavras, uma séria concorrência à fruta tropical, cuja árvore quase todos os brasileiros conheceram no quintal de suas casas. Mas, para tanto, é necessário descobrir novos valores em produtos tradicionais e desenvolver formas de consumo diferentes daquelas já conhecidas. Isso tem acontecido com a goiaba brasileira. Graças aos esforços da Associação Brasileira dos Produtores de Goiabas - Goiabrás, muito tem sido "descoberto" a respeito da goiaba nos últimos tempos, sobretudo em relação aos benefícios que o consumo da fruta pode trazer à saúde humana. Apesar de fruta conhecida por quase todos os brasileiros, poucos sabem das suas características no que diz respeito a micronutrientes, e, por essa razão, quase nenhuma importância tem sido dada ao seu consumo.

No Estado da Paraíba, são cultivadas muitas variedades de frutas nativas e exóticas; esse cultivo tende a crescer com os projetos do Governo do Estado. Suas árvores frutificam em abundância com curto período de safra, ocasionando grande desperdício devido à perecibilidade dos frutos. Desta forma, faz-se necessário o aproveitamento da fruta nos processos de conservação e comercialização de novos produtos.

2.2 Caracterização - Propriedades Físicas, químicas e térmicas de produtos agrícolas.

- Propriedades físicas

O estudo das propriedades física e química dos produtos agrícolas tem sido um fator de muita importância para preservação dos mesmos em unidades de armazenamentos como também para o desenvolvimento de projetos de máquinas e equipamentos agroindustriais.

A massa específica real do produto é importante, pois podemos relacionar com a porosidade do leito mediante a determinação da sua massa específica aparente. A porosidade influencia a queda de pressão no escoamento através da fase, muitos trabalhos mostram que a porosidade de um leito estático depende do tamanho da partícula e da distribuição de tamanhos, da forma e da rugosidade superficial da partícula e do método de empilhamento das partículas (pedaços cúbicos de goiaba).

RIBEIRO *et al* (2002) estudaram as propriedades físicas de produtos agrícolas e compararam os resultados experimentais encontrados com os dados de literatura e verificaram que os métodos utilizados foram eficazes.

ARAÚJO *et al* (2002) estudaram o efeito da temperatura sobre a massa específica de polpa de cupuaçu sob diferentes teores de sólidos e avaliaram alguns modelos propostos na literatura.

PINTO *et al* (1997) 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 de massa específica e umidade adimensional obtidos pela correlação de LOZANO *et al* (1983) que para diferentes temperaturas e obtiveram bons resultados.

O comportamento de um leito depende sensivelmente da natureza das partículas que o constitui. GELDART (1973) sugeriu uma classificação de partículas em quatro categorias: A, B, C e D, como mostra a Figura 2.1. O diagrama para a referida classificação apresenta algumas modificações com relação às características para a divisão de cada zona, segundo ZENZ (1983).

A classificação de GELDAR (1973) é apresentada a seguir:

CATEGORIA A: são as partículas, para as quais a velocidade mínima de fluidização e a velocidade de aparição das bolhas são diferentes. As características das partículas dessa categoria são aproximadamente as seguintes:

$$\rho_p < 1,4 \text{ g/cm}^3 \text{ e } 20\mu\text{m} < d_p < 100 \mu\text{m}$$

CATEGORIA B: são os materiais para os quais a velocidade de mínima fluidização e velocidade mínima de aparição das bolhas se confundem. Ou seja, as bolhas se iniciam à velocidade mínima de fluidização ou ligeiramente acima. Suas características são:

$$1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_p < 4,0 \text{ g/cm}^3 \text{ e } 40\mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$$

A curva de Geldart separando as zonas A e B é dada pela equação:

$$(\rho_p - \rho_g) d_p = 225 \text{ (g/cm}^3\text{)} \cdot \mu\text{m}$$

CATEGORIA C: os pós do tipo C caracterizam-se por sua forte tendência à aglomeração. As partículas possuem pequenas dimensões. $d_p = 30 \mu\text{m}$

CATEGORIA D: a fluidização destas partículas é instável, na maioria dos casos adequada para leitos de jorro. As partículas possuem tamanhos bastante elevados.

$$d_p > 600 \mu\text{m}$$

A curva do diagrama separando as zonas B e D é dada pela equação:

$$(\rho_p - \rho_g) d_p^2 = 10^6 \text{ (g/cm}^3\text{)} \cdot \mu\text{m}$$

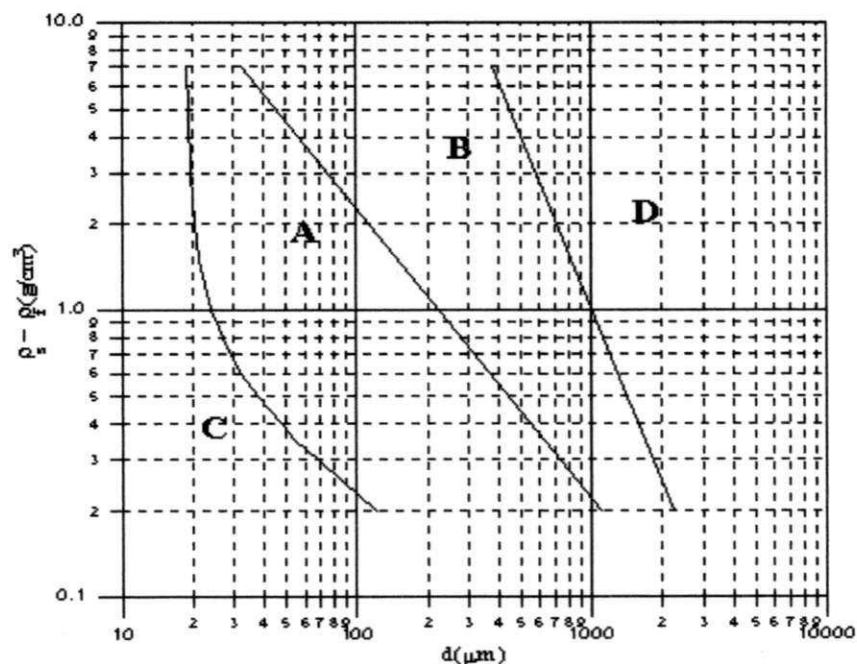


Figura 2.1 Representação gráfica da classificação de GELDART (1973)

Em 1984 SAXENA e GANZHA propuseram outra classificação baseada sobre a análise do escoamento de uma partícula isolada. As transições são traduzidas por números de Reynolds em mínima fluidização, Re_{mf} , em função do número de Arquimedes, Ar . Quatro grupos são definidos a partir desses valores.

Grupo	Re_{mf}	Ar	Regime
I	$1 \leq Re_{mf} \leq 10$	$3,35 \leq Ar_f \leq 21700$	laminar
IIA	$10 \leq Re_{mf} \leq 40$	$21700 \leq Ar_f \leq 1,3 \cdot 10^5$	transitório 1
IIB	$40 \leq Re_{mf} \leq 200$	$1,3 \cdot 10^5 \leq Ar_f \leq 1,6 \cdot 10^6$	transitório 2
III	$Re_{mf} > 200$		turbulento

Diversos trabalhos com partículas classificadas na categoria A e B segundo GELDART (1973) apresentam boa fluidização. Muitos pesquisadores têm sugerido modelos para representar os mecanismos pelos os quais sólidos de granulometria e/ou densidades diferentes se misturam e segregam em leito fluidizado. Segundo esses autores, ambos os fenômenos dependem essencialmente das características de bolhas no leito fluidizado.

WIRSUM *et al* (2001) estudaram o comportamento de mistura de partículas de sistema binário em leito fluidizado com bolhas variando a velocidade de fluidização, o tamanho e a densidade das partículas e a fração volumétrica dos sólidos maiores. Os resultados apresentados mostram que a separação de partículas grandes por flotação é aparente em sistemas de leito fluidizado com bolhas particularmente a baixas velocidades.

GUPTA e BERRUTI (2000) e SMOLDERS e BAEYENS (2001) estudaram o leito fluidizado com circulação que opera a altas velocidades do gás, ou seja, normalmente opera em regime de “fluidização rápida”. Em altas velocidades do gás, as duas fases heterogêneas característica do leito fluidizado é substituída por uma condição de uniformidades onde grandes bolhas ou porosidades são de um modo geral ausente. Este então chamados de regime “turbulento” de leito fluidizado.

KOZANOGLU *et al* (2002) estudaram a hidrodinâmica da fluidização de partículas grandes operando em pressões reduzidas. Os resultados experimentais mostraram que o aumento da velocidade mínima de fluidização diminui a pressão de operação. Esta tendência foi confirmada por LLOP *et al*, citado pelo autor.

SNIEDERS *et al* (1999) estudaram a dinâmica de partículas grandes em leito fluidizado conectado a um compartimento quadrático para avaliar a taxa de circulação de sólidos e a distribuição de das partículas após o tempo de fluidização.

BI e GRACE (1995) estudaram o efeito do método de medição usado na velocidade para definir o início da fluidização turbulenta.

- Propriedades químicas

Segundo MIRANDA *et al* (2004) o conceito de vitamina C foi determinado no século XX quando a preocupação era encontrar a cura para o escorbuto. Atualmente são estudadas a ação antioxidante e protetora das células, da mesma forma que o alfa tocoferol e o betacaroteno. Os autores avaliaram os teores de vitamina C de 10 marcas de polpas de frutas comercializadas em Salvador, os resultados mostraram que quando comparados com os padrões estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, 10 % das polpas de acerola e 57 % das polpas de goiaba apresentaram teores inferiores ao limite mínimo, enquanto que as polpas de caju 100 % das marcas pesquisadas estavam de acordo aos padrões.

Segundo CARNEIRO *et al* (2004) o ácido ascórbico é essencial e importante para o organismo humano, na biossíntese do colágeno, metabolismo de aminoácidos, formação de adrenalina, desintoxicação hepática, entre outras inúmeras funções. Os autores determinaram a quantidade de vitamina C em diversas frutas comparando a metodologia que utiliza o 2,6 DFI (titulométrico) e o método enzimático, estes verificaram que tal quantidade pode ser super ou subestimada pelo método DFI. Para a goiaba vermelha os valores encontrados foram 271,37 mg/100g e 133 mg/100g da amostra, respectivamente para o método enzimático e o método DFI.

A vitamina C definida genericamente como ácido ascórbico, é um importante nutriente e essencial para os seres humanos, principalmente pela sua propriedade antioxidante. Porém, é muito sensível a destruição quando a fruta é submetida a condições adversas de manipulação e/ou armazenamento ARGANDOÑA *et al* (2004). Além disso, a vitamina C é facilmente oxidada, especialmente em soluções aquosas e alcalinas. Conseqüentemente, o ácido ascórbico é usualmente considerado como índice de qualidade nutricional durante o processamento e armazenamento de alimentos. Os autores estudaram o efeito do pré-tratamento osmótico na instabilidade do ácido ascórbico em goiabas desidratadas, os resultados encontrados mostraram que o tempo de desidratação osmótica não influenciou na velocidade de degradação de vitamina C. Além disso, a incorporação de açúcares nas goiabas no pré-tratamento osmótico favoreceu a retenção de 30 a 35% de ácido ascórbico durante a secagem, que foi totalmente degradada para amostras de goiaba que não sofreram este pré-tratamento.

Segundo TORREGGIANI e BERTOLO (2001) a inclusão de uma etapa de pré-tratamento osmótico na secagem de frutas tem sido considerada por diversos

pesquisadores como decisiva na obtenção de produtos desidratados de melhor qualidade final.

Segundo ARAÚJO *et al* (2004) durante o amadurecimento de frutos o conteúdo de ácido ascórbico pode variar devido a vários fatores intrínsecos e extrínsecos.

RAIMUNDO *et al* (2004) estudaram a degradação do teor de vitamina C em suco de laranja pasteurizado durante 30 dias verificando uma diminuição do conteúdo de vitamina C.

- Propriedades térmicas

O conhecimento das propriedades térmicas dos produtos agrícolas é importante para um adequado dimensionamento e otimização de equipamentos e operações unitárias necessárias, especialmente a secagem. Segundo MOHSENIN (1980), torna-se necessário à determinação do calor específico, condutividade e difusividade térmica para prever as mudanças térmica internas de um produto agrícola sujeito à secagem. Por outro lado, de acordo com LUIKOV (1966), devido à heterogeneidade dos meios porosos capilares, vários são os fatores que influenciam o fluxo e a quantidade de calor que atravessa o produto, podendo os valores de condutividade e difusividade térmica variar devido às propriedades estruturais do meio, especialmente a sua massa específica, porosidade e teor de umidade.

O calor específico é uma propriedade definida como a quantidade de energia necessária para elevar de um grau de temperatura uma massa específica de uma substância. A condutividade térmica representa a propriedade que relaciona a taxa com que o fluxo de calor escoar através do material em função de um gradiente de temperatura, enquanto a difusividade térmica refere-se à capacidade do material de conduzir e acumular energia térmica. SOUSA e PEREIRA (1996) relataram que a condutividade térmica de materiais termosensíveis varia com a umidade, e a obtenção da curva que descreve o fenômeno tem grande utilidade em aplicações de secagem.

SILVA *et al* (2002) estudaram o calor específico e as propriedades físicas de algumas frutas tropicais em função do teor de umidade e observaram que o método das misturas calorimétricas é adequado, por outro lado verificaram que o calor específico apresenta valores mais elevados do que os encontrados para grãos devido à presença de maior umidade na sua composição.

AFONSO JÚNIOR *et al* (2000) estudaram as propriedades térmicas da massa granular do café: calor específico, condutividade e difusividade térmica, para diferentes tipos de preparo a diferentes teores de umidade. Os autores concluíram que as propriedades térmicas comportam-se de forma similar àquelas da maioria dos produtos agrícolas, ou seja, o calor específico e a condutividade térmica aumentam com a elevação do teor de umidade enquanto a difusividade térmica diminui com o aumento da umidade do produto.

CHANDRASEKAR e VISWANATAN (1999) estudaram as propriedades térmicas do café na faixa de umidade (b.u.) de 9,9-30,6 %, e observaram que a condutividade térmica e o calor específico aumentam com o teor de umidade, enquanto que a difusividade térmica apresenta um efeito contrário.

MEDEIROS *et al* (2000) determinaram as propriedades físicas e termodinâmicas de polpas de frutas tropicais avaliando o efeito da composição química e, observaram que as frutas mais ácidas tendem a apresentar elevados valores da capacidade calorífica e difusividade térmicas mais baixas, em relação a condutividade térmica não verificaram qualquer tendência no comportamento frente à variações no conteúdo de água, de sólidos solúveis ou na acidez. Contudo observaram que polpas com elevadas concentrações de fibras apresentam baixas condutividades térmicas.

SOUSA e PEREIRA (1996) estudaram a condutividade térmica efetiva da gelatina em função da umidade em um processo de secagem industrial e observaram uma forte dependência linear da condutividade térmica da gelatina com o teor de umidade, variando entre 0,128 e 0,467 kcal/h m ° C, para umidades de 10 a 75 % em base úmida, respectivamente.

2.3 Secagem

Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás a uma temperatura e a uma umidade relativa fixas, manifesta-se sempre o seguinte tipo de comportamento. Imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir a temperatura de bulbo úmido do gás. Uma vez que as temperaturas do sólido tenham atingido a temperatura de bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante (período de secagem a taxa constante). Esse período tem seu término quando o sólido atinge o teor de umidade crítico. Além desse ponto, a temperatura da superfície eleva-

se e a taxa de secagem cai rapidamente. Apesar desse período de taxa decrescente poder ser prolongado, a remoção da umidade é muito pequena. Quando a taxa de secagem aproxima-se de zero, atinge-se o teor de umidade de equilíbrio, que é o menor valor de teor umidade a ser obtido para as condições desenvolvidas. O andamento desse processo pode ser visto na Figura 2.2 e Figura 2.3.

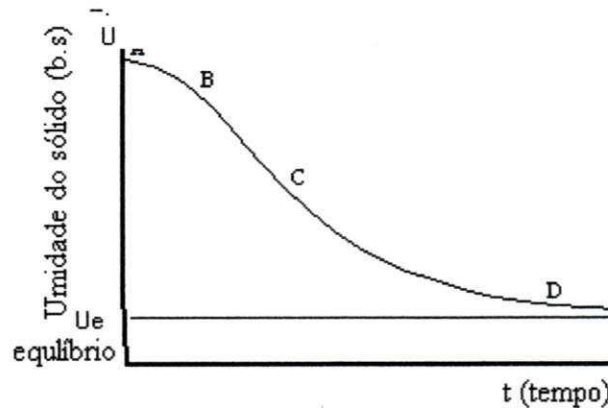


Figura 2.2. Curva característica da cinética de secagem.

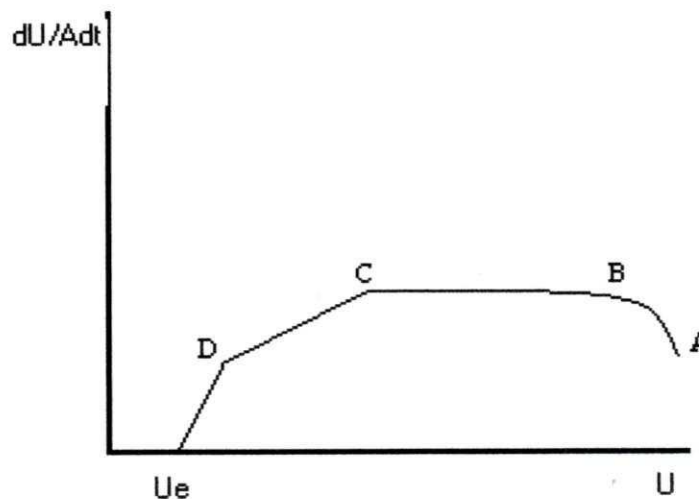


Figura 2.3. Taxa de secagem em função da umidade.

A taxa de secagem, definida por: $W_s = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt}$

O segmento AB representa o período de ajuste de secagem em regime; o segmento BC é o período de secagem a taxa constante, no qual toda superfície do sólido está saturada de água. Neste período, a temperatura do material procura se ajustar às condições de secagem. A secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa

líquida sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. Ou seja, a taxa de secagem independe do teor de umidade. Este período termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico (ponto C). A partir deste ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente; o segmento CD equivale ao período a velocidade decrescente, a qual se modifica continuamente no decorrer de todo o resto do ciclo de secagem. A superfície fica cada vez mais pobre em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor do que a velocidade com que a massa é transferida da superfície.

Para expressar o mecanismo de difusão e a velocidade de transferência de umidade, recorre-se a Lei de Fick, que para geometria de placa plana e transferência de calor unidirecional, pode ser escrita pela Equação 2.1:

$$\frac{du'}{dt} = D_L^* \nabla^2 U \quad (2.1)$$

em que

D_L^* - coeficiente de difusão do líquido.

Como muitos sólidos alteram suas características durante a secagem, D_L^* raramente é constante. Para esta equação, além das condições de contorno deve-se conhecer as características de D_L^* .

No Brasil a secagem natural, na qual os grãos ficam espalhados em uma camada fina, exposto ao calor do sol, é amplamente difundida e predominante em relação à secagem artificial, também chamada de mecânica, realizada por meio de secadores. A última é uma operação relativamente cara, pois demanda uma grande quantidade de energia para o aquecimento e transporte do ar, porém segundo BROOKER *et al* (1974), apresentam algumas vantagens:

- colheita antecipada, reduzindo assim perdas devido as chuvas e trincamento naturais;
- planejamento da colheita otimizando as condições de utilização de máquinas e de mão-de-obra;
- maior tempo de estocagem sem deterioração dos grãos;
- preços mais elevados do produto em determinadas épocas;

- aumento das possibilidades de utilização do grão, pois o grau de germinação não é prejudicado;
- comercialização do produto com melhor qualidade.

2.3.1 Modelos

Para se realizar a otimização da operação de secagem é necessário conhecer as variáveis que afetam os mecanismos de transporte de umidade e calor, o que permitirá um melhor e mais rígido controle da operação. O uso de modelos matemáticos adequados e a simulação do processo por meio destes podem minimizar custos e significar em uma mudança de escala, e talvez em um protótipo piloto. A modelagem matemática tem como objetivo a simulação da operação para evitar desperdício da matéria-prima em ensaios experimentais, como também para estudo de *scale-up*.

A cinética de secagem de produtos agrícolas e frutas tropicais pode ser descrita por um modelo fickiano simples, com coeficiente de difusão efetivo constante. No entanto, é freqüente encontrar comportamento cinético que se afasta deste modelo simplificado, o qual não é adequado para descrever completamente a operação. Alguns autores atribuem o afastamento do modelo fickiano nessas condições à incidência de outros mecanismos não difusionais. Um dos motivos que influenciam a não aplicabilidade do modelo, especialmente no caso das frutas, é o efeito de encolhimento, o qual não é considerado na maioria das aplicações.

Segundo LUIKOV (1966), os mecanismos propostos para o movimento de umidade em sólidos são: difusão de líquido devido ao gradiente de concentração, difusão de vapor devido ao gradiente de pressão, movimento de água devido as forças capilares, fluxo de líquido e vapor devido ao gradiente de pressão total, difusão superficial e fluxos provocados por evaporação e condensações sucessivas.

Diferentes teorias tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O principal objetivo é descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem são dois: os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos. A formulação desses modelos, desenvolvida a partir do comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de

transporte constantes, possibilitando uma descrição similar da taxa de secagem MAYTA *et al* (1996).

2.3.1.1 Teoria da Difusão

SHERWOOD (1929a, b) desenvolveu muitas pesquisas sobre a operação de secagem de sólidos, propondo que o movimento da umidade num sólido ocorre pelo mecanismo de difusão em fase líquida, e que a Lei de Fick pode ser aplicada para prever a velocidade do movimento da umidade, conforme mostrado na Equação 2.1.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \psi^2} + \frac{q}{\psi} \frac{\partial U}{\partial \psi} \right) \quad (2.2)$$

A Equação 2.2 apresenta várias soluções para geometrias diferenciadas: plana ($q = 0$), cilíndrica ($q = 1$) e esférica ($q = 2$); considerando apenas o fluxo na direção radial e com as seguintes condições iniciais e de contorno:

Para placa plana: $\psi = L$

Para cilindros e esferas: $\psi = R$

Condição Inicial

$$CI \quad U(\psi, 0) = U_0 \text{ (superfície)} \quad (2.3)$$

Condição de Simetria

$$CC1 \quad \left. \frac{\partial U}{\partial \psi} \right|_{\psi=0} = 0 \quad (2.4)$$

Condição da superfície ($t \rightarrow \infty$)

$$CC2 \quad U(\psi, t) = U_{eq} \quad (2.5)$$

CRANCK (1975) apresentou as soluções analíticas para as três geometrias citadas, conforme Figuras 2.6 a 2.8:

Placa plana

$$\frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4l^2}\right) \quad (2.6)$$

Cilindro infinito

$$\frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(- \frac{\mu_n^2 D_{eff} t}{R_p^2}\right) \quad (2.7)$$

Esfera

$$\frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(- \frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R_p^2}\right) \quad (2.8)$$

Quando a secagem é controlada pela difusão, é importante a determinação dos coeficientes de difusão para o estudo quantitativo das características de secagem em relação às variáveis experimentais controladas tais como vazão de ar e a temperatura.

Vários estudos de secagem não consideram a umidade de equilíbrio, apenas a razão U/U_i (HAWLADER *et al.*, 1991, OLIVEIRA, 1999; ROMERO-PEÑA, 1999)

BROOKER *et al* (1974) na análise da secagem de grão, realizaram uma simplificação da equação de difusão em coordenadas esféricas para prever a secagem de vários materiais, empregando somente o primeiro termo da equação para calcular a taxa de secagem dos produtos. Ainda, segundo esses autores, as equações de secagem baseadas na teoria da difusão não representam com precisão o comportamento da secagem de grãos devido à escolha inadequada das condições de contorno nas soluções das equações e à incorreta consideração de que a difusividade de massa e a constante de secagem são independentes do teor de umidade.

Para a solução da Equação 2.2 são assumidas várias simplificações que não condiz com a realidade, pois o sólido tem uma estrutura celular heterogênea, a transferência não é unidirecional, a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos (na fase gasosa, e/ou na líquida, em poros de vários tamanhos), a temperatura do material aumenta durante o processo e ocorre o encolhimento com a evaporação da água.

DINCER e DOST (1995) propuseram modelos que consideram o fenômeno do encolhimento observando as taxas de secagem de diferentes materiais.

De acordo com a literatura, uma das formas mais utilizadas para obtenção das informações sobre a taxa de secagem é pelos experimentos de secagem em camada fina; nestes experimentos o ar em condição constante de umidade, temperatura e velocidade escoava através de uma camada delgada de material úmido. Esses estudos isoladamente não descrevem de maneira adequada o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, entretanto, podem representar um elemento de volume desses leitos BARROZO *et al.* (1998).

Os pesquisadores BARROZO *et al.* (1998) também ressaltam a importância do conhecimento das equações de secagem para o sucesso de projetos de secadores. A Tabela 3 apresenta algumas destas equações empíricas e/ou semi-empíricas disponíveis na literatura para descrição da cinética de secagem de materiais sólidos.

Tabela 2.3 - Equações de secagem

Equações	Referências	Número
$U^* = e^{-Kt} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	LEWIS (1921)	2.9
$U^* = A \cdot e^{-Kt} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	BROOKER <i>et al.</i> (1974)	2.10
$U^* = A \cdot \left(e^{-Kt} + 19 \cdot e^{-9 \cdot Kt} \right)$ $K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	HENDERSON e HENDERSON (1968)	2.11
$U^* = e^{-Kt^n} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	PAGE (1949)	2.12
$U^* = e^{(-Kt)^n} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	OVERHULTZ <i>et al.</i> (1973)	2.13

Fonte: BARROZO *et al.* (1998)

em que

$$U^* = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e}$$

Pela análise da literatura específica, verifica-se que as equações de secagem puramente empíricas são boas opções para a predição do processo de secagem, dentro das condições operacionais para as quais foram estabelecidas. O maior problema está na correta determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e das propriedades físicas dos produtos a secar (FARIA, 1998)

2.3.2 Curva de sorção – Comportamento higroscópico

O teor de umidade de equilíbrio é particularmente importante na secagem, uma vez que representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Assim, o teor de umidade de equilíbrio de um sólido pode ser definido como sendo o teor de umidade que este apresenta quando a pressão de vapor de água em sua superfície se iguala a pressão de vapor de água do ar de secagem que o envolve.

O teor de umidade de equilíbrio é definido como sendo a quantidade de massa de água por unidade de massa total (base úmida), que um produto contém quando é submetido a condições controladas de temperatura e umidade do ar ROA e ROSSI (1999).

Os estudos mostram que a maior ou menor intensidade com que a água se liga ao alimento pode ser expressa pela atividade de água, a qual pode ser definida como a relação entre a pressão de vapor de água do ar e a pressão de vapor de água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Em alimentos, isto significa a relação entre a pressão de vapor de água no alimento e a pressão de vapor de água pura, medidas à mesma temperatura. Seu valor é extremamente importante, já que influi no desenvolvimento de microorganismos, velocidade de reações enzimáticas, oxidação de lipídeos, hidrólise e escurecimento não enzimático, assim como a cristalização e retrogradação que podem ocorrer em alimentos. O conceito de atividade de água nos alimentos permite quantificar o grau de liberdade de água contida no mesmo. Portanto, o controle da atividade de água é muito importante na preservação e desenvolvimento de novos produtos alimentícios, SANCHEZ (1994). A atividade de água pode definir o tipo de tratamento térmico que o produto pode sofrer.

A relação entre a umidade de equilíbrio de um sólido e a atividade de água em uma dada temperatura é expressa graficamente através de isotermas de sorção LABUZA (1988).

A atividade de água de um alimento não é somente função do conteúdo de água, mas também de substâncias as quais exercem o efeito de ligação da água na estrutura do alimento.

A relação existente entre a água e outros componentes de um produto definem a sua higroscopicidade que é muito marcante nos produtos alimentícios e torna-se uma característica fundamental que influencia o processo de manuseio, processamento, estocagem e consumo de materiais biológicos, PRADO *et al* (1999). Embora um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas, tenha sido proposto para o cálculo da umidade de equilíbrio, BROOKER *et al* (1974), nenhuma equação teórica é capaz de prever exatamente a umidade de equilíbrio de produtos agrícolas, em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa.

O método mais utilizado para a determinação das isotermas de equilíbrio propostos na literatura é: O método estático de sais saturados em água destilada para uma faixa de umidade relativa de 10 a 80 %. Este método apresenta como principal desvantagem à demora na obtenção dos teores de umidade de equilíbrio, além de fornecer resultados não muito confiáveis para temperaturas e umidades relativas altas, devido ao risco de deterioração do produto.

ASCHERI (1999) realizou um estudo de comparação das características de adsorção de água de três amostras de microcápsulas de óleo essencial de laranja, obtidas pela secagem por atomização de três diferentes emulsões preparadas pela adição de óleo essencial de laranja (**oel**), a uma solução aquosa de material de parede (**mp**) constituída de capsul (5,0, 0,0 e 10,0 %), goma arábica (5,0, 10,0 e 0,0 %) sendo constante para as três emulsões a maltodextrina (36,0 %), água (44,0 %) e óleo essencial (10,0 %). A microencapsulação foi realizada nas temperaturas de 220 e 110 °C de ar de entrada e saída do secador usando um atomizador rotativo a 20.000 rpm. Com base à determinação das isotermas de adsorção de água a 30, 40 e 50 °C e usando o modelo de GAB para ajustar os pontos experimentais, foram avaliadas as características das isotermas, a estabilidade e área superficial de adsorção de água das diferentes amostras de microcápsulas obtidas. Os resultados indicaram ser importante o estudo das características de adsorção de água para estimar a estabilidade das microcápsulas de **oel** e a comparação destas mostrou que as microcápsulas obtidas pela secagem por atomização da emulsão preparada com 5,0 % de capsul e 5,0 % de goma arábica apresentaram o melhor resultado.

Vários modelos matemáticos para as isotermas de equilíbrio são propostos na literatura específica, sendo os mais utilizados a equação de BET (Brunauer-Emmer-Teller), a equação de GAB e a equação de Henderson a qual foi utilizada neste trabalho. Este último modelo foi usado por Chen e Clayton para modelagem de isotermas de dessorção de arroz utilizando temperaturas entre 10 e 40°C FALABELLA *et al* (1992).

BRUNAUER, EMET e TELLER (1938) tomando a conceituação de LANGMUIR (1918) de adsorção na monocamada molecular, propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas moleculares, cuja equação diz que a capilaridade define o limite superior do número de monocamadas CHIRIFE e IGLESIAS (1978). A equação geral de BET para isotermas pode ser escrita na seguinte forma:

$$U_c/U_m = C_{BET}a_w/(1 - a_w) [1 - (n + 1)a_w^n + n a_w^{n+1}/1 + (C_{BET} - 1)a_w - C_{BET}a_w^{n+1}] \quad (2.14)$$

A forma usual da equação de BET é dada por:

$$a_w/(1 - a_w) U = 1/(U_m C_{BET}) + a_w (C_{BET} - 1)/U_m C_{BET} \quad (2.15)$$

que corresponde a Equação (2.14) com um número infinito de camadas adsorvidas.

em que:

a_w , - atividade de água

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

U - teor de umidade de equilíbrio expressa em base seca

U_m , - teor de umidade na monocamada molecular

GUGGENHEIM-ANDERSON-BOER (GAB) estenderam as teorias de adsorção física de LANGMUIR e BET, resultando numa equação triparamétrica, conhecida como equação de GAB, matematicamente adequada para aplicações em engenharia e que permite um ótimo ajuste de dados de sorção de quase todos os alimentos até atividade de água de 0,9. Este modelo está sendo utilizado em vários laboratórios oficiais de alimentos nos EUA e na Comunidade Européia como padrão de descrição e comparação de isotermas por apresentar maior quantidade de parâmetros, sendo recomendada pelo projeto Europeu COST 90 GOUVEIA (1999). A equação de GAB é dada por:

$$U_e/U_m = C_{GAB} K_{GAB} a_w / (1 - K_{GAB} a_w) (1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w) \quad (2.16)$$

onde C_{GAB} e K_{GAB} são as constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes em um dado sítio de sorção. Quando K_{GAB} for igual a unidade a equação de GAB se reduz a equação de BET.

O modelo de GAB é similar ao de BET e assume a adsorção física localizada nas multicamadas, sem interações laterais, porém com as seguintes vantagens, segundo RAO e RIZVI (1986):

- a) descreve a sorção de água de todos os alimentos com atividade de água variando de 0 a 0,9;
- b) é uma equação matemática de três parâmetros relativamente simples;
- c) os parâmetros utilizados têm significado físico no processo de sorção; e
- d) é capaz de descrever o efeito da temperatura no processo de sorção.

Em 1940, Halsey, desenvolveu uma equação que considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Ele assumiu que a magnitude do parâmetro b caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se b é grande, a atração entre o vapor e o sólido é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se b é pequena, a força de atração predominante são de Van der Waals e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície, sendo a equação dada por:

$$a_w = \exp [-a / RT (U/U_m)^b] \quad (2.17)$$

em que:

a_w - atividade de água

U - teor de umidade de equilíbrio expressa em base seca

U_m - teor de umidade na monocamada molecular

a e b - parâmetros de ajuste

R - constante universal dos gases

T - temperatura de realização do ensaio

O modelo empírico proposto por Henderson para obtenção da Umidade de equilíbrio é dado pela Equação 2.18:

$$1 - a_w = \exp[-(B_2 \cdot U^{B_1})] \quad (2.18)$$

Onde B_1 e B_2 são parâmetros que dependem da temperatura.

2.3.3 Secagem de frutas

Diversos trabalhos foram realizados para a obtenção de polpa de frutos tropicais desidratados na forma de pó, utilizando a técnica de secagem em leito de jorro, sendo encontrado na literatura diversas publicações.

HUFENUSSLER e KACHAN (1993) estudaram a desidratação de purê de banana, analisando a umidade do pó em relação ao obtido em secadores spray e a vácuo, promovendo também uma análise sensorial, no qual o sabor do purê reconstituído foi comparado com o do purê original e com o produzido em secadores de tambor rotativos. Os resultados destes testes mostraram que o pó obtido em secador de leito de jorro atendia aos padrões de conservação exigidos de umidade, e que o sabor do purê reconstituído não apresentava diferença significativa do original, o mesmo resultado não foi apresentado com o purê reconstituído do pó obtido em secador rotativo.

Em trabalho posterior, KACHAM e CHIAPPETA (1988) apresentaram os resultados obtidos na desidratação da pasta de tomate em leito de jorro, com ênfase aos dados fluidodinâmicos do equipamento. A caracterização do pó de tomate obtido da pasta reconstituída foi objeto de um segundo trabalho desenvolvido por esses autores, cujos resultados referem-se ao conteúdo de umidade do pó, a umidade de equilíbrio e de aglomeração, ao tempo de reconstituição da pasta e algumas propriedades desta, tais como: pH, acidez, açúcares redutores, viscosidade e cor. Com relação à umidade do pó, apenas o obtido em ensaios a 80 °C foi considerado viável para utilização comercial. Em relação às outras propriedades, os autores mostraram que a pasta atendia aos padrões de qualidade exigidos. Os testes de cor e viscosidade, entretanto, apontaram para uma diminuição da viscosidade e mudança de cor em comparação com a pasta original.

ALMEIDA (1991) apresentou os primeiros resultados dos estudos sobre secagem de polpa de umbu em secador de leito de jorro e que se referem aos testes fluidodinâmicos do equipamento e a influência da temperatura de operação e vazão do ar, sobre a umidade do produto, eficiência térmica e rendimento do processo. Os testes preliminares fluidodinâmicos realizados com polpa de umbu efetuados com cargas

limitadas à região cônica da coluna mostraram uma diminuição na vazão de jorro mínimo. Em relação à influência da temperatura e a vazão do gás, sobre a umidade do produto, os resultados apresentados mostraram que a umidade do produto obtido cresce com a elevação da temperatura até um valor máximo, passando então a decrescer, e que altas vazões do ar de secagem provocaram um maior teor de umidade do pó obtido. A eficiência térmica foi maior para temperaturas e vazões baixas, enquanto o rendimento do processo aumentou em temperaturas e vazões mais elevadas. Posteriormente, estudando a cinética de secagem da polpa de umbu em leito de jorro, LIMA (1993) constatou que esta ocorria à taxa constante. Suas curvas de secagem mostraram que o tempo para atingir o estado estacionário era de 15 a 20 minutos, dependendo das condições operacionais.

MOREIRA (1991) estudou os efeitos da temperatura de operação sobre o teor de vitamina C do pó de umbu, obtido mediante secagem em leito de jorro, concluindo que faixas de temperatura entre 70 e 80 °C favorecem a preservação da vitamina C, fato este atribuído à secagem mais rápida, que evita a degradação do produto.

ALSINA *et al* (1997) estudaram a cinética de secagem de acerola em equipamento de escala de laboratório avaliando o efeito da temperatura do ar de secagem numa faixa de 60 a 80 °C e velocidade do gás entre 0,7 a 1,5 m/s. Nestas condições, os autores não observaram influência significativa da velocidade do ar na taxa de secagem, contudo observou-se a influência da elevação da temperatura. Os pesquisadores utilizaram uma equação empírica incluindo o efeito de encolhimento para descrever a cinética de secagem, a qual ajustou satisfatoriamente os dados experimentais.

PANAGIOTOU *et al* (1999) investigaram o fenômeno de transferência de massa durante a desidratação osmótica de maçã, banana e kiwi em solução osmótica de glicose e de sacarose. Os autores estudaram os efeitos da temperatura, tamanho da amostra, velocidade de agitação, concentração do agente osmótico e temperatura de imersão. Os resultados mostraram que a glicose conduz a maior perda de água.

VAZQUEZ *et al* (1999) estudaram o efeito de vários tratamentos químicos na cinética de secagem de uvas de Moscatel a 60 °C. Eles observaram que os dados experimentais ajustaram bem um modelo que leva em consideração o tamanho da uva e o coeficiente efetivo de difusão em função da umidade do produto.

GALLALI *et al* (2000) estudaram o comportamento da secagem de frutas e legumes em um secador solar, avaliando as suas propriedades químicas, cinzas e açúcares.

KROKIDA *et al* (2000) estudando a cinética de secagem convencional e a vácuo de maçã, banana, cenoura e batata, observaram que a taxa de deterioração de cor aumenta com a elevação da temperatura.

TSAMI e KATSIOTI (2000) estudaram a cinética de secagem de ameixa seca, figo e morango, utilizando de um modelo matemático simples envolvendo um parâmetro característico (K) como função das variáveis de processo. O modelo foi avaliado com os dados produzidos em secador não convencional em laboratório. Os autores observaram também, a mudança de cor na secagem de abacate, ameixa seca e morango seca convencionalmente a 70 °C.

ACHARIYAVIRIYA *et al* (2000) desenvolveram modelos de difusão para secagem de mamão e manga glace, nos quais os coeficientes de difusão foram avaliados por regressão dos dados experimentais. Os autores desenvolveram três modelos. Nos modelos 1 e 2 consideraram os coeficientes de difusão efetivos constante e variando proporcionalmente com a umidade. No modelo 3, o fator de Arrhenius era uma função polinomial de segundo grau do conteúdo de umidade, e o coeficiente de difusão efetivo constante para um pequeno intervalo de tempo. Os autores verificaram que o modelo 3 predizia melhor os dados finais da secagem, enquanto os modelos 1 e 2 ajustavam bem os dados iniciais do processo.

KIRANOUDIS *et al* (2000) estudaram a cinética de secagem de maçã, pêra, kiwi e banana apresentando um modelo empírico de um parâmetro de transferência de massa, constante de secagem, como função das variáveis do processo. O modelo apresentou grande influência do tamanho característico da amostra e temperatura do ar de secagem.

RESENDE e KIECKBUSCH (1993) utilizaram um secador de bandeja com fluxo de ar ascendente na secagem de fatia de manga.

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

RODRIGUES *et al* (2004) estudaram a influência da desidratação osmótica como tratamento preliminar no tempo de secagem de abacaxi. A desidratação osmótica

foi realizada durante 4 horas em solução de sacarose a 45 e 55 °Brix e, a secagem em estufa com circulação de ar foi conduzida a 60 °C. Os resultados indicaram que para um mesmo tempo de secagem, a umidade final é significativamente menor para amostras submetidas à osmose.

ARAÚJO *et al* (2004) estudaram a modelagem da secagem de acerola pré-tratada osmoticamente e verificaram que o modelo difusional para esfera com quatro termos e considerando o encolhimento, apresentou um bom ajuste dos dados experimentais. Os autores observaram que o coeficiente de difusão efetivo diminui com o aumento da temperatura de secagem, os valores encontrados variaram de $0,6.10^{-4}$ a $1,8.10^{-4}$ cm^2/min .

TELIS *et al* (2000) estudaram a secagem de caqui incluindo o efeito do encolhimento volumétrico. No modelo proposto, o coeficiente de difusão foi calculado pela equação de Fick para uma esfera substituindo o valor do raio na equação por seus valores instantâneos do raio em função da umidade do produto.

2.3.4 Secagem de goiaba

O processamento de goiaba pelo método de secagem, visando uma melhor conservação e armazenamento em condições favoráveis, tem sido pouco estudada apesar desta operação unitária, segundo diversos pesquisadores, ser a mais conveniente para a conservação de produtos agrícolas. Até, então, na revisão bibliográfica realizada, apenas um trabalho de secagem foi encontrado na literatura. Outros trabalhos realizados dizem respeito às isotermas de equilíbrio da goiaba e caracterização físico-química.

ALMEIDA *et al* (1999) utilizaram um secador de leito fixo para secagem de fatias de goiaba. Os autores estudaram o efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de fatias de goiaba para diferentes espessuras e verificaram que o modelo difusional representava bem os dados experimentais.

ARGANDOÑA (1999) realizou um estudo sobre a desidratação de pedaços de goiaba pelo processo de desidratação osmótica em soluções de açúcar. A perda de peso, perda de água e ganho de soluto no fruto foram determinados em função da temperatura e da concentração de soluto, para a escolha da melhor condição de processo. O tratamento que apresentou melhor condição segundo autores foi à concentração de 60° Brix de solução de sacarose e 40 °C. Os frutos foram pré-tratados osmoticamente nestas condições e foram submetidos à secagem por ar quente em secador de bandejas em leito fixo, os autores observaram que o tempo de secagem para as amostras com pré-

tratamento osmótico foi menor do que para frutos se pré-tratamento. Na avaliação do produto em relação à cor e textura, o pré-tratamento osmótico favoreceu a retenção destas propriedades.

HUBINGER *et al* (1992) estudaram as isotermas de adsorção de umidade de goiaba. CARVALHO *et al* (1984) apresentam um estudo sobre a higroscopicidade de pó de goiaba liofilizada.

ARAÚJO (2001) estudou a cinética de secagem do fruto da goiabeira. Os autores determinaram as isotermas de dessecção da goiaba pelo método gravimétrico estático com temperaturas variando de 40 a 70 °C e umidade relativa de 0,31 a 0,82, obtidas com solução saturada de sais. O autor ajustou seus dados experimentais pelas equações de GAB, BET, Hasley, Smith e Oswin e verificou que as equações de GAB e Oswin ajustaram melhor os dados experimentais.

Em virtude de poucos estudos terem sido publicados sobre a secagem de goiaba, a necessidade de um estudo mais detalhado, do processamento da goiaba por métodos não-convencionais de secagem, torna-se evidente.

2.3.5 Encolhimento de Produtos agrícolas

SUZUKI *et al* (1976) estudaram o encolhimento de cenoura, batata, batata doce e rabanete utilizando a equação de KILPATRICK *et al* (1955) e mostraram que durante os primeiros estágios de secagem, o volume de encolhimento de vegetais e batata é igual ao volume de água eliminado por evaporação, mas para os estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida. Os autores apresentaram três modelos de secagem que relacionam as mudanças na área de superfície e no teor de umidade.

O primeiro modelo, uniforme 1, o encolhimento foi considerado igual ao volume de água perdida por evaporação durante todo o processo de secagem e na mudança na área superficial, devido ao encolhimento. É expresso na Equação 2.19 para materiais de superfície cúbica e esférica:

$$A/A_i = (V/V_i)^n \quad (2.19)$$

O segundo modelo, uniforme 2, é função do conteúdo de umidade e densidades iniciais do produto sendo expressa pela seguinte expressão:

$$A/A_i = (b U + c)^n \quad (2.20)$$

em que:

$$b = \rho_i / (U_i - 1)$$

$$c = 1 + b - \rho_i$$

em que,

U , - conteúdo de umidade da amostra, (b.s)

ρ_i , - massa específica da amostra inicial

O terceiro modelo, central, baseia-se na suposição de que durante a secagem se forma uma camada seca na superfície do material submetido ao processo e o centro do material permanece com o teor de umidade mais elevado. Se a massa específica do material no seu ponto central é igual a sua massa específica no ponto de equilíbrio de secagem, a área superficial para o conteúdo de umidade médio pode ser expressa pela expressão abaixo 2.21 que representa o encolhimento quando este é proporcional ao volume de água perdida durante a secagem;

$$A/A_i = (k U + p)^n \quad (2.21)$$

com:

$$K = (p - \mu) / (U_i - U_e)$$

$$P = (\mu U_i - U_e) / (U_i - U_e)$$

$$\mu = (U_i + 1) \rho_i / (U_i + 1) \rho_e$$

GOUVEIA (1999) em um estudo da cinética de secagem de gengibre em secador de leito fixo, estudou o encolhimento volumétrico utilizando os três modelos propostos por SUZUKI *et al* (1976) e, observou que os três modelos ajustaram-se bem aos valores experimentais, contudo o modelo 1 e o central apresentaram melhores resultados.

MIRSA e YOUNG (1980) relataram que o encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade e pode ter um efeito significativo na difusividade mássica e na taxa de remoção de umidade. Contudo, eles verificaram que considerar o encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido à escassez de informações sobre o coeficiente de encolhimento. Eles também observaram que o encolhimento é uma função da retração livre, relacionada com a perda de água e também elástica, a qual é provocada pelas células adjacentes.

Segundo PARK (1987) o encolhimento do material no processo de secagem, apresenta modificações de contorno usadas para resolução da segunda Lei de Fick, por isso é de grande importância quantificar esse fenômeno ao se analisar a cinética de secagem.

FUSCO *et al* (1991) estudaram o encolhimento em modelos difusionais considerando geometrias diversificadas. Apresentaram os resultados do encolhimento representando-os por relações de volume com o teor de umidade e optaram por uma expressão que correlacionava com uma função do terceiro grau.

SUAREZ e VIOLLAZ (1991) estudaram o encolhimento de batatas com diferentes conteúdos de umidade e diferentes densidades do material. A variação da área superficial com o tempo foi medida inicialmente considerando o grau de encolhimento da amostra. O modelo de Fick com encolhimento, para tempos de secagem relativamente pequenos, foi adotado apresentando um bom ajuste aos dados experimentais com coeficiente de difusão independente do teor de umidade. Para o modelo difusional, os dados obtidos predizem uma grande dependência do coeficiente de difusão com o teor de umidade.

VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1991) desenvolveram um modelo matemático para secagem de alimentos levando-se em consideração o encolhimento como parte essencial no processo de secagem, o qual se baseou nas seguintes suposições: a amostra é tratada de um ponto de vista macroscópico como um sistema pseudo-homogêneo. Durante a secagem, a umidade, a pressão parcial do vapor e temperatura estão em equilíbrio termodinâmico; nenhuma massa de água é produzida ou consumida durante o período de secagem.

RATTI (1994) propôs que as características de encolhimento de batatas, maçãs e cenouras não são somente uma função do teor de umidade, mas também depende das condições operacionais e geometria da amostra. O autor relatou que o aumento da velocidade do ar reduz o grau de encolhimento da maçã e da batata significativamente, e a configuração da amostra é desprezível.

ZOGZAS *et al* (1994) mostraram a independência do encolhimento característico com a temperatura e umidade de secagem do ar.

HATAMIPOUR e MOWLA (2002) estudaram o encolhimento de cenouras durante a secagem de leiteo fluidizado com inertes investigando os efeitos das partículas inertes e da velocidade do ar.

KROSS *et al* (2002) estudaram o efeito do encolhimento durante o processo de secagem de tomates frescos pré-tratados em solução osmótica de 10 – 0,4 % Na Cl-sacarose, em temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C.

ALSINA *et al* (1997) estudaram o encolhimento de acerola durante a secagem convectiva, encontrando uma relação linear com a umidade para o encolhimento de área. Os autores propuseram um modelo simplificado para caracterizar o efeito do encolhimento na cinética de secagem.

PINTO *et al* (1997) estudaram a variação do coeficiente de encolhimento volumétrico de batata em forma de disco e lâmina com o alto teor de umidade, durante a secagem em condições de ar constante. Os autores observaram um encolhimento mais acentuado na forma de placa que na forma de disco, caracterizando a influência da forma na secagem e também verificaram que o encolhimento volumétrico apresenta um comportamento linear em relação à variação da umidade das amostras durante a maior parte da secagem.

HATAMIPOUR e MOWLA (2002) estudaram o encolhimento de cenouras durante a secagem em leito fluidizado com inertes para diferentes temperaturas e velocidade do ar de secagem. As amostras foram cortadas na forma cilíndrica com umidade inicial de 90% em base úmida. Estes observaram que estas variáveis operacionais usadas no sistema não apresentaram efeito significativo no encolhimento.

2.3.6 Eficiência energética

É conhecido o fato da secagem por meio de secadores convectivos ser uma das operações unitárias mais dispendiosas em termos energéticos, uma vez que para a evaporação da umidade uma quantidade de energia muito elevada é gasta e não recuperada. Um critério fundamental para avaliação de secadores é então sua eficiência energética.

De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986) a secagem consome até 70 % da energia total nas indústrias de produtos derivados de madeira, é responsável por cerca de 50 % do consumo energético nas indústrias têxteis e utiliza acima de 60 % do total de energia no processo de produção de milho nas fazendas. Segundo os autores, RICHARDSON e JENSON (1976) pesquisaram 17 tipos diferentes de secadores industriais para sólidos e concluíram que dentre eles apenas cinco contribuíram com 99 % da energia total consumida pelo grupo: flash, torre cilíndrica, rotatório contínuo,

batelada e leito fluidizado. STRUMILLO e KUDRA (1986) definiram a eficiência energética de um secador, ϕ , como:

$$\phi = \frac{\text{energia necessária para evaporação da água}}{\text{energia total fornecida à operação}}$$

BIMBINET (1982) estabeleceu também alguns critérios para avaliação energética de secadores convectivos. Em seu trabalho definiu um consumo energético específico (ESC) como a razão entre a energia térmica para operar o secador (no caso considera apenas a energia necessária para aquecer o ar) e a massa de água removida no mesmo período de tempo:

$$ESC = Ea_{q,a} / W_{ag, ev} \quad (2.22)$$

[ESC] = kJ/kg água

Outra definição do autor é a taxa de consumo energético (ECR), que relaciona o consumo energético específico ao calor latente de vaporização da água em T, temperatura em que a água é vaporizada. O calor latente no caso é aquele necessário para vaporizar a água livre:

$$ECR = ESC / \Delta H_{vag, T} \quad (2.23)$$

A eficiência é então definida como o inverso da taxa de consumo energético, sendo mais elevada quanto melhor for a performance energética do secador:

$$EF = \frac{1}{ECR} \quad (2.24)$$

O autor fornece ordens de grandeza para critérios estabelecidos acima. A título de ilustração: para secadores convectivos na indústria de alimentos, operando sem sistema

de recuperação de energia, os valores de ESC se encontram entre 3300 e 600 kJ/kg, ECR na faixa de 1,5 a 3,0 e a eficiência energética, EF entre 0,3 e 0,7.

KAMINSKI *et al* (1989) utilizaram um conceito de otimização multiobjetiva para o processo de secagem em leito fluidizado. Os critérios para otimização do processo foram: qualidade do produto, coeficiente de consumo energético, coeficiente volumétrico de evaporação, diâmetro final da partícula. Em seu trabalho o coeficiente energético, EM, foi definido como:

$$EN = W_{ev}\Delta H_{vag,T} / W_{gs}C_{pg}(T_{ge} - T_{amb}) \quad (2.25)$$

$\Delta H_{vag,T}$ - entalpia de vaporização da água na temperatura de secagem (kJ/kg)

C_{pg} - calor específico do gás (kJ/kg K)

W_{ev} - vazão mássica de água evaporada (kg/s)

W_{gs} - vazão mássica de gás seco (kg/s)

PASSOS *et al* (1989) usaram uma definição de eficiência de secagem visando a comparação dos secadores de grãos de leito de jorro e de leito de jorro fluidizado, ambos com geometria cônico-cilíndrica. Para os autores esta eficiência de secagem é a razão entre a energia necessária para aquecer o grão e evaporar a água e a energia total fornecida à operação. A energia total fornecida a operação inclui a energia necessária para aquecer o ar e a energia mecânica para bombeá-lo.

2.4 Secadores

2.4.1 Leito fixo

Os secadores de leito fixo são caracterizados por apresentar baixo custo e possuir fácil operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a percolar pela massa do produto. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação e são muito versáteis uma vez que podem ser utilizados para secagem de diferentes produtos alimentícios. É constituído de uma câmara de secagem, na qual o ar é insuflado por um ventilador. O ar de secagem movimenta-se da camada

inferior para a superfície da massa do leito. A troca de umidade que acontece entre o produto e o ar ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa, conforme ocorre à secagem, dando origem a um gradiente de umidade, o qual não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto (GOUVEIA, 1999).

Segundo LACERDA FILHO (1986) os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada da amostra e a temperatura do ar de secagem. O gradiente será mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto.

2.4.2 Leito de jorro

- Considerações gerais

Entre as diversas operações unitárias que envolvem partículas sólidas e fluidas, destaca-se o leito de jorro. Tendo por finalidade promover íntimo contato entre um fluido e partículas relativamente grandes que apresentam fluidização de baixa qualidade. Esta técnica é aplicada com eficiência à secagem de materiais granulares, pastas e suspensões, à granulação e ao recobrimento de partículas.

O leito de jorro mostrou-se muito promissor e já em 1963, implantaram-se no Canadá unidades industriais para a secagem de ervilhas, lentilha e fibras de linho. Também unidades de resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização entre outras são citadas por MATHUR e ESPSTEIN (1974).

O leito de jorro consta de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica ou plana, cuja extremidade inferior está localizada o orifício de entrada do ar de secagem. O jorro é formado pela penetração do gás através do leito de partículas sólidas. Quando a vazão do gás é suficiente para provocar o movimento ascendente das partículas, a circulação principia, formando uma região central chamada jorro, de alta porosidade e maior velocidade, tanto das partículas quanto do gás. Nesta região, as partículas sólidas são arrastadas pneumáticamente, formando no topo uma fonte de sólidos que se empilham radialmente, descendo pelo espaço anular que envolve o jorro, em contra-corrente com o gás. Esta região é caracterizada pela baixa porosidade e pelo movimento descendente das partículas, cujo comportamento assemelha-se ao de um leito deslizante. O movimento das partículas é caracterizado pelo retorno das mesmas ao jorro na região inferior do leito, ocorrendo em seguida inversão no sentido do movimento.

MUJUNDAR (1989) enfatizou algumas limitações na utilização do leito de jorro, como proposto inicialmente por MATHUR e GHISLER (1955), que são relacionadas a seguir:

- a) a alta perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- b) dimensões geométricas do leito de jorro limitadas para uma operação eficiente;
- c) fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- d) faixa operacional limitada;
- e) capacidade por unidade de espaço físico limitado; e
- f) dificuldades de mudança de escala.

Apesar dessas limitações, o leito de jorro convencional tem aplicações em processos que não necessitam de unidades de grandes dimensões, como é o caso da indústria farmacêutica e química fina.

FANE *et al* (1980) desenvolveram um secador de suspensões de baixo custo e concluíram que o leito de jorro é uma alternativa barata comparado ao “spray-drying”, em certas aplicações (substâncias pouco viscosas e com baixo teor de gordura), para obtenção de produtos de alta qualidade e, sendo uma técnica potencialmente melhor quando a faixa de operação não é grande.

De acordo com ALMEIDA e ROCHA (2002), é possível fluidizar e jorrar as sementes de brócolos, em escala de laboratório, sem causar danos às estruturas essenciais do embrião, possibilitando a normal emergência e desenvolvimento destas sementes. Sugere-se a realização do teste de vigor para futuros trabalhos envolvendo fluidização e jorro, nos quais será possível determinar também o potencial fisiológico das sementes.

- Curvas Características do leito de jorro

O mecanismo de transição do leito fixo para o jorro pode ser mostrado na curva característica da queda de pressão em função da vazão do ar, ilustrado na Figura 2.4. Inicialmente, para pequenas vazões, o gás apenas circula, sem perturbar as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento da vazão, as partículas próximas ao orifício de entrada do gás se deslocam, surgindo então uma cavidade circundada por uma camada sólida compacta, ainda mais resistente à passagem do gás, que acarretará uma maior queda de pressão no leito. À medida que a vazão aumenta, a

cavidade vai se alongando, havendo formação de um jorro interno. A queda de pressão continua a aumentar até atingir o valor máximo (ΔP_{\max}), no ponto B. A partir deste ponto, o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade, e a queda de pressão, conseqüentemente, passa a diminuir. No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas do núcleo central já é suficiente para provocar uma expansão do leito. Esta expansão pode ser acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno, resultando em instabilidade e flutuações na queda de pressão, formação de bolhas e, no caso de cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno. Um pequeno incremento na vazão do gás além do ponto C, correspondente ao jorro incipiente, faz com que a queda de pressão caia até o ponto D, no qual o jorro aflora à superfície. Neste ponto, a queda de pressão (ΔP_{jes}) torna-se constante a um aumento na vazão do gás provoca somente a elevação da fonte. Ocorre, entretanto, que, devido à instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito, os pontos C e D, que correspondem respectivamente às vazões de jorro incipiente e de início de jorro estável, não são exatamente reprodutíveis, sendo preferível se trabalhar com o processo inverso, diminuindo-se lentamente o fluxo de gás até o ponto E, onde se tem a menor velocidade (V_{jm}) com a qual se pode obter o jorro estável. Prosseguindo a redução na vazão, a queda de pressão aumenta, atingindo o máximo em F, localizado bem abaixo do ponto B, já que no processo inverso a perda de carga acontece devida apenas à interação gás-sólido. A partir de F, a queda de pressão decresce com a vazão.

A obtenção do jorro estável está relacionada com a altura máxima do leito (H_{\max}), onde ainda é possível se obter um sistema estável, sem que ocorra fluidização heterogênea ou movimento pistonado. Desta forma, pode-se observar que o sistema é limitado pela altura da carga de sólidos, sofrendo ainda a influência dos parâmetros geométricos da coluna, o ângulo do cone, relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada do gás, das propriedades e dimensões das partículas envolvidas.

Embora os estudos fluidodinâmicos do leito de jorro partam da obtenção experimental das curvas características de queda de pressão, e subseqüente determinação da queda de pressão máxima (ΔP_{\max}), queda de pressão no jorro estável (ΔP_{jes}), velocidade do jorro mínimo (V_{jm}), além da altura máxima (H_{\max}), uma previsão destas variáveis é de fundamental importância quando se projeta o equipamento, principalmente no que concerne ao dimensionamento do soprador. A literatura propõe

diversas correlações, na sua maioria empíricas, que, embora muitas vezes possam apresentar resultados contraditórios e estejam limitadas à faixas de condições operacionais bastante restritas, fornecem, principalmente para o jorro convencional, uma previsão das variáveis hidrodinâmicas já citadas, possibilitando assim uma estimativa razoável dos parâmetros do projeto.

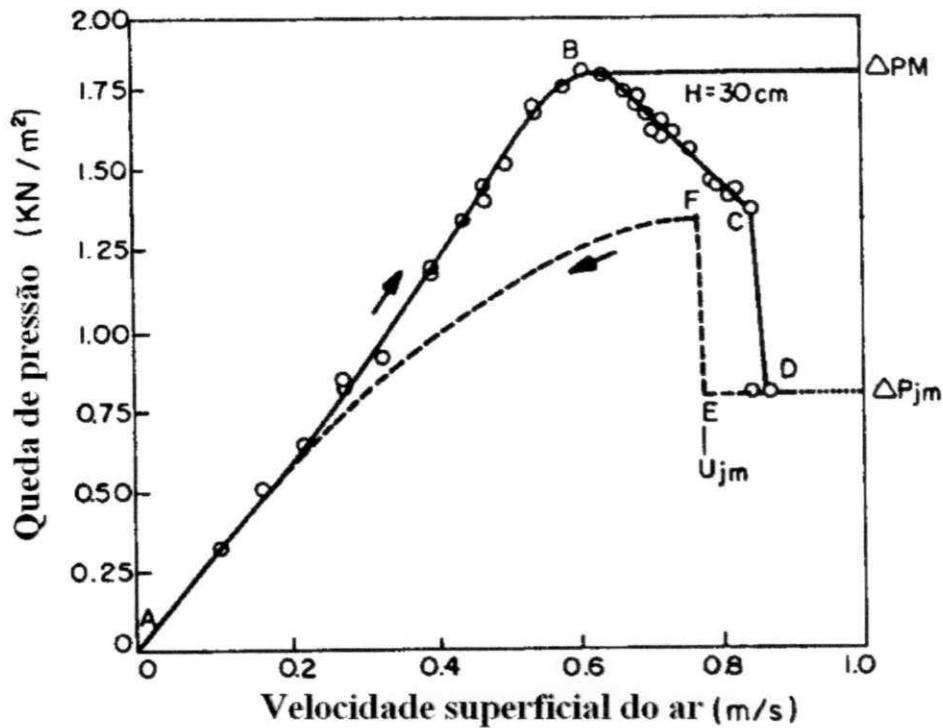


Figura 2.4 - Curva característica da queda de pressão. MADONNA *et al.* (1961) Trigo.

$$d_p = 0,36\text{cm}, D_c = 0,152\text{ m}, D_i = 1,27 \times 10^{-2}\text{ m}, \alpha = 60^\circ$$

A Figura 2.5 ilustra um leito de jorro convencional, destacando as três regiões que o compõem: jorro, anel e fonte..

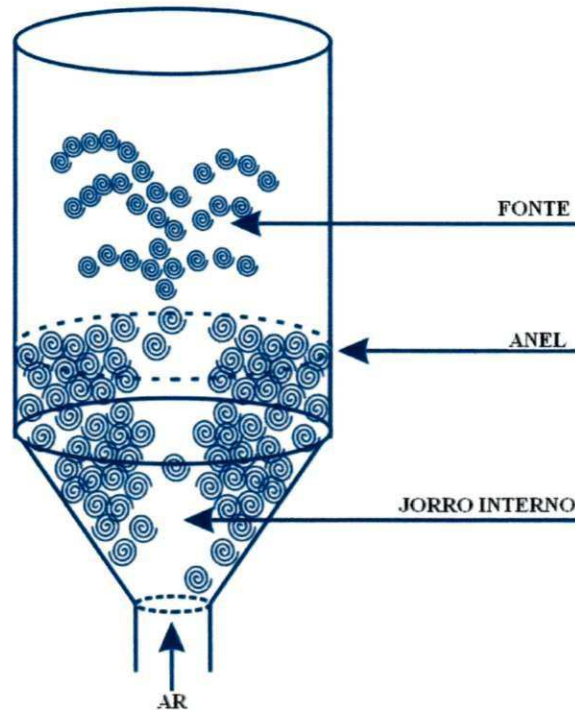


Figura 2.5. Diagrama esquemático do leito de jorro convencional

- Efeito da altura máxima do leito de jorro ($H_{m\acute{a}x}$).

A compreensão do mecanismo de terminação do jorro é de fundamental importância, pois o mesmo está relacionado com a altura máxima capaz de se manter um jorro estável, $H_{m\acute{a}x}$. Qualquer equação obtida para o cálculo de $H_{m\acute{a}x}$ deve vir acompanhada da descrição deste mecanismo. SILVA (1996) demonstrou que, qualquer que seja a geometria do leito, o mecanismo de terminação do jorro pode ser identificado por faixas distintas do parâmetro A . Esse parâmetro, definido, inicialmente, por MORGAN e LITTMAN (1982) para a geometria cone-cilíndrica, representa a relação entre a energia mínima necessária para formar o jorro e aquela requerida para mantê-lo ao longo do leito nas condições de jorro mínimo, em $h = H/H_{m\acute{a}x} = 1$, ou seja:

$$A = \rho_g V_t V_{mf} / (\rho_s - \rho_g) g D_i$$

em que,

V_t - a velocidade terminal da partícula (m)

V_{mf} - a 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 V_{mf} obtida através de ensaios experimentais ou calculada a partir de correlações empíricas.

Com base nos dados e observações 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 quando $A > 0,02$ e o de pistonagem do jorro quando $A < 0,014$. Percebe-se que o mecanismo de pistonagem no jorro ocorre em leitos com baixo valor de A , uma vez que o jato de fluido na entrada do leito, em $h = 1$, não possui energia suficiente para formar o jorro.

De acordo com MATHUR e EPSTEIN (1974), os mecanismos de terminação de jorro, podem ser classificados como:

(i) Fluidização no topo da região anular

A fluidização no topo da região anular tem sido considerada como mecanismo de terminação do jorro quando o leito convencional é formado de partículas grandes ($d_p > 1\text{mm}$) jorradas com o ar. Neste mecanismo, o jorro termina devido a fluidização do topo da região anular. Neste ponto onde $H = H_{max}$, a velocidade mínima de jorro torna-se igual à velocidade de mínima fluidização MORGAN e LITTMAN (1982).

(ii) Pistonagem do jorro

Este mecanismo foi observado em leitos de jorro convencionais formados de partículas pequenas ($d_p < 1\text{mm}$) jorradas pelo ar. Neste mecanismo, o jorro termina quando a cavidade interna degenera-se em bolhas que se movimentam, ascendentemente, em direção à região anular. A condição mínima necessária para ocorrência de jorro estável nestes sistemas e a condição de contorno, para este mecanismo de obstrução do jorro são descritas por EPSTEIN e CHANDANANI (1987), como:

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

A velocidade terminal da partícula pode ser estimada pelo mecanismo do fluido segundo KUNII e LEVENSPIEL (1977), e pode ser determinada considerando a partícula esférica a partir da equação a seguir;

$$Re_p < 0,4$$

$$V_t := \frac{g \cdot (dp)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{18 \cdot \mu}$$

$$0,4 < Re_p < 500$$

$$V_t := \left[\frac{4}{225} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 \cdot g^2}{\rho_g \cdot \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot dp$$

$$500 < Re_p < 200000$$

$$V_t := \left[\frac{3 \cdot 1 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot dp}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}$$

em que Re_p é o número de Reynolds da partícula, calculado pela equação a seguir:

$$Re_p = \rho_f d_p U / \mu_f$$

- Velocidade de jorro mínimo (V_{jm}).

A mínima velocidade (V_{jm}) do gás necessária para manter condições de jorro estável depende das propriedades do sólido e do fluido e das características geométricas do leito, principalmente do seu diâmetro (D_c). A velocidade de jorro mínimo assume seu valor máximo quando a altura do leito é máxima.

MATHUR e GISHLER (1955) desenvolveram uma correlação empírica para V_{jm} baseada na análise diferencial. Os resultados foram obtidos considerando uma faixa restrita de tamanhos de partículas, em diferentes leitos, cujos diâmetros variaram numa faixa de 7,6 até 30,5 cm, utilizando o ar como fluido. A correlação encontrada pelos autores é dada pela expressão e é válida para vasos cônicos cilíndricos:

$$V_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[2gH \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

A correlação de ABDELRAZEK (1969) para vasos cilíndricos com base cônica utilizando esferas de vidro e aço com tamanhos uniformes ($d_p = 0,5 - 08 \text{ mm}$, $\rho_p = 2,46 \text{ Mg/m}^3$ e $7,07 \text{ Mg/m}^3$) é expressa pela seguinte equação:

$$V_{jm} = \frac{1}{1,74} \left[\left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{1/2} - 0,25 \right] \quad (2.27)$$

GOLTSIKER (1967) desenvolveu a seguinte correlação para fertilizantes e sílica gel ($d_p = 1,0 - 3,0 \text{ mm}$)

$$(Rei)_{jm} = 73(Ar)^{0,14} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,47} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,9} \quad (2.28)$$

- Efeito da geometria da coluna e das propriedades dos sólidos.

Em uma determinada coluna, a altura máxima do leito (H_{max}), para obtenção do jorro em condições estáveis, tende a decrescer com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do fluido (D_i). Com base em dados para diversos materiais em coluna cilíndrica, BECKER (1961) sugeriu um valor crítico para obtenção de jorro estável como $D_i / D_c = 0,35$.

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 satisfatória, para uma circulação de sólidos é de 40° .

O comportamento de um leito depende sensivelmente da natureza das partículas que o constitui. GELDART (1973) sugeriu uma classificação de partículas em quatro categorias sendo que, na maioria dos casos as partículas classificadas na categoria D, apresentam uma fluidização instável e são adequadas para leitos de jorro. Estas partículas possuem diâmetros elevados, geralmente maiores que $600 \mu\text{m}$. O número de Arquimedes é calculado pela seguinte expressão:

$$Ar = d_p^3 g \rho_g (\rho_p - \rho_g) / \mu_g^2$$

A uniformidade do tamanho das partículas favorece a estabilidade do jorro, enquanto que a presença de pequenas porções de partículas fina pode prejudicar a estabilidade. Sólidos em uma ampla faixa de densidades têm sido usados em leitos de jorro sem qualquer indicação de que exista limite de densidade de partículas, além do qual a ação do jorro não seria realizada MATHUR e EPSTEIN (1974).

O formato e as características superficiais das partículas têm influência na estabilidade do jorro. Uma equação empírica de MALEK e LU (1964), para a altura máxima de jorro estável, sugere que se podem jorrar partículas não esféricas em leitos mais profundos do que com partículas esféricas MATHUR e EPSTEIN (1974).

2.4.3 Leito fluidizado

O termo “leito fluidizado” é usado geralmente para designar um sistema multifásico em que uma carga de partículas sólidas é suspensa por uma corrente de gás ou líquido. É denominada “fluidização” porque neste estado as duas fases do sistema sólido/fluido comportam-se de forma similar a um líquido homogêneo, MARTIN (1982).

A fluidização de um leito de partículas por um gás é um processo realizado para manter um contato íntimo entre gás e partículas sólidas. O leito fluidizado consta basicamente de uma coluna vertical, tendo em sua parte inferior uma placa porosa, que sustenta o leito de partículas. Ao introduzir um gás, geralmente o ar, as partículas comportam-se como leito fixo a baixas velocidades.

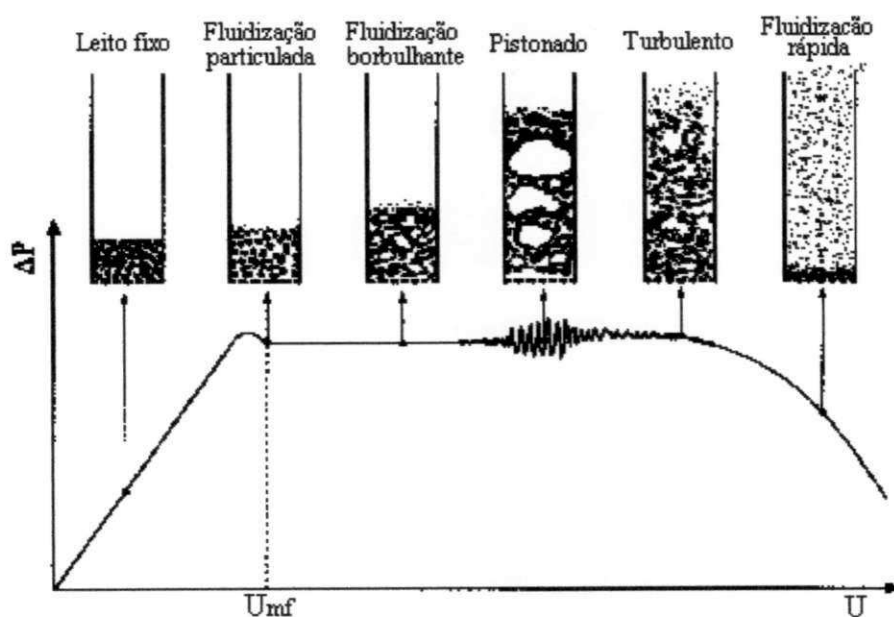


Figura 2.6 Regimes de fluidização de um leito de partículas

À medida que a velocidade aumenta, as partículas se rearranjam oferecendo menor resistência a passagem do ar. Em uma velocidade do ar, específica do meio, o leito subitamente se expande e a perda de carga no leito equilibra-se ao peso das partículas. Acima desta velocidade, o leito comporta-se como um fluido. Com o contínuo aumento da velocidade do ar, nota-se a formação de cavidades gasosas, denominadas de bolhas, que crescem com o aumento na velocidade do ar e na altura do leito. Quando o diâmetro das bolhas é comparável ao da coluna, o leito comporta-se como regime empistonado. Quando a velocidade é muito elevada, as partículas são arrastadas pelo gás e escapam da coluna, ocorrendo um transporte pneumático. Na Figura 2.6 é mostrado este comportamento.

- Velocidade mínima de fluidização (V_{mf}) e Porosidade mínima de fluidização (ϵ_{mf})

Um grande número de correlações é proposto para determinar a velocidade mínima de fluidização. A Tabela 2.3, mostra algumas correlações encontradas na literatura. Contudo, geralmente utiliza-se o método clássico proposto por RICHARDSON (1971), que corresponde ao intercepto de duas linhas tangentes na curva característica de fluidização da Figura 2.4: uma no trecho de leito fixo e outra que acompanha o patamar na região de perda de carga estável.

Tabela 2.4. Resumo das correlações empíricas para determinação da velocidade mínima de fluidização (V_{mf})

AUTOR	Eq.	CORRELAÇÃO
BABU <i>et al</i> (1978)	2.29	$R_{mf} = (25,25 + 0,0651 Ga)^{0,5} - 25,25$
BOURGEOIS e GRENIER (1968)	2.30	$V_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_p d_p} \left\{ \left[(25,46^2) + 0,0382 Ar \right]^{\frac{1}{2}} - 25,46 \right\}$
ERGUN (1951, 1952a e b)	2.31	$R_{mf} = \left[(42,857 (1 - \epsilon_{mf})/\phi)^2 + \epsilon_{mf}^3 \phi Ga/1,75 \right]^{0,5} - 42,857 (1 - \epsilon_{mf})/\phi$
GRACE (1982)	2.32	$V_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_p d_p} \left\{ \left[(27,20^2) + 0,0408 Ar \right]^{\frac{1}{2}} - 27,20 \right\}$
LUCAS <i>et al.</i> (1986b)	2.33	$V_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_p d_p} \left\{ \left[(29,50^2) + 0,0357 Ar \right]^{\frac{1}{2}} - 29,50 \right\}$
SAXENA <i>et al.</i> (1977)	2.34	$R_{mf} = (25,28 + 0,0571 Ga)^{0,5} - 25,28$
THONGLIMP <i>et al.</i> (1984)	2.35	$V_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_p d_p} 2,79 \cdot 10^{-2} Ar^{0,63}$
WEN e YU (1966)	2.36	$V_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_p d_p} \left\{ \left[(33,70^2) + 0,0408 Ar \right]^{\frac{1}{2}} - 33,70 \right\}$

A porosidade mínima de fluidização para diversas partículas sólidas foi determinada por BOTTERIL *et al* (1982a e b) e LUCAS *et al* (1986), através das medidas de perda de carga e expansão do leito realizadas à diferentes velocidades do ar. Os primeiros autores propuseram traçar uma curva $\epsilon = f(\ln V/V_{mf})$ e o segundo o autor a curva de $\ln(\epsilon^3/1 - \epsilon) = f(\ln V/V_{mf})$. O valor da porosidade mínima de fluidização é obtido por extrapolação dos resultados de V/V_{mf} igual a 1. MURACHMAN (1990) propôs a determinação da porosidade mínima de fluidização a partir da expansão do leito, utilizando a Equação 2.26:

$$\epsilon_{mf} = 1 - [(m/Ac)/H_{mf}(\rho_p - \rho_g)] \quad (2.36)$$

em que,

m - massa do leito.

Ac - área da seção transversal do escoamento.

H_{mf} - expansão total do leito obtido utilizando uma escala graduada na parte interior da parede da coluna.

2.5 Planejamento e otimização de experimentos

Um experimento é uma série de ensaios nos quais são realizadas variações nos parâmetros ou variáveis de entrada do processo ou de uma operação industrial, objetivando verificar e identificar as variações nas respostas ou variáveis de saída (COSTA, 1999).

O emprego de métodos estatísticos tem como objetivo alcançar soluções otimizadas dos problemas experimentais, e vem se tornando cada vez mais freqüente em trabalhos envolvendo todos os tipos de materiais, principalmente os naturais, MEDEIROS (2001). Segundo BOX *et al* (1978), os métodos estatísticos suavizam as dificuldades na determinação do erro experimental e a complexidade dos efeitos estudados.

De acordo com CARPINETTI (1996) a análise experimental com base no planejamento estatístico pode fornecer informações do tipo:

- quais as variáveis, ou fatores, do processo que são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse, o qual se constitui na variável dependente ou item de controle;
- os níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variação do parâmetro de resposta seja mínimo;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

As técnicas usuais de planejamento de experimentos e otimização de processos, amplamente utilizados em ciências e engenharia são encontradas de forma detalhada nos textos de BOX *et al* (1978); BARROS NETO *et al* (1995). Os experimentos fatoriais e os experimentos fatoriais fracionários são as técnicas mais usuais no planejamento experimental, usando o quadro de análise de variância (ANOVA) para análise de dados.

O experimento fatorial 2^K é um tipo especial de planejamento experimental, adequado ao estudo eficiente e econômico do efeito conjunto de vários fatores ou variáveis de entrada, sobre uma variável de resposta de interesse, onde cada fator está

presente em apenas dois níveis. Portanto, se o número de níveis for igual a 2, uma série experimental completa se transforma em: $2_1 \times 2_2 \times \dots \times 2_k$ com 2^k experimentos, onde k é o número de variáveis de entrada (independentes). Observa-se que, trabalhando-se apenas com dois níveis de cada variável, a série experimental é reduzida substancialmente.

No projeto fatorial completo em dois níveis, pode-se trabalhar com variáveis independentes descontínuas (qualitativas) ou contínuas. Os níveis de cada variável podem ser codificadas em nível baixo (-) e nível alto (+).

No método clássico de experimentos, as variáveis independentes de um determinado processo são avaliadas uma de cada vez, mantendo-se as demais constantes, sendo a resposta (variável dependente) estimada por um método de medida adequada. A abordagem dessa técnica experimental apresenta como desvantagem o fato de requerer um número grande de ensaios experimentais quando se trata de experimentos multivariados, além de apresentar limitações nas conclusões, em consequência de possíveis interações entre variáveis estudadas TAQUEDA *et al* (1998).

Desta forma, o planejamento estatístico de experimentos e a análise de variância proporcionam um vantajoso método para a avaliação dos efeitos e interações das variáveis operacionais mais importantes do processo em análise. Assim, para alcançar o resultado esperado (máximo ou mínimo), as variáveis operacionais devem ser cuidadosamente controladas e suas influências na variável de resposta quantificadas, sendo recomendado a utilização de experimentos estatisticamente planejados e técnicas de otimização, que são ferramentas indispensáveis de auxílio à pesquisa, pois fornecem resultados a partir de um reduzido número de experimentos com sensível aumento na precisão das informações obtidas BOX *et al* (1978). Uma das técnicas mais utilizadas na otimização estatística de experimentos é a metodologia de superfícies de resposta, que implica na representação de superfícies em três dimensões, demonstrando de forma clara, uma tendência na variável de resposta que deve ser analisada criteriosamente. Após a determinação da região de interesse, busca-se um detalhamento dessa área visando obter-se as condições nas quais a resposta será otimizada. Esta técnica é comumente empregada na análise de dados experimentais de secagem e assuntos correlatos, não somente minimizando o número de experimentos, em sua maioria trabalhosos e dispendiosos, como também permitindo a otimização do processo e melhorando a qualidade dos produtos finais.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Matéria prima

A matéria-prima utilizada foi a goiaba vermelha (*Psidium guajava L.*), do tipo Paloma, comercializada em Campina Grande - PB. As goiabas foram selecionadas visualmente por sua consistência, maturação, cor e danos físicos e em seguida separadas.

3.1.1 Primeira etapa

Numa primeira etapa, as amostras foram cortadas na forma de fatias no sentido do diâmetro equatorial da fruta, com valor médio de 6,0 cm e espessuras entre 0,2 cm e 1,5 cm, para serem processadas em secador de leito fixo, com umidade inicial em torno de 4,75 kg de água/kg de sólido seco (base seca).

3.1.2 Segunda etapa

Numa segunda etapa, as goiabas com teor de umidade variando de 4,86-5,79 kg de água/kg de sólido seco (base seca) foram descascadas e cortadas em pedaços cúbicos, fazendo uso de cortador de batatas industrial. Os pedaços cúbicos passaram por um processo de pré-secagem em leito fixo em camada espessa e, posteriormente levados a um secador de leito fluidizado e leito de jorro para obtenção dos parâmetros fluidodinâmicos. Os pedaços de goiaba in natura em forma de cubos apresentam um número de Arquimedes na ordem de $3,0 \times 10^7$ e após a pré-secagem na ordem de $0,6 \times 10^7$ e $1,0 \times 10^7$, enquanto que o diâmetro e massa específica do cubo in natura de 0,11 m e 900,00 a 970 kg/m³, respectivamente. Após a pré-secagem os valores destas variáveis são respectivamente em média $6,5 \times 10^{-3}$ m e 870 a 940 kg/m³.

No presente trabalho, os pedaços cúbicos de goiaba são classificados segundo GELDAR (1973), na categoria D, na qual as partículas apresentam uma fluidização instável, na maioria dos casos, e são adequadas ao movimento do leito de jorro. Contudo, o teor de umidade inicial destas partículas não favorece o escoamento do leito, assim sendo faz-se necessário um processo de pré-secagem para favorecer o comportamento do leito de jorro e do leito fluidizado.

A Figura 3.1 mostra a matéria-prima utilizada no presente trabalho. O fruto da goiabeira é apresentado na forma in natura após colheita na Figura 3.1a, cortada no sentido polar da fruta e sem sementes na Figura 3.1b e na Figura 3.1c é mostrada a fruta pronta para ser processada.



Figura 3.1a. Fruta in natura (goiaba vermelha)

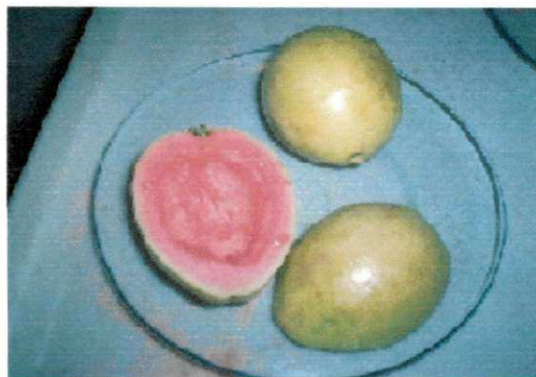


Figura 3.1b. Corte longitudinal da goiaba

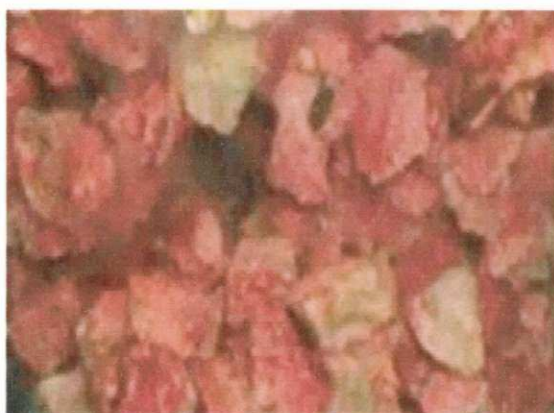


Figura 3.1c. Pedacos cúbicos de goiaba

3.2 Caracterização

3.2.1 Caracterização física da goiaba

Para caracterizar os pedacos cúbicos de goiaba *in natura*, após a pré-secagem em leito fixo e após a secagem em leito de jorro e leito fluidizado, determinam-se a massa específica e o tamanho das partículas.

A massa específica é medida pelo método de picnometria líquida, utilizando-se provetas de 100 mL (medidas efetuadas em triplicatas). São conduzidos ensaios de secagem em estufa com circulação de ar em diferentes temperaturas 40, 60 e 70 °C para

observar o comportamento da variação da massa específica em diferentes níveis de umidade do produto. A metodologia utilizada é a seguinte:

1 - adiciona-se álcool etílico até um determinado volume em uma proveta de 100 mL. Em seguida, adiciona-se cerca de 30 pedaços de goiaba em forma de cubos pesados em balança analítica; registra-se o volume deslocado de álcool etílico.

A massa específica é calculada pela Equação 3.1. Todas as determinações são realizadas em triplicata.

$$\rho_s = \frac{m_{pc}}{V_i - V_d} \quad (3.1)$$

Os resultados obtidos da massa específica em secador de bandeja com circulação de ar são ajustados segundo um polinômio de segunda ordem e a partir desta equação determina-se o valor da massa específica em função da umidade do produto durante a pré-secagem dos cubos de goiaba em leito fixo.

O volume de um pedaço cúbico de goiaba é determinado pela Equação 3.2.

$$V_{pc} = \frac{V_d}{n_{pc}} \quad (3.2)$$

em que:

n_{pc} - número de pedaços cúbicos

V_d - volume deslocado na proveta

A massa específica foi determinada seguindo a metodologia descrita anteriormente em diferentes tempos, como também o diâmetro médio dos cubos de goiaba.

O diâmetro do pedaço cúbico de goiaba ao longo do processo de pré-secagem em leito fixo é determinado a partir do encolhimento volumétrico do cubo em função da umidade do produto ajustado os dados a um modelo linear.

Para a determinação das propriedades físicas dos cubos de goiaba obtidas durante a secagem em leito de jorro, massa específica e diâmetro da “partícula”, segue-se a mesma metodologia. Contudo, a partir dos valores inicial e final destas propriedades para cada ensaio em função das umidades inicial e final os resultados

foram ajustados segundo um polinômio de primeira ordem para a massa específica mostrado na Equação (3.3) com um coeficiente de correlação igual 0,85 e, de segunda ordem para o diâmetro de esfera de igual volume deslocado dos pedaços de goiaba apresentado na Equação (3.4) com um coeficiente de correlação igual 0,9. Em função do diâmetro determinou-se o volume de uma “partícula”.

$$\rho_p = 876,619 + 155,543 \times U_{ib.s.} \quad (3.3)$$

$$d_p = 0,5889 + 0,454 * U_{ib.s.} - 0,18312 * U_i^2 \quad (3.4)$$

3.2.2 Caracterização físico-química

- Vitamina C

A determinação do teor de vitamina C baseia-se na redução do 2,6-diclorofenolindofenol-sódio (DCFI) pelo ácido ascórbico. O DCFI em meio básico ou neutro é azul, em meio ácido é rosa e sua forma reduzida é incolor. O ponto final da titulação é detectado pela viragem da solução do DCFI quando todo ácido ascórbico já foi consumido. O resultado é expresso em mg/100mL ou em mg/100g.

O teor de Vitamina C é determinado através da equação abaixo:

$$\text{mg ácido ascórbico/100g de amostra} = \frac{5 \times \text{vol} \times 100}{v \times \text{mL de amostra ou g da amostra}}$$

* a divisão 5/P indica o fator F, onde P é o volume gasto na padronização.

sendo:

5 - mg de ácido ascórbico padrão titulado;
vol - volume da solução DCFI utilizada para titular a amostra;
v - volume da solução DCFI utilizada para titular o padrão.

- Sólidos solúveis (°Brix)

Pela leitura direta no refratômetro RL-2 NR-2720, mede-se o °Brix da goiaba in natura. E, empregado o método nº 13.6.1 (Instituto Adolfo Lutz, 1976), tomando os devidos cuidados na preparação da amostra em forma de pasta usando um mixer doméstico.

- Umidade

A umidade da goiaba é determinada por secagem até peso constante em estufa com circulação de ar à 70 °C. Para um melhor controle da umidade do ar circulante, uma bandeja contendo leito de sílica gel é colocada na estufa. As amostras de pedaços cúbicos de goiaba são pesados em intervalos de tempo. Durante o acompanhamento da perda de umidade as amostras, são retiradas da estufa e colocadas em dessecadores, aguardando seu resfriamento até temperatura ambiente, quando então se procede a sua pesagem. As operações de aquecimento, resfriamento e pesagem são repetidas até peso constante. As determinações de umidade são feitas em triplicatas.

3.2.3 Propriedades térmicas

Os frutos maduros com boa aparência, consistência e ausência de danos físicos, foram selecionados; lavados em água corrente e em seguida enxutos com papel toalha. Os teores de umidade iniciais da fruta foram determinados pelo método da estufa citado anteriormente. A goiaba foi cortada no sentido longitudinal da fruta e retirada as sementes trabalhando apenas com o mesocarpo da fruta. Em seguida a amostra foi colocada em estufa com circulação de ar a 70 °C e a intervalos regulares de tempo era retirada e pesada, obtendo-se desta maneira amostras com diferentes teores de umidade. Em seguida feitas as leituras das propriedades térmicas, que foram determinadas com o auxílio do aparelho Thermolink, apresentado na Figura 3.5, que consiste de uma sonda linear dupla, composta de duas agulhas de aço inoxidável espaçadas de 6,0 mm e com 30,0 mm de comprimento, uma delas emite um pulso de calor e a outra é usada como sensor, deste modo a condutividade térmica (K) a difusividade térmica (D), são determinados baseados na Equação 3.6:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi Kt} \exp\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \quad (3.6)$$

sendo

r - distância da fonte de calor ao sensor em mm;

ΔT - variação de temperatura medida pelo termopar em °C;

q - calor dissipado, W.m⁻¹;

K - Condutividade térmica, W m⁻¹ °C⁻¹;

D = difusividade térmica, mm² s⁻¹;

t - tempo, s

Conhecida a condutividade e a difusividade térmica, o calor específico volumétrico é determinado pela seguinte equação:

$$C = \frac{K}{D} \quad (3.7)$$

C - Calor específico volumétrico, $\text{J.cm}^{-3}.\text{C}^{-1}$



Figura 3.5 – Equipamento utilizado para determinação das propriedades térmicas (thermolink)

3.3 Equipamento

3.3.1. Secador de Leito Fixo, leito de jorro e leito fluidizado.

- COLUNA A

O secador de leito fixo utilizado pode operar com circulação de ar variável e temperatura controlada com limites entre a ambiente e 75°C. A FIGURA 3.2 mostra o sistema utilizado para a realização dos ensaios da secagem de fatias de goiaba. A câmara de secagem consta de uma coluna cilíndrica de aço inoxidável e visores em acrílico, com 0,297 m de diâmetro, 0,730 m de altura e base cônica fixa de 120°. O equipamento permite adaptação de outras bases cônicas, acopladas à parte interna da

coluna, contudo utilizou-se um distribuidor de ar plano. A relação diâmetro da coluna/diâmetro do orifício de entrada do ar D_c/D_i igual a 6,0.

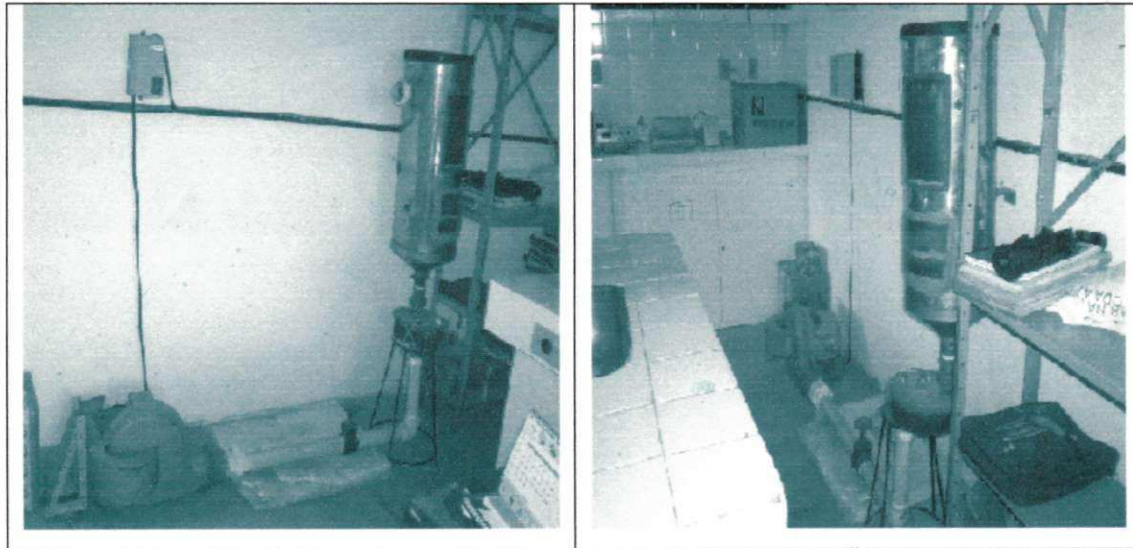


Figura 3.2 - Esquema do equipamento experimental: soprador, válvula, resistência elétrica, variac, termômetro, coluna de secagem A.

- COLUNA B.

Na coluna B, são realizados os ensaios da pré-secagem de pedaços cúbicos de goiaba em camada espessa em leito fixo. As condições operacionais utilizadas foram: a vazão volumétrica do ar de secagem de $230 \text{ m}^3/\text{h}$ e temperatura de 45, 55, 70 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, para posterior realização dos ensaios fluidodinâmicos de leito fluidizado. Como também ensaios de pré-secagem com temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de pedaços cúbicos de goiaba a mesma vazão do ar de secagem, para posterior secagem em leito de jorro e leito fluidizado.

A instalação utilizada é basicamente a descrita em trabalhos anteriores apresentados por ALSINA *et al* (1995) e ALMEIDA (1993). A coluna cônico-cilíndrica, de 17,8 cm de diâmetro e 60 cm de altura, com uma base cônica de 60° . A relação D_c/D_i é igual a 3,56. Utilizou-se na parte cônica, esfera de vidro para distribuir melhor o ar de secagem.

A instalação completa do conjunto de equipamentos é mostrada na Figura 3.3, onde se podem observar os seguintes periféricos:

- a) compressor radial para impulsionar o ar no interior da linha de alimentação do leito, tipo S100L2, com 4 Cv e 2920 rpm, fabricado pela Metalúrgica Abramo ERBELE S/A;
- b) rotâmetro para medir a vazão do ar, tipo R.2.V.C. Haste, capacidade 400 m³/h, fabricado pela OMEL S/A;
- c) válvula para manter o controle de vazão do ar na linha de alimentação, tipo globo;
- d) coluna cônico-cilíndrica;
- e) aquecedor elétrico com três resistências.

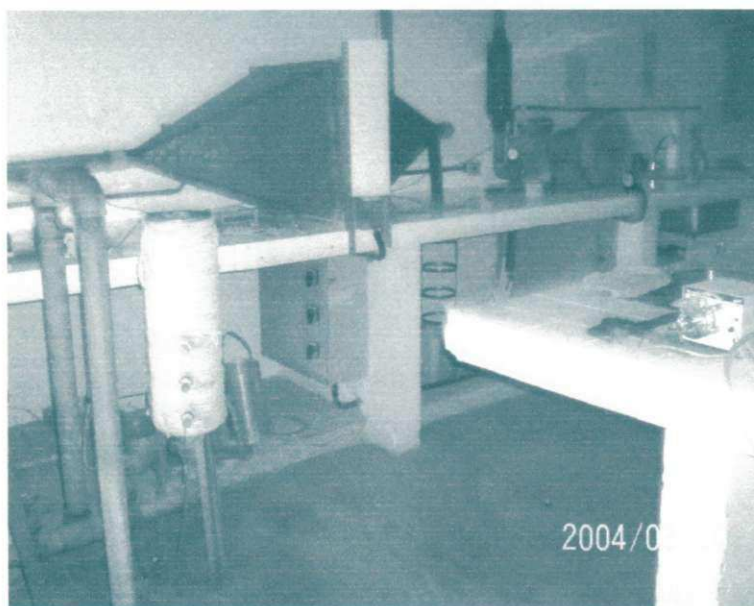


Figura 3.3. Coluna B utilizada para pré-secagem de pedaços cúbicos de goiaba.

- COLUNA C.

Na coluna C, foram realizados os ensaios da fluidodinâmica e secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fluidizado e leito de jorro. A coluna possui uma altura da parte cilíndrica de 1,0 m e diâmetro de 0,108 m. O orifício de entrada do ar possui um diâmetro de 2,8 cm. A seção cônica na parte inferior da coluna possui uma altura de 0,09 m. A coluna possui 10 furos espaçados igualmente para tomadas de pressão e temperatura. A Figura 3.4 mostra uma fotografia do sistema.

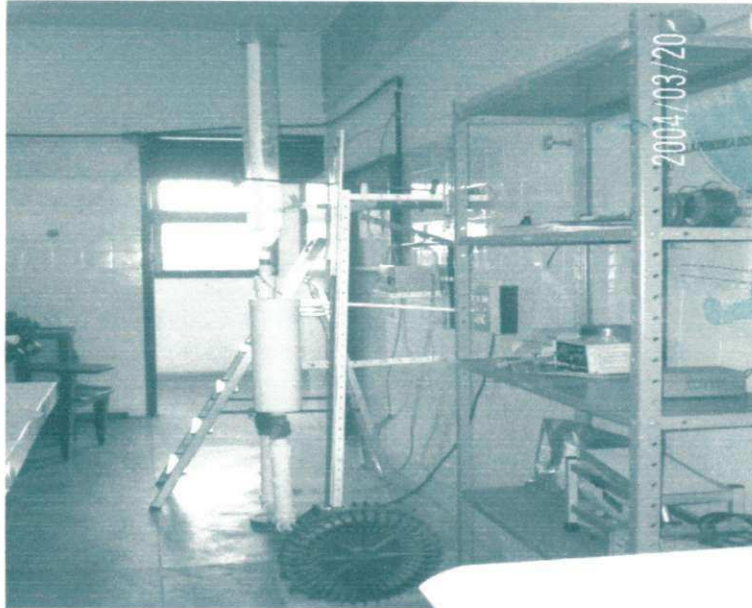


Figura 3.4. Coluna C utilizada nos ensaios de leito de jorro e leito fluidizado.

3.4 Encolhimento do pedaço cúbico de goiaba

A metodologia de cálculo empregada na modelagem do encolhimento obedece ao modelo proposto por KEEY (1972), o autor considera o encolhimento como uma função da umidade do material podendo ser representado por uma relação do tipo:

$$L = L_{iu} (1 + \beta * U) \quad (3.8)$$

L e L_{iu} - dimensões características do material úmido e isento de umidade

U - umidade do material em base seca

β - coeficiente de encolhimento

Considerando-se como dimensão característica o volume do material determinado pelo método do volume deslocado em uma proveta, os dados da razão de V/V_i obtidos a partir da Equação 3.4 do diâmetro da partícula e U/U_i foram correlacionados. O ajuste linear aos dados experimentais permitiu a determinação do coeficiente volumétrico de encolhimento.

3.4.1 Encolhimento durante a secagem em leito fixo

Foram realizados ensaios de secagem de pedaços cúbicos de goiaba em estufa com circulação de ar em três níveis de temperatura 40, 60 e 70 °C. Inicialmente, determinava-se o volume deslocado por um pedaço cúbico de goiaba in natura. Em seguida, eram preparados em média sete pratos contendo cada um 30 cubos de goiaba,

para cada temperatura de secagem. Em intervalos de tempo aleatórios, retirava-se uma amostra, pesava-se para determinação da umidade e pelo método do volume deslocado em álcool etílico P.A, media-se o volume de uma partícula. O encolhimento volumétrico do pedaço cúbico de goiaba foi determinado a partir de um ajuste linear gráfico do volume normalizado do cubo de goiaba pelo seu volume inicial em função da umidade do produto adimensionalizada. A metodologia de cálculo empregada para avaliação do encolhimento volumétrico foi comparada com o modelo proposto por KEEY (1992) que considera o encolhimento volumétrico função da umidade do material. O ajuste linear permitiu a determinação, por extrapolação, do diâmetro dos pedaços cúbicos.

3.4.2 Encolhimento durante a secagem em leito de jorro

O encolhimento volumétrico dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro foi determinado inicialmente a partir do volume partícula. Considerou-se uma esfera de igual volume e determinou-se o diâmetro inicial e final. A partir deste resultado, como foi relatado anteriormente, os dados foram ajustados a um polinômio de segundo ordem e a partir desta equação empírica obteve-se para cada valor de umidade do produto durante a secagem o diâmetro teórico do material e conseqüentemente o volume teórico do mesmo. O volume adimensionalizado foi graficado em função da umidade normalizada do produto para os ensaios com umidade inicial do produto.

3.5 Isotermas de equilíbrio

Inicialmente, foi pré-fixada a temperatura para obtenção das isotermas de equilíbrio em função das condições de operações previstas nos ensaios realizadas de secagem. Foram utilizadas pequenas quantidades da amostra de pedaços de goiaba sem sementes, em torno de $4,7884 \pm 2,0352$ g, consideradas representativas.

Em uma estufa com circulação de ar, previamente aquecida à temperatura de 60 °C, as amostras foram colocadas, inicialmente, durante 120 min, para reduzir a umidade inicial do produto evitando a danificação do sensor do equipamento *Novasina*. Após esse período de tempo, as mesmas eram levadas ao dessecador para que atingissem a temperatura ambiente. Então, eram pesadas e, em seguida colocadas no *Novasina*, onde permaneciam até a total estabilização do aparelho, realizando-se as leituras da atividade de água.

As amostras, quando saíam do aparelho, eram novamente pesadas e retornavam à estufa por 30 min.

Esse procedimento foi repetido até que a atividade de água atingisse valores numa faixa de 0,880 até 0,175 em média para todos os ensaios. A partir dos valores de massa úmida e de massa de sólido seco, foram calculados os teores de umidade em equilíbrio para cada atividade de água mediante as equações 3.8 3.9:

A umidade inicial das amostras foi determinada pelo método da estufa e é descrito no item 3.4.3

$$m_s = m_i / (1 + U_i) \quad (3.9)$$

$$U_e = (m_t - m_s) / m_s \quad (3.10)$$

sendo, m o peso da amostra e os sub-índices i , t e s representam, respectivamente, o valor inicial, final e o peso seco da amostra.

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Henderson, para diversos valores de temperatura.

$$1 - a_w = \exp[-(B_2 \cdot U^{B_1})] \quad (3.11)$$

Para obtenção dos parâmetros B_1 e B_2 , realizou-se linearização das curvas aplicando logaritmo neperiano:

$$\ln(1 - a_w) = -B_2 \cdot U^{B_1} \quad (3.12)$$

Aplicando mais uma vez o logaritmo neperiano, tem-se:

$$\ln[-\ln(1 - a_w)] = \ln B_2 + B_1 \ln U \quad (3.13)$$

3.6 Procedimento experimental da cinética de secagem

O procedimento experimental para a obtenção das fatias de goiaba e dos pedaços cúbicos de goiaba secos é relatado no diagrama de blocos da Figura 3.7.

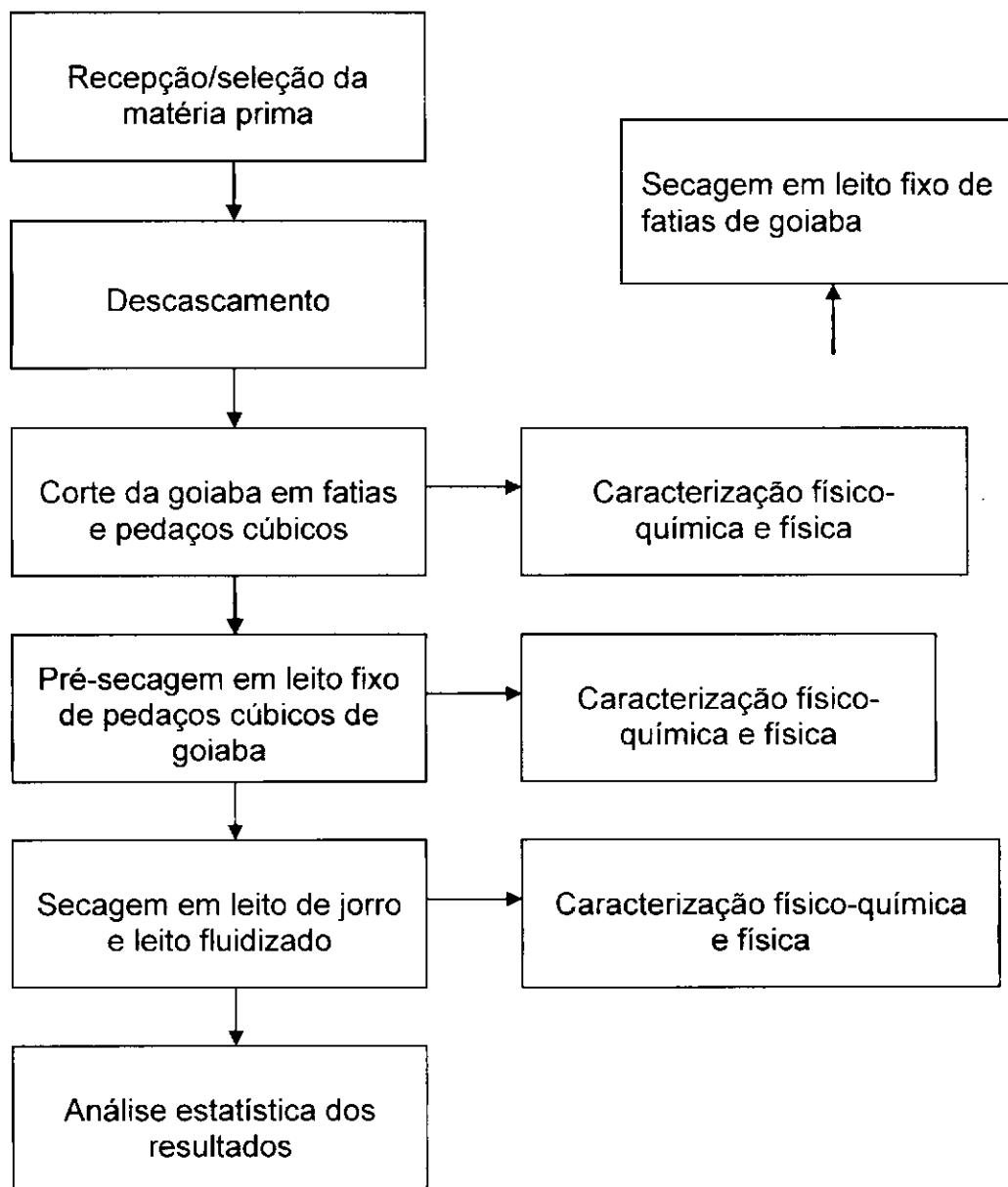


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do procedimento experimental para a obtenção da goiaba seca em fatias e pedaços cúbicos.

3.6.1 Cinética de secagem em camada delgada de fatias de goiaba em leito fixo – Primeira etapa

Inicialmente, eram pré-fixadas as variáveis operacionais, temperatura e velocidade do ar de secagem, em seguida ligava-se o sistema. Uma vez atingido o regime estável, a amostra de fatias de goiaba, com umidade inicial conhecida, era distribuída em uma cesta metálica de peso conhecido e colocada na câmara de secagem. Em períodos de tempos regulares a cesta com a amostra era retirada, pesada rapidamente e retornada ao secador. Este procedimento era repetido até atingir peso constante.

Os teores de umidade inicial e final do produto eram obtidos pelo método da estufa a 70 °C. A partir dos dados experimentais foram obtidas as curvas de secagem para cada uma das condições utilizadas com temperatura entre 40 e 70 °C e velocidade do ar de 0,8 e 1,2 m/s.

3.6.2 Pré-secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo – Segunda etapa

Os ensaios de pré-secagem dos pedaços cúbicos de goiaba no secador de bandeja foram planejados para fornecer níveis de umidade de 60, 105 e 150% (em base seca) no final de cada experimento. Estes experimentos eram conduzidos com uma temperatura de entrada do ar de secagem fixada em 50 °C, e vazão do ar de 230 m³/h. Em intervalos de tempo (min) era realizada a pesagem da bandeja contendo a amostra acompanhando-se desta forma a perda de umidade do material ao longo do processo de secagem em função da sua massa. O produto final foi avaliado no seu teor de vitamina C.

3.6.2.1 Secagem em leito de jorro e leito fluidizado

Os ensaios de secagem em leito de jorro e leito fluidizado de pedaços cúbicos de goiaba foram realizados com uma duração de 60 min. As medidas de velocidade do ar na coluna eram efetuadas em intervalos de tempo por um anemômetro digital, bem como a temperatura e umidade relativa do ar na saída do secador e, a temperatura de entrada do ar de secagem. Acompanhava-se ainda, a medida da altura da fonte de partículas. Em quase todos os ensaios observou-se a produção de um sub-produto produzido pelo atrito dos pedaços cúbicos de goiaba, contudo não se fez nenhum acompanhamento deste pó produzido. Nos ensaios foram feitas as coletas de amostras dos pedaços cúbicos de goiaba em intervalos de tempo, para avaliação da umidade do

produto pelo método da secagem em estufa até peso constante ao longo da secagem no leito de jorro.

Com a finalidade de se observar o comportamento fluidodinâmico do leito à medida que os cubos se tornavam mais secos, e conseqüentemente mais leves e menores, determinou-se a massa específica do mesmo, o diâmetro do pedaço cúbico pelo método volume deslocado e o número de Arquimeds tempo de secagem. No final do experimento determinou-se a vitamina C da goiaba.

As curvas de secagem foram construídas a partir dos dados de umidade do produto, obtidos durante os 60 minutos da secagem, contados a partir do instante em que se ligava o secador carregado de pedaços cúbicos de goiaba.

A metodologia empregada na construção das curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação pode ser assim descrita:

1 – antes de proceder ao carregamento dos pedaços de goiaba ao secador, após estabilizado o sistema na temperatura de trabalho e com a velocidade do ar no jorro fixada, registrava-se as medidas de umidade relativa e das temperaturas de bulbo seco na saída do secador;

2 – a partir do momento em que se acionava o secador, registrava-se em intervalos de tempo a altura da fonte, retirava-se uma amostra do produto do secador em funcionamento, aproximadamente 10%, de forma que não houvesse interferência no comportamento fluidodinâmico do mesmo. As amostras eram levadas a estufa até atingir peso constante para determinação da umidade do produto naquele instante. Com estas informações obtiveram-se as curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação ao longo de todo o processo combinado de leito fixo/leito de jorro, bem como a taxa de evaporação em secador de leito de jorro.

3 – a taxa de evaporação foi determinada pela integral da curva de dU/dt em função do tempo

3.7 Eficiência térmica da secagem em leito de jorro

A eficiência térmica foi determinada segundo a definição proposta por KAMINSKI et al. (1989). A equação utilizada relaciona a quantidade de calor evaporado no processo e a quantidade de calor fornecida à operação. A eficiência térmica foi determinada para cada ensaio no início e final do experimento.

$$Q_{evj} = W_{evj} \times \lambda_{vap} \quad (3.14)$$

$$Q_{ced} = W_{gs} \times (H_s - H_e) \quad (3.15)$$

$$W_{gs} = \rho_{gs} \times Var \times A \times \left(\frac{1}{1 + U_{abs}} \right) \quad (3.16)$$

$$\phi = \frac{Q_{evj}}{Q_{ced}} \quad (3.17)$$

sendo:

W_{gs} - vazão do gás seco (kg/min)

W_{evj} - taxa de evaporação da água no secador de leito de jorro (kg/min)

H_s - entalpia de saída do ar (kJ/kg)

H_e - entalpia de entrada do ar (kJ/kg)

λ_{vap} - calor latente de vaporização da água (kJ/kg) na temperatura de saída do gás

Q_{evj} - quantidade de calor necessário para evaporar a água

Q_{ced} - quantidade de calor fornecida (kJ/min)

ϕ - eficiência térmica (%)

3.8 Modelagem matemática da cinética de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado

No período de taxa decrescente a difusão é controlante, a umidade movimenta-se para a superfície em virtude da difusão molecular. O processo de vaporização da água na secagem de um sólido, pode então ser descrito aplicando-se modelos matemáticos que consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda lei de Fick. Segundo Fick para um sólido esférico homogêneo, o transporte unidimensional da umidade, na direção radial pode ser expresso pela Equação 3.15.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = Def \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2\partial U}{r\partial r} \right) \quad (3.18)$$

Esta equação pode ser aplicada no caso particular da secagem de uma esfera, com coeficiente de difusão constante, tendo como condição inicial, umidade uniforme em toda esfera, e como condições de contorno, a taxa de evaporação nula no centro e umidade de equilíbrio na superfície.

Condição inicial:

$$U(r,0) = U_i$$

Condição de contorno:

$$U(r_p,t) = U_e \quad e$$

$$\frac{\partial U}{\partial r}(0,t) = 0$$

sendo:

U_e – umidade de equilíbrio do material (kg água/kg sólido seco)

U_i – Umidade inicial do material (kg água/kg sólido seco)

R_p – raio da partícula (m)

t – tempo (min)

A solução fornecida por CRANCK (1975) para a Equação 3.15, sujeita às condições inicial e de contorno apresentadas é dada pela Equação 2.8 relatada no Capítulo 2. Tendo em vista a forma geométrica dos pedaços cúbicos de goiaba alterarem durante a secagem em leito de jorro e leito fluidizado, com o achatamento nos vértices do cubo, foi utilizada a equação de difusão aplicada para esfera. Esta equação é válida tanto para tempos curtos quanto para tempos longos. O ajuste dos dados experimentais foi obtido considerando os quatro primeiros termos da série com o efeito do encolhimento onde o raio foi substituído pelos valores instantâneos do raio em função da umidade $r(U)$, determinando-se o coeficiente de difusão efetiva, obtido por regressão não-linear, utilizando o software Origin[®]. Neste caso, graficou-se U^* em função de t/r^2 e substituiu-se o valor $(6/\pi^2 = 0,6079)$ por um parâmetro ajustável A , que multiplica os quatro termos, o modelo difusional utilizado é mostrado na Equação 3.17.

$$U^* = A * [\exp(-Def * 9.8695 * t/r^2) + 0.25 * \exp(-Def * 39.454 * t/r^2) + 0.111 * \exp(-Def * 88.8264 * t/r^2) + 0.0625 * \exp(-Def * 157.8191 * t/r^2)] \quad (3.19)$$

3.9 Estudo fluidodinâmico

3.9.1 Leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba

Foram conduzidos experimentos para determinar os parâmetros fluidodinâmicos como a velocidade de jorro mínimo e a altura máxima capaz de manter o jorro estável haja vista a importância destas variáveis na secagem em leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba.

3.9.1.1 Altura máxima jorrável

A altura máxima capaz de manter o jorro estável foi determinada para o maior valor de umidade usado no presente trabalho dos pedaços cúbicos de goiaba in natura, ou seja, de 1,5 (b.s.). Vários ensaios foram conduzidos variando-se a altura do leito mantendo-se a mesma forma de compactação inicial e observando-se seu comportamento.

3.9.1.2 Velocidade de jorro mínimo e velocidade de colapso do jorro

O estudo fluidodinâmico de pedaços cúbicos de goiaba teve como objetivo determinar as condições operacionais da secagem deste material em secador de leito de jorro. Devido às grandes taxas de evaporação no secador de leito de jorro observadas no início da secagem, a velocidade de jorro mínimo não foi obtida pelo método clássico com base na curva característica de queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar injetado na coluna. A velocidade de jorro mínimo foi determinada no sentido da vazão do ar decrescente no momento em que ainda se percebia a presença de uma fonte de jorro estável, e, em seguida, determinou-se também a velocidade de colapso do leito. Os ensaios foram conduzidos para pedaços cúbicos de goiaba com níveis diferentes de umidade e com diferentes alturas do leito no secador. A Tabela 3.1 ilustra a faixa operacional trabalhada.

Tabela 3.1. Condições operacionais da hidrodinâmica do leito de jorro.

H_i (m)	U_i (b.s.)
0,09	0,6
0,09	1,5
0,105	1,05
0,12	0,6
0,12	1,5

3.9.1.3 Parâmetro de Littman

O parâmetro de Littman foi determinado em função da umidade do produto ao longo do processo de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro. A partir da determinação do diâmetro da partícula seguindo a metodologia descrita anteriormente. Inicialmente, verificou-se o regime de escoamento e, em seguida determinou-se a velocidade terminal da partícula, considerando-a um esfera, utilizando a equação de LEVENSPIEL (1977) para escoamento turbulento.

3.9.2 Leito fluidizado

No estudo do comportamento fluidodinâmico de pedaços cúbicos de goiaba utilizou-se a coluna C mostrada anteriormente. Os ensaios seguiram duas etapas as quais estão descritas a seguir:

ETAPA 1.

- 1) Seleção das goiabas a serem processadas e posterior assepsia;
- 2) Preparação da amostra em pedaços cúbicos sem a parte interna da mesma, fez-se uso de um cortador de batata palito industrial;
- 3) Determinação da umidade inicial da amostra;
- 4) Acionamento do compressor a velocidade desejada para o processo de pré-secagem da amostra de pedaços cúbicos de goiaba;
- 5) Pré-aquecimento do sistema sem o material nas condições operacionais desejadas para realização da pré-secagem da amostra, realizada na coluna B, durante o tempo necessário para estabilização da temperatura de trabalho. As temperaturas utilizadas foram: 45, 55, 73 e 80 °C;

- 6) Atingida a temperatura desejada colocava-se a amostra de pedaços cúbicos de goiaba no secador de coluna com a base plana. Efetuava-se a pré-secagem de forma a obter a umidade ideal da amostra para posterior estudo fluidodinâmico em leito fluidizado;
- 7) Determinação da umidade após a operação de pré-secagem da amostra.

ETAPA 2.

- 1) A amostra pré-seca na coluna B, foi colocada na coluna C onde foram realizados os ensaios em leito fluidizado com níveis de umidade em base seca de 17, 67,2, 80,2 e 239,4% e altura do leito variando de 0,105 a 0,115m. O empacotamento dos pedaços cúbicos deve obedecer sempre a mesma forma para minimizar este efeito;
- 2) As curvas características foram obtidas a partir da determinação da variação da queda de pressão em função da velocidade do ar na coluna no sentido da velocidade decrescente até a interrupção completa do fluxo de ar na coluna. Contudo, inicialmente, a válvula era aberta lentamente de forma a favorecer a circulação das partículas cúbicas de goiaba evidenciando um leito fluidizado;
- 3) Determinação da umidade do produto após o estudo fluidodinâmico;
- 4) A velocidade mínima de fluidização foi determinada pela observação quantitativa durante o experimento e comparada com valores obtidos pelas correlações da literatura.

3.10 Planejamento experimental

3.10.1 Secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

No presente trabalho, a umidade relativa do ar não foi um parâmetro controlado, sendo apenas medido por um termohigrômetro. Com a finalidade de obter uma informação sobre a influência das variáveis operacionais no estudo da cinética de secagem de fatias de goiaba, em secador de leito fixo, e de pedaços cúbicos de goiaba em processo combinado leito fixo/leito de jorro com o mínimo de experimentos. Para o estudo da secagem combinado leito fixo/leito de jorro empregou-se um planejamento fatorial três fatores com ponto central, objetivando analisar o efeito da altura inicial do leito, da umidade inicial e da velocidade do ar de secagem.

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada visando à proposição de modelos estatísticos capazes de prever adequadamente as variáveis dependentes do processo na secagem combinada de leito fixo/leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba. A temperatura do ar de secagem foi mantida constante em todos os experimentos realizados na secagem em leito de jorro de 60 °C, enquanto na pré-secagem em leito fixo as variáveis do processo, temperatura do ar de secagem, velocidade do ar de secagem e umidade inicial do produto mantiveram-se constantes em todos os ensaios.

A Tabela 3.2 (a) e (b) estão listadas as variáveis de entrada e seus respectivos níveis, usados na otimização dos processos de secagem de pedaços cúbicos de goiaba. A faixa operacional utilizada da altura do leito, umidade inicial do produto e da velocidade do ar de secagem no processo combinado foi determinada com base nos resultados preliminares obtidos do estudo hidrodinâmica de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro, por outro lado a temperatura foi fixada em função dos estudos realizados em secagem de fatias de goiaba em leito fixo.

Tabela 3.2a. Planejamento fatorial 2^3 para ensaios de secagem em leito Fixo/leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba.

Variáveis operacionais	Unidades	Níveis		
		-1	0	+1
Altura do leito, H_i	m	0,09	0,105	0,12
Velocidade do ar, V_{ar}	m/s	2,8	3,2	3,5
Umidade inicial, U_i	m_{H_2O}/m_{ss}	0,6	0,105	1,5

m_{H_2O} – massa de água; m_{ss} – massa de sólido seco

Tabela 3.2b. Matriz experimental da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em de jorro

Ensaio	H_i	U_i	V_{ar}
01	-1	-1	-1
02	+1	-1	-1
03	-1	+1	-1
04	+1	+1	-1
05	-1	-1	+1
06	+1	-1	+1
07	-1	+1	+1
08	+1	+1	+1
09 (C)	0	0	0
10 (C)	0	0	0

(C) – experimentos no ponto central

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos no presente trabalho apresenta, inicialmente, um estudo da caracterização física e química dos pedaços cúbicos de goiaba em relação ao comportamento do diâmetro da partícula, do encolhimento volumétrico dos pedaços cúbicos de goiaba e das propriedades térmicas em função da umidade do produto, que servem de base para justificar os diversos comportamentos fenomenológicos das variáveis dependentes avaliadas. Também, realizou-se um estudo do equilíbrio higroscópico da goiaba sem sementes para diferentes temperaturas, objetivando verificar o efeito da umidade de equilíbrio na cinética de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado. Posteriormente, são apresentados resultados referentes a fluidodinâmica dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado. Numa primeira etapa será mostrado o estudo da cinética de secagem de fatias de goiaba em camada fina seguido em leito fixo, apresentando os efeitos da temperatura e da vazão do ar de secagem e o efeito da espessura das fatias. Numa segunda etapa será apresentada a análise da secagem de pedaços cúbicos de goiaba em secador de leito de jorro e leito fluidizado.

4.1 Caracterização

A caracterização dos pedaços cúbicos de goiaba obtidos do mesocarpo da fruta in natura refere-se ao estudo das propriedades físicas e químicas, como: massa específica, tamanho, propriedades térmicas, equilíbrio higroscópico, vitamina C e °Brix.

4.1.1 Caracterização Física

4.1.1.1 Massa específica

Dentro das perspectivas de estudo sobre as características físicas da goiaba em pedaços cúbicos, foi analisado o efeito da umidade sobre a massa específica deste produto obtida em estufa com circulação de ar para diferentes temperaturas 40, 60 e 70°C em secador de bandeja com circulação de ar e da massa específica da goiaba obtida durante a

secagem em leito de jorro à temperatura de 60 °C. A partir destes resultados pode-se observar que a massa específica sofre variação significativa nas diferentes condições operacionais de temperatura usada em níveis de umidade elevados, região onde a quantidade de água retirada é equivalente à variação da redução do tamanho dos pedaços cúbicos. Na Figura 4.1, é observado que os dados experimentais da massa específica obtida durante os ensaios de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro apresentam uma mesma tendência encontrada para leito fixo, contudo dentro de uma faixa de umidade de trabalho no qual o material é adequado para utilização de leito de jorro e de leito fluidizado segundo a classificação de GELDART (1973). Verifica-se a partir da Figura 4.1 que a massa específica passa por um máximo em torno de 2,5 de umidade em base seca para condições de temperaturas diferentes.

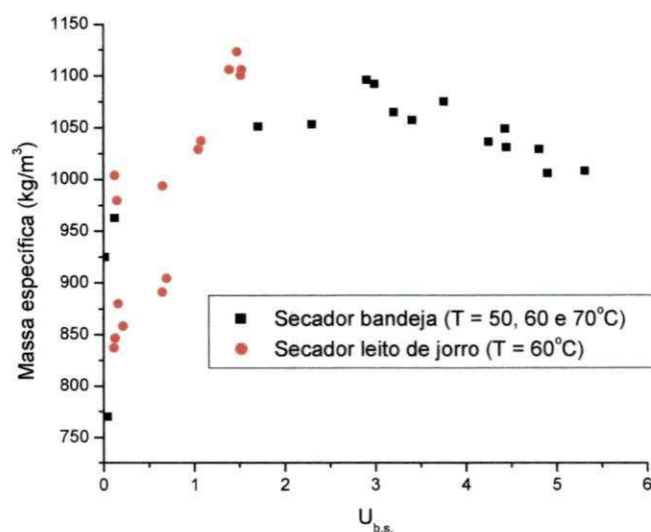


Figura 4.1. Efeito da temperatura sobre a massa específica

Também, pode-se observar partir dos dados das Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 que os pedaços cúbicos utilizados no leito de jorro confirmam a partir dos valores encontrados desta propriedade em conjunto com o seu diâmetro a inclusão dentro da categoria D da classificação de partículas proposta por GELDART (1973) os quais se prestam a uma fluidização instável. Apresentando valores de do diâmetro do pedaço cúbico da goiaba igual ao comprimento característico representado pelo lado do cudo 0,5 a 1,0 cm. Os valores determinados do diâmetro da partícula cúbica foi obtido apenas em uma determinação haja vista a quantidade de material disponível ser pequena. Por outro lado, utilizou-se 30 cubos de goiaba para minimizar o erro experimental.

Tabela 4.1. Massa específica da goiaba descascada em cubos. Temperatura de secagem $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; Brix =9,2

$U\text{ (t)}$	$v_i\text{ (cm}^3\text{)}$	$\rho\text{ (kg/m}^3\text{)}$	$Ar \times 10^{-7}$
4,432	0,7	1049	1,69
3,409	0,5	1057	1,22
2,299	0,4	1053	0,97
1,708	0,34	1051	0,83
0,015	0,1	925	0,21

Tabela 4.2. Massa específica da goiaba em cubos descascada. Temperatura de secagem $= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; Brix =9,7

$U\text{ (t)}$	$v_i\text{ (cm}^3\text{)}$	$\rho\text{ (kg/m}^3\text{)}$	$Ar \times 10^{-7}$
4,900	0,73	1066	1,89
4,253	0,69	1036	1,74
3,206	0,45	1065	1,16
2,993	0,43	1092	1,14
2,906	0,43	1096	1,14
1,936	0,3	1108	8,07
0,0415	0,15	770	2,80

Tabela 4.3 Massa específica da goiaba em cubos descascada. $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; Brix =9,1

$U\text{ (t)}$	$v_i\text{ (cm}^3\text{)}$	$\rho\text{ (kg/m}^3\text{)}$	$Ar \times 10^{-7}$
5,313	0,77	1008	1,88
4,810	0,73	1029	1,82
4,447	0,70	1031	1,75
3,756	0,55	1075	1,44
3,496	0,47	1113	1,27
3,208	0,49	965	1,15
0,125	0,13	963	3,04

4.1.1.2 Encolhimento Volumétrico

Sabendo-se que a secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade envolve um fenômeno de encolhimento foram conduzidos ensaios em estufa com circulação de ar sob diferentes condições de temperatura 40, 60 e 70 °C, para estudar o efeito desta variável sob diferentes condições de umidade durante o processo. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, mostram os resultados obtidos.

Tabela 4.4. Encolhimento do produto. T = 70 °C; Brix =9,2

$U(t)/U_{i\ b.s}$	v/v_i	$v\ (cm^3)$
1	1	0,7
0,77	0,71	0,5
0,52	0,57	0,4
0,38	0,48	0,34
$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,14	0,1

Tabela 4.5. Encolhimento do produto. T = 60 °C; Brix =9,7

$U(t)/U_{i\ b.s}$	v/v_i	$v\ (cm^3)$
1	1	0,73
0,86	0,96	0,69
0,65	0,62	0,45
0,61	0,58	0,43
0,59	0,59	0,43
0,39	0,41	0,3
$8,43 \cdot 10^{-3}$	0,2	0,15

Tabela 4.6. Encolhimento do produto. T = 40 °C; Brix =9,1

$U(t)/U_i$	v/v_i	$v\ (cm^3)$
1	1	0,77
0,91	0,95	0,73
0,84	0,91	0,70
0,71	0,71	0,55
0,66	0,61	0,47
0,60	0,63	0,49
$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,16	0,13

A partir dos dados experimentais obtidos e apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, para uma melhor avaliação do efeito da temperatura sobre o encolhimento volumétrico foi graficado o volume adimensional em função da umidade reduzida, encontrando-se que o encolhimento volumétrico, que apresentou comportamento linear durante toda a secagem, com coeficiente de encolhimento constante, conforme mostra a Figura 4.2. Desta forma utilizou-se um modelo linear proposto por KEEY (1992), o qual ajustou satisfatoriamente bem os valores experimentais obtidos, como é mostrado na Figura 4.2. O coeficiente de encolhimento volumétrico, β , igual a 0,82208 não foi influenciado pela de temperatura na faixa estudada.

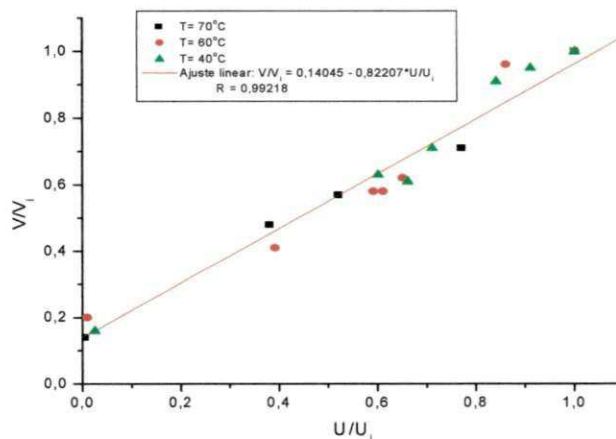


Figura 4.2. Efeito da Temperatura no encolhimento Volumétrico dos pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo

Em relação ao comportamento dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro conforme a metodologia descrita no Capítulo 3, o encolhimento volumétrico foi acompanhado medindo-se para cada ensaio o diâmetro da esfera de igual volume deslocado no início e no final de cada experimento, Ajustou-se os resultados obtidos a um modelo linear em função da umidade do produto em base seca. Observou-se de forma geral que o encolhimento volumétrico para níveis de umidade entre 0,6 e 1,0 em base seca apresentam uma mesma tendência aos resultados encontrados para a secagem em bandeja dos pedaços cúbicos de goiaba. Os dados relativos aos ensaios realizados com umidade inicial de 0,6 e 1,05 em base seca são ilustrados na Figura 4.3. Observa-se que os mesmos podem ser representados por uma única curva independente da velocidade do ar de secagem e da altura inicial do leito, o modelo de KEEY proposto

mostra-se satisfatório com um coeficiente de correlação igual a 99 %. Verifica-se que o coeficiente de encolhimento dos pedaços de goiaba em leito de jorro apesar da circulação dos mesmos e do atrito apresenta-se da mesma ordem de grandeza ao encontrado em secador de bandeja, 0,62244.

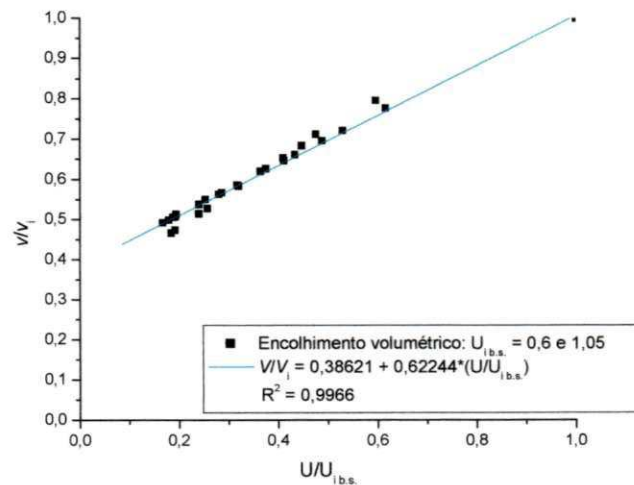


Figura 4.3. Encolhimento volumétrico dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

A Figura 4.4 mostra o ensaio realizado em leito de jorro com umidade inicial do produto igual a 1,5 em base seca. Verifica-se que a curva apresenta duas regiões bem caracterizadas identificadas pela mudança de inclinação da curva a partir de $U/U_{i,b.s.}$ aproximadamente igual a 0,6. Este valor equivale a uma umidade do produto em base seca de 0,9. Podemos afirmar que este comportamento da curva aproxima-se do tipo b apresentado por KEEY (1992), onde o produto encontra-se na saturação e a quantidade de água removida do material é igual a variação do tamanho da partícula.

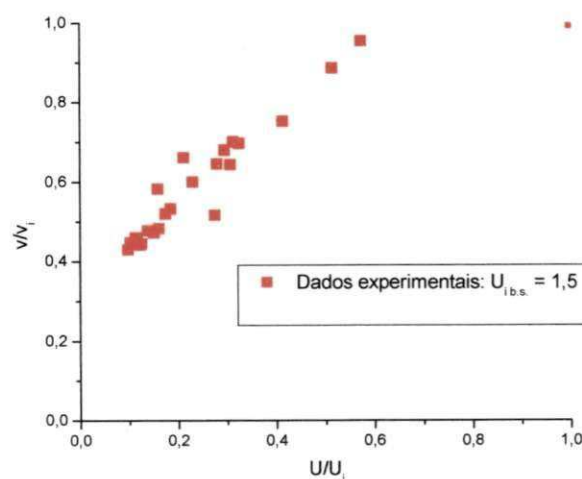


Figura 4.4. Encolhimento volumétrico dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

4.1.2 Propriedades Térmicas

O estudo das propriedades térmicas é um fator muito importante para o desenvolvimento de máquinas e equipamentos agro-industriais. Todavia, poucos dados encontrados na literatura são em função da temperatura e umidade do produto. A seguir são apresentados os resultados do calor específico, condutividade e difusividade térmica, de fatias goiaba sem a polpa em função da temperatura e umidade do produto. O método utilizado para determinação das propriedades foi o da sonda linear dual descrito no capítulo 3.

Os resultados obtidos de calor específico volumétrico, condutividade e difusividade térmica para a goiaba e o caju na temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, são mostrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 em função da umidade. Observa-se que o comportamento dessas variáveis apresenta uma mesma tendência: Na região de baixa umidade, as propriedades térmicas variam de maneira acentuada, aumentando com o incremento do teor de água e passando por um valor máximo que se encontra entre 2 e 4 de umidade em base seca. Na fruta mais úmida, a tendência se inverte, com uma diminuição do valor da propriedade térmica com o aumento de umidade. É interessante notar que o intervalo de umidades correspondentes ao máximo nas propriedades térmicas praticamente coincide com o observado na variação da massa específica com a umidade, na Figura 4.5, fato que confirma a influência dos efeitos estruturais sobre as propriedades térmicas. O efeito do aumento da condutividade térmica e calor específico com a umidade, neste caso na região de baixa umidade, foi também observado por Affonso Jr (2002) e Chandrasekar e Viswanatan (1999) estudando grãos de café, com até 40% 30% de umidade (b.u) e ALSINA *et al* (2004) no estudo das propriedades térmicas de fatias de caju. Os dados experimentais foram comparados com os obtidos por ALSINA *et al* (2004) que trabalharam com fatias de caju e são apresentados também nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

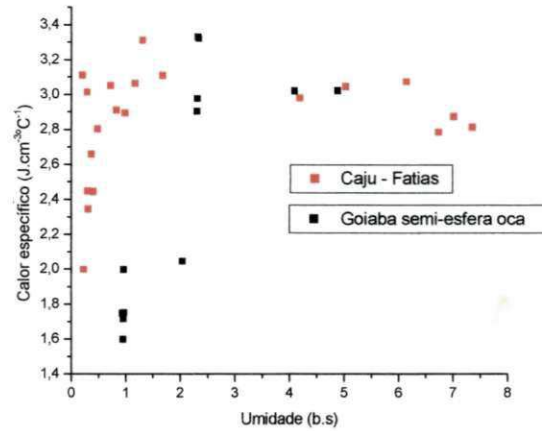


Figura 4.5 - Efeito da umidade do produto sobre o calor específico

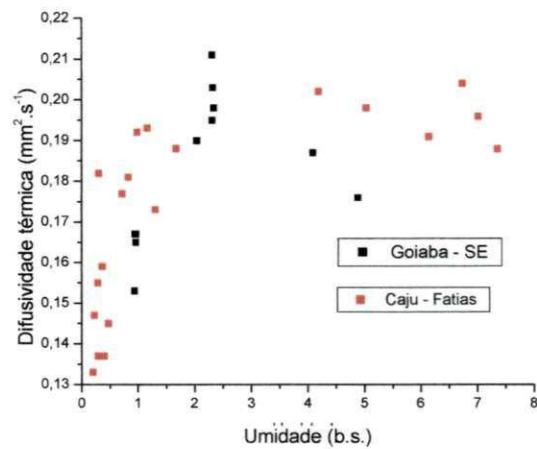


Figura 4.6 - Efeito da umidade do produto sobre a difusividade térmica.

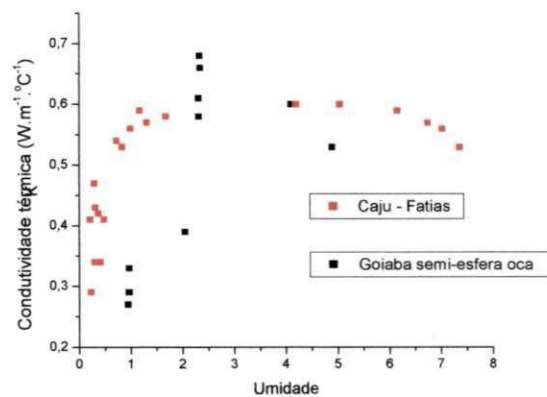


Figura 4.7 - Efeito da umidade do produto sobre a condutividade térmica

4.2 Caracterização Química

A Tabela 4.7 mostra os resultados encontrados dos pedaços cúbicos de goiaba “in natura” referentes à vitamina C, Brix e índice de refração da amostra. Observa-se que o produto utilizado apresenta uma boa padronização.

Tabela 4.7 Propriedades químicas do mesocarpo da fruta *in natura*.

ENSAIO	Vitamina C (% b.s.)	^o Brix	Índice de refração
1	11,150	9,1	1,3457
2	6,208	9,3	1,3460
3	–	–	–
4	6,855	–	–
5	11,816	9,5	1,3462
6	–	9,2	1,3458
7	7,280	9,7	1,3465
8	6,855	–	–
9	–	8,9	1,3453
10	–	9,1	1,3456

4.3 Isotermas de Equilíbrio

Dos resultados obtidos das mediadas de atividade de água, plotou-se curvas de equilíbrio higroscópico, as quais são apresentadas na FIGURA 4.8, estas curvas apresentam comportamento semelhante ao obtido por NIP (1979) para isotermas de sorção de goiaba em pó a 22°C, utilizando o método estático através de soluções supersaturadas de sal.

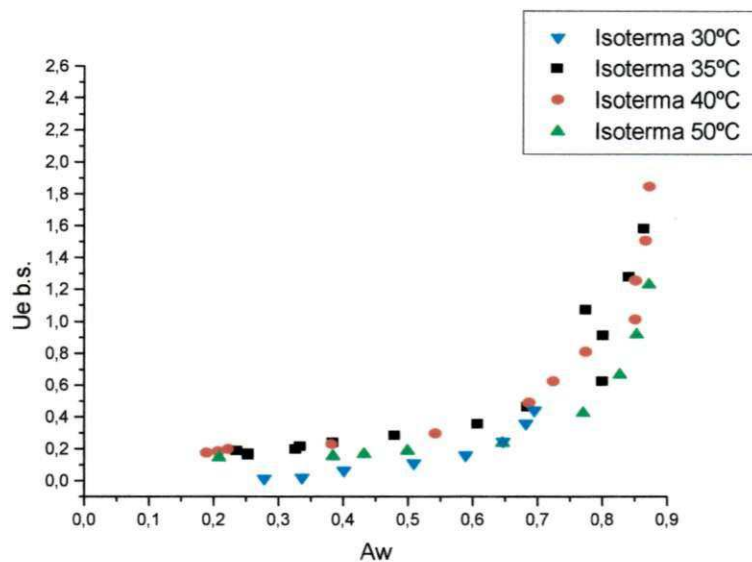


Figura 4.8 Isotermas de equilíbrio da goiaba vermelha.

Observa-se na Figura 4.9 que, segundo a representação linearizada do modelo de Henderson, não existe o efeito significativo da temperatura no intervalo estudado entre 30 e 50 °C, do comportamento higroscópico do mesocarpo da goiaba, uma vez que os valores se ajustam aproximadamente em uma única curva.

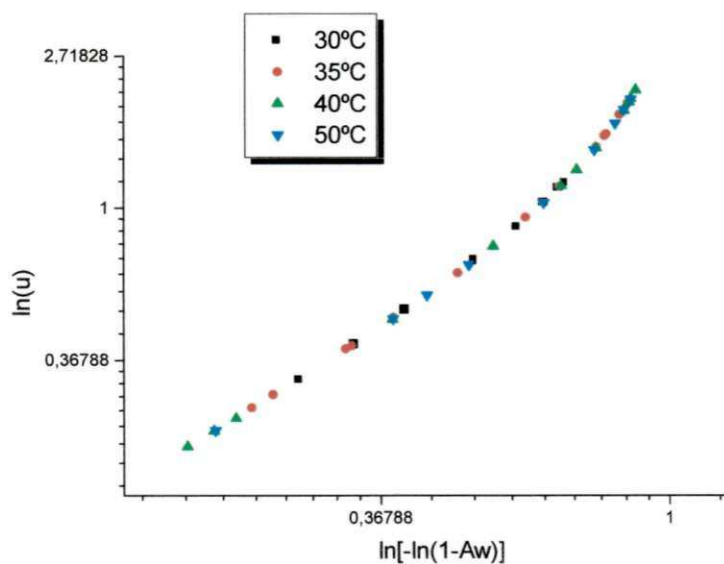


Figura 4.9. Representação linearizada conforme modelo de Henderson

Os dados foram tratados de acordo com a equação (2.40) para determinação dos parâmetros do modelo proposto por Henderson. O ajuste apresentou coeficiente de correlação médio de 0,99.

Pelos resultados do ajuste mostrados na Tabela 4.8, os parâmetros B1 e B2 da equação de Henderson não apresentam variação significativa com a temperatura, oscilando em torno dos valores médios apresentados na última linha da Tabela 4.8. Estes resultados confirmam o observado na Figura 4.9, indicando que os dados de equilíbrio higroscópico podem ser representados, no intervalo de 30 a 50 °C pela equação:

$$1 - a_v = \exp\left[-\left(0,595 + U^{0,666}\right)\right] \quad (4.1)$$

Tabela 4.7. Parâmetros da equação de Henderson.

Temperatura	B1	B2
30°C	0.704 ± 0,023	0,629 ± 0,008
35°C	0.656 ± 0,025	0,591 ± 0,011
40°C	0.664 ± 0,031	0,571 ± 0,015
50°C	0.640 ± 0,046	0,589 ± 0,019
Média	0.666 ± 0,031	0,595 ± 0,013

4.4 Fluidodinâmica de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fluidizado.

Os resultados obtidos no conjunto de experimentas mostraram que é possível obter um leito fluidizado com pedacos cúbicos de goiaba. Verifica-se que além da influência da umidade inicial do produto a ser fluidizado, outro parâmetro vital para que ocorra a fluidização, é a forma de empacotar o leito, visto que as partículas mesmo após a pré-secagem tendem a se aglomerar em função da maneira em que o leito é empacotado. Além do mais, a geometria da coluna utilizada nos ensaios é segundo literatura mais apropriada para leito de jorro.

A Figura 4.10 ilustra o comportamento do leito fluidizado de pedacos cúbicos de goiaba vermelha durante a secagem, observa-se a expansão do leito de forma homogênea.

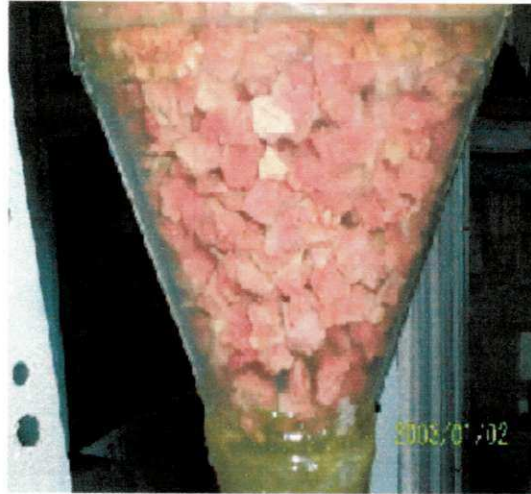


Figura 4.10 – Comportamento das partículas durante a secagem em leito fluidizado.

Para avaliar o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado de pedaços cúbicos de goiaba obtido do mesocarpo da fruta in natura foram conduzidos experimentos para uma altura do leito variando entre 0,105 a 0,115 m e quatro níveis de umidade inicial em base seca 17,1%, 67,2%, 80,2% e 239,4%. As variações de umidade inicial da amostra para realização do ensaio fluidodinâmico em leito fluidizado foram obtidas pelos do processo de pré-secagem em camada espessa de pedaços cúbicos de goiaba., em leito fixo, realizado na coluna B, ilustrada no capítulo 3.

Com a diminuição da umidade durante a secagem, observou-se uma redução na altura do leito e, conseqüente, aglomeração dos pedaços de goiaba os quais foram separados no término do experimento. Segundo as observações qualitativas, o leito fluidizado ocorreu em regime turbulento, rápido, bastante diluído com o aumento da velocidade do gás. Verificou-se que para o experimento realizado com umidade inicial de 239,4% em base seca não foi possível fluidizar o leito de partículas. Nos demais ensaios, observou-se que à medida que a velocidade do gás era acrescida, o leito de pedaços cúbicos de goiaba elevou-se como um todo, sem ocorresse uma expansão do mesmo. E em seguida, a parte inferior do leito foi fluidizada de forma diluída enquanto a superfície do leito foi fluidizada de forma homogênea. Para velocidades mais elevadas o leito foi fluidizado de maneira empistonado, que é uma característica de sistemas constituídos de partículas grandes.

As curvas características de queda de pressão para leito fluidizado obtidas pelo método clássico à velocidade decrescente são ilustradas na Figura 4.11. Verifica-se que estas apresentam o mesmo comportamento encontrado por VEGA *et al* (1996) onde se observa uma ampla zona de transição entre o leito fixo e o leito fluidizado devido ao teor de umidade do produto. Observa-se, também, que o comportamento da curva na região de mínima fluidização é complexo passando rapidamente o leito para um outro regime. Desta forma é difícil predizer a velocidade de mínima fluidização pelo método clássico proposto por RICHARDSON (1971), citado por MURACHMAN (1990), uma vez que a velocidade de mínima fluidização sofre efeito significativo da umidade inicial do produto para uma mesma altura do leito. Por outro lado, para teores de umidade próximos, mas com a mesma altura e alturas diferentes esta variável não é influenciada. ALMEIDA (1993) verificou um comportamento semelhante quando do estudo da fluidização de sementes de urucum, ou seja, não verificou o efeito da altura do leito na velocidade mínima de fluidização. Observou-se que para umidades inferiores a queda de

pressão é superior. Contudo, como os resultados ainda são preliminares não se encontrou uma justificativa plausível para avaliar este comportamento.

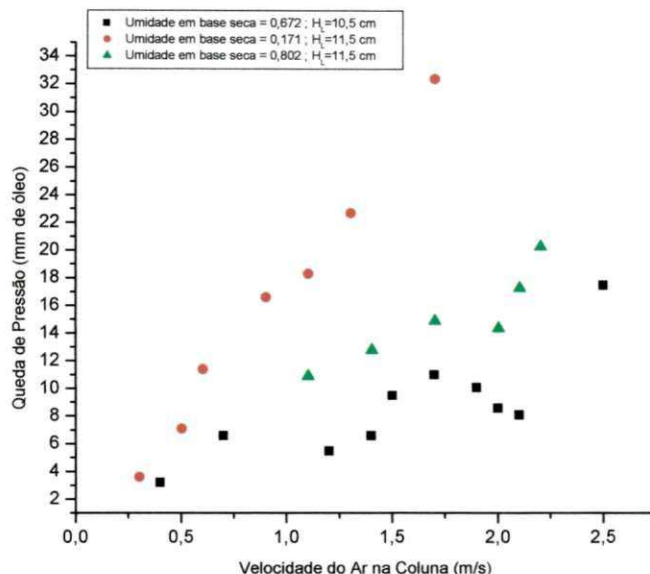


Figura 4.11. Curva Característica em leito fluidizado de pedaços cúbicos de goiaba

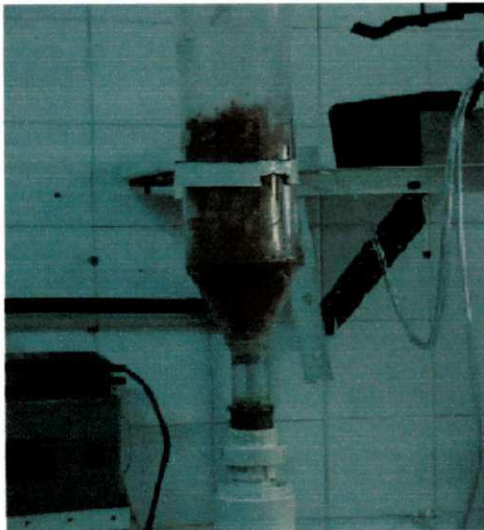
A Tabela 4.8 mostra os resultados experimentais obtidos da U_{mf} e os determinados a partir de correlações empíricas. Verificou-se que este parâmetro não sofre efeito significativo da altura inicial do leito, resultado semelhante foi encontrado por ALMEIDA (1991) durante o estudo fluidodinâmico de sementes de urucum em leito fluidizado. Por outro lado, observou-se que a umidade inicial do produto afeta consideravelmente a velocidade de mínima fluidização.

Tabela 4.8 Velocidade mínima de fluidização: dados experimentais e obtidos através de correlações empíricas.

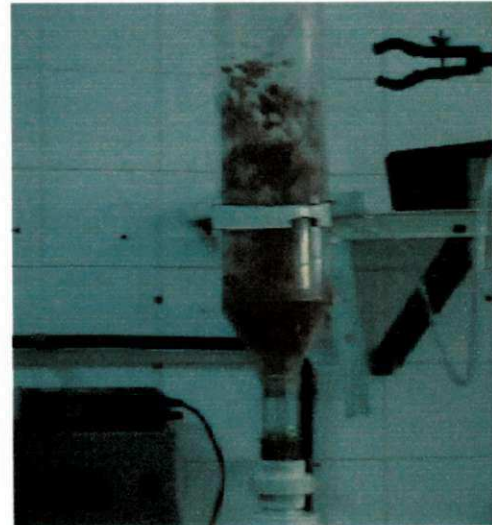
H_i (m)	U_i	U_{mf} (m/s)		
		Experimental	Gislher	Thorley
0,105	0,672	1,7	1,9	2,2
0,11	0,171	1,0	-	-
0,11	0,802	1,7	1,9	2,2

4.5 Fluidodinâmica de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito de Jorro

Tendo em vista mudança de comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro em função das mudanças das propriedades físicas dos pedaços de goiaba e das elevadas taxas de secagem mesmo em baixas temperaturas no início jorro, devido à alta circulação do material, os ensaios fluidodinâmicos foram realizados no processo inverso com a redução da velocidade do ar na coluna para determinar os parâmetros fluidodinâmicos, contudo as curvas características não foram construídas devido à alta instabilidade do leito. A Figura 4.12 mostra o comportamento do leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba durante a secagem. Observa-se a mudança de comportamento fluidodinâmico do leito, onde o mesmo passa por um período de jorro estável onde o leito é caracterizado pela formação das regiões do anel e do jorro, em seguida fluidização rápida caracterizado por um leito com comportamento de um líquido em ebulição e formação de bolhas, “slugging” e posteriormente transporte pneumático, onde as partículas são arrastadas ao longo da altura da coluna.



(a)



(b)

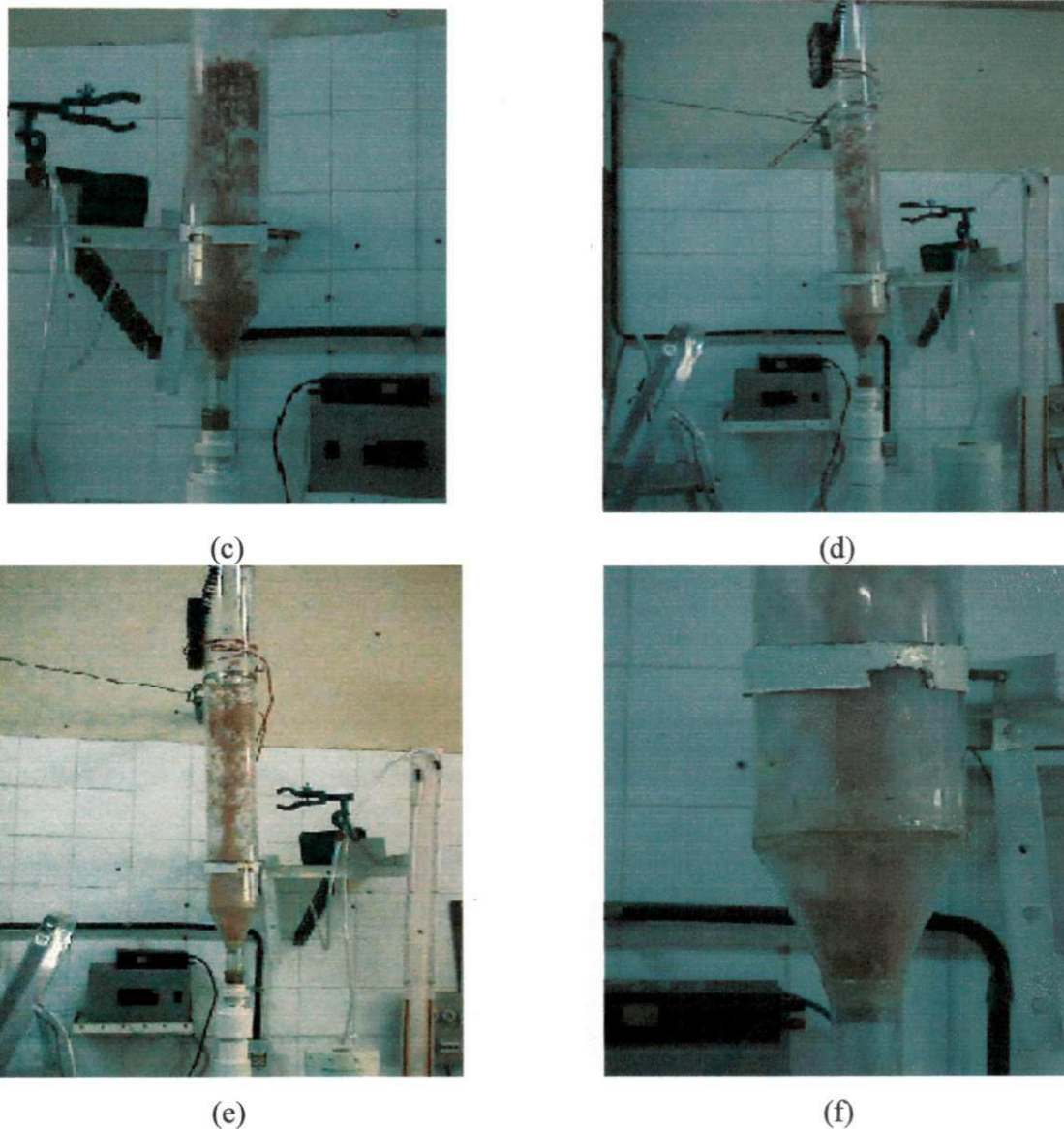


Figura 4.12. Comportamento fluidodinâmico do leito de jorro; (a) Leito fixo; (b) leito expandido com circulação de goiaba na superfície do leito; (c) “slugging”; (d) leito de jorro; (e) leito de jorro; (f) região inferior do leito de jorro.

4.5.1 Altura Máxima Jorrável

Por sucessivos ensaios realizados na coluna C, cuja metodologia está descrita no Capítulo 3, foi possível determinar a altura máxima do leito de pedaços cúbicos, abaixo da qual ainda ocorre um jorro estável (H_{\max}) para o maior valor de umidade inicial do produto utilizado na secagem em leito de jorro, correspondente a 1,5 (b. s.). A partir desse valor inicia-se uma fluidização incipiente e de baixa qualidade.

A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre os resultados experimental e os valores obtidos por correlações citadas na literatura, verifica-se que as correlações de

LEFROY e DAVIDSON (1968) e GRBAVCIC et al (1976), que são função apenas das características da coluna e das propriedades das partículas, estimam de forma satisfatória o valor experimental determinado.

Tabela 4.9. Comparação entre o valor da altura máxima jorrável e os preditos por correlação

Experimental, $H_{\max}(\text{m})$	Correlações empíricas, $H_{\max}(\text{m})$	
	(3)	(4)
0.12	0.113	0.143

A Tabela 4.10 mostra os resultados obtidos do parâmetro de LITTMAN. Verifica-se que para todos os ensaios os valores obtidos são superiores a 0,02, confirmando que o mecanismo de terminação do jorro é de fluidização no topo da região anular, pois os ensaios foram realizados na altura máxima capaz de manter o jorro estável.

Tabela 4.10. Número de Arquimedes e parâmetro de Littman obtidos em leito de jorro.

ENSAIO	$Ar \times 10^{-7}$	Parâmetro de littman,A
1	1,271	0,132
2	1,333	0,139
3	1,770	0,139
4	1,743	0,139
5	1,290	0,132
6	1,279	0,150
7	1,127	0,112
8	1,743	0,139
9	1,010	0,117
10	1,347	0,136

4.5.2 Velocidade de Jorro Mínimo

Tendo em vista as respectivas mudanças estruturais e das propriedades físicas dos pedaços cúbicos de goiaba, como também das altas taxas de evaporação da água nos instantes iniciais da secagem do material, a metodologia tradicional para determinação

da velocidade de jorro mínimo obtida a partir das curvas características de queda de pressão versus velocidade do ar na coluna não pode ser utilizada. Dessa forma, a metodologia proposta encontra-se descrita no Capítulo 3.

Através dos resultados obtidos das propriedades físicas do diâmetro do material ao longo da secagem podem-se determinar as variações do número de Arquimedes e da constante de Littman que mostram a mudança de comportamento do leito devido a alterações citadas anteriormente e, que justificam a metodologia utilizada para a determinação da velocidade de jorro mínimo. A Figura 4.13 apresenta estas modificações para um ensaio. Comportamento similar foi observado nos diversos experimentos.

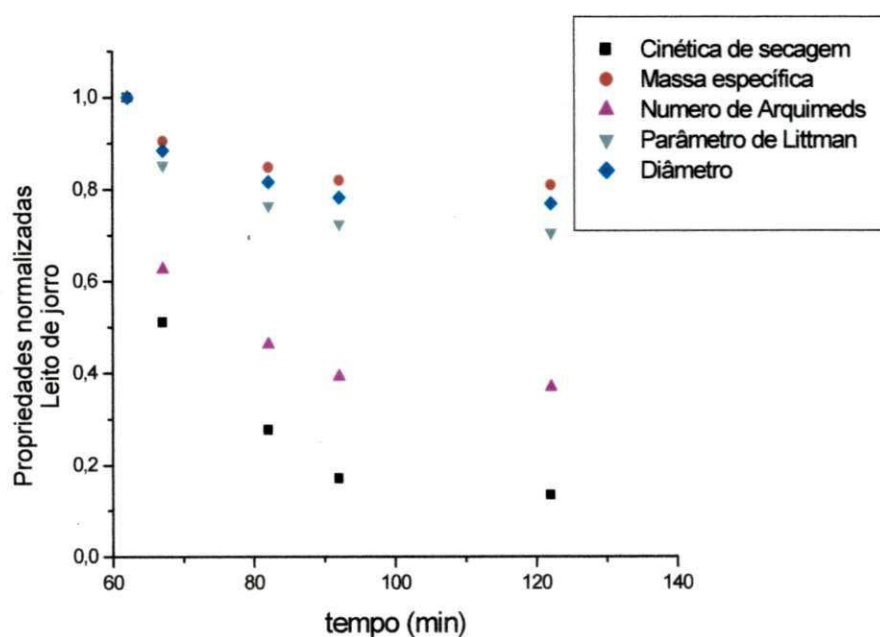


Figura 4.13. Propriedades normalizadas em função do tempo de secagem

A Tabela 4.11 ilustra os resultados experimentais obtidos da velocidade de jorro mínimo (V_{jm}) para as diversas condições operacionais da altura inicial do leito (H_i) e do teor de umidade inicial em base seca (U_i) e os preditos pelas correlações empíricas citadas na literatura. Verifica-se que a correlação proposta por GISHLER (1955) prediz melhor os valores experimentais obtidos. Enquanto que as correlações propostas por SMITH e RED () e ABDELRAZEK (1969) superestimam e subestimam os valores experimentais, respectivamente.

Tabela 4.11. Velocidade de jorro mínimo – Valores observados e preditos por correlações

CONDIÇÕES OPERACIONAIS		Velocidade de jorro mínimo (m/s)			
H_i (m)	$U_{i.b.s.}$	Experimental	Abdelrazek (1969)	Smith e Red (1964)	Gishler (1955)
0,09	0,6	1,4	1,096	52,448	1,919
0,12	0,6	2,6	1,311	72,184	2,293
0,09	1,5	2,5	1,273	59,875	2,228
0,12	1,5	2,8	1,46	78,23	2,552

A Figura 4.14 apresenta a relação entre os valores preditos através das correlações de GISHLER (1955) e ABDELRAZEK (1969) com os valores observados. Verifica-se que os dados preditos pela correlação de ABDELRAZEK (1969) apresentam uma dispersão mais acentuada.

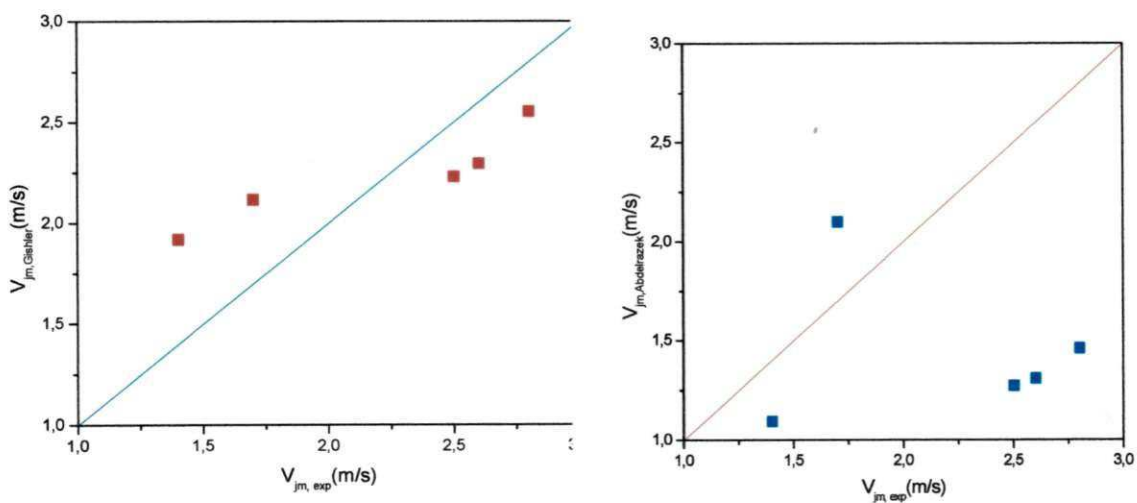


Figura 4.14. Valores preditos e observados da velocidade de jorro mínimo (a) Gishler (b) Abdelrazek

Os resultados experimentais da velocidade de jorro mínimo em conjunto com a altura máxima do leito foram utilizados para definição da matriz do planejamento experimental para os ensaios de secagem.

4.5.3 Estudo das modificações estruturais na fluidodinâmica do leito de jorro durante a secagem.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam as modificações ocorridas na estrutura do leito de jorro durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba para razões de V/V_{jm} variando de 1,0 até 2,5, umidade inicial do produto numa faixa de 0,6 a 1,5 em base seca e altura inicial do leito entre 0,09 e 0,12m. Analisando as Figuras 4.16 e 4.17 observa-se um comportamento similar das curvas onde a altura adimensional da fonte em relação à altura inicial do leito em função do número de Arquimedes normalizado apresenta um crescimento linear a partir do segundo valor do Ar_{ad} , este fato pode ser justificado devido às altas taxas de secagem ocorridas nos primeiros minutos, os pedaços cúbicos sofrem efeito de encolhimento característicos de produtos agrícolas de forma mais acentuada modificando rapidamente as propriedades físicas do produto, tamanho e massa específica, e conseqüentemente o seu número de Arquimedes. Na Figura 4.16, verifica-se ainda que nas condições de velocidade de operação do ar de secagem igual à velocidade de jorro mínimo e na altura máxima capaz de manter o jorro estável e umidade mais elevada o produto sofre o efeito de encolhimento devido à perda de água, menos rapidamente mantendo-se praticamente constantes as propriedades físicas do material. Desta forma o número de Arquimedes apresenta poucas variações e a altura da fonte do leito aumenta acentuadamente para pequenas variações do Arquimedes. Por outro lado, para razões de V/V_{jm} igual a um, e condições contrárias de máximo e mínimo da umidade inicial do produto e altura inicial do leito as curvas comportam-se similarmente, contudo observa-se que para um mesmo valor da altura da fonte adimensional o número de Arquimedes normalizado é menor para condições de umidade inicial em base seca de 1,5 e altura inicial do leito de 0,09m, ou seja o fator encolhimento é mais acentuado quando se tem umidades mais elevadas. Nestas curvas verificam-se, praticamente, duas regiões, apresentadas por inclinações distintas. Na primeira, partindo do valor inicial do Arquimedes normalizado até o segundo ponto de cada curva, foi observado um leito de jorro estável e bem definido com as regiões do

anel e do jorro também bem diferenciadas. A segunda região, a partir do segundo ponto da curva, é caracterizada por apresentar um leito bastante diluído e instável.

Na Figura 4.17 verifica-se um comportamento semelhante ao encontrado nas curvas apresentadas na Figura 4.16 e discutido anteriormente.

Na Figura 4.15, as curvas apresentadas da altura da fonte adimensionalizada em função do Arquimedes normalizado mostram um comportamento linear o qual caracteriza a primeira região citada anteriormente. Esta região é caracterizada por apresentar um jorro estável, ou seja, durante todo o ensaio de secagem nas condições de ponto central e para condições mínimas de operação da secagem em leito de jorro obtida no planejamento, altura inicial do leito de 0,09m e umidade inicial do produto de 0,6 (b.s.), a estrutura do leito de jorro se manteve em condições bem definidas.

A Figura 4.18 apresenta um leito estável até o segundo valor de Arquimedes normalizado que corresponde aproximadamente aos 10 minutos inicial da secagem, em seguida observa-se um leito bastante diluído sem formação da região central do jorro e da região anular, o leito apresenta um comportamento descontínuo e sua estrutura é muito modificada, com formação de grandes bolhas de ar caracterizando *slugging*

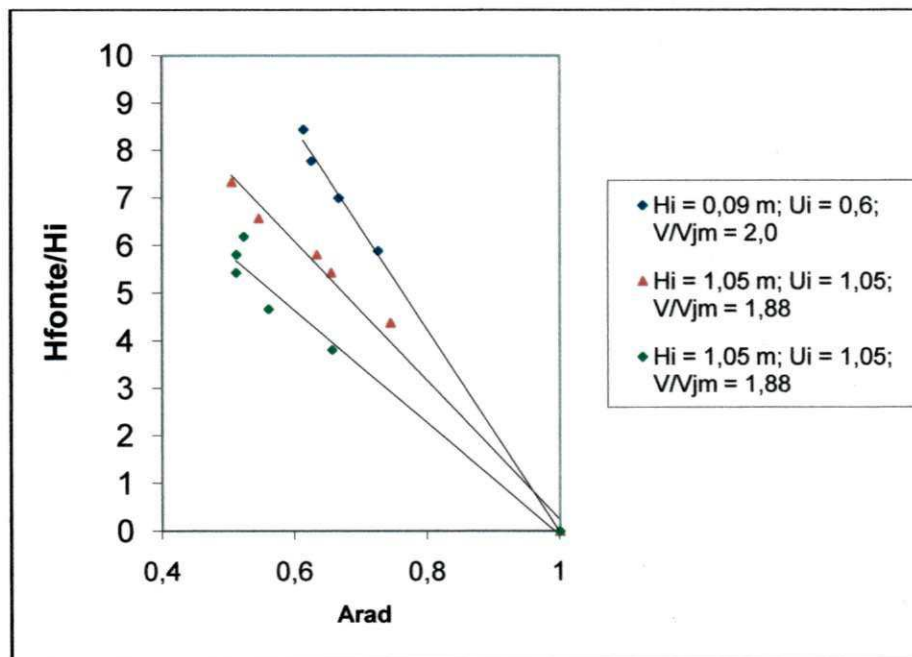


Figura 4.15. Efeito do número de Arquimedes na estabilidade do leito de jorro durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba. Os valores em vermelho e verde referem-se ao ensaio realizado no ponto central.

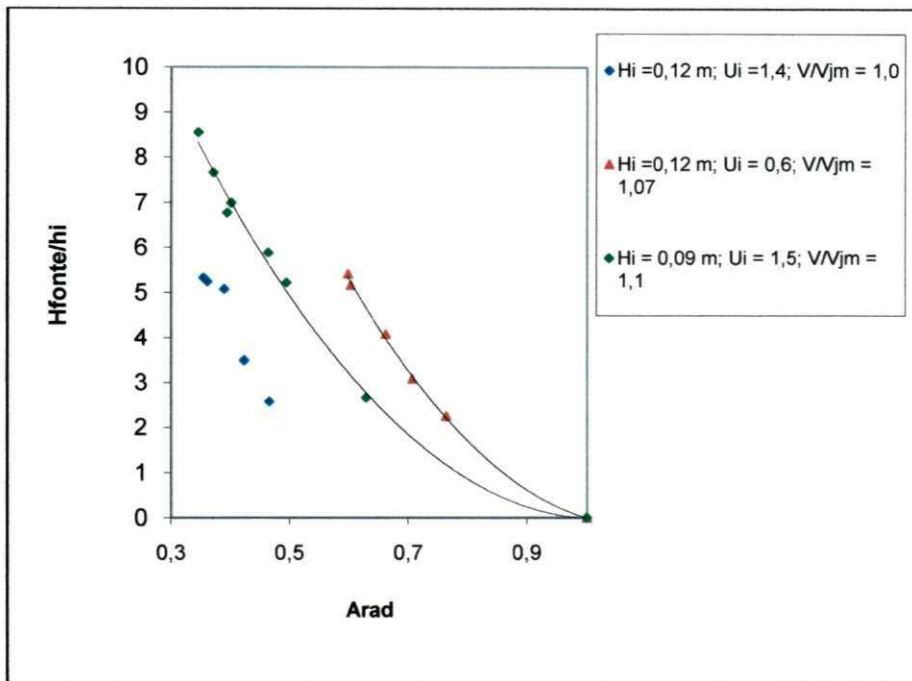


Figura 4.16. Efeito do número de Arquimedes na estabilidade do leito de jorro durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba

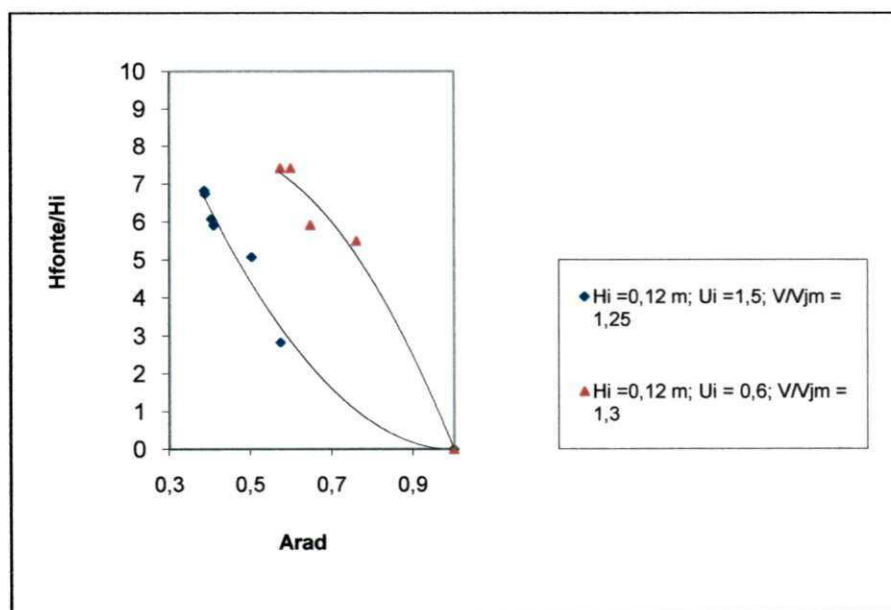


Figura 4.17. Efeito do número de Arquimedes na estabilidade do leito de jorro durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba

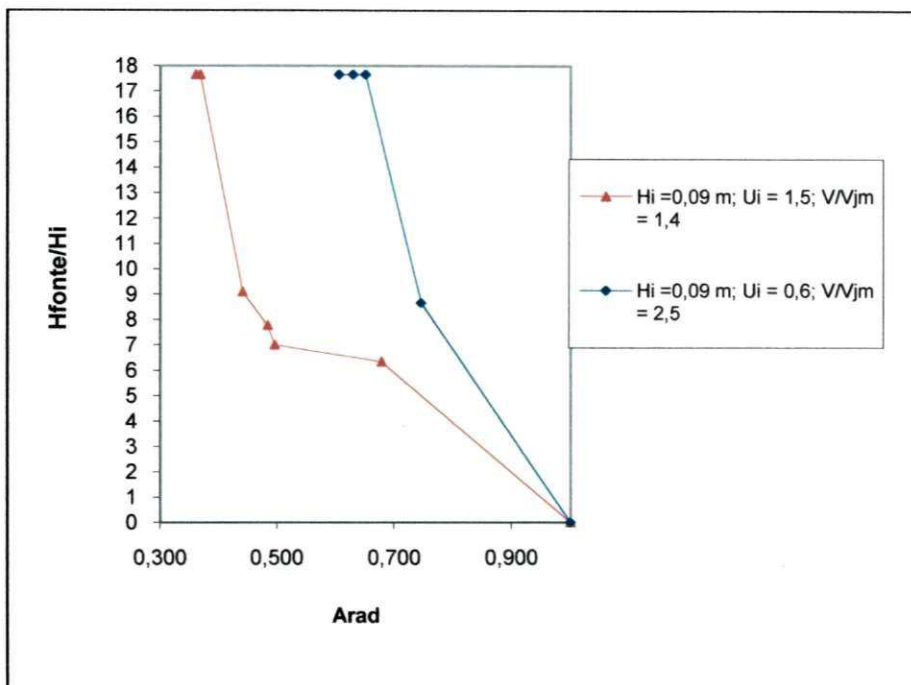


Figura 4.18. Efeito do número de Arquimedes na estabilidade do leito de jorro durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba

4.6 Cinética de Secagem de Fatias de Goiaba em leito fixo

Nas Figuras 4.19 e 4.20 são apresentadas curvas de secagem de fatias de 0,5 cm e 1,0 cm de espessura, respectivamente, obtidas em leito fixo com diferentes temperaturas de ar escoando a uma velocidade de 0,8 m/s.

Observa-se que, como esperado, quanto mais elevada a temperatura, mais rapidamente se processa a secagem. Entretanto, foi verificado que para a temperatura de 70°C o produto obtido apresenta um escurecimento, ocasionado provavelmente pela caramelização de açúcares e mudanças físico-químicas, bem como gelificação do produto, o que torna limitado o uso de temperaturas elevadas, apesar de favorecer a cinética.

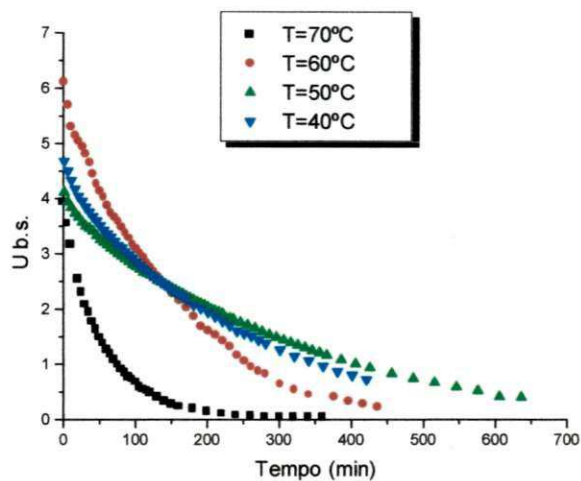


Figura 4.19. Influência da temperatura do ar de secagem em fatias de goiaba.
($e = 0,5$ cm; $V = 0,8$ m/s).

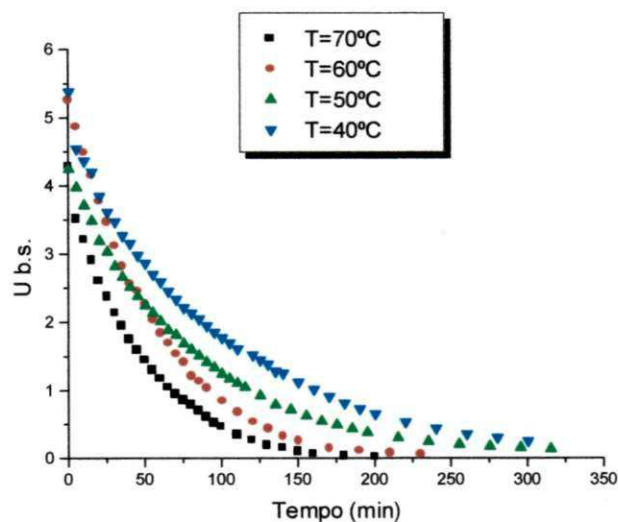


Figura. 4.20. Influência da temperatura do ar de secagem em fatias de goiaba.
($e = 1,0$ cm; $V = 0,8$ m/s).

Na Figura 4.21 são mostradas as curvas de secagem de fatias de goiaba com diversas espessuras, para 50°C e $V = 0,8$ m/s. Conforme esperado, a cinética torna-se mais lenta com espessuras maiores. Observa-se na curva obtida para espessura de 1,5 cm uma descontinuidade, isto ocorreu, uma vez que o ensaio foi realizado de um dia para o outro, assim sendo ocorrendo o que era de se esperar o efeito têmpera.

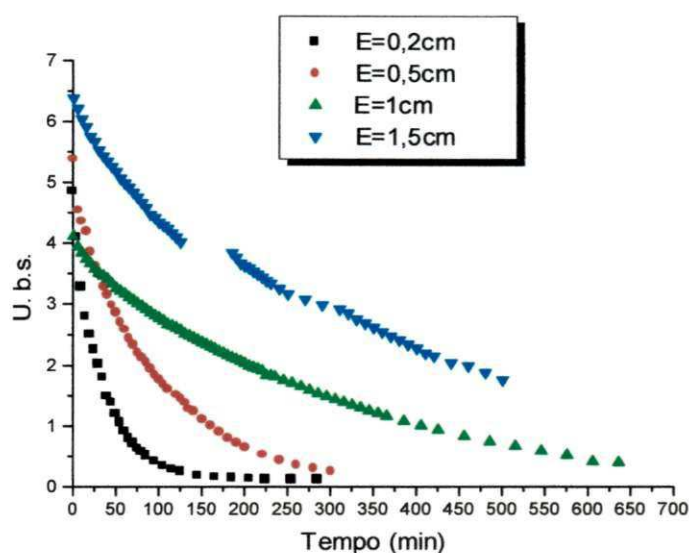


Figura 4.21. Influência da espessura das fatias de goiaba na cinética de secagem.

($T = 50^{\circ}\text{C}$; $V = 0,8 \text{ m/s}$)

Numa primeira abordagem, partes dos dados experimentais foram modelados mediante a equação (2.18), considerando que umidade de equilíbrio tendia a zero. As constantes de secagem foram calculadas considerando o modelo difusional simplificado sem considerar o efeito do fator encolhimento. Nesta primeira estimativa, aceitou-se como aproximação razoável que a umidade de equilíbrio igualasse a zero.

Na Tabela 4.12 são mostrados os valores dos parâmetros obtidos nesta estimativa.

Tabela 4.12. Parâmetros do modelo difusional simplificado

T($^{\circ}\text{C}$)	e(cm)	k(min^{-1})	D (cm^2/min)	r^2
40	0,5	0,00935	$9,47 \times 10^{-4}$	0,998
	1,0	0,00322	$1,30 \times 10^{-3}$	0,998
50	0,2	0,02157	$3,49 \times 10^{-4}$	0,998
	0,5	0,01170	$1,18 \times 10^{-3}$	0,998
	1,0	0,00399	$1,61 \times 10^{-3}$	0,998
60	1,5	0,00345	$3,14 \times 10^{-3}$	0,998
	0,5	0,01882	$1,90 \times 10^{-3}$	0,998
	1,0	0,00574	$2,32 \times 10^{-3}$	0,998
70	0,5	0,02010	$2,03 \times 10^{-3}$	0,998
	1,0	0,01616	$6,54 \times 10^{-3}$	0,998

Apesar das considerações simplificatórias do modelo difusional utilizado, observa-se, pelas Figuras 4.22 e 4.23, que este ajusta bem aos dados experimentais obtidos, especialmente no início da secagem. À medida que se aproxima do equilíbrio, o modelo simplificado do ajuste apresenta maiores desvios em relação aos valores experimentais. Este afastamento é esperado, já que nesta primeira estimativa não se considera a umidade de equilíbrio na equação (6), sendo válida por tanto apenas nas primeiras horas de secagem.

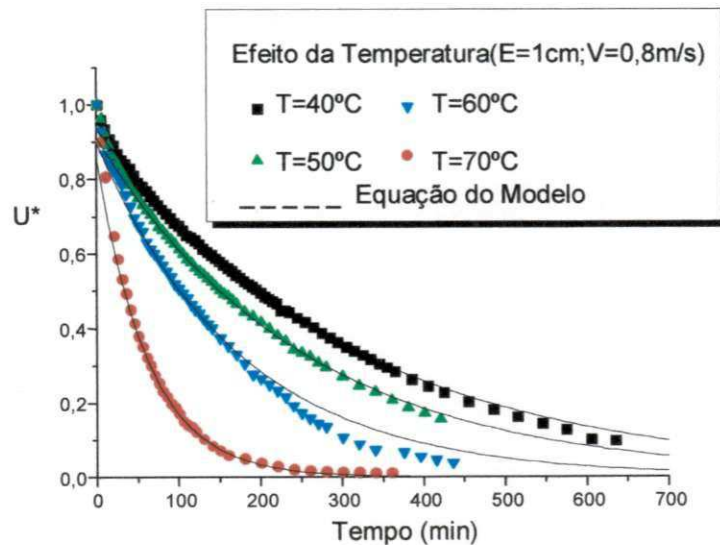


Figura 4.22. Ajuste do modelo às curvas experimentais.

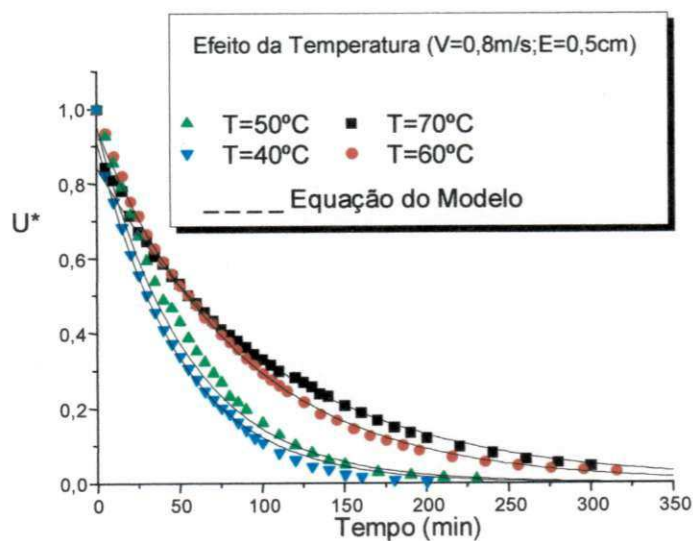
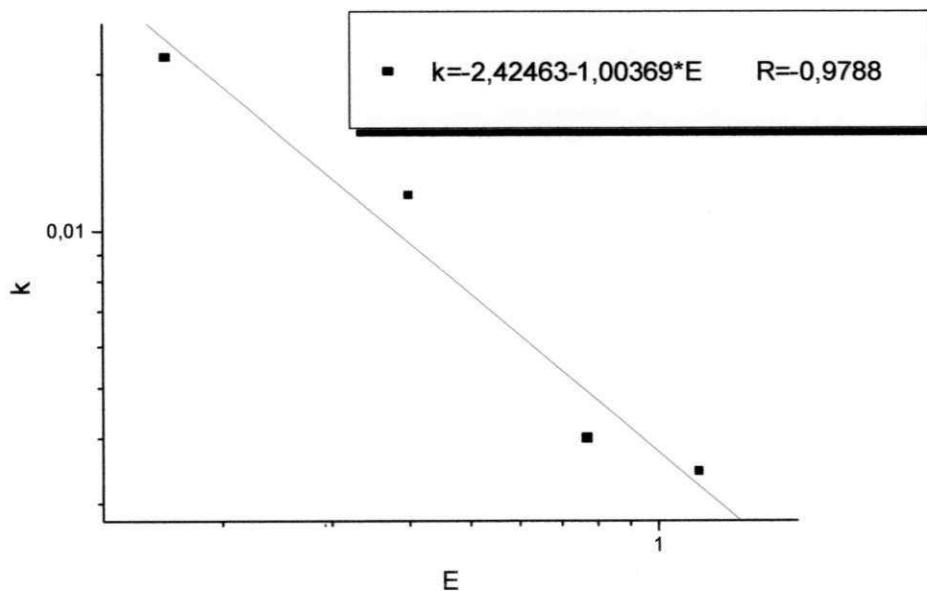


Figura 4.23. Ajuste do modelo às curvas experimentais.

Para uma melhor análise crítica da aplicabilidade do modelo à situação em estudo, representa-se na Figura 4.24, a dependência da constante de secagem com a espessura da fatia de goiaba. De acordo com o modelo difusional com coeficiente de difusão efetivo constante, esperar-se-ia uma dependência proporcional da constante de secagem com o inverso do quadrado da espessura. No entanto, nas condições usadas para espessura das amostras de fatias de goiaba, foi encontrado um comportamento da constante de secagem de forma proporcional ao inverso da espessura, como se mostra na Figura 4.21. Este afastamento do modelo deve-se, provavelmente, ao efeito do encolhimento não considerado na solução clássica representado pela equação (5). De fato, foi encontrado neste trabalho que o encolhimento foi de aproximadamente 50% na espessura e 25% no diâmetro. Apesar disto, pode observar-se um bom ajuste do modelo proposto aos dados experimentais, como se mostra nas Figuras 4.22 e 4.23, sugerindo que o coeficiente de difusão efetivo calculado deve incluir os efeitos de encolhimento.

Figura 4.24- Efeito da espessura sobre a constante de secagem.



Na Figura 4.25 está representada a difusividade média obtida a partir de vários ensaios em função da temperatura. Observa-se que, considerando os pontos até 60°C, a equação de Arrhenius se aplica satisfatoriamente, apresentando uma energia de ativação de 5,65kcal/mol. Verifica-se que, para a temperatura de 70°C, ocorre um afastamento do

comportamento esperado. Como já citado anteriormente, foram observadas alterações de cor e textura nas fatias de goiaba, quando processadas nesta condição operacional, podendo admitir-se que o afastamento a 70°C ocorre em decorrência de modificações estruturais ocasionadas ao produto quando seco a altas temperaturas, especialmente próxima do TG dos açúcares.

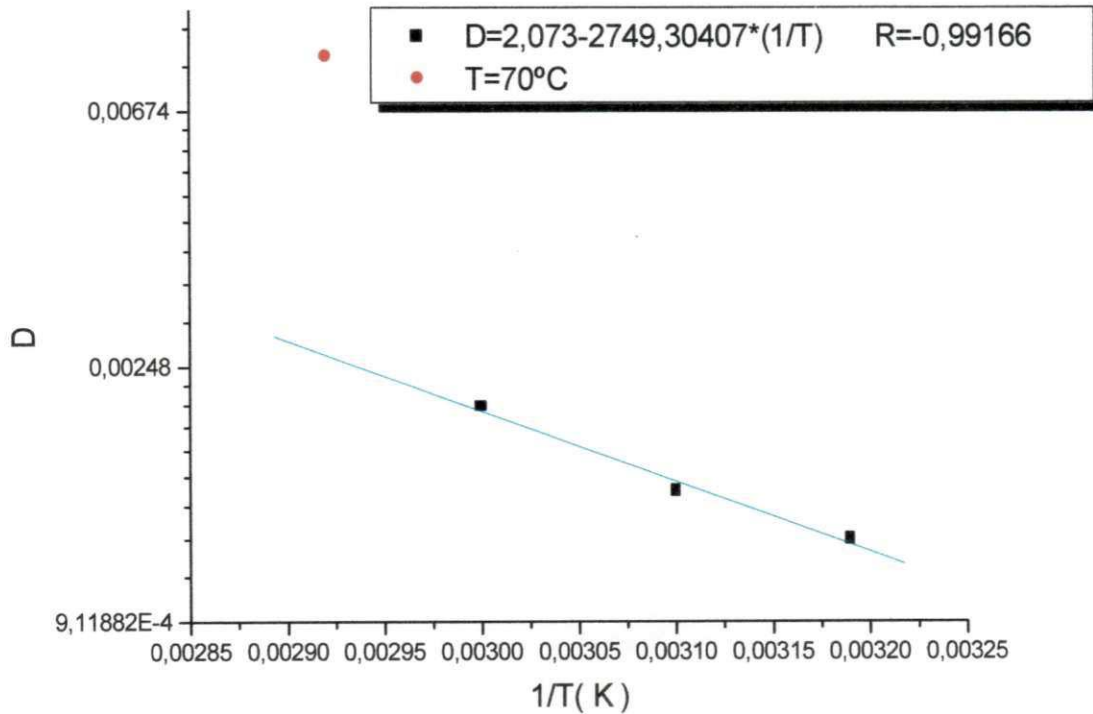


Figura 4.25. Efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão.

4.7 Estudo da Pré-Secagem em Camada Espessa de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fixo.

A pré-secagem foi realizada com o objetivo de reduzir a umidade inicial dos pedacos cúbicos de goiaba para estudar o efeito da umidade nas curvas características do leito fluidizado e de jorro. A Tabela 4.13 mostra um resumo das condições operacionais utilizadas e efeito sobre a umidade final do produto e o encolhimento do leito.

TABELA 4.13 Condições operacionais e efeito sobre a umidade final e encolhimento do leito fixo ($H_i = 5,0$ cm ; $Q = 230$ m³/h)

Experimento	T(°C)	U _{i b,s}	U _{f b,s}	Tempo (min)	H _f (cm)
01	73	5,068	0,171	120	3,3
02	55	4,879	0,802	70	2,5
03	45	5,796	2,394	60	2,5
04	80	4,868	0,672	30	4,5

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.13, verifica-se que para a temperatura de 80 °C a taxa de secagem dos pedacos cúbico de goiaba em camada espessa é mais elevada, obtendo-se valores do teor de umidade em base seca final menores mesmo em tempos mais curtos de secagem. Observa-se também que a altura final do leito sofre significativa variação, ocorrendo uma maior redução em temperaturas inferiores de 45 e 55 °C. Em temperaturas mais elevadas mesmo com a redução da umidade final do produto a altura final do leito é superior. Este fato deve-se a aglomeração mais rápida dos pedacos cúbicos de goiaba, com contração do leito, havendo assim uma tendência à diminuição do diâmetro do leito de goiaba e conseqüentemente menor redução da sua altura final.

A Figura 4.26 ilustra melhor o comportamento da cinética de secagem onde se observou, de maneira esperada, que a secagem ocorre mais rapidamente em temperaturas mais elevadas. Não se verificou escurecimento do produto final para temperatura maiores que 70°C como observado na cinética de secagem de fatias de goiaba em camada delgada em leito fixo. Esta diferença de comportamento deve estar associada à composição da polpa, mais rica em açúcar, o que induziria o escurecimento, mesmo a temperaturas menos elevadas. Estas observações apontam para a secagem da

goiaba sem a polpa interna, de modo a obter um produto de melhor qualidade, e sugerindo a separação e utilização da polpa para a obtenção de geléias, sucos, concentrados e outros produtos.

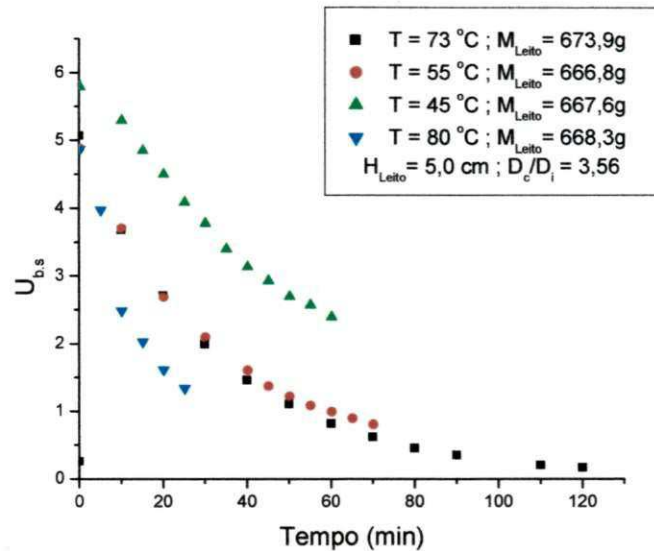


Figura 4.26. Influência da temperatura do ar de secagem na cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba.

Na Figura 4.27 verifica-se que o modelo de decaimento exponencial ajustou-se de forma satisfatória os dados experimentais obtidos para a secagem em camada espessa de pedaços cúbicos de goiaba.

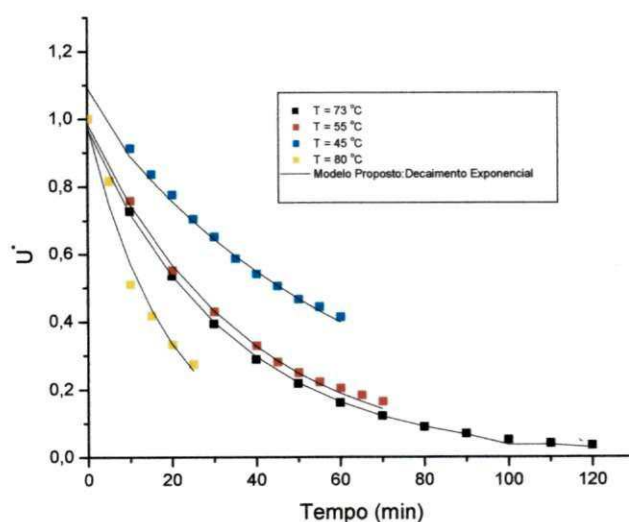


Figura 4.27. Ajuste do modelo aos dados experimentais.

4.8 Secagem em Leito de Jorro e Leito Fluidizado de Pedacos Cúbicos de Goiaba.

No presente trabalho, inicialmente, realizou-se um experimento em leito de jorro e leito fluidizado para observar de maneira geral o comportamento deste tipo de secador em relação ao de leito fixo já estudado. As observações avaliadas preliminarmente foram qualitativas. Verificou-se que os pedacos cúbicos de goiaba comportavam-se como um leito fixo, no início, em virtude do alto teor de umidade do produto. Em seguida com a redução da umidade do produto os pedacos de goiaba começaram a fluidizar e posteriormente, a apresentar um jorro estável. Verificou-se que os secadores de leito de jorro e leito fluidizado permitiram secar uma quantidade superior de matéria-prima com um tempo menor em relação ao leito fixo. Com relação à qualidade, o produto final conservou seu odor e sabor da fruta “in natura”, bem como apresentou uma cor bastante atraente, o que permitirá uma boa aceitação no mercado. Desta forma realizou-se um planejamento experimental para secagem de pedacos cúbicos de goiaba como mostrado no Capítulo 3 e a partir daí realizou-se um estudo mais detalhado deste tipo de secador. Em relação à secagem de pedacos cúbicos de goiaba em leito fluidizado foram realizados apenas dois experimentos em condições operacionais opostas para uma comparação com os resultados encontrados em leito de jorro.

4.81 Cinética de Secagem em Leito de Jorro e em Leito Fluidizado

É fundamental enfatizar o elevado estado de instabilidade durante a secagem no leito de jorro nos 10 minutos iniciais, decorrentes do movimento instável do leito que dependendo das condições operacionais comporta-se por alguns instantes como leito fixo e posterior alternância de regime fixo/jorro com aquecimento dos pedacos cúbicos de goiaba. MEDEIROS (2004) observou este mesmo comportamento durante a secagem de feijão verde num processo combinado leito fixo/leito de jorro. Em relação à condição fluidodinâmica do leito, à medida que a secagem continua, o movimento dos cubos de goiaba se torna mais intenso, aumentando sensivelmente a altura da fonte como foi discutido anteriormente devido às modificações no número de Arquimedes. Em alguns casos verifica-se um leito muito diluído modificando a estrutura do jorro e, em alguns casos caracterizando o “slugging”, no qual a velocidade do ar é muito alta, superior a velocidade terminal dos cubos passando pelas partículas acarretando uma má circulação das mesmas, formando também caminhos preferenciais.

A partir dos dados experimentais de umidade em base seca obtida segundo a metodologia apresentada no Capítulo 3 em função do tempo foram construídas as curvas de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro. Para análise da secagem foram retiradas amostras durante os experimentos, visando à determinação das curvas de secagem. Procurando boa reprodutibilidade, pois uma das variáveis estudadas foi a carga de sólidos, nos ensaios foram coletadas em média 6 amostras ao longo dos 60 min de secagem em leito de jorro e em leito fluidizado, cada amostra contendo em média 4,0 g de pedaços cúbicos de goiaba, totalizando uma variação de aproximadamente 10% do valor total da carga. Esta percentagem foi considerada aceitável no sentido de não alterar significativamente as condições do jorro.

As curvas de secagem dos ensaios realizados segundo o planejamento experimental são mostradas nas Figuras 4.28 e 4.29. Os ensaios 9 e 10, referentes às repetições no ponto central, são inicialmente analisados quanto a sua reprodutibilidade. Contudo, para o ensaio 11, a reprodutibilidade dos resultados não foi confirmada.

Na Figura 4.28, observa-se que as curvas equivalentes aos ensaios realizados nas condições operacionais para o ponto central do planejamento experimental são praticamente coincidentes, o que confirma a boa reprodutibilidade.

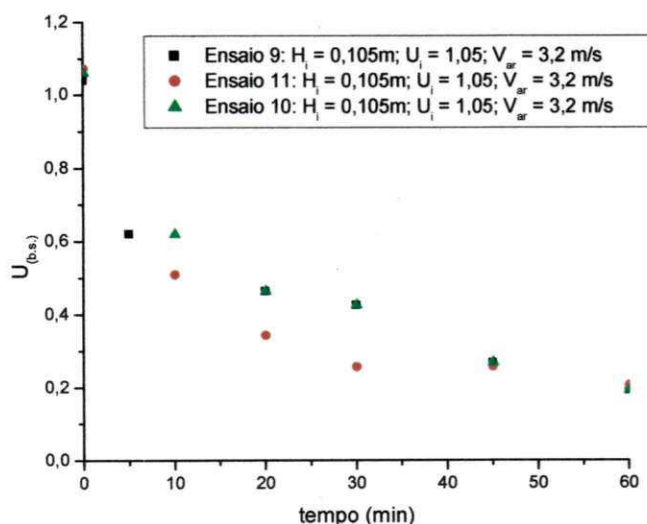


Figura 4.28. Cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro – Reprodutibilidade no ponto central.

A Figura 4.29 ilustra o comportamento das curvas de secagem realizadas sob diversas condições iniciais de altura inicial do leito, umidade inicial do produto e razão

de V/V_{jm} aproximadamente igual a 1,0, ou seja condição de velocidade mínima de jorro, em todos os ensaios. Verifica-se que, como esperado, os ensaios realizados com menor umidade inicial do produto e menor altura apresentam valores de umidade final do produto inferior. Observa-se também que as curvas praticamente coincidem a partir de um tempo de secagem aproximadamente igual a 15 min, com a umidade igual a 0,2.

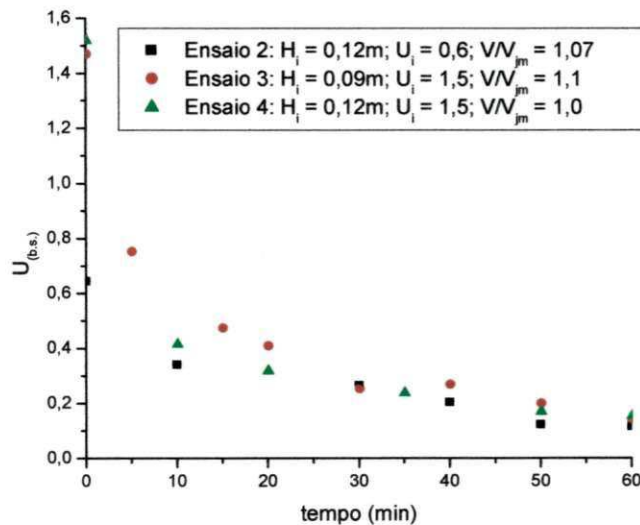


Figura 4.29. Cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

A Figura 4.30 mostra o comportamento das curvas de secagem em leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba para uma razão de V/V_{jm} aproximadamente 1,3. Observa-se uma tendência similar ao resultado mostrado na FIGURA 4.29 anteriormente, com as curvas coincidindo a partir dos 40 min de secagem., também para umidade igual a 0,2.

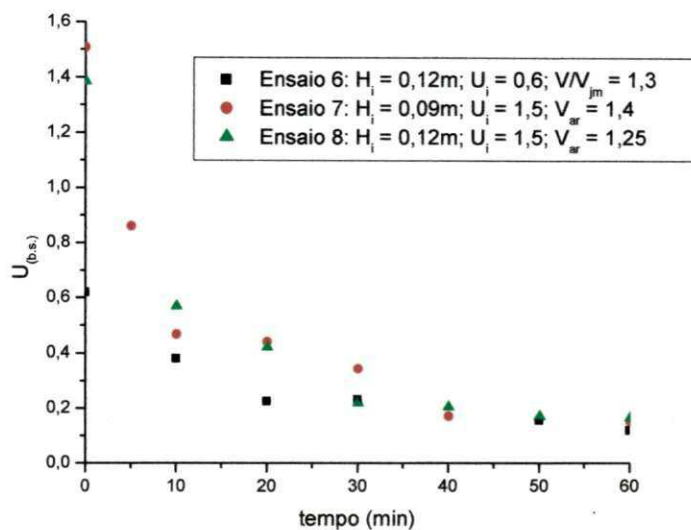


Figura 4.30. Cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

Na Figura 4.31 verifica-se que para um valor de V/V_{jm} aproximadamente igual a 2,0 a cinética de secagem ocorre mais rapidamente no ensaio 1 onde verifica-se claramente os efeitos da altura do leito e da umidade inicial dos cubo de goiaba na umidade final do produto.

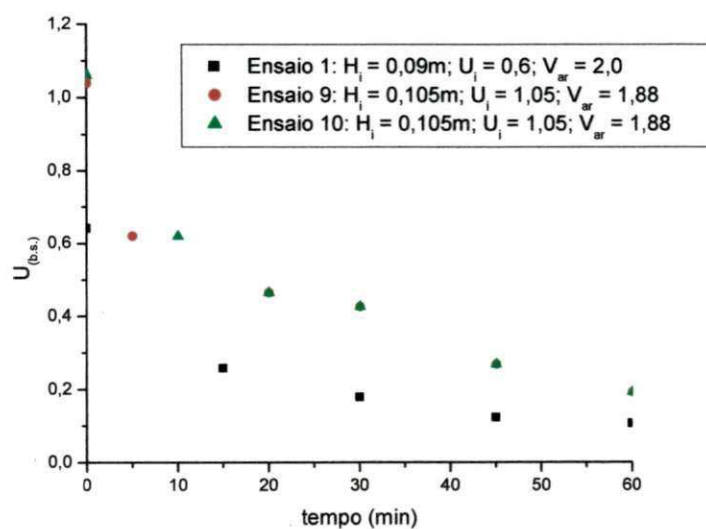


Figura 4.31. Cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro

A Figura 4.32 ilustra a secagem combinada leito fixo/leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba, observa-se que as curvas apresentam um comportamento similar apresentando uma descontinuidade a partir dos últimos 60 min da secagem que coincide com o processo em leito de jorro, neste instante as taxas de evaporação são mais

elevadas no secador de leito de jorro devido à circulação das partículas. Contudo, faz-se necessário ressaltar que as condições de secagem nos processos são diferentes tanto para a variável temperatura do ar de secagem como a velocidade do ar.

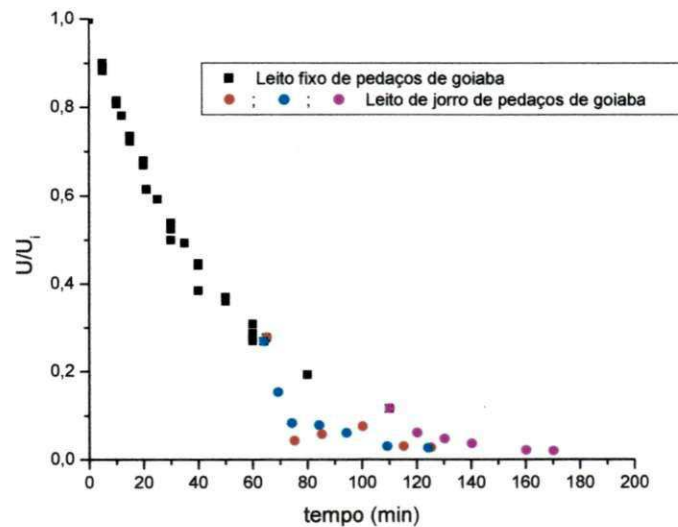


Figura 4.32. Cinética de secagem combinado leito fixo/leito de jorro

A Tabela 4.14 ilustra os resultados da massa de água evaporada durante a secagem em leito de jorro obtido a partir do balanço de massa cuja metodologia está descrita no capítulo 3. Os resultados encontrados foram comparados com os valores determinados pela integração das curvas das taxas de evaporação com o tempo, o que permitiu a validação da metodologia empregada no tratamento dos dados experimentais. Como era esperado, os ensaios realizados com maiores valores de altura do leito ou maior valor de umidade inicial do produto apresentaram maior massa de água evaporada no leito independente da razão V/V_{jm} , para um mesmo tempo de secagem.

Tabela 4.14. Massa de água evaporada em leito de jorro

Ensaio	Condições operacionais	Massa de água evaporada, m_{evj} (g)
1	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 2,0$	39,33
2	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 1,07$	68,23
3	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,1$	35,44
4	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,0$	140,24
5	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 2,5$	36,74
6	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 1,3$	59,43
7	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,4$	99,94
8	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,25$	129,96
9(C)	$H_i = 0,105$ m; $U_i = 1,05$; $V/V_{jm} = 1,88$	83,68
10(C)	$H_i = 0,105$ m; $U_i = 1,05$; $V/V_{jm} = 1,88$	72,06

No Apêndice A.1 são encontrados os valores do número de Biot de massa, pelos quais se podem confirmar a hipótese de resistência externa desprezível na secagem combinada leito fixo/leito de jorro, haja vista os resultados encontrados serem elevados. Estes valores foram determinados a partir da analogia de Reynolds onde o número de Prandtl e o número de Schmidt é igual à unidade.

Em relação ao leito fluidizado foram realizados apenas três experimentos sendo um deles usado para se verificar a reprodutibilidade dos dados experimentais.

A Figura 4.33 apresenta as curvas da cinética de secagem em leito fluidizado para dois níveis de altura e velocidade do ar de secagem para uma mesma umidade

inicial do produto. Os ensaios em leito fixo e leito fluidizado foram realizados sob condições diferentes de temperatura e velocidade do ar de secagem, por tanto a Figura 4.33 apenas ilustra um comportamento exponencial da umidade normalizada em função do tempo apresentando também uma descontinuidade no momento em que se inicia a secagem em leito fluidizado apresentando grande taxa de evaporação no início. Verifica-se que as curvas de cinética de secagem em leito de jorro e leito fluidizado apresentam um mesmo comportamento. Observa-se em ambas que ocorre uma mudança de comportamento da secagem de leito fixo para leito de jorro ou leito fluidizado que não é justificado pela mudança de um mecanismo de secagem ou modificação estrutural do produto e, sim pela modificação das condições operacionais utilizadas em leito de jorro e leito fixo, no que diz respeito a temperatura do ar de secagem e da velocidade do ar de secagem na coluna.

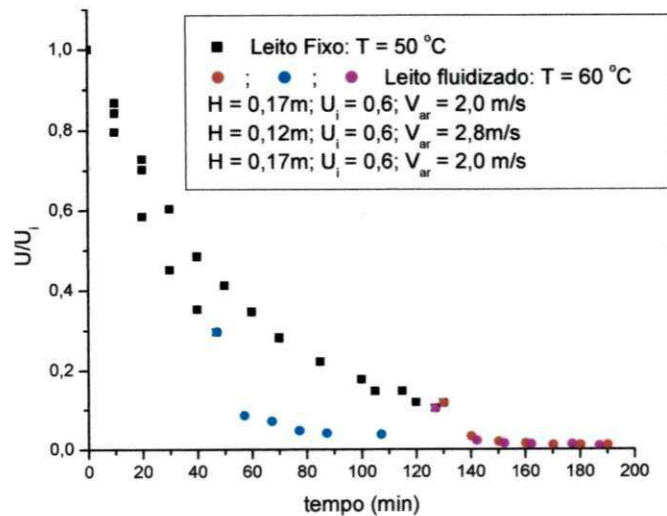


Figura 4.33. Cinética de secagem combinado leito fixo/leito fluidizado.

A Tabela 4.15 apresenta os valores da massa de água evaporada durante o ensaio realizado em secador de leito fluidizado.

Tabela 4.15. Massa de água evaporada em leito fluidizado.

Ensaio	Condições operacionais	Massa de água evaporada, m_{evj} (g)
1	$H_i = 0,17$ m; $U_i = 0,6$; $V_{ar} = 2,0$ m/s	98,92
2	$H_i = 0,17$ m; $U_i = 0,6$; $V_{ar} = 2,0$ m/s	92,71
3	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V_{ar} = 1,5$ m/s	125,08

Analisando as Tabelas 4.14 e 4.15 verifica-se que os ensaios realizados em leito de jorro e leito fluidizado de secagem de pedaços cúbicos de goiaba a massa de água evaporada é sensivelmente maior durante a secagem em leito de jorro para uma mesma altura do leito e umidade inicial do produto apresentando um pequeno efeito da velocidade do ar de secagem. Contudo, como era de se esperar, a massa evaporada de água tende ser superior na secagem em leito fluidizado haja vista a maior quantidade de material utilizado nos ensaio 1 e 2 para leito fluidizado comparados com o ensaio 2 realizado em leito de jorro mostrado na Tabela 4.14 mesmo tendo trabalhado com uma velocidade do ar de secagem superior em leito de jorro.

Nos dois sistemas combinados de secagem, verifica-se que para uma maior umidade inicial do produto a massa de água evaporada é maior, este comportamento pode ser explicado pelas propriedades térmicas do produto como a difusividade e a condutividade. Como se verificou anteriormente, estas propriedades térmicas aumentam com a elevação do teor de umidade do produto até um valor máximo em torno de 2 a 4 em base seca. Desta forma o material mais úmido absorve mais calor logo a quantidade de água evaporada no final do processo será definitivamente maior. O mesmo fato pode ser considerado no efeito da carga.

4.8.2 Fração de Água Evaporada

As frações de água evaporada nos leito de jorro e leito fluidizado foram determinadas a partir da massa de água evaporada acumulada durante a secagem em função do tempo. Verifica-se nas Figuras 4.1 e 4.2, principalmente no início dos ensaios, apesar das variações decorrentes das condições em que foram efetuadas as medidas de umidade do produto, os ensaios realizados com maior velocidade do ar de secagem e maior altura inicial do leito apresentam taxas de evaporação superiores. Na Figura 4.34 as curvas apresentam um mesmo comportamento e tendem a se distanciar ao longo da secagem. Evidencia-se que cerca 70 % da água contida na amostra dos pedaços cúbicos de goiaba é evaporada nos 20 min iniciais, em geral. Este fator vem comprovar as mudanças bruscas ocorridas nas propriedades físicas dos pedaços cúbicos de goiaba durante os primeiros 20 min de secagem, tendo influência muito grande no comportamento fluidodinâmico do leito durante o seu processamento.

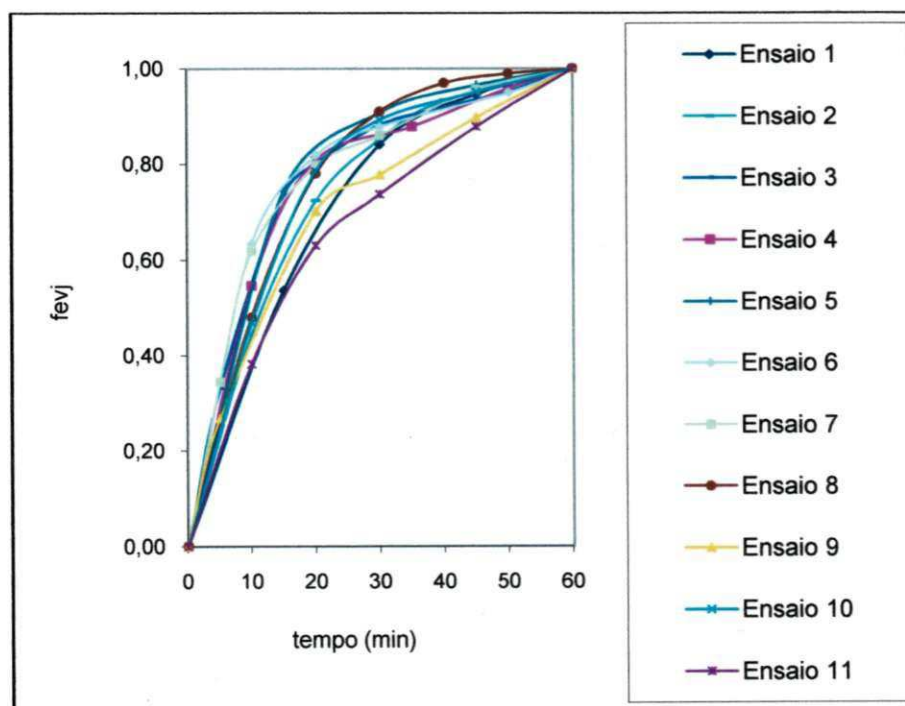


Figura 4.34. Fração de água evaporada em secador de leito de jorro

A Figura 4.35 mostra os ensaios realizados em leito fluidizado que nos 20 min iniciais aproximadamente 70 % da água contida no produto é evaporada. As curvas apresentam um mesmo comportamento e, nas condições operacionais utilizadas de altura inicial do leito, umidade inicial do produto e velocidade do ar de secagem as

curvas mostram-se praticamente sobrepostas não se evidenciando efeito significativo das variáveis independentes.

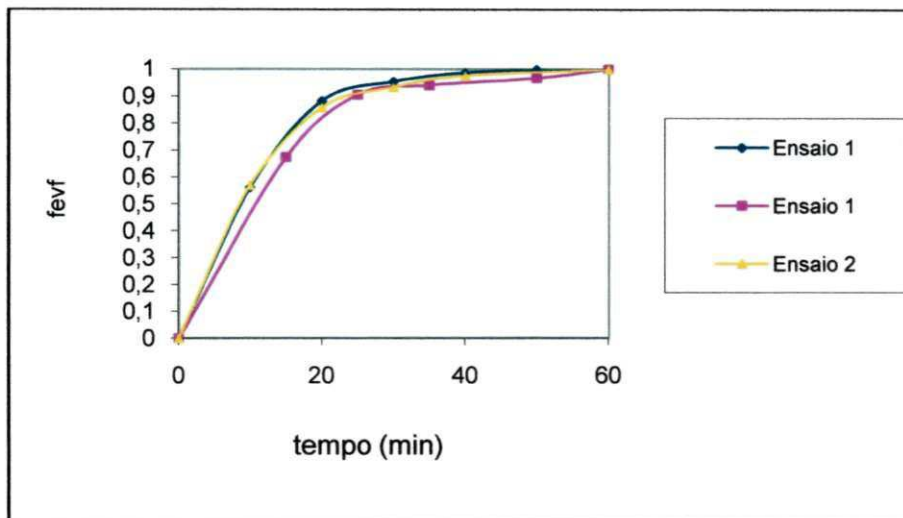


Figura 4.35. Fração de água evaporada em secador de leito fluidizado

A partir das Figuras 4.34 e 4.35 pode-se verificar que nos dois secadores, a fração de água evaporada durante os primeiros 20 min, é praticamente a mesma, na secagem combinada leito fixo/leito de jorro. Contudo, observa-se que na secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fluidizado a partir de aproximadamente 30 min quase toda a água, 95%, é evaporada, este comportamento é apresentado pela baixa inclinação da curva mostrada por um patamar paralela ao eixo do tempo. Em ambos os sistemas de secagem, justificam-se a alta fração de água evaporada nos instantes iniciais pela ação combinada da alta circulação dos sólidos e da capacidade destes sólidos em absorver calor e conduzir para o seu interior, fato justificado pelo comportamento das propriedades térmicas.

As Figuras 4.34 e 4.35 comprovam também a instabilidade estrutural do leito devido à grande quantidade de água removida do material nos primeiros minutos, que acarreta em modificações das propriedades físicas do mesmo e conseqüentemente no número de Arquimedes e na constante de Littmann.

4.9 Modelagem Matemática.

4.9.1 Leito de Jorro

Os dados da cinética de secagem de pedaços cúbicos de goiaba foram ajustados pelo modelo difusional representado pela equação 2.20, para uma esfera tendo em vista as modificações sofridas pelo material durante a circulação do mesmo em leito de jorro, com um achatamento nos vértices aproximando a geometria do cubo ainda mais a uma esfera. Os resultados encontrados levam a afirmar que no período de taxa decrescente caracterizado pela migração de água por difusão U^* , se comportou conforme a segunda lei de Fick, considerando a hipótese do encolhimento volumétrico. A Figura 4.36 ilustra os ajustes efetuados dos dados experimentais para diversas condições operacionais, utilizando quatro termos da série.

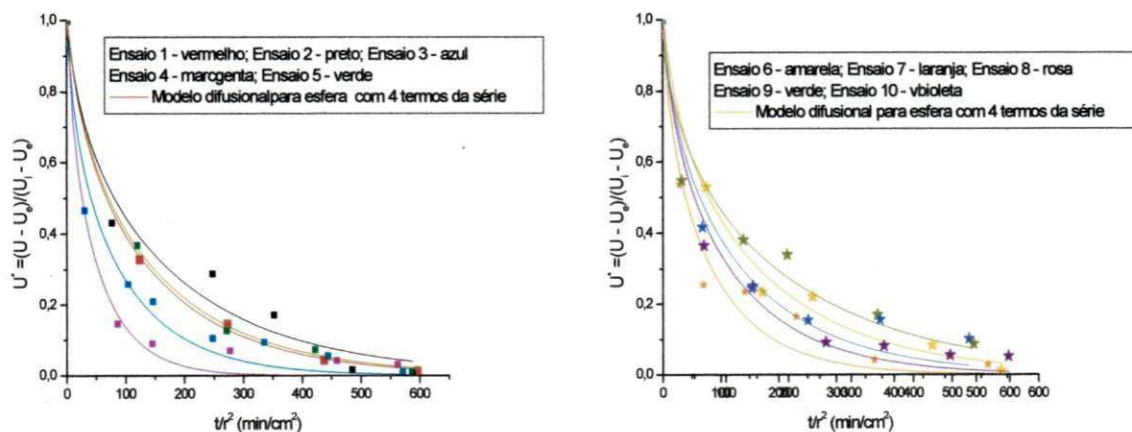


FIGURA 4.36. Cinética de secagem. Modelo difusional

A Tabela 4.16 mostra os resultados do parâmetro A e do coeficiente de difusão efetivo, D_{ef} . Verifica-se que os valores encontrados para D_{ef} variam de aproximadamente $4,0 \cdot 10^{-4}$ a $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{min}$ e estão na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados por SILVA (2004) no estudo da secagem convectiva de acerola. Conforme, pode-se observar na Tabela 4.16 para a maioria dos ensaios realizados o modelo difusional para esfera considerando o encolhimento volumétrico apresentou um bom ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de correlação consideráveis em torno de 99%, o que permitiu uma estimativa das difusividades efetivas a partir do

modelo. Constatou-se que não há influência da velocidade do ar de secagem sobre D_{ef} para as mesmas condições de altura inicial do leito e umidade inicial do produto, o que evidencia a consideração de resistência externa desprezível e controle difusional interno. Verifica-se ainda que o coeficiente A da curva ajustada é próximo do valor teórico, 0,604 do modelo para uma esfera com condições de equilíbrio na superfície, sendo que A tende para esse valor na medida que mais termos da série são considerados. Na Tabela 4.16 comparando os resultados do ensaio 1 e 1(*), modelados considerando 4 e 7 termos da equação, observa-se que há uma tendência natural ao valor de A aproximar-se de 0,608, que é o valor previsto pelo modelo difusional para geometria esférica, contudo não ocorre variação significativa do coeficiente de difusão efetivo, assim sendo a modelagem foi realizada considerando apenas os quatro primeiros termos da equação. Em relação ao efeito da umidade inicial do produto sobre D_{ef} verifica-se que para mesma altura inicial do leito e velocidade do ar de secagem, nas condições de máximo ou de mínimo destas variáveis independentes, ocorre um aumento do coeficiente de difusão efetivo, aproximadamente o dobro para valores de $U_{i\ b.s.i}$ mais elevados. As diferenças apresentadas sugerem que o modelo deveria incluir o efeito da umidade sobre o coeficiente de difusão efetivo. Por outro lado deve ser levado em consideração as simplificações relativas à umidade de equilíbrio a qual foi determinada considerando que os parâmetros do modelo de Henderson encontrados no presente trabalho para uma faixa de aplicação de temperatura de 30 a 50 °C poderiam ser extrapolados para a temperatura de 60 °C. Uma outra suposição simplificadoria, a condição de umidade inicial uniforme, embora não exatamente satisfeita no presente trabalho devido à pré-secagem do material, que ingressaria no leito de jorro ou fluidizado com uma distribuição de umidade nas partículas, parece ser bastante aceitável dentro do grau de precisão utilizado. Apesar das simplificações assinaladas, o modelo mostrou-se com um bom grau de ajuste e adequado para efeitos de predição da cinética de secagem em leito de jorro. O modelo difusional usado para esfera foi truncado com 7 termos haja vista não ocorrer variação significativa do valor do coeficiente A ajustado em relação ao valor teórico.

Tabela 4.16. Difusividade efetiva calculada a partir do ajuste do modelo difusional para uma esfera com encolhimento – Leito de jorro

Ensaio	A	D_{ef} (cm ² /min)	R ²	Desvio padrão A
1	0,7015	0,00063	0,99	0,00002
2	0,6875	0,00049	0,97	0,00009
3	0,6667	0,00094	0,96	0,00015
4	0,7009	0,00168	0,99	0,00026
5	0,7034	0,0006	0,99	0,00002
6	0,7020	0,00053	0,99	0,00005
7	0,6765	0,00101	0,96	0,00019
8	0,6884	0,00081	0,98	0,0001
9	0,6420	0,00041	0,94	0,00009
10	0,6814	0,00063	0,96	0,00011
1 (*)	0,6613	0,00059	0,99	0,00002

(*) Ajuste realizado com 7 termos da equação.

4.9.2 Leito Fluidizado

Os resultados dos ensaios de cinética de secagem em leito fluidizado de pedaços cúbicos de goiaba foram também ajustados pelo modelo difusional para uma esfera tendo em vista a mesma consideração usada para leito de jorro, contudo não foi considerado o efeito do encolhimento volumétrico. A Figura 4.37 mostra que o modelo ajusta bem os valores iniciais e se afasta um pouco nos instantes finais do ensaio. Estes desvios devem-se talvez ao fato de se não levar em conta o fator encolhimento.

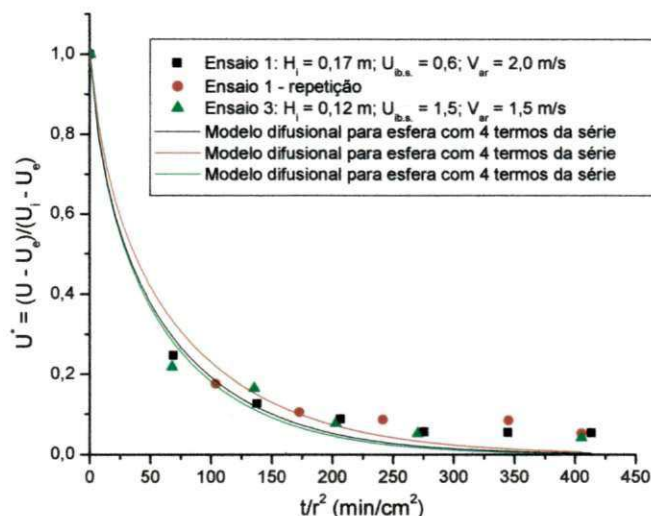


Figura 4.37. Estimativa de D_{ef} a partir do modelo difusional

A Tabela 4.17 mostra os valores de A e do coeficiente de difusão obtida a partir do ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem em leito fluidizado para os dois ensaios realizados (Ensaio 1: $H_i = 0,17$ m; $U_{i \text{ b.s.}} = 0,6$; $V_{ar} = 2,0$ m/s e o Ensaio 2: $H_i = 0,12$ m; $U_{i \text{ b.s.}} = 1,5$; $V_{ar} = 1,5$ m/s). Verifica-se de uma forma geral que a difusividade efetiva obtida na secagem em leito fluidizado é igual aos valores encontrados em leito de jorro aproximadamente para níveis de umidades elevadas, também confirmando o efeito da carga, quanto maior a carga mais elevada a taxa de evaporação. Mesmo apresentando bons valores do coeficiente de correlação observa-se na Figura 4.37 que a qualidade do ajuste dos valores experimentais é inferior à do modelo utilizado no leito de jorro, no qual o encolhimento dos pedaços de goiaba foi levado em consideração.

Tabela 4.17. Difusividade efetiva calculada a partir do ajuste do modelo difusional para uma esfera com encolhimento – Leito fluidizado

Ensaio	A	D_{ef} (cm ² /min)	R ²	Desvio padrão, A
1	0,696	0,00131	0,98	0,0002
1	0,698	0,00114	0,98	0,0002
2	0,699	0,00137	0,98	0,0002

Os valores das difusividades efetivas obtidas na secagem em leito de jorro apresentam valores próximos independentemente da velocidade do ar de secagem como também, da altura inicial do leito para níveis de umidade de 0,6 e 1,05 em base seca podendo ser representado por um valo médio. O mesmo acontece em leito fluidizado que mostra valores muito próximos ao encontrado em relação aos obtidos em leito de jorro. Verifica-se que para níveis de umidade elevados o coeficiente de difusão obtido em leito de jorro e em leito fluidizado apresenta a mesma ordem de grandeza dos valores encontrados em secagem de fatias de goiaba, 0,5 cm e 1,0 cm de espessura, em secador conectivo com a temperatura do ar de secagem de 60°C e velocidade do ar de 0,8 m/s independente da espessura da fatia, mostrados na Tabela 4.17. Os valores elevados dos coeficientes de difusão obtidos para níveis de umidade do produto mais acentuado, pode ser justificado, como mencionado anteriormente, pelo efeito das propriedades estruturais da goiaba, que variam com o teor de água, bem como pelo efeito das propriedades térmicas que apresentam um efeito positivo em relação a umidade do produto.

4.10 Desempenho da Secagem em Leito de Jorro e leito Fluidizado

O desempenho do processo de secagem no sistema leito fixo/leito de jorro e leito fixo/leito fluidizado será avaliado em função das perdas de vitamina C e da eficiência energética.

4.10.1 Análise da Perda de Vitamina C.

A perda de vitamina C referente à qualidade final do produto é um critério também utilizado como referência para se avaliar a eficiência térmica num processo de secagem. Desta forma, a seguir é feita uma comparação entre os resultados obtidos nos sistemas combinados leito fixo/leito de jorro e leito fixo/leito fluidizado.

A Tabela 4.18 apresenta os resultados referentes à análise da degradação da vitamina C da goiaba, em base seca, durante a pré-secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito fixo seguido da secagem em leito de jorro. Verifica-se que para valores aproximadamente iguais da razão de V/V_{jm} , as perdas de vitamina C são mais acentuadas nos experimentos realizados com a carga menor de pedaços de goiaba e

maior umidade inicial. Nos ensaios 2 e 5 verifica-se que o efeito de V/V_{jm} é bastante significativo para as mesmas condições de H_i e U_i , onde as perdas de vitamina C são mais acentuadas para condições mínimas dos valores iniciais das variáveis independentes. Por outro lado este comportamento é contrário nas condições de máximo das variáveis de controle do processo. Observa-se que as variáveis independentes altura inicial do leito e umidade inicial do produto apresentam um efeito negativo sobre a vitamina C, ou seja, quanto maior a carga e maior a umidade inicial menor as perdas.

Tabela 4.18. Perda de vitamina C no processo de secagem combinado leito fixo/leito de jorro

Ensaio	Condições operacionais	% de Vit.C (b.s.)			Perda de Vitamina C (%)	
		*	**	***	Leito fixo	Leito de jorro
1	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 2,0$	11,150	8,254	5,532	25,97	32,97
2	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 1,07$	6,208	4,886	4,825	21,29	1,25
3	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,1$	-	5,301	4,758	-	10,24
4	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,0$	6,855	3,441	3,415	49,80	0,76
5	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} = 2,5$	11,816	9,057	8,254	23,34	8,86
6	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 0,6$; $V/V_{jm} =$ 1,3	-	7,947	7,484	-	5,83
7	$H_i = 0,09$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,4$	7,280	5,384	4,662	26,04	13,41
8	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V/V_{jm} = 1,25$	6,855	3,283	3,176	52,11	3,26
9(C)	$H_i = 0,105$ m; $U_i = 1,05$; $V/V_{jm} 1,88$	-	5,940	5,170	-	13,00
10(C)	$H_i = 0,105$ m; $U_i = 1,05$; $V/V_{jm} 1,88$	-	6,950	6,08	-	12,50

A Tabela 4.19 mostra os resultados da perda de vitamina C durante a secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fluidizado para duas condições operacionais diferentes de altura inicial do leito, umidade inicial do produto e velocidade do ar de secagem. Observa-se que os valores encontrados são muitos elevados sendo mais acentuado nas condições mínimas de H_i e V_{ar} para um mesmo tempo de secagem.

Tabela 4.19. Perda de vitamina C no processo de secagem combinado leito fixo/leito fluidizado

Ensaio	Condições operacionais	% de Vit.C (b.s.)			Perda de Vitamina C (%)	
		*	**	***	Leito fixo	Leito de jorro
1	$H_i = 0,17$ m; $U_i = 0,6$; $V_{ar} = 2,0$ m/s	-	6,34	4,63	-	26,97
2	$H_i = 0,12$ m; $U_i = 1,5$; $V_{ar} = 1,5$ m/s	-	7,53	4,17	-	44,62

(*) in natura; (**) após pré-secagem; (***) após secagem

Comparando as Tabelas 4.18 e 4.19 verifica-se em termos de eficiência térmica que as perdas de vitamina C são maiores em leito fluidizado. Verifica-se que no ensaio realizado na altura máxima capaz de manter um jorro estável e umidade inicial mais elevada para o leito de jorro, o leito fluidizado nesta faixa de transição apresenta uma perda de vitamina C muito acentuada em torno de 45 %, desta forma pode-se dizer que a região de transição de jorro para fluidizado também afeta significativamente a qualidade do produto final.

Em ambos os sistemas de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba verificam-se uma tendência na redução das perdas de vitamina C quando se trabalha com cargas do leito e umidade inicial com valores mais elevados, para um mesmo tempo de secagem e temperatura. Os nutrientes são degradados em menor quantidade, pois a área de transferência de calor é maior, assim sendo o calor absorvido pelo material é menor. Também é importante ressaltar que as propriedades térmicas como difusividade e condutividade aumentam com a elevação do teor de umidade sendo mais acentuada este efeito em umidades mais baixas como foi discutido anteriormente, desta forma como a umidade final do produto obtido na secagem leito fixo/leito de jorro e leito fixo/leito fluidizado estão muito próximas, isto indica que a capacidade de absorver calor e de penetrar no material nos instantes finais da secagem ser a praticamente a mesma, pode justificar o comportamento de um efeito negativo da altura inicial do leito e da umidade inicial do produto. A perda de vitamina C também pode ser explicada por um possível gradiente de temperatura no interior do sólido, mais acentuado quanto menor a condutividade térmica.

4.10.2 Eficiência Térmica.

A Tabela 4.20 apresenta os resultados referentes à eficiência térmica do processo de secagem conforme descrito no capítulo 3. Os valores mostrados são relativos ao início e final do ensaio. Como era previsto há um melhor aproveitamento da energia na fase inicial da secagem o que comprova as elevadas taxas de evaporação da água nos primeiros minutos do processo. Observa-se que quanto maior a carga do leito para um mesmo valor inicial de umidade e velocidade do ar de secagem a eficiência térmica no início do ensaio é melhor. Também se verifica que para uma mesma carga inicial de produto a ser processado e velocidade do ar de secagem a eficiência da secagem é superior para níveis de umidade inicial do produto maior. O efeito da velocidade do ar de secagem só é significativo quando se trabalha em condições de máximo desta variável independente da condição inicial de umidade e carga do produto.

Tabela 4.20. Eficiência térmica no processo de secagem combinado leito fixo/leito de jorro

Ensaio	Condições operacionais	Eficiência térmica ϕ (%)
1	$H_i = 0,09 \text{ m}; U_i = 0,6; V_{\text{ar}} = 2,8 \text{ m/s}$	7,7
		0,56
2	$H_i = 0,12 \text{ m}; U_i = 0,6; V_{\text{ar}} = 2,8 \text{ m/s}$	19,70
		0,51
3	$H_i = 0,09 \text{ m}; U_i = 1,5; V_{\text{ar}} = 2,8 \text{ m/s}$	51,00
		3,00
4	$H_i = 0,12 \text{ m}; U_i = 1,5; V_{\text{ar}} = 2,8 \text{ m/s}$	46,20
		0,11
5	$H_i = 0,09 \text{ m}; U_i = 0,6; V_{\text{ar}} = 3,5 \text{ m/s}$	7,50
		0,9
6	$H_i = 0,12 \text{ m}; U_i = 0,6; V_{\text{ar}} = 3,5 \text{ m/s}$	14,30
		2,20
7	$H_i = 0,09 \text{ m}; U_i = 1,5; V_{\text{ar}} = 3,5 \text{ m/s}$	27,50
		0,44
8	$H_i = 0,12 \text{ m}; U_i = 1,5; V_{\text{ar}} = 3,5 \text{ m/s}$	32,00
		0,21
9(C)	$H_i = 0,105 \text{ m}; U_i = 1,05; V_{\text{ar}} = 3,2 \text{ m/s}$	23,00
		2,10
10(C)	$H_i = 0,105 \text{ m}; U_i = 1,05; V_{\text{ar}} = 3,2 \text{ m/s}$	13,60
		1,20

4.11 Análise Estatística dos Resultados do Planejamento Experimental 2³ Completo – Secagem em Leito de Jorro.

A análise dos resultados obtidos para as variáveis respostas ρ_{Gf} / ρ_i , d_f/d_i , Ar_f/Ar_{sp} , $P_{vit.C}$, U_f/U_i , e m_{evj} foi realizada através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “Statistic”, cuja matriz das variáveis independentes codificada e das respostas são apresentadas na Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Planejamento fatorial 2³ - Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios de secagem em leito de jorro.

Ensaio	H _i	U _i	Var	ρ_{Gf} / ρ_i	d_f/d_i	Ar_f/Ar_{sp}	Pvit.C (%)	U_f/U_i	m_{evj}
1	-1	-1	-1	0,939	0,880	0,836	33,080	0,178	0,03933
2	+1	-1	-1	1,010	0,870	0,783	1,250	0,192	0,06823
3	-1	+1	-1	0,870	0,760	0,549	10,240	0,094	101,100
4	+1	+1	-1	0,490	0,970	0,910	0,760	0,103	0,14024
5	-1	-1	+1	0,884	0,880	0,847	16,990	0,198	0,03674
6	+1	-1	+1	1,203	0,930	0,754	5,830	0,200	0,05943
7	-1	+1	+1	1,066	0,850	0,531	13,410	0,103	0,09994
8	+1	+1	+1	0,812	0,780	0,672	3,260	0,111	0,12696
9	0	0	0	0,860	0,920	0,678	13,000	0,183	0,08368
10	0	0	0	0,796	0,910	0,796	12,500	0,195	0,07171

4.12.1 Análise de Regressão dos Modelos Estatísticos

Para todas as variáveis respostas analisadas os termos não significativos podem ser eliminados do modelo estatístico. As análises estatísticas foram efetuadas para um limite de confiança de 95%, contudo em algumas respostas os efeitos ficaram muito próximos do erro permitido, desta forma optou-se para alguma variável resposta diminuir para 90% o limite de confiança, objetivando analisar melhor os efeitos sobre estas variáveis. As Equações 4.1, 4.2 e 4.3 correspondem aos modelos estatísticos descodificados para as variáveis respostas m_{evj} , U_f/U_i e $P_{vit.C}$ para limites de confiança de 90 e 95%, respectivamente. Para as outras variáveis serão apresentados apenas tendências de comportamento tendo em vista os modelos não serem estatisticamente significativos apesar da redução do limite de confiabilidade de 90%, sendo apresentado posteriormente apenas tendências.

A massa de água evaporada pode ser representada pela equação abaixo:

$$m_{evj} = 0,0778 - 0,0446 * U_i \quad (4.1)$$

A razão adimensional entre a umidade final e a umidade inicial é representada pela equação abaixo:

$$U_f/U_i = 0,0415 + 0,0151 * H_i + 0,0334 * U_i \quad (4.2)$$

A perda de vitamina C é representada pela equação abaixo:

$$P_{vit. C} = 5,516 - 7,83 * H_i - 3,68 * U_i + 2,92 * H_i * U_i + 2,50 * H_i * V_{ar} + 2,15 * U_i * V_{ar} - 2,66 * H_i * U_i * V_{ar} \quad (4.3)$$

Para cada modelo representado nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3 a significância estatística foi determinada pela análise de variância, cujos resultados serão mostrados a seguir. Como também, os resultados obtidos da análise de variância para todas as outras respostas.

4.11.2 Análise das Variáveis Respostas: Propriedades Físicas Adimensionalizadas.

Dentro do estudo realizado através do softwaer “statistic” podemos avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis respostas citadas. No limite de confiança estabelecido de 95% para d_f/d_i , Ar_f/Ar_{sp} e ρ_f/ρ_i . Observou-se que os modelos ajustam bem os dados experimentais, considerando todos os efeitos que se apresentaram próximo ao erro estimado pelo limite, com um bom coeficiente de correlação. Contudo, não foram significativos. Os modelos apenas ajustam bem os dados experimentais, talvez um planejamento fatorial completo mais conFiguração estrela, obtendo-se um modelo não linear ajustasse melhor os dados experimentais. Estes resultados já eram esperados tendo em vistas as discussões mostradas anteriormente sobre as propriedades físicas no que se refere à massa específica e o tamanho do pedaço cúbico de goiaba. Para avaliar melhor os efeitos destas variáveis independentes o limite de confiança foi reduzido para 90% no caso das respostas d_f/d_i e ρ_{Gf}/ρ_{Gf} . Os resultados são apresentados na Tabela 2.

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 apresentam os pontos experimentais de d_f/d_i , Ar_f/Ar_{sp} e ρ_{Gf}/ρ_{Gf} em relação aos valores previstos pelo modelo. Verifica-se que para d_f/d_i e ρ_f/ρ_i os valores observados em relação aos valores previstos apresentam uma boa concordância. Contudo em relação ao número de Arquimedes normalizado os valores encontram-se muito dispersos.

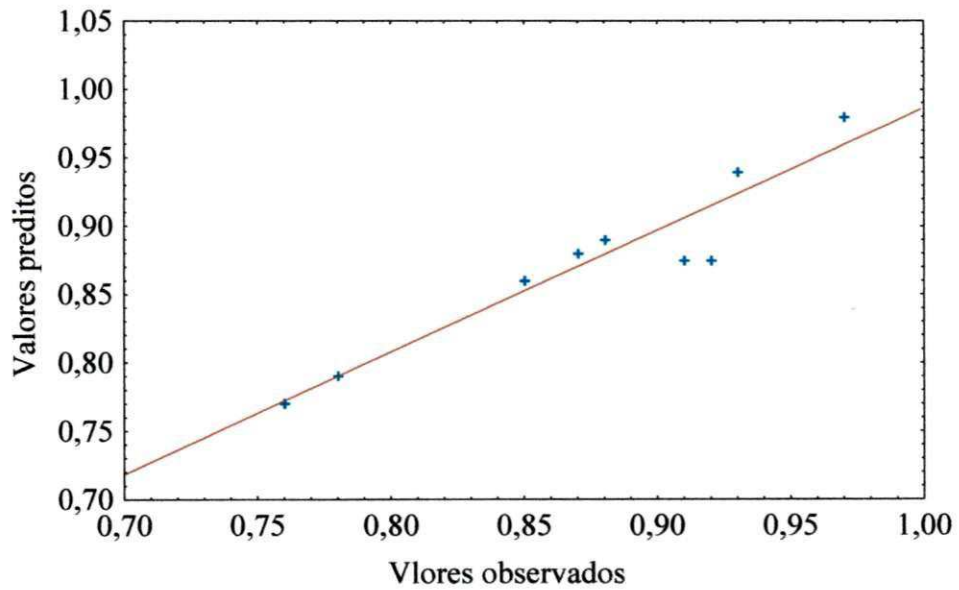


Figura 4.38. Valores observados versus valores preditos - d_f/d_i (95%)

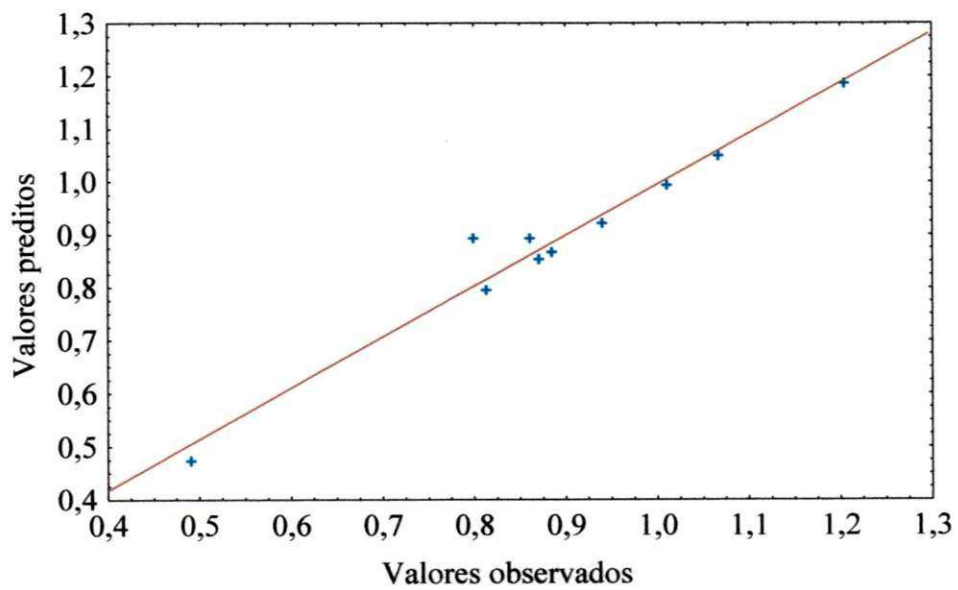


Figura 4.39. Valores observados versus valores preditos - ρ_{GF}/ρ_i (95%)

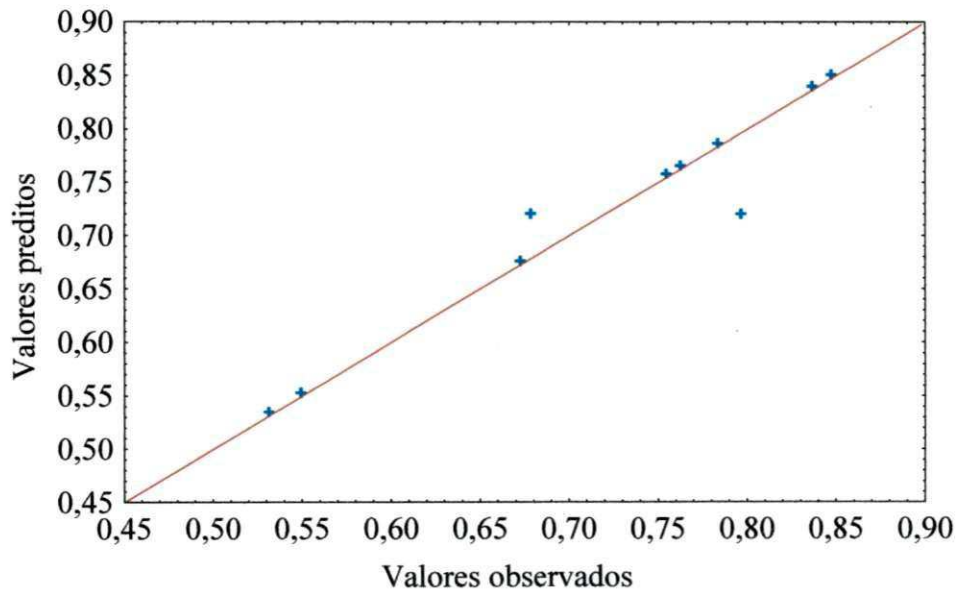


Figura 4.40. Valores observados versus valores preditos – A_{rf}/A_{ri} (95%)

As Figuras 4.41 e 4.42 mostram a dispersão entre os valores observados e valores preditos para um limite de confiança de 90% para as variáveis respostas d_{Gf}/d_i e ρ_{Gf}/ρ_{Gi} onde verifica-se uma grande dispersão dos resultados indicando uma má qualidade de ajuste do modelo linear previsto estatisticamente.

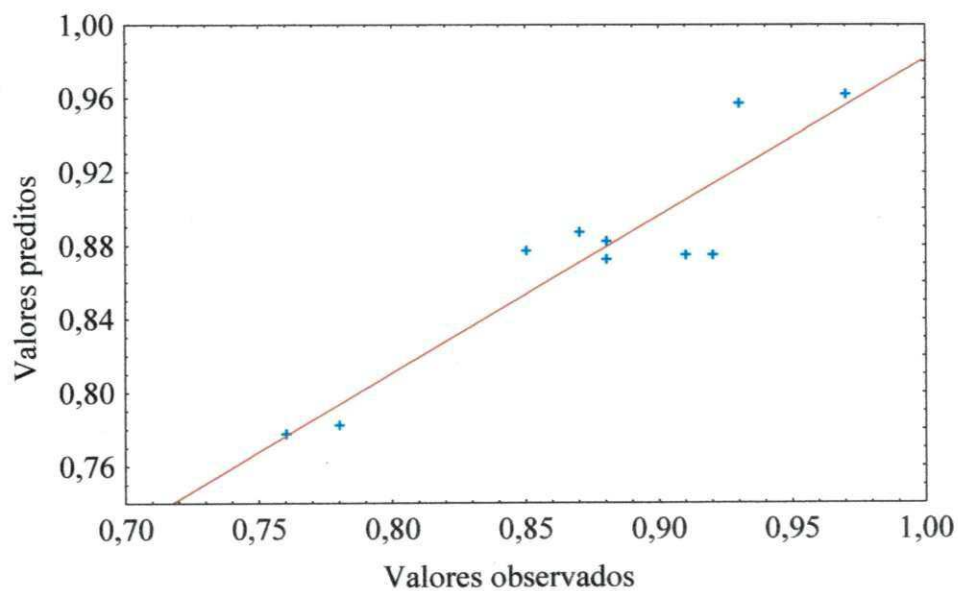


Figura 4.41. Valores observados versus valores preditos - d_{Gf}/d_i (90%)

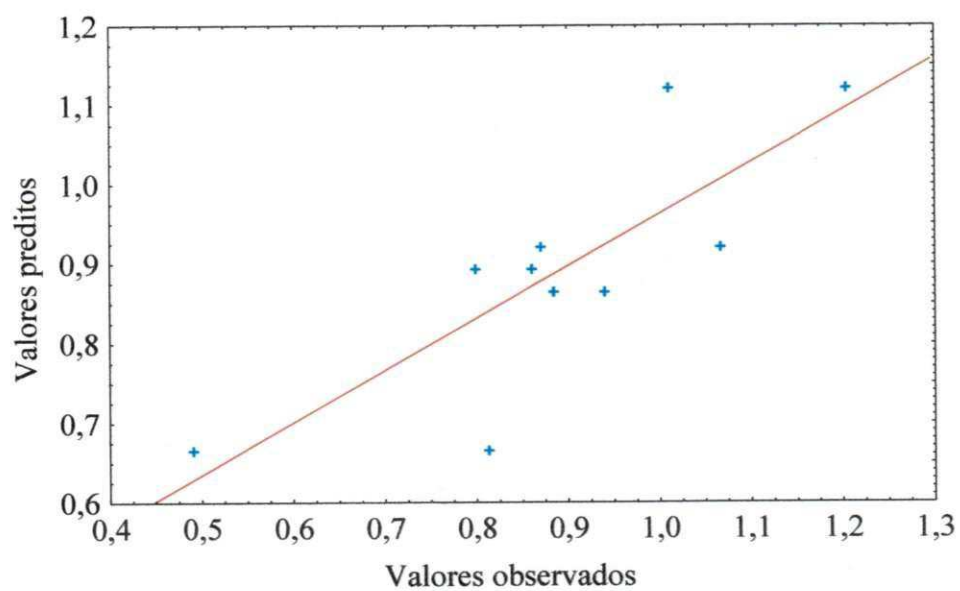


Figura 4.42. Valores observados versus valores preditos - ρ_{Gf}/ρ_{Gi} (90%)

A Figura 4.43 apresenta o diagrama de Pareto para a variável resposta d_{Gf}/d_i com limite de confiança 90%. Observa-se na Figura 4.43 que o efeito da variável H_i é positivo, enquanto os outros efeitos são negativos. O efeito interativo entre todas as variáveis independentes é o mais significativo tendo um efeito combinado negativo na variável resposta.

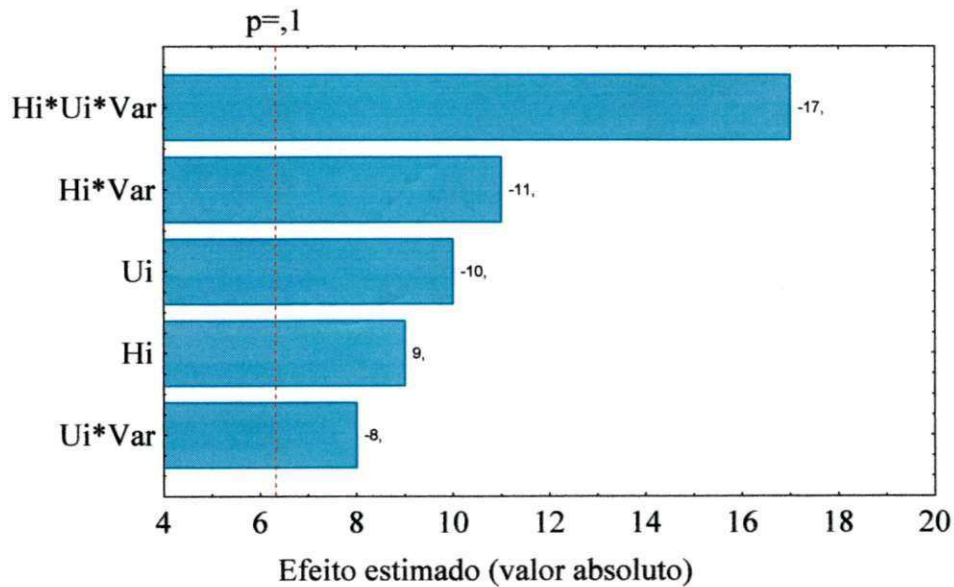


Figura 4.43. Diagrama de Pareto dos efeitos para variável resposta - d_{Gf}/d_i (90%)

Na Figura 4.44, observa-se no diagrama de Pareto o efeito na variável resposta ρ_{Gf}/ρ_{Gi} para uma confiabilidade de 90% os efeitos são negativos e o efeito interativo é estatisticamente mais significativo.

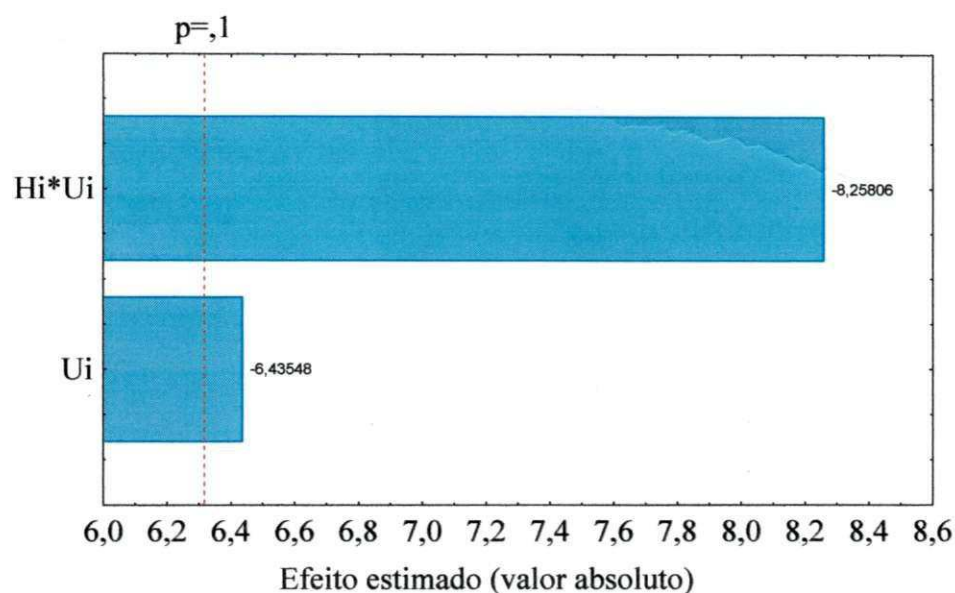


Figura 4.44. Diagrama de Pareto dos efeitos para variável resposta - ρ_{GF}/ρ_{Gi} (90%)

Em relação à variável resposta do número de Arquimedes normalizado obtido durante a secagem em leito de jorro o qual mostra as modificações estruturais do mesmo para os limites de confiança de 95% e 90% não foram observados efeitos significativos das variáveis independentes e nem tendências das mesmas dentro do erro percentual previsto pelo modelo estatístico. Desta forma não se faz necessário ilustrar através do diagrama de Pareto os efeitos das variáveis independentes.

De acordo com ANOVA mostrada na Tabela 4.22, verifica-se e confirma-se os resultados mostrados através dos Figuras dos valores observados versus valores preditos, que mostram a dispersão dos dados, que os modelos não são estatisticamente significativos embora apresentem bons coeficientes de correlação, exceto para a variável resposta ρ_{GF}/ρ_i com limite de confiança de 90%. Os modelos encontrados ajustam bem os valores experimentais dentro da faixa operacional estudada, levando a crê que os erros aleatórios são predominantes, pois se verifica em todos os casos que o valor de F calculado por falta de ajuste é muito menor do que o valor Tabelado. Um estudo mais detalhado com planejamento completo e configuração estrela ajustasse bem os resultados encontrados.

Tabela 4.22 – Resultados da análise de regressão - d_f/d_i , Ar_f/Ar_{sp} , ρ_f/ρ_i

Variável Resposta	Qualidade e do Ajuste (%)	Coeficiente de Correlação	Teste F (Regressão)			Teste F (Falta de Ajuste)		
			F_{calc} MQ _R /M Q _r	F_{tab}	F_{calc}/F_{ta} b	F_{calc} MQ _{faj} /MQ _e p	F_{tab}	F_{calc}/F_{ta} b
d_f/d_i^*	52,35	0,8941	2,41	19,35	0,12	80,00	161,4	0,50
d_f/d_i	67,65	0,8562	4,76	4,05	1,18	36,33	53,59	0,68
Ar_f/Ar_{sp}	69,20	0,9315	3,89	19,35	0,20	0,09	161,4	0,00
ρ_f/ρ_i^*	82,89	0,9619	7,23	19,35	0,37	5,36	161,4	0,03
ρ_f/ρ_i	55,67	0,6552	6,65	3,26	2,04	9,45	58,20	0,16

* Limite de confiança 95%; Limite de confiança 90%

4.11.3. Análise de regressão das variáveis respostas: massa de água evaporada (m_{evj}), razão de umidade final e umidade inicial (U_f/U_i) e da perda de Vitamina C ($P_{Vit.C}$).

As Figuras 4.45, 4.46 e 4.47 apresentam os efeitos das variáveis independentes H_i , U_i e V_{ar} e das suas interações, sobre as variáveis resposta m_{evj} com limite de confiança de 90%, U_f/U_i e $P_{Vit.C}$ com confiabilidade de 95%. Observa-se que os efeitos de interação entre as variáveis independentes são apenas apresentados para a variável resposta $P_{Vit.C}$.

A Figura 4.45 apresenta o diagrama de Pareto para o efeito das variáveis independentes sobre m_{evaj} com um nível de confiança de 90%. Os resultados mostram que para esta variável o modelo de primeira ordem não apresenta efeitos interativos, apenas a variável independente U_i apresenta efeito positivo na massa de água evaporada no leito de jorro. É razoável entender fisicamente este fenômeno tendo em vista que quanto maior a umidade inicial do produto, para o mesmo tempo de secagem, a massa evaporada é maior. Apesar de a altura não apresentar efeito estatístico sobre esta variável é importante considerá-la tendo em vista que quanto maior a carga de pedaços cúbicos de goiaba no leito maior a quantidade de água evaporada. Porém, é importante

perceber que o efeito desta variável pode ser considerado no modelo, pois o seu erro percentual está muito próximo do erro permitido pelo modelo.

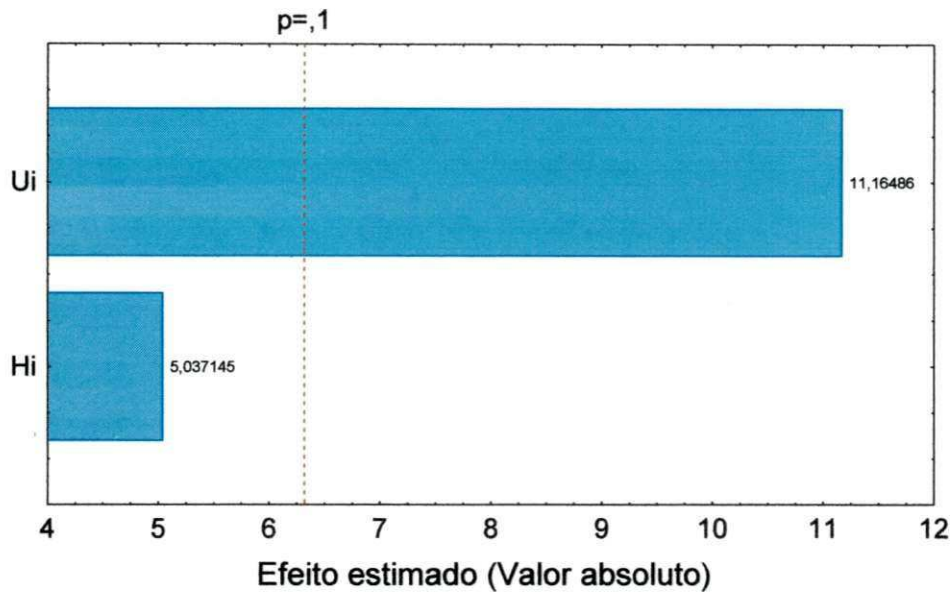


Figura 4.47. Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta m_{evj} (90%)

.Em relação a variável resposta razão entre as umidade final e umidade inicial, apenas o efeito da U_i é significativo com tudo de forma negativa para um limite de confiança de 95% foi da variável independente U_i que mostra um efeito negativo, apresentado no diagrama de Pareto na Figura 4.46.

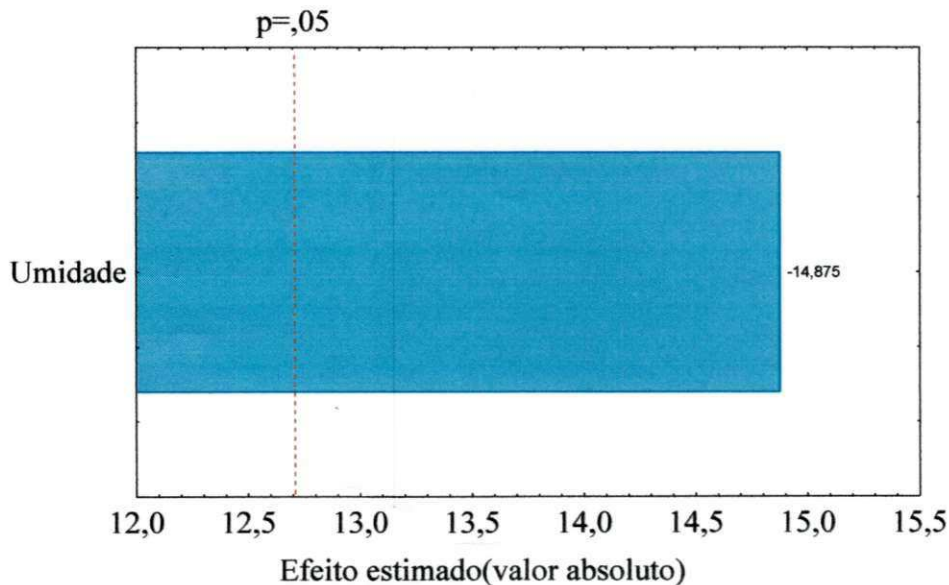


Figura 4.46. Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta U_f/U_i (95%)

A Figura 4.47 apresenta o Diagrama de Pareto para a variável resposta percentual de perda de vitamina C para um limite de confiança de 95%. Observam-se efeitos individuais negativos, da altura inicial do leite e umidade inicial do produto que são estatisticamente mais importantes. O modelo estatístico também apresenta os efeitos interativos entre as variáveis H_i*U_i , H_i*V_{ar} e U_i*V_{ar} sendo positivo. O efeito combinado entre as três variáveis independentes é negativo.

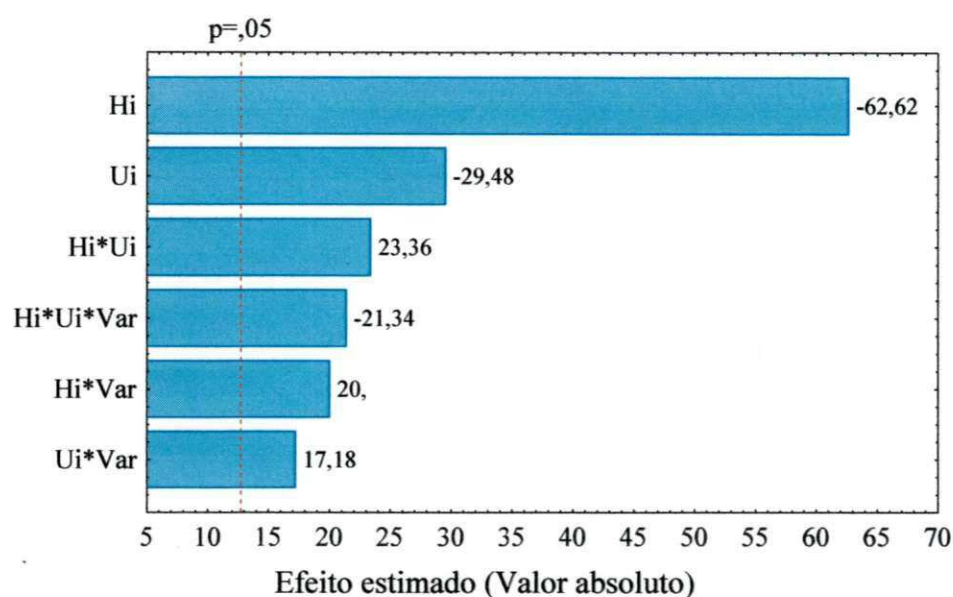


Figura 4.47. Diagrama de Pareto dos efeitos para variável resposta $P_{Vit. C}$.

As Figuras 4.48 e 4.49 apresentam um estudo da dispersão entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo para m_{evj} e U_f/U_i . Os resultados encontrados inicialmente indicam uma falta de ajuste dos valores experimentais obtidos ao modelo estatístico previsto.

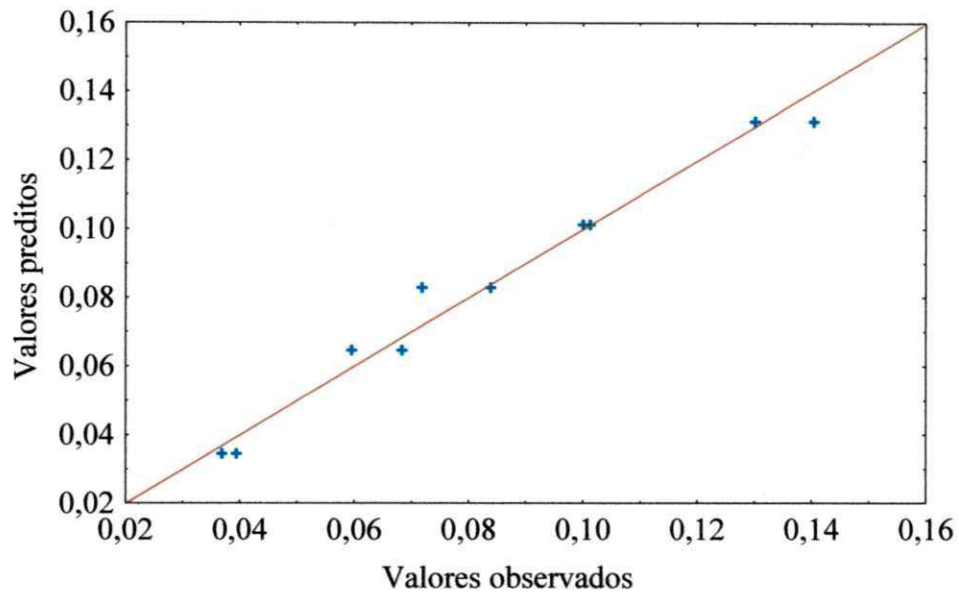


Figura4.48. Valores observados versus valores preditos - m_{evj} (90%)

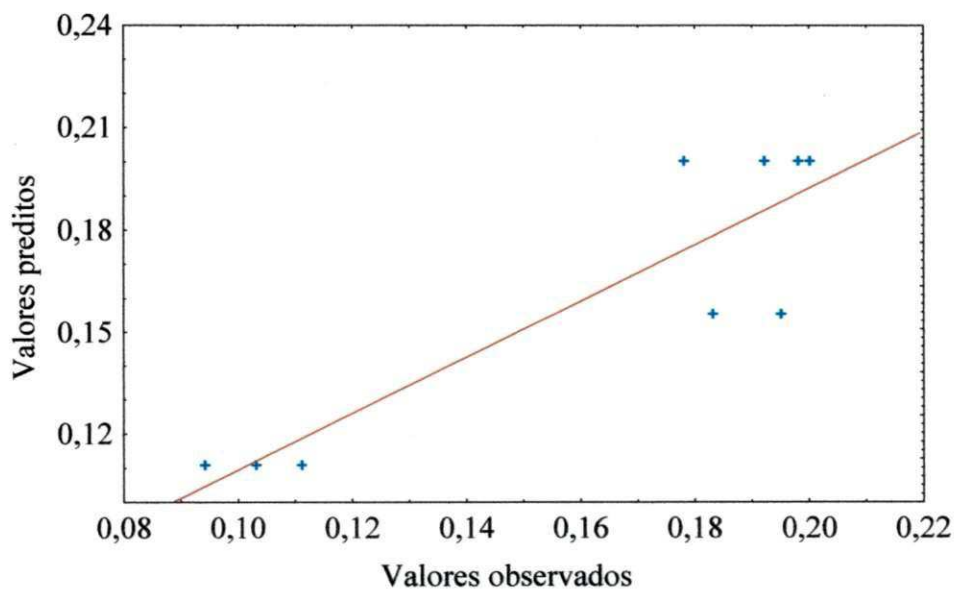


Figura 4.49. Valores observados versus valores preditos - U_f/U_i (95%)

Em relação à perda de vitamina C, a Figura 4.50 apresenta os valores observados versus os valores preditos pelo modelo de primeira ordem. Verifica-se que o modelo estatístico ajusta satisfatoriamente os dados do percentual de perda de vitamina C.

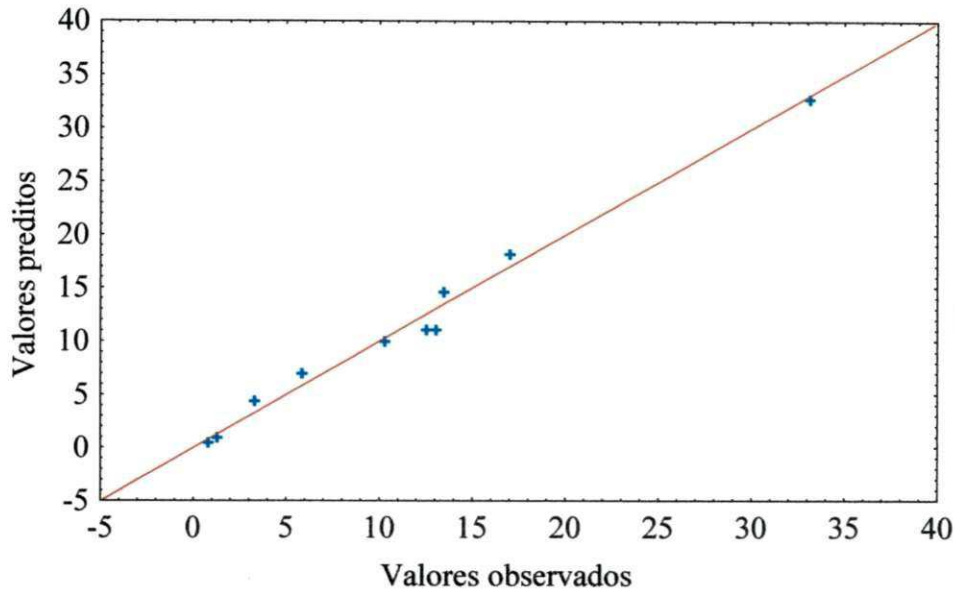


Figura 4.50. Valores observados versus preditos $P_{vit.C}$ (95%)

Nos resultados mostrados na Tabela 4.23, observa-se que o modelo ajustado aos dados de massa de água evaporada no leito de jorro apresenta uma boa qualidade de ajuste para um limite de confiança de 90%. O modelo é estatisticamente significativo e preditivo. A regressão explica 78,62% da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 99,35%. O coeficiente de correlação é 0,8099, o que significa que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo é quase 9,9 vezes superior ao F Tabelado de regressão. A falta de ajuste apresentada no diagrama de dispersão, entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo deve estar relacionado a erros aleatórios. Em relação a variável resposta U_f/U_i o modelo mostra-se também estatisticamente significativo com um coeficiente de correlação igual a 0,8291. O valor de F obtido é aproximadamente 7,3 vezes superior ao valor Tabelado num limite de confiança de 95%. A regressão explica 80,76% do valo máximo explicável de 99,63%. Em relação a variável resposta $P_{vit. C}$ o modelo mostra-se também estatisticamente significativo e preditivo como era de se esperar tendo em vista quase nenhuma dispersão apresentada anteriormente com um coeficiente de correlação de 0,986. O valor de F obtido é aproximadamente 4 vezes superior ao valor Tabelado de regressão para um limite de confiança de 95%. A regressão explica 98,57% do valor máximo explicável de 99,98%.

Tabela 4.23– Resultados da análise de regressão – m_{evj} , U_f/U_i e $P_{vit.C}$.

Resposta	Q _{ajuste} (%)	R ²	Teste F (Regressão)			Teste F (Falta de Ajuste)		
			F _{calc}	F _{tab}	F _{calc} /F _{tab}	F _{calc}	F _{tab}	F _{calc} /F _{tab}
m_{evj} *	96,77	0,975	34,08	3,46	9,85	4,04	58,91	0,07
U_f/U_i **	80,76	0,802	38,80	5,32	7,29	6,37	19,35	0,33
$P_{vit.C}$ **	95,71	0,980	34,45	8,94	3,85	46,57	199,5	0,23

* Limite de confiança 90%; **Limite de confiança 95%

4.12 Análise das Superfícies de Resposta

A comparação dos valores de F Tabelados com relação aos valores obtidos pelos modelos para a massa de água evaporada no leito de jorro, umidade normalizada em relação a umidade inicial da amostra e a perda de vitamina C na secagem em leito de jorro de pedaços cúbicos de goiaba garantem que os modelos apresentam uma quantidade de variação devido ao modelo ajustado bem superior a variação não explicada, mostrando que os valores experimentais são bem representados pelos modelos ajustados.

Verifica-se desta forma que os três modelos são estatisticamente validados, sendo utilizados para gerar as superfícies de resposta. Contudo, é interessante ressaltar as tendências existentes nas outras variáveis respostas dos efeitos da altura inicial do leito, umidade inicial da amostra e velocidade do ar de secagem através das superfícies de resposta tendo em vista que na maioria das situações os efeitos estiveram muito próximos ao percentual de erro permitido pelo limite de confiança estabelecido. As Figuras 4.51, 4.52 e 4.53 apresentam as superfícies de respostas para as variáveis d_f/d_i , ρ_{Gf}/ρ_i , Ar_f/ar_{sp} para um valor máximo de velocidade.

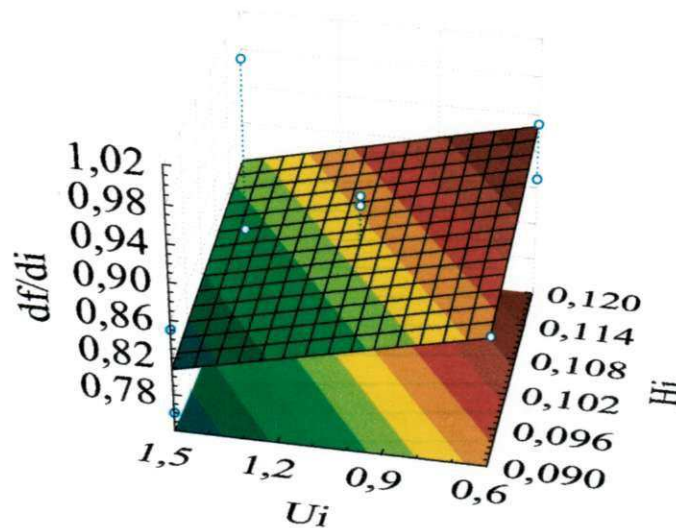


Figura 4.51. Superfície de resposta para variável d_f/d_i

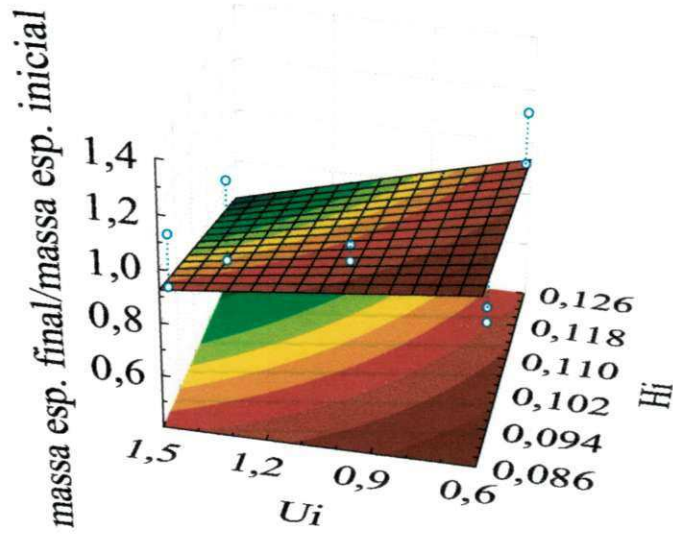


Figura 4.52. Superfície de resposta para variável ρ_{Gf}/ρ_i

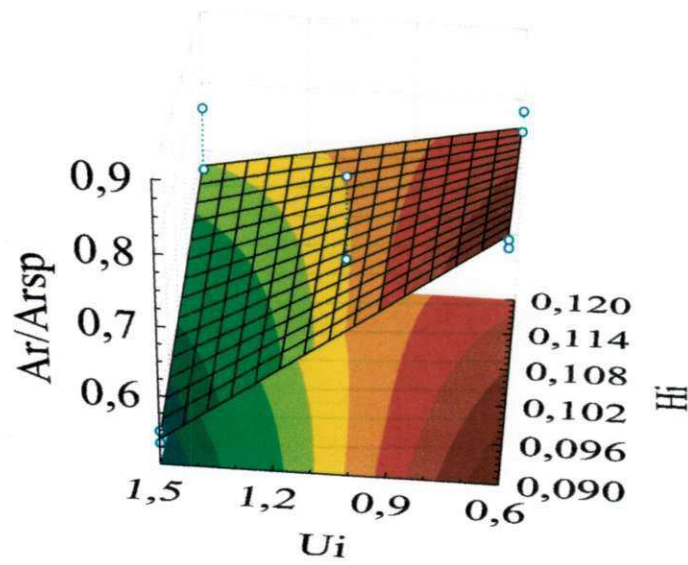


Figura 4.53. Superfície de resposta para a variável Ar_f/Ar_{sp}

4.12.1 Análise das superfícies de respostas das variáveis U_f/U_i , m_{evj} e $P_{vit.C}$

O comportamento da superfície de resposta para a variável U_f/U_i apresenta o mesmo comportamento quando avaliada no ponto central, nos valores de máximo e mínimo da velocidade do ar de secagem. Para qualquer valor da altura inicial do leito e valores menores de umidade inicial a razão U_f/U_i apresenta valores máximos, enquanto que para valores maiores de umidade independente da altura do leito esta variável resposta apresenta resultados menores. Como pode ser visto na Figura 4.54.

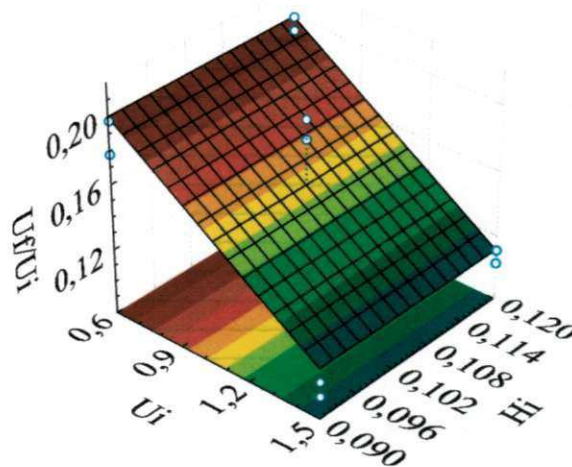


Figura 4.54. Superfície de resposta para variável U_f/U_i no valor máximo de velocidade do ar de secagem.

A Figura 4.55 mostra também através da superfície de resposta para a variável U_f/U_i o mesmo comportamento quando se avaliando os efeitos das variáveis independentes U_i e V_{ar} no ponto central, nos valores de máximo e mínimo da altura inicial do leito.

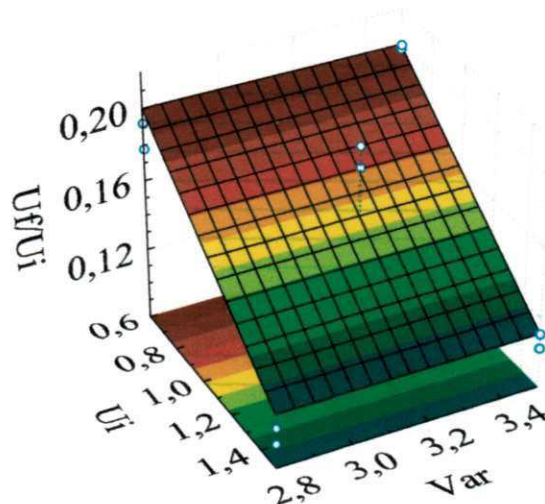


Figura 4.55. Superfície de resposta para a variável U_f/U_i no valor mínimo da altura inicial do leito de jorro

Em relação à massa de água evaporada no leito de jorro as Figuras 4.56 e 4.57 mostram as superfícies de resposta para esta variável. Observou-se de modo geral que para os valores de máximo, mínimo e no ponto central da velocidade do ar de secagem e da altura inicial do leito estas superfícies mostram um mesmo comportamento, respectivamente. Na Figura 4.56 verifica-se que a massa de água evaporada apresenta um valor de máximo para um nível de umidade inicial do produto de 1,5 (b.s.) independente do valor da altura inicial do leito e, um valor mínimo para um nível de umidade menor de 0,6 (b.s.), apresentando um aumento em função do aumento da umidade inicial do produto. Comportamento similar é mostrado na Figura 4.57, onde para valores de mínimo, máximo e no ponto central da altura inicial do leito a massa evaporada de água apresenta um acréscimo com o aumento da umidade inicial do produto independentemente da velocidade do ar de secagem.

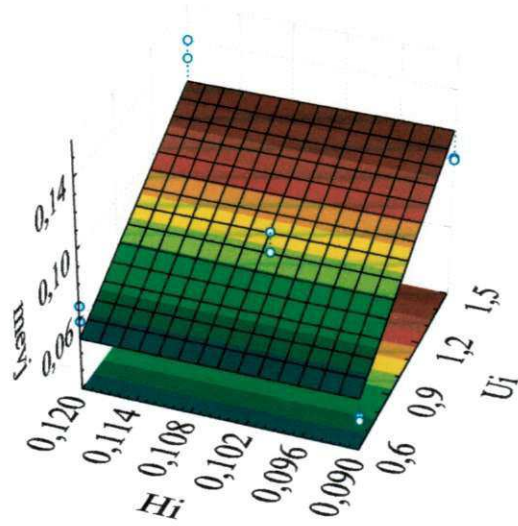


Figura 4.56. Superfície de resposta para a variável m_{evj} no valor máximo de velocidade do ar de secagem.

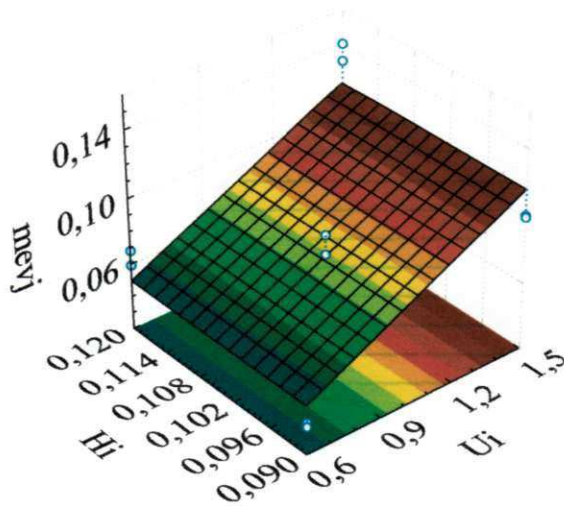


Figura 4.57. Superfície de resposta para a variável m_{evj} no ponto central de velocidade do ar de secagem.

As Figuras 4.58, 4.59, 4.60, 4.61, 4.62 e 4.63 mostram as superfícies de resposta para a variável resposta perda de vitamina C durante a secagem em leito de jorro. As Figuras 4.58, 4.59 e 4.60 mostram que quando a velocidade do ar se mantém constante para qualquer valor seja no ponto central, de máximo ou de mínimo a perda de vitamina C apresenta um efeito negativo com o aumento da altura inicial do leito independente do teor de umidade inicial do produto. Verifica-se ainda que as menores perdas de vitamina C acontecem na condição de máximo da velocidade do ar mostrada na Figura 4. 58.

Na Figura 4.61 verifica-se que a variável resposta perda de vitamina C apresenta um efeito negativo com a redução da velocidade do ar de secagem e da umidade inicial do produto analisada no ponto central do valor da altura do leito. Comportamento semelhante é encontrado para um valor de máximo da carga do leito apresentado na Figura 4.63. Contudo, as perdas de vitamina C são mais acentuadas quando se trabalha com a carga mínima de pedaço de goiaba. A Figura 4.62 verifica-se um efeito negativo da umidade inicial do produto sob a variável resposta vitamina C independente da altura inicial do leito, quando analisada na altura máxima do leito.

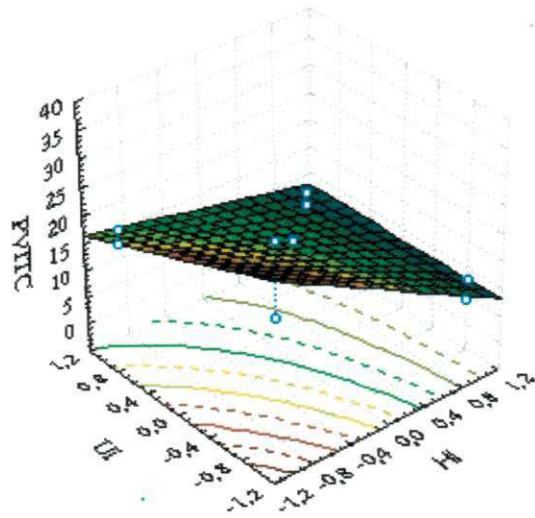


Figura 4.58. Superfície de resposta da perda de vitamina C (ponto central da V_{ar})

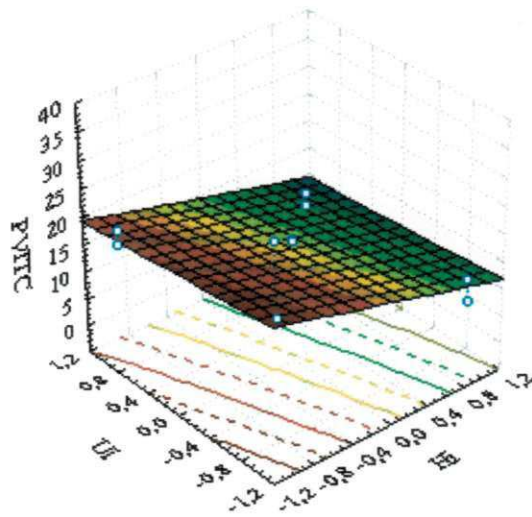


Figura 4.59. Superfície de resposta da perda de vitamina C (valor máximo da V_{ar})

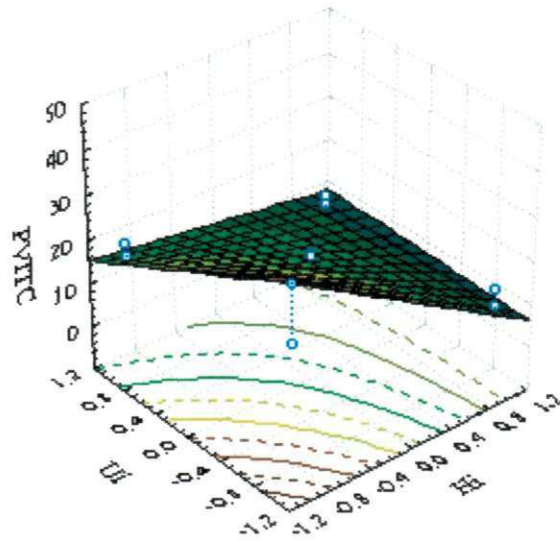


Figura 4.60. Superfície de resposta da perda de vitamina C (valor mínimo da V_{ar})

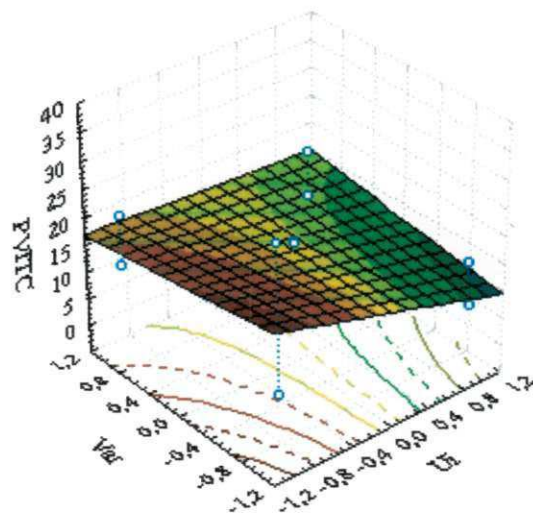


Figura 4.61. Superfície de resposta da perda de vitamina C (ponto central da H_i)

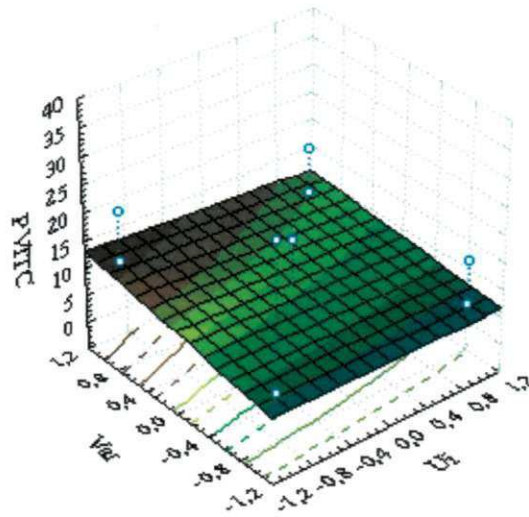


Figura 4.62. Superfície de resposta da perda de vitamina C (valor máximo de H_i)

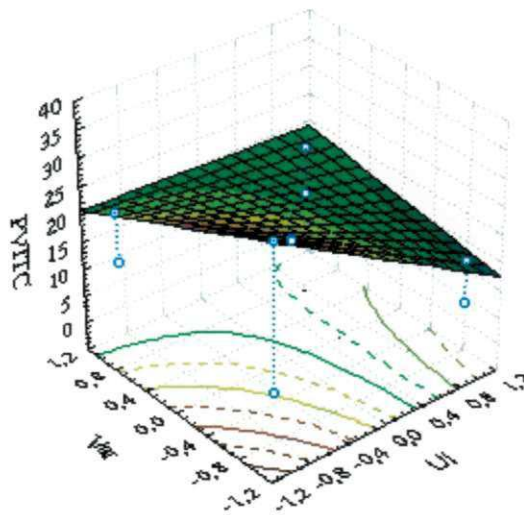


Figura 4.63. Superfície de resposta da perda de vitamina C (valor mínimo de H_i)

Os resultados obtidos através da análise estatística dos efeitos estimados das variáveis independentes em relação as variáveis respostas confirmam o estudo fenomenológico discutido anteriormente dentro das condições operacionais no qual foi realizado o estudo deste trabalho.

CAPÍTULO V

5 Considerações Finais

Os principais resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais e das análises apresentados neste trabalho são aqui listados de maneira sucinta.

5.1 Massa Específica

- A massa específica sofre variação significativa nas diferentes condições operacionais de temperatura usada em níveis elevados de umidade. Nestas condições a quantidade de água retirada é equivalente à variação da redução do tamanho dos pedaços cúbicos.
- A massa específica obtida durante os ensaios de secagem dos pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro apresentam a mesma tendência encontrada para leito fixo.
- A massa específica passa por um máximo em torno de 2,5 de umidade em base seca para condições de temperaturas diferentes
- Os pedaços cúbicos utilizados no leito de jorro confirmam a partir dos valores encontrados desta propriedade em conjunto com o seu diâmetro a inclusão dentro da categoria D da classificação de partículas proposta por GELDART (1973)

5.2 Encolhimento Volumétrico.

- A variação do volume dos pedaços cúbicos de goiaba apresentou comportamento linear com sua umidade durante toda a secagem em secador de bandeja, com coeficiente de encolhimento constante.
- Observa-se, de forma geral, que o encolhimento volumétrico para níveis de umidade entre 0,6 e 1,0 em base seca apresenta uma mesma tendência aos resultados encontrados para a secagem em bandeja dos pedaços cúbicos de goiaba. Os mesmos podem ser representados por uma única curva independente

da velocidade do ar de secagem e da altura inicial do leito, o modelo de KEEY proposto mostra-se satisfatório com um coeficiente de correlação igual a 99 %.

- O encolhimento volumétrico obtido no ensaio realizado em leito de jorro com umidade inicial do produto igual a 1,5 apresenta duas regiões bem caracterizadas identificadas pela mudança de inclinação da curva a partir de $U/U_{i \text{ b.s.}}$ aproximadamente igual a 0,6. Este comportamento aproxima-se do tipo b apresentado por KEEY (1992), no qual o produto encontra-se na saturação e a quantidade de água removida do material é igual a variação do tamanho da partícula.

5.3 Propriedades Térmicas.

- Os resultados obtidos de calor específico volumétrico, condutividade e difusividade térmica apresentam uma mesma tendência no comportamento. Na região de baixa umidade, as propriedades térmicas variam de maneira acentuada, aumentando com o incremento do teor de água e passando por um valor máximo que se encontra entre 2 e 4 de umidade em base seca. Na fruta mais úmida, a tendência se inverte, com uma diminuição do valor da propriedade térmica com o aumento de umidade.

5.4 Isotermas de equilíbrio.

- Em relação às isotermas de equilíbrio podemos afirmar que não foi observado efeito significativo da temperatura dentro da faixa estudada e os dados experimentais podem ser ajustados por uma única curva segundo o modelo de Henderson com coeficiente de correlação de 0,99.

5.5 Fluidodinâmica de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fluidizado e Leito de Jorro.

- Observa-se que o comportamento da curva na região de mínima fluidização é complexo passando rapidamente o leito para um outro regime.
- A velocidade de mínima fluidização sofre efeito significativo da umidade inicial do produto para uma mesma altura do leito. Por outro lado, para teores de umidade próximos, mas com a mesma altura e alturas diferentes esta variável não é influenciada.
- Observa-se a mudança de comportamento fluidodinâmico do leito, onde o mesmo passa por um período de jorro estável, em seguida fluidização rápida, “slugging” e posteriormente transporte pneumático.
- As correlações de LEFROY e DAVIDSON (1968) e GRBAVCIC et al (1976), para estimar o valor da altura máxima jorrável, que são função apenas das características da coluna e das propriedades das partículas, estimam de forma satisfatória o valor experimental determinado.
- A correlação proposta por GISHLER (1955) prediz satisfatoriamente os valores experimentais obtidos da velocidade de jorro mínimo. Enquanto que as correlações propostas por SMITH e RED () e ABDELRAZEK (1969) superestimam e subestimam os valores experimentais, respectivamente.
- Observaram-se modificações estruturais ocorridas na fluidodinâmica do leito de jorro durante a secagem analisando-se o número de Arquimedes. um comportamento similar das curvas onde a altura adimensional da fonte em relação à altura inicial do leito em função do número de Arquimedes normalizado apresenta um crescimento linear a partir do segundo valor do Ar_{ad} .
- Verificou-se que nas condições de velocidade de operação do ar de secagem igual à velocidade de jorro mínimo e na altura máxima capaz de manter o jorro estável e umidade mais elevada o produto sofre o efeito de encolhimento devido à perda de água, menos rapidamente mantendo-se praticamente constantes as propriedades físicas do material. Desta forma o número de Arquimedes apresenta poucas variações e a altura da fonte do leito aumenta acentuadamente para pequenas variações do Arquimedes.
- As curvas apresentadas da altura da fonte adimensionalizada em função do Arquimedes normalizado mostram um comportamento linear. Esta região é

caracterizada por apresentar um jorro estável, ou seja, durante todo o ensaio de secagem nas condições de ponto central e para condições mínimas de operação da secagem em leito de jorro através de um planejamento, altura inicial do leito de 0,09m e umidade inicial do produto de 0,6 (b.s.), a estrutura do leito de jorro se manteve em condições bem definidas

- Observou-se um leito bastante diluído sem formação da região central do jorro e da região anular, apresentando um comportamento descontínuo onde sua estrutura é muito modificada, com formação de grandes bolhas de ar caracterizando “slugging” nas condições de mínimo da altura inicial do leito e valor máximo e mínimo de umidade inicial do produto e V/V_{jm} igual a 1,4 e 2,5.

5.6 Cinética de Secagem de FatiasS de Goiaba em Leito Fixo em Camada Delagada.

- Observou-se que, como esperado, quanto mais elevada à temperatura, mais rapidamente se processa a secagem. Entretanto, foi verificado que para a temperatura de 70°C o produto obtido apresenta um escurecimento, ocasionado provavelmente pela caramelização de açúcares e mudanças físico-químicas da polpa, bem como gelificação do produto.
- Conforme esperado, a cinética torna-se mais lenta com espessuras maiores das fatias.
- Apesar das considerações simplificatórias do modelo difusional utilizado, observou-se que este ajusta bem os dados experimentais obtidos, especialmente no início da secagem. Na medida que se aproxima do equilíbrio o ajuste apresenta maiores desvios Este afastamento era esperado
- A equação de Arrhenius se aplica satisfatoriamente para a variação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura apresentando uma energia de ativação de 5,65kcal/mol.

5.7 Estudo da Pré-Secagem em Camada Espessa de Pedacos Cúbicos de Goiaba em Leito Fixo.

- Verifica-se que para a temperatura de 80 °C a taxa de secagem dos pedacos cúbico de goiaba em camada espessa é mais elevada, obtendo-se valores do teor de umidade em base seca final menores mesmo em tempos mais curtos de secagem. Observa-se também que a altura final do leito sofre significativa variação, ocorrendo uma maior redução para as temperaturas inferiores de 45 e 55 °C.
- Não se verificou escurecimento do produto final como observado na cinética de secagem de fatias de goiaba em camada delgada em leito fixo. Esta diferença de comportamento deve estar associada à composição da polpa, mais rica em açúcar, o que induziria o escurecimento, mesmo a temperaturas menos elevadas.

5.8 Secagem em Leito de Jorro e Leito Fluidizado de Pedacos Cúbicos de Goiaba.

- Verifica-se que, como esperado, os ensaios realizados com menor umidade inicial do produto e menor altura apresentam valores de umidade final do produto inferior. Observa-se também que as curvas praticamente coincidem a partir de um tempo de secagem aproximadamente igual a 15 min, com a umidade igual a 0,2 em base seca.
- Como era esperado, os ensaios realizados com maiores valores de altura do leito ou maior valor de umidade inicial do produto apresentam maior massa de água evaporada no leito independente da razão V/V_{jm} , para um mesmo tempo de secagem.
- Verifica-se que, a massa de água evaporada é sensivelmente maior durante a secagem em leito de jorro para uma mesma altura do leito e umidade inicial do produto apresentando um pequeno efeito da velocidade do ar de secagem. Contudo, como era de se esperar a massa evaporada de água tende ser superior na secagem em secador de leito fluidizado. Haja vista a maior quantidade de material utilizado durante a secagem nos ensaios.

- As curvas de fração de água evaporada em leito de jorro e leito fluidizado apresentam um mesmo comportamento e tendem a se distanciar ao longo da secagem. Evidencia-se que cerca 70 % da água contida na amostra dos pedaços cúbicos de goiaba são evaporadas nos 20 min iniciais. Este fator vem comprovar as mudanças bruscas nas propriedades físicas dos pedaços cúbicos de goiaba durante a secagem, tendo influência significativa no comportamento fluidodinâmico do leito durante o seu processamento. Contudo, observa-se que na secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito fluidizado a partir de aproximadamente 30 min quase toda a água é evaporada, enquanto no leito de jorro apenas 80% são evaporadas.

5.9 Modelagem Matemática da Cinética de Secagem.

- Os resultados encontrados no processamento de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro e leito fluidizado levam a afirmar que a secagem ocorre no período de taxa decrescente, no qual a migração de água por difusão se comporta conforme a segunda lei de Fick, considerando a hipótese do encolhimento volumétrico.
- Verifica-se que os valores encontrados para D_{ef} em secador de leito de jorro variam de aproximadamente $4,0 \cdot 10^{-4}$ a $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{min}$ e estão na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados por SILVA (2004) no estudo da secagem convectiva de acerola.
- Constata-se na secagem em leito de jorro que não há influência da velocidade do ar de secagem sobre D_{ef} para as mesmas condições de altura inicial do leito e umidade inicial do produto, o que evidencia a consideração de resistência externa desprezível e controle difusional interno.
- Em relação à secagem em leito fluidizado, observa-se que o modelo difusional ajusta bem aos valores iniciais e se afasta um pouco nos instantes finais do ensaio. Estes desvios devem-se talvez ao fato de se não levar em conta o fator encolhimento.
- Verifica-se de uma forma geral que a difusividade efetiva calculada a partir das curvas de secagem em leito fluidizado é aproximadamente igual à encontrada

em leito de jorro para níveis de umidades elevadas. Também, observa-se que o D_{ef} não sofre o efeito da carga do leito.

5.10 Desempenho da Secagem em Leito de Jorro e Leito Fluidizado.

- Observa-se que quanto maior a carga do leito e maior a umidade inicial dos pedaços cúbicos de goiaba, menor as perdas de vitamina C tanto para o secador de leito de jorro como para o de leito fluidizado. Sendo as perdas mais acentuadas no leito fluidizado.
- Quanto a eficiência térmica da secagem de pedaços cúbicos de goiaba, verifica-se que para uma mesma carga inicial de produto a ser processado e velocidade do ar de secagem, a eficiência da secagem é superior para níveis maiores de umidade inicial do produto. O efeito da velocidade do ar de secagem só é significativo quando se trabalha em condições de máximo desta variável independente da condição inicial de umidade e carga do leito.

5.11 Análise Estatística dos resultados do planejamento experimental 2³ Completo – Secagem em leito de jorro.

- Com relação à obtenção dos dados experimentais, observa-se que a técnica de planejamento fatorial utilizado para a secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro mostra-se uma ferramenta bastante útil, pois permite a verificação das influências das variáveis do processo de uma forma sistemática, analisando possíveis interações entre as variáveis.
- Verifica-se que as influências significativas foram em sua grande maioria da altura inicial do leito e da umidade inicial do produto. a velocidade apenas se mostrou significativa quando combinada a outras variáveis.
- As superfícies respostas analisadas foram apenas em relação às variáveis: umidade final do produto, massa de água evaporada e perda de vitamina c, haja vista que apenas estas respostas são estatisticamente significativas e os modelos de resposta, preditivos.

5.12 Conclusão

Uma avaliação geral da secagem de fatias de goiaba, contendo tanto o mesocarpo como a parte inteira da fruta, em secador convectivo mostra a inviabilidade da utilização desta técnica, tendo em vista o produto obtido apresentar modificações em sua cor, textura e aparência e alteração das propriedades organolépticas do produto final. No entanto, a secagem de pedaços cúbicos de goiaba obtidos utilizando apenas o mesocarpo da fruta “in natura” apresenta bons resultados quanto à qualidade do produto final. A secagem em leitos fluidodinamicamente ativos, de jorro e fluidizados, mostrou-se como uma alternativa viável também em termos de eficiência energética e tempo de processamento. Ambos os secadores apresentaram um bom desempenho dentro dos objetivos traçados neste trabalho podendo ser utilizados como uma nova alternativa de secagem de frutas em pedaços. Contudo, percebe-se que o leito de jorro apresenta, de maneira geral, desempenho superior.

Os resultados observados relativos à fluidodinâmica do leito de jorro são elucidativos quanto às mudanças de regime que acontece durante a secagem de materiais deformáveis. Aspectos sobre a estabilidade desses tipos de leito são também analisados, verificando a correlação entre a altura da fonte e o Arquimedes normalizado nas condições dinâmicas ao longo da secagem. Verifica-se que é possível operar o leito em condições estáveis desde que se utilizem condições adequadas de carga e umidade inicial do produto.

5.13 Perspectiva

- Expandir a matriz experimental utilizada em secador de leite de jorro, planejamento fatorial com configuração estrela, de forma analisar e encontrar condições ótimas de operação.
- Estudar outras variáveis fluidodinâmicas como: taxa de circulação de sólidos, diâmetro do jorro e distribuição da porosidade no leite de jorro.
- Avaliar modelos de distribuição do gás na região do jorro e do anel.
- Definir uma matriz experimental para o estudo mais detalhado do secador de leite fluidizado a partir de um planejamento fatorial com configuração estrela.
- Estudar a variação da porosidade mínima de fluidização.
- Estudar o efeito da temperatura de secagem nos secadores de leite de jorro e leite fluidizado.
- Avaliar modelos mais realísticos para a cinética de secagem em ambos os secadores.
- Realizar a análise sensorial do produto obtido.
- Realizar estudos sobre o tempo de prateleira do produto final.

CAPÍTULO VI

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAZEK, I.D. (1969), An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds. Citado por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N.. Spouted Beds. New York, Academic Press, 1974.

ACHARIYAVIRIYA, S.; SOPONRONNARIT, S.; TERDYOTHIN, A., Diffusion models of papaya and mango glaze' drying, Drying Technology, V. 18, n.7, p.1605-1615, 2000.

AFONSO JR, P.C.; CORRÊA, P.C. Propriedades térmicas dos grãos de café. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Poços de Caldas: Embrapa Café, v.2, p.1142-1146. 2000.

AGUILERA, J.M.; PARADA, E. Cytel – DAHI: Na Ibero-American project on moisture foods and combined methods technology. Foods Research Intarcional, 25, p. 159-65, 1992.

ALMEIDA, C. e ROCHA, S.C.S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leite fluidizado e leite de jorro. Scientia Agricola, v.59, n.4, p.645-652, 2002

ALMEIDA, M.M. de. Desidratação de polpa de umbu. Relatório de Estágio Integrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1991.

ALMEIDA, M. M.; ALSINA, O. L. S. ; SILVA, Y. C. E. . ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO NA SECAGEM DE FATIAS DE GOIABA: APLICAÇÃO DE UM MODELO DIFUSIONAL. In: II CONGRESSO DE INGENIERÍA DE PROCESOS DEL MERCOSUL, FLORIANOPÓLIS, 1999.

ALSINA, O. L. S. ; PEREIRA, Jaciane Andrade ; SILVA, Veruscka Araújo . Efeito das condições de pré-tratamento osmótico da acerola (*Malpighia emarginata*, DC), sobre os coeficientes de difusão na secagem convectiva e qualidade do produto final. In: CIBIA IV I IV CONGRESSO Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, 2003, Valparaíso. Programa y Libro de Resúmenes. CIBIA IV - I IV CONGRESSO Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, 2003. p. 85-85.

ALSINA, O.L.S, SILVA, O.S.; BRASILEIRO, M.N., Drying kinetics of indian cherry. In Proceedings of the Inter-American Drying Conference (IADC), Itu-SP, pp. 434-40, 1997.

ARAÚJO, J. de, L., QUEIROZ, A.J.de M.; de FIGUEREDO, R. M. F. Massa específica de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) sob diferentes temperaturas, 2002.

ARAÚJO, M.E.R. Predição da cinética de secagem de fruto da goiabeira, Universidade Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado. 2001.

ARAÚJO, S. W. C. ; ALSINA, O. L. S. ; SILVA, V. A. . Estudo do efeito da casca sobre a transferência de massa na desidratação osmótica da acerola. In: I Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2004, Campina Grande. I Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2004. v. CD. p. 1-6.

ARGANDÔNA, E.J.S., CUNHA, R.L.; HUBINGER, M.D. Efeito do pré-tratamento osmótico na estabilidade do ácido ascórbico em goiabas desidratadas. XIX CBCTA, Recife, 2004.

ARGANDÔNA, E.J.S., Desidratação de Goiaba por Imersão e Secagem, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 1999.

ASCHERI, D.P.R Estudo das características de adsorção de água e da estabilidade das microcápsulas de óleo essencial de laranja na seleção de material de parede. Ciências Tecnologia de Alimentos, v.19 n.3 Campinas, 1999.

BABU, S.P., SHAH, B.; TALWAKAR, A. (1978). Fluidization correlations for coal gazeification materials, minimum fluidization velocity and fluidized bed Expansion ratio. Citado por MURACHMAN, B. "Hydrodinamique et Transferts Thermiques dans les Lit Fluidisés par les Gaz". Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.

BARROS, N.B., SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Ed. UNICAMP, 1995,299p.

BARROZO, M.A.S., SATORI, D.J.M., FREIRE, J.T. Transferência de calor e massa em leitos deslizantes e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: Gráfica da UFSCar, p. 119-159, 1998.

BECKER, H.A., An investigation of laws governing the spouting of coarse particules. Chemical Engineering Science, v. 13, 245,1961.

BI, H.T.; GRACE, J.R. Effect of measurement method on the velocities to demarcate the onset of turbulent fluidization. Chemical Engineering Journal, v.57, n.3, p.261-271. 1995.

BIMBINET, J.J. Criteria of energetic performance for convection-type dryers, Drying's 82, Washington, Hemisphere Publishing, Company, p. 121-128, 1982.

BOTTERIL, J.S.M., TEOMANY, Y.; YUREGIR, K.R.(1982). The effect of operating temperature on the velocity of minimum fluidization, bed-voidage and general behavior. Citado por MURACHMAN, B. Hydrodinamique et Transferts Thermiques dans les Lit Fluidisés par les Gaz. Dissertação de Doutorado.Toulouse: I.N.P., 1990.

BOX, G.E.P., HUNTER, J.H.; HUNTER, W.G. Statistics for experimenters – in introduction to desing, data analysis and model bilding, New York, John Wiley & Sons, 1978, 653p.

BROOKER, D.B; ARKEMA, F.W.B.; HALL, C.W.. Drying cereal grains, Connecticut, The AVI Publishing Company, inc. 265p.,1974. Citado por Prado, M.E.T. et al.

“Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos”. *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, v.19, n.1. Campinas, 1999.

BRUNAUER, D.B., EMMET, T.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of American Chemistry Society*; v.60, n.2, p.309-19, 1938.

CARNEIRO, C.G., ANUNCIATO, P.T., MONTE, R.; CARDELLO, L. Vitamina C em alimentos vegetais: Determinação por método enzimático e titulométrico. In: XIX CBCTA, Recife, setembro 2004.

CARPINETTI, L.C.R. Planejamento de experimentos. São Carlos: Departamento de Eng. Mecânica, EESC/USP, 1996. v.1.

CARVALHO, R.F.; CAL-VIDAL, J. Higroscopicidade de pó de goiaba liofilizada *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, n.4, p.455-460, 1985.

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

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 – a review. *Journal of Food Technology*, v.13, p.159-174, 1978.

COSTA, C.M.L. Influência das condições de secagem no rendimento e na composição do óleo essencial de pimenta longa (*Piper hispidinervium* C. Dc.) Belém: Departamento de Eng. Química, Universidade Federal do Pará, 1999, 214p.

CRANK, J. “The Mathematics of Diffusion”. 2ed., Clarendon Press, 1975, 414p.

DINCER, I.; DOST, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying technology*, v.13 (1e2), 425-435, 1995.

EPSTEIN, N. e CHANDNANI, P.P.; “Gas spouting Characteristics of Fine Particles”. *Chem. Eng. Science*, v. 42, p.2977-81, 1987.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress* 48 (2) (1952), pp. 89–94, 1952.

FANE, A.G., STEVESON, T.R.; LLOYD, C. J.; DUNN, M., The spouted dryer – an alternative to spray drying. *Chemeca 80*, 8th Chemical Engineering Conf., Australia, p.278-82, 1980.

FARIA, L.J.G. Análise experimental do processo de secagem de urucum (*bixa orellana* L.) em leito fixo. Campinas: Faculdade de Eng. Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 274p. Tese de Doutorado.

FUSCO, A.J., AVANZA, J.R.; GABITTO, J.F. Diffusional model for sorption isotherms. In: International Symposium, Glasgow, 1974. Proceedings of an: London, Academic, 1991, p.139-54.

GALLALI, Y.M.; ABUJNAH, Y.S.; BANNANI, F.K. Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III;

- chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions). *Renewable Energy*, v.19, p.203-212, 2000.
- GELDART, D. "Type of the Gas Fluidization". *Powder technology*, v. 7, p. 285-92, 1973.
- GOLTSIKER, A.D., Doctoral dissertation, Leningrad Technol. Inst., Leningrad, 1967. Quoted by Romankov and Rashkovskaya [201, Chapter 1]
- GOUVEIA, J.P.G. de.; Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo. Campinas, SP. Faculdade de Eng. de Alimentos da UNICAMP, 1999 – Tese.
- GRACE, J.R. Fluidized bed hydrodynamics, dans *Handbook of multiphase systems*. Éditeur chef gad Hetsroni McGraw-Hill Book Company. Citado por SOARES, O. da S. Comportamento fluidodinâmico em leito de jorro constituído por mistura de partículas, Dissertação de mestrado, UFPB, Campina Grande, 1996. 87p.
- GUPTA, S. K.; BERRUTI, F. Evaluation of the gas-solid suspension density in CFB risers with exit effects. *Powder Technology*, 108, 21-31. 2000.
- HATAMIPOUR, M.S. e MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Science*, v.55, p. 247-252, 2002.
- HAWALADER, 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.
- HENDERSON, J.M., HENDERSON, S.M. A Computacional procedure for deepbed drying analysis. *Journal Engineering Research*. V.13,p.87-95,1968.
- HUBINGER M., MENEGALLI F.C., AGUERRE, J., SUAREZ,C. Water Vapor adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. *Journal of Food Science*, v.57, n.6, p.405-407, 1992.
- HUFENUSSLER, M.; KACHAN, C.C. . Secagem de purê de banana com um secador de leito com jorro. *Anais do XXI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos*, v.2, p. 340-354, São Paulo, 1993
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz – Métodos químicos e físicos para análises de alimentos. V.1, 316p., São Paulo, 1976.
- KACHAN, G.C.; CHIAPPETTA, E. . Desidratação da pasta de tomate em um secador de leito de jorro. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, v.2, p. 510-523, São Paulo, 1988
- KAMINSKI, W. ZBICINSKI, I., GRABOWSKI, S. A; STRUMILLO, C. Multiobjective optimization of drying process, *Drying Technology*, v.7, n.1, p.1-16, 1989.
- KILPATRICK, P. W., LOWE, E. e ARSDEL, W. B. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Advances in Food research*, New York, Academic Press, v.6, 360p. 1955

KIRANOUDIS, C.T., TSAMI; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits. *Drying Technology*, v.15, n.5, p. 1399-1418. 2000

KOZANOGLU, B.U., CHANES, J.W., CUAUTLE, D.G; JEAN, J.P.S. Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study. *Powder Technology*, v.125, p.55-60, 2002.

KROKIDA, M.K.; KARATHANOS, V.T.; MAROULIS, Z.B., Effect of osmotic dehydration on viscoelastic properties of apple and banana, *Drying Technology*, v. 18, n.4, p. 951-966, 2000

KROSS, R. K., MATA, M. E. R. M. C e DUARTE, M. E. M. "Shrinkage effect during drying of fresh pretreated tomatoes". *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. v. 4, n.2., p. 187-194. 2002.

LABUZA, T.P.. "Sorption phenomena in foods". *Food Technology*, n.22(3). P. 263-272, 1988. Citado por Prado, M.E.T. et al. "Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos". *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, v.19, n.1. Campinas, 1999.

LACERDA FILHO, A.F..Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café. Viçosa, UFV, 136p. Dissertação de Mestrado. 1986.

LEVENSPIEL, O., KUNII, D. *Fluidization Engineering*. Wiley, New York. 1977.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solids materials. *Industrial Engineering Chemical*, v.13, p.427, 1921.

LIMA, C. A. P. . Secagem de Polpa de Umbu em Leito de Jorro: Estudo do Desempenho de um Jorro Convencional. Msc. Thesis, 1993, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

LOZANO, J.E. ROTSTEIN, E. and URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *J. Food Sci.* **48** (1983), pp. 1497-1502. 1983.

LUCAS, A., ARNALDOS, J., CASAL, J.; PUIGYANER, L(1986). High temperature incipient fluidization in mono and polydisperse systems. Citado por MURACHMAN, B. *Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les Lit Fluidisés par les Gaz*. Dissertação de Doutorado.. Toulouse: I.N.P., 1990.

LUIKOV, A. V., *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*. London, Pergamom Press, 1966, 380p.

MALEK, M. A. E LU, B. C. Y., Pressure drop and spouted bed heigth in spouted bed, *Ind. Eng. Process Des. Devel.* v.4, p. 123 -8.,1965.

MALEK, M.A., LU, B.C.Y.(1964). Pressure drop Spoutable bed and Height in Spouted beds. Citados por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N.. *Spouted Beds*. New York, Academic Press, 1974.

MARTIN, H. Heat and mass transfer in fluidized beds. *International Chemical Engineering*. Vol. 22, p. 30-33, 1982.

MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N.. *Spouted Beds*. New York, Academic Press, 1955.

MATHUR, K.B., GHISLER, P.E.(1955). A Technique of Contacting Gases with Coarse Solid Particles. Citados por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N.. *Spouted Beds*. New York, Academic Press, 1974.

MAYTA, S.M.A., MASSARANI, G., PINTO, J.C. Modeling of grain drying in continous cross-flow sliding bed dryers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 74, p. 797-805, 1996.

MEDEIROS, M.F. D.Influência da Composição Química dos Materiais no Desempenho do Processo de Secagem de Polpas de Frutas em Leito de Jorro.Tese.Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2001.

MEDEIROS, M.F.D.; DE SOUSA, E. B. D.; DE SOUZA, J.S.; JERÔNIMO, C.E. de M. Determinação de propriedades físicas e termodinâmicas de polpas de frutas tropicais: Influência da composição química. In: XL Congresso Brasileiro de Química.p.213-214, 2000.

MIRANDA M.S., D.R., MOTA, E.M., OLIVEIRA, N.S., SANTOS, M.C.M. SCHETTINI e SALES, M. Avaliação do teor de vitamina C e rotulagem de polpas de frutas comercializadas em Salvador – BA. . XIX CBCTA, Recife, 2004.

MIRSA, R. N. E YOUNG, J. H. Numerical solution of simulateous diffusion and shrinkage during soybean drying. *Transactions of the Americam Society of Agricultural Engineers.*, v.23, n.5, p.1277-1282, 1980.

MOHSENIN, N.N. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York: Gordon and Breach science publishers Inc.,407p.1980.

MOREIRA, S. A. “Processamento da Polpa de Umbu em Leito de Jorro – estudo da Temperatura de Secagem”. Relatório de Iniciação Científica, UFPB. Campina Grande, 1996.

MORGAN,N.H. e LITTMAN, H.; “Predicting the Maximum Spouted Height in Spouted beds of Irregularly Shaped Particles”. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* , vol.21, pp.23-6,1982.

MUJUNDAR, A. S.; *Spouted Beds: Principles and Recent Developments*. Anais do XVII ENEMP, vol.1, pp.03-13, São Carlos, 1989.

MURACHMAN, B. *Hydrodinamique et Transferts Thermiques dans lês Lit Fluidisés par les Gaz*. Dissertação de Doutorado.. Toulouse: I.N.P., 1990.

NIP, W.K. “Development and storage stability of drum-dried guava and papaya-taro flakes. *Journal of Food Science*, v.44, n.1, p.222-225; 1979.

OLIVEIRA, C. A., Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”.

Campinas. Faculdade de Eng. Química, Universidade Estadual de Campinas, 144p. Dissertação de Mestrado. 1999.

OVERHULTZ, D.G., WHITE, G.M., HAMILTON, H.E., ROSS, J.J. Drying Soybean with Heated Air, Transactions of the ASAE, v.16, n.1, p.112-113,1973.

PAGE, C. factores influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer. West Lafayette, Department of the Agricultural Engineering. Procedure University, 1949.

PANAGIOTOU, N.M.; KARATHANOS, V.T.; MAROULIS, Z.B., Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits, Drying Technology, Volume 17, Issue 1-2, January - February 1999, Pages 175-189.

PARK, K. J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem. Campinas: Departamento de Eng. De Alimentos da Faculdade de Eng. De Alimentos. 54p. Tese de Livre Docência em Fenômenos de Transporte. 1987

PASSOS, M. L., MUJUNDAR, A.S. e RAGHAVAN, V.G.S. Spouted and spout-fluidized beds for grain drying, Drying Technology, v.7, n.4, p. 663-696, 1989.

PINTO, L. A. A., FELIPE, C. A. S. e WENDT, R. "Análise do encolhimento na secagem de alimentos fibrosos". In: II Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Pp. 147-150. Uberlândia, 1997.

RAIMUNDO, E., KRÜGER, R. L., CICHOSKI, A. J. E DI LUCCIO, M. Bactérias lácticas e vitamina C em suco de laranja exposto a luz. XIX CBCTA, Recife, setembro 2004.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. , Journal of Food Engineering, Volume 23, Issue 1, 1994, Pages 91-105.

RAO, M., RIZVI, S.S.H. Engineering properties of foods. Nova Iorque, Marcel Dekker, 398p, 1986.

RESENDE, E. D. & KIECKBUSCH, T. G. Conservação de Fatias de Manga por Combinação de Métodos: Pré-Secagem e Congelamento. Anais do XXI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, 2º Volume, pp. 545-554, Ouro Preto - MG, Brasil. 1993.

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

RICHARDSON, A. S.; JENSON, W. M. P. Energy research and development, Adm. Aerojet Nucl., Comp. Report, n. E (10-1)-1375, 1976 apud STRUMILLHO, C. KUDRA, T. Drying: principles, applications and desing. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 448p. 1986

RICHARDSON, J. F. (1971). Incipient fluidization and particles system. Citado por MURACHMAN, B. "Hydrodinamique et Transferts Thermiques dans lês Lit Fluidisés par les Gaz". Dissertação de Doutorado.. Toulouse: I.N.P., 1990.

ROA, G.; ROSSI, S.J.. "Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio mediante a medição de umidade relativa de equilíbrio." Revista Brasileira de armazenamento, v.2, n.2, p. 17-22, 1977. Citado por Prado, M.E.T. et al. "Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos". Ciência e Tecnologia dos Alimentos, v.19, n.1. Campinas, 1999.

RODRIGUES, R. M., REGES, C. M., REGES, I. S. E SILVA, V. P. Influência da desidratação osmótica como tratamento preliminar no tempo de secagem de abacaxi (*Amanás Comosus L. Merrill*) variedade pérola. XIX CBCTA, Recife, setembro 2004.

ROMERO-PEÑA, L.M. Estudo de pré-tratamento para obtenção de tomate desidratado em fatias. Campinas. Faculdade de Eng. Química, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 1999.

SAXENA, S.C.; VOGEL, G.J. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure. Citado por ALMEIDA, M.M. Dissertação de Mestrado, UFPB, 1993, 104P.

SHERWOOD, T. D. The drying of solids I. Industrial and Engineering Chemistry, v.21, n.1, p.12-16, jan. 1929a.

SHERWOOD, T. D. The drying of solids II. Industrial and Engineering Chemistry, v.22, n.10, p.976-980, oct. 1929a.

SILVA, G. F., RIBEIRO, V. S. e ALMEIDA, M. M. Propriedades físicas de produtos agrícolas. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. V.4, n.1., p. 1-6. 2002.

SILVA, O. S. da. Comportamento fluidodinâmico em leito de jorro constituído por mistura de partículas. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1996.

SMITH, J.W.; REDDY, K.V.S. Spouting of mixed particle size beds. Journal Chemical Engineering, v.42, p.206, 1964.

SNIEDERS, F. F., HOFFMANN, A. C., CHEESMAN. D., YATES, J. G., STEIN, M. e SEVILLE, J.P.K. The dynamics of large particles in a four-compartment interconnected. Powder Technology, 101, 229-239, 1999.

SOUSA, L. H. C. D.; PEREIRA, N. C. Determinação da condutividade térmica efetiva da gelatina em função da umidade em um processo de secagem industrial. XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados.v.1, p.369-374,1996.

SOUZA, D. O. C., RAMOS, A. M. E PEREIRA, J. A. M. Curva de secagem de manga (*Mangifera indica L.*) variedade Tommy Atkins. XIX CBCTA, Recife, setembro 2004.

STRUMILLO, C. KUDRA, T. Drying: principles, applications and desing. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 280p.

SUAREZ, C. E VIOLLAZ, P. E. Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs. Journal of Food Engineering. V.13, n.2, p. 103-114, 1991.

SUZUKI, K., KUBOTA, K., HASEGAVA, T. E HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, v.41, p.1189-1194, 1976.

TAQUEDA, M. E. S., COSTA, C. M. L. E FARIA, L. J. G. Planejamento e análise estatística de experimentos aplicados ao beneficiamento de produtos naturais. In: FARIA, L. J. G. e COSTA, C. M. L. Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais. Belém: UFPA/NUMA/POEMA, p.205-219, 1998.

TELIS, V. R. N. ; GABAS, A. L. ; MENEGALLI, F. C. ; TELIS-ROMERO, J. T. Water Sorption Thermodynamic Properties Applied to Persimmon Skin and Pulp. *Thermochimica Acta*, Grão-Bretanha, v. 343, p. 49-56, 2000.

TORREGLIANNI, D.; BERTOLO, G. High-quality fruit and vegetable products using combined processes. In: FITO, P. et al. (Ed.). *Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation – Application in Food Industries*. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 2001. p. 3-9.

TSAMI, E.; KATSIOTI, M., Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration, *Drying Technology*, Volume 18, Issue 7, August 2000, Pages 1559-1581.

VAGENAS, G. K. e MARINOUS-KOURIS. Finite element simulation of drying of agricultural products with volumetric changes. *Appl. Math. Modeling*, v.15, n.9, p.475-482, 1991.

VAZQUEZ, G.; CHENLO, F.; MOREIRA, R.; COSTOYAS, A., Effects of various treatments on the drying kinetics of Muscatel grapes, *Drying Technology*, v.18, n.9, p.2131-2144. 1999.

WEN, C. H. e YU, Y. H., "Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity". *AIChE Journal*, vol. 12, pp. 610, 1966.

WIRSUM, M., FETT, F., IWANOWA, N. e LUKJANOW, G. Particle mixing in bubbling fluidized beds of binary particle systems. *Powder Technology*, 120, 63-69. 2001.

ZENZ, F. A., "Particulate Solids. The Third Fluid Phase in Chemical Engineering". *Chem. Eng.*, 90 (24): 61-7, 1983.

ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B. E MARINOUS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.

APÊNDICE A

Apêndice A1. Resultados do estudo de transferência de massa na secagem de pedaços cúbicos de goiaba em leito de jorro.

Ensaio	H _i (m)	U _{i b.s.}	V _{ar} (m/s)	Coef. de transf. de massa, K _p (m/s)	B _{im}
1	0,09	0,6	2,8	3,189	6782,95
2	0,12	0,6	2,8	5,901	16157,50
3	0,09	1,5	2,8	18,455	28173,32
4	0,12	1,5	2,8	17,946	15209,67
5	0,09	0,6	3,5	6,771	15054,90
6	0,12	0,6	3,5	4,401	11071,69
7	0,09	1,5	3,5	27,604	39037,34
8	0,12	1,5	3,5	12,239	21808,58
9	0,105	1,05	3,2	12,043	42248,41
10	0,105	1,05	3,2	7,690	17597,48

$$D_{AB} = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K_{AR} = 2,872 \cdot 10^{-5} \text{ kJ/m.s.K}$$