



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CAJÁ  
USANDO PLANEJAMENTO FATORIAL COMPOSTO  
CENTRAL.**

Andréia Souto da Silva

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Edson Leandro de Oliveira  
Co-Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Everaldo Silvino dos Santos

Natal/RN  
Fevereiro/2008.

**Andréia Souto da Silva**

AVALIAÇÃO DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CAJÁ  
USANDO PLANEJAMENTO FATORIAL COMPOSTO  
CENTRAL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Everaldo Silvino dos Santos

Natal/RN  
Fevereiro/2008.

Divisão de Serviços Técnicos  
Catalogação da Publicação na Fonte.  
UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

**Silva, Andréia Souto.**

Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central / Andréia Souto da Silva. – Natal, RN, 2008.  
70 f.

Orientador: Edson Leandro de Oliveira.

Co-orientador: Everaldo Silvino dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Conservação por secagem – Cajá – Dissertação. 2. Cajá (*Spondias mombin*) – Dissertação. 3. Secador convectivo com leito fixo – Dissertação. 4. Bagaço de fruta – Dissertação. 5. Planejamento fatorial composto central – Dissertação. I. Oliveira, Edson Leandro de. II. Santos, Everaldo Silvino dos. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 664.8.047(043.3)

Silva, Andréia Souto – Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central. Dissertação de mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Área de concentração. Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologia Regional, Natal/RN Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Everaldo Silvino dos Santos

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem do bagaço de cajá (matéria prima proveniente da indústria de processamento de polpa de frutas), em um secador convectivo de bandejas com leito fixo, em que se determinou o coeficiente de difusividade efetiva através do modelo difusional de Fick. Foi utilizado um planejamento fatorial composto central no qual foram avaliados os seguintes fatores: temperatura do ar de entrada no secador (55; 65 e 75°C); velocidade do ar de entrada (3,2; 4,6 e 6,0 m/s) e espessura da torta na bandeja (0,8; 1,2 e 1,6 cm). Os resultados mostraram que o modelo difusional de Fick descreve bem o processo de secagem e que a melhor condição foi com a temperatura de 75°C, velocidade do ar de secagem de 6,0 m/s e espessura da torta de 0,8 cm onde a difusividade efetiva calculada foi de  $6,772 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  no tempo de 220 minutos. A análise do planejamento mostrou que todos os fatores e suas interações foram significativos, com nível de confiança de 95%.

PALAVRAS CHAVES: Cajá (*Spondias mombin L.*), secagem, secador convectivo com leito fixo, bagaço de fruta, planejamento fatorial composto central.

BANCAEXAMINADORA E DATA DA DEFESA: 28 de fevereiro de 2008.

Presidente: Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira (UFRN)

Membros: Prof. Dr. Everaldo Silvino dos Santos (UFRN)

Profa. Dra. Margarida Maria dos Anjos Magalhães (UFRN)

Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina (UFCG)

## ABSTRACT

This work deals with the kinetics assay of Cajá (*Spondias mombin L.*) bagasse drying by an experimental design using a tray dryer. In order to add-value to this product a kinetic study has been carried out. A central composite experimental design has been carried out to evaluate the influence of the operational variables: input air temperature (55; 65 e 75°C); the drying air velocity (3.2; 4.6 e 6.0 m/s) and the fixed bed thickness (0.8; 1.2 e 1.6 cm) and as response variable the the moisture content (dry basis). The results showed that the diffusional Fick model fitted quite well the experimental data. The best condition found has been input air temperature of 75°C, drying air velocity of 6.0 m/s as well as fixed bed thickness of 0.8 cm. The experimental design assay showed that the main effects as well as the second ones were significant at 95% confidence level. The best operational condition according to statistical planning was 75 °C input air temperature, 6.0 m.s<sup>-1</sup> drying air velocity and 0.8 cm fixed bed thickness. In this case, the equilibrium moisture content (1.3% dry basis) occurred at 220 minutes.

---

KEYWORDS: Drying, tray drier, Cajá (*Spondias mombin L.*), bagasse of fruit, central composite experimental design.

---

## Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade que me deu de cursar o mestrado, por me dar forças, coragem e estímulo para nunca desistir de meus objetivos.

Aos meus pais e minhas irmãs, por compreenderem minha ausência, meu mau humor, meus problemas e, mesmo com tudo isso, apoiaram-me em todos os momentos. Quero dizer o quanto eu amo a minha família, em especial a minha mãe que sempre fez de tudo para que eu conseguisse almejar tudo o que pretendia e pretendo.

Ao Professor Edson Leandro de Oliveira (Orientador), por aceitar me orientar e acreditar em minha proposta de trabalho, obrigado pela confiança, apoio e paciência. Com você aprendi a nunca desistir, a ter coragem de enfrentar os desafios. Admiro seu profissionalismo, sua amizade, seu interesse e comprometimento em ensinar bem. Você é insubstituível e estará sempre em meu coração. Eu te adoro de montão.

Ao Professor Everaldo Silvino dos Santos (Co-orientador), pelo incentivo, pela ajuda, pela nossa amizade e por acreditar no meu trabalho. Você é demais!

A indústria “Delícia da Fruta” por fornecer a matéria prima para o trabalho e pela atenção dispensada em nossos contatos.

A CAPES pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

A Roberta V. A. Chaves (Uma grande amiga), que é um ser humano incrível. Sua amizade e sinceridade é um grande mérito que conquistei. Ela ajudou-me a dar continuidade ao meu trabalho, confiando e apoiando nos momentos difíceis do curso e da vida, dispondo-se sempre a ajudar. Ela ficará sempre em meu coração.

A Bia, Jeany e Luziany (Minhas queridas bolsistas e amigas), sem as quais não haveria graça nas práticas experimentais. Obrigado pelos momentos vividos. Vocês são especiais e sensacionais. Contem comigo sempre.

Ao meu amor Dr. Carlos César (My Baby), por ter me mostrado que a vida é maravilhosa, que mesmo nos momentos mais difíceis ainda há uma esperança de que tudo pode mudar.

A minha bonequinha Anna Carolinne (Minha filha), mesmo sem entender as coisas da vida, me apoiou e deu forças para lutar pelos meus objetivos. Obrigada minha gatona!

A todos os funcionários, amigos e professores do PPGEQ, pelo apoio e paciência. Com eles aprendi a ser uma profissional polivalente que estuda, aplica qualidade e se interessa por tudo. Enfim, a ser uma profissional completa. Obrigada por tudo!

# Sumário

Folha de Rosto	ii
Resumo	iv
Abstract	v
Agradecimentos	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1 – Introdução geral</b>	<b>02</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>2 – Objetivos</b>	<b>05</b>
2.1 – Geral	05
2.2 – Específicos	05
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>3 - Aspectos teóricos</b>	<b>07</b>
3.1 – Frutas	07
3.2 - Cultura do cajá ( <i>Spodias mobin</i> )	09
3.2.1 - Utilização atual e potencial	11
3.2.2 – Caracterização	11
3.2.3 - Outras características	13
3.3 - Planejamento experimental	13
3.3.1 - Planejamento fatorial	14
3.3.2 - Algumas definições	14

3.3.3 - Realização de experimentos e estimativa do erro experimental	15
3.3.4 - Cálculo dos efeitos principais e de interações	15
3.3.5 - Cálculo do desvio padrão para os efeitos	16
3.3.6 - Planejamento fatorial composto central	16
3.3.7 - Passos para um planejamento fatorial composto central	17
3.3.8 - Interpretação geométrica dos efeitos	17
3.3.9 - Método dos mínimos quadrados (MMQ)	18
3.3.10 - Análise dos resíduos	19
3.3.11 - Teste de significância de ajuste	19
3.3.12 - Análise de superfície de resposta usando planejamento composto central	21
3.3.13 - A metodologia da superfície de resposta (MSR)	21
3.3.14 - Usos da MSR	22
3.3.15 – Otimização	25
3.3.15.1 - Planejamento composto central – CCD	26
3.3.15.2 - Planejamento Box - Behnken 3k - 3 níveis – BBD	26
3.4 – Secagem	26
3.4.1 - Comportamento da secagem	29
3.4.2 - Período de velocidade constante	30
3.4.3 - Considerações sobre umidade crítica	31
3.4.4 - Períodos de velocidade decrescente	32
3.4.5 - Modelo difusional	33
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>4 - Estado da arte</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>5 - Materiais e métodos</b>	<b>43</b>
5.1 - Matéria-prima	43
5.2 - Planejamento fatorial	45
5.3 – Secagem	45



5.3.1 - Equipamento de secagem	46
5.3.2 - Operação do equipamento	47
5.4 - Métodos analíticos	48
5.4.1 - Análises físico-químicas	48
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>6 - Resultados e discussões</b>	<b>50</b>
6.1 - Caracterização físico-química	50
6.2 - Secagem do bagaço de cajá	50
6.3 - Análises dos ensaios de secagem através do planejamento experimental	54
6.3.1 - Análise dos efeitos	55
<b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>7 – Conclusões</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTULO 8</b>	
<b>8 - Referências bibliográficas</b>	<b>65</b>

## Lista de figuras

Figura 01	Frutas tropicais.	08
Figura 02	Estádios do cajá.	10
Figura 03	Imagem do cajá.	13
Figura 04	Sistema representando uma função ligando os fatores as respostas.	14
Figura 05	Interpretação geométrica dos efeitos em um planejamento $2^2$ .	18
Figura 06	Curva em 2D plotada como resposta de um único fator.	23
Figura 07	Gráfico de contorno e superfície de resposta.	24
Figura 08	Representação de um experimento composto central com dois fatores.	24
Figura 09	Representação da transferência de calor e umidade do material.	27
Figura 10	Teor de umidade versus tempo de secagem.	28
Figura 11	Velocidade de secagem versus teor de umidade.	28
Figura 12	Esquema do teor de umidade crítico	32
Figura 13	Curvas a e b características de sólidos porosos com elevada superfície específica de evaporação.	32
Figura 14	Fluxograma do processamento da polpa de fruta.	43
Figura 15	Fluxograma básico do procedimento utilizado na secagem do bagaço de cajá.	44
Figura 16	Bagaço de cajá <i>in-natura</i> em processo de descongelamento.	44
Figura 17	Esquema do sistema de secagem – secador convectivo de bandejas.	47
Figura 18	Esquema de distribuição das resistências na fonte externa do secador.	47
Figura 19	Cinética de secagem do bagaço de cajá para duas espessuras e duas velocidades do ar de secagem a uma temperatura de 55 °C.	51
Figura 20	Cinética de secagem do bagaço de cajá para duas espessuras e duas velocidades do ar de secagem a uma temperatura de 75 °C.	51
Figura 21	Razão de umidade em função do tempo com espessura variável.	52
Figura 22	Razão de umidade em função do tempo com espessura variável.	52
Figura 23	$\ln U^*$ em função do tempo de secagem (espessura de 0,8 cm, velocidade de 3,2 m/s e temperatura de 55 °C (a) e 75°C (b)).	53
Figura 24	Diagrama de pareto do planejamento composto central mostrando a influência dos fatores estudados.	56
Figura 25	Valores observados versus valores preditos para a umidade em base seca do processo de secagem do bagaço de cajá.	58

Figura 26	Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da temperatura (T) e velocidade (v) para o bagaço de cajá no ponto central - espessura.	59
Figura 27	Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da espessura (E) e temperatura (T) para o bagaço de cajá no ponto central - velocidade.	60
Figura 28	Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da espessura (E) e velocidade (v) para o bagaço de cajá no ponto central - temperatura.	61

## Lista de tabelas

Tabela 01	Caracterização da porção comestível do cajá em dois estágios de maturação.	12
Tabela 02	Propriedades nutritivas do cajá.	13
Tabela 03	Tabela de análise de variância (ANOVA).	20
Tabela 04	Níveis para os fatores e seus valores codificados para a secagem do bagaço de cajá.	45
Tabela 05	Condições de operação dos experimentos.	46
Tabela 06	Resultados de análises físico-químicas para o bagaço de cajá <i>in-natura</i> .	50
Tabela 07	Resultados obtidos do modelo difusional da cinética de secagem do bagaço de cajá para o período de velocidade decrescente.	54
Tabela 08	Planejamento composto central com matriz das variáveis independentes codificadas e reais e variáveis resposta para os ensaios de secagem.	55
Tabela 09	Efeitos estimados no planejamento composto central.	56
Tabela 10	Resultados da análise de regressão para temperatura, velocidade e espessura.	57

# Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$a_w$	Atividade de água	-
$A_s$	Área superficial	$m^2$
$A$	Coefficiente angular	-
$B$	Coefficiente linear	-
$Def$	Difusão efetiva	$m^2/s$
$dm/dt$	Velocidade de secagem	$Kg/s$
$dQ/dt$	Velocidade de transferência de calor	$J/s$
$dU/dt$	Velocidade de secagem	$Kg/m^2s$
$E$	Espessura da bandeja	$cm$
$F$	Teste F	-
$F_0$	Métrica baseada na distribuição de Fisher	-
$h$	Coefficiente de transferência convectivo de calor	$W/m^2°C$
$K$	Constante de secagem	$Kg/sm^2atm$
$L$	Espessura da camada	$M$
$MS_E$	Quadrado médio do erro	-
$MS_R$	Quadrado médio do modelo	-
$SQ_R$	Soma de quadrado do modelo	-
$SQ_E$	Soma de quadrado do erro	-
$SQ_T$	Soma de quadrado total	-
$t$	Tempo de secagem	$s$
$T_G$	Temperatura do gás	$°C$
$T$	Temperatura	$°C$
$T_S$	Temperatura na superfície do material	$°C$
$T_{bu}$	Temperatura de bulbo úmido	$°C$
$U_0$	Umidade inicial do sólido	$kg\ de\ H_2O/kg\ de\ sólido$
$U_F$	Umidade final do sólido	$kg\ de\ H_2O/kg\ de\ sólido$
$U_C$	Umidade crítica	$kg\ de\ H_2O/kg\ de\ sólido$
$U_e$	Umidade de equilíbrio	$kg\ de\ H_2O/kg\ de\ sólido$
$U$	Umidade do sólido	$kg\ de\ H_2O/kg\ de\ sólido\ seco$
$U^*$	Razão de umidade	-

$U_{bs}$	Umidade em base seca	Kg de H <sub>2</sub> O/kg de sólido seco
$v$	Velocidade superficial média do gás	m/s
$\delta$	Espessura da bandeja	cm
$\alpha$	Nível de significância	-
$\lambda$	Calor latente de vaporização	J/kg

---

# Capítulo 1

## Introdução geral

---

# 1. Introdução geral

O Brasil, além de possuir uma grande área territorial, é um país que reúne condições climáticas favoráveis para agricultura. Em estação de alta produção de frutas, o consumo *in natura*, embora seja elevado devido à redução de preço durante a safra, não é suficiente para evitar o desperdício acarretado pelo excedente da alta produção.

O Nordeste Brasileiro, por ser uma região tropical e com clima favorável, tem-se destacado na produção de frutas como o abacaxi, a banana, a manga, o caju e o mamão. O melão e a uva, devido ao potencial de qualidade, são as frutas de maior destaque na exportação para o mercado externo tanto para o consumo “*in natura*” quanto na produção de vinho, no caso da uva.

Nesse contexto, pode-se destacar o Rio Grande do Norte que possui uma das áreas de maior dinamismo no campo da agricultura, especificamente na produção de frutas tropicais irrigadas, que já havia se consolidado como uma zona de intensa modernização tecnológica na década de 1980.

Partes dessas frutas além de perecíveis são sazonais e daí a necessidade de se buscar alternativas técnicas e econômicas para o aproveitamento do excedente da produção, possibilitando o seu consumo e exportação durante todo o ano.

O aumento da produção, no entanto, gera uma maior preocupação em relação aos impactos ambientais provocados nos ecossistemas naturais. Os problemas relacionados com a geração de resíduos sólidos, e sua implicação na saúde, meio ambiente e qualidade de vida, têm se agravado nas últimas décadas principalmente pela falta de políticas institucionais para o setor.

A implementação de um sistema para reciclagem do resíduo sólido gerado pela indústria de processamento de frutas mostra-se pertinente, pois agrega valor econômico ao bagaço das frutas, além de reduzir os problemas ambientais decorrentes desta atividade industrial. Desta forma, o processamento de tal resíduo configura-se como uma forma dinâmica de destinação deste material, promovendo a geração de empregos e renda para a população do estado.

Certamente, o Estado do Rio Grande do Norte se beneficiará no sentido de achar novas soluções para o excedente da produção de frutas como o cajá, a banana o mamão e outras. Uma das alternativas é a secagem do bagaço de frutas.

Na prática, a secagem de um material alimentício consiste na remoção de parte de sua



água livre de superfície, que possa ser manuseado, transportado e armazenado à temperatura ambiente sem perdas significativas e que não comprometam suas qualidades organolépticas e nutricionais. A utilização da secagem em produtos alimentícios é uma prática bastante utilizada nos dias atuais.

Dentro dos diferentes sistemas de secagem de produtos alimentícios, a secagem solar tradicional é, ainda hoje, o procedimento mais utilizado no mundo, principalmente quando se trata de grãos e sementes. A secagem solar tradicional é realizada quando, mesmo após a maturação fisiológica, o produto fica exposto ao ar e ao sol. No entanto, através de pesquisas desenvolvidas em diversos centros, existem uma grande variedade de secadores, tanto com uso de energia solar, quanto com o uso de energia elétrica e/ou a energia proveniente da combustão de lenha e de derivados de petróleo.

No processo de secagem por evaporação de um sólido ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: há transferência de calor para evaporar o líquido e transferência de massa na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido para a superfície. Os fatores que governam estes processos determinam a velocidade de secagem e o movimento no interior do sólido sendo consequência do gradiente de concentração que depende das características do material.

O objetivo da secagem do bagaço de cajá *in natura* é o seu reaproveitamento em iogurtes, sorvetes, geléias, massas, etc.

O sistema de secagem a ser usado, para este trabalho, será um secador convectivo de bandejas com controle de temperatura e velocidade do ar de secagem.

---

# Capítulo 2

## Objetivos

---

## 2. Objetivos

### 2.1 - Objetivo Geral

Estudar da secagem de bagaço de cajá em secador convectivo de bandejas com leito fixo.

### 2.2 - Objetivos Específicos

- Caracterizar físico-quimicamente o bagaço de cajá *in natura*;
- Utilizar o planejamento fatorial,  $2^3$  com composto central;
- Estudar o comportamento cinético do bagaço de cajá, analisar os parâmetros de secagem, modelagem, determinar as constantes de secagem e os coeficientes de difusividade.

---

# Capítulo 3

## Aspectos teóricos

---

## 3. Aspectos teóricos

### 3.1. Frutas

O Brasil reúne excelentes condições para se tornar um dos maiores pólos produtivos de frutas tropicais para o mercado mundial. Seu clima permite a produção de uma grande variedade de frutas tropicais e algumas delas proporcionam mais de uma safra por ano.

Segundo Figueira (2000) para que essa perspectiva se realize é necessário que o complexo brasileiro supere uma série de dificuldades que incluem:

- A falta de uma política de defesa fitossanitária em âmbito nacional.
- A carência de infra-estrutura organizada para as frutas, abrangendo transporte e armazéns frigoríficos, critério e crédito para comercialização e armazenagem.
- O sistema tributário da produção, notadamente no que se refere a ICMS para movimentação entre estados brasileiros, só para citar alguns problemas.

Embora o Brasil venha aumentando suas exportações de frutas frescas, é ainda um país marginal no comércio mundial, mesmo sendo o segundo maior produtor de frutas no mundo. A participação da exportação não ultrapassa 3%, mas a fruticultura nacional apresenta todas as condições para reverter o quadro, inclusive no aumento do consumo de frutas no mercado interno. De acordo com o Instituto Brasileiro de Fruticultura (Ibrafr), o consumo per capita de frutas no Brasil é de apenas 57 Kg por ano, bem abaixo de países como Itália (114 Kg/ano) ou Espanha (120 Kg/ano), FIGUEIRA (2000).

De acordo com a Organização Internacional para a Luta Biológica (OILB) a produção econômica de frutas de alta qualidade deve priorizar “o uso de métodos ecologicamente mais seguros, minimizando o uso de agroquímicos e seus efeitos colaterais indesejados, pondo ênfase na proteção do ambiente e na saúde humana”, FIGUEIRA (2000).

De forma geral, Carthout *et al* (1992) mostra que os sistemas de produção de frutas no Brasil desenvolveram-se a partir de uma lógica produtivista com o uso intensivo de insumos químicos. Diante do novo cenário mercadológico e visando, sobretudo, à manutenção da sua capacidade competitiva, em 1997, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) de Uva e Vinhos, localizada em Bento Gonçalves, no Rio Grande do Sul, desencadeou um processo para aprimorar todos os segmentos que compõe a cadeia produtiva da maçã. Esta iniciativa resultou no lançamento da primeira versão das Normas de Produção Integrada de Frutas. Na seqüência, foram estabelecidos pomares comerciais com o objetivo de avaliar a

viabilidade técnica e econômica de Sistemas de Produção Integrada de Maçã, consolidando um projeto pioneiro de produção integrada de frutas no Brasil.



Figura 01- Frutas tropicais.

Carthout *et al* (1992) mostra que como conseqüência do bom desempenho técnico obtido pelo programa de produção integrada de maçã e da pressão do mercado externo, outras cadeias sentiram-se estimuladas e começaram a se organizar para a implantação da produção integrada que privilegia a sustentabilidade ambiental e a segurança alimentar, pré-requisitos para se realizar a conversão de propriedades em sistema convencional para sistemas agroecológicos de produção. Com o apoio do Ministério da Agricultura e do Abastecimento as cadeias produtivas de pêssigo, uva, manga, citros, mamão e banana, Figura 01, começaram a ser avaliadas, aprimoradas e expandidas a partir dos seus tradicionais pólos produtivos, preparando essas cadeias para um segundo salto qualitativo: o desenvolvimento dos sistemas de pós-colheita, certificação de origem e rastreabilidade da produção. Buscando adequar a oferta aos novos padrões de qualidade e sanidade dos mercados externo e interno, as redes varejistas foram as primeiras a darem o segundo salto qualitativo no aprimoramento das cadeias produtivas de frutas que foi o estabelecimento de procedimentos padronizados de pós-colheita e a implantação de sistemas de certificação de origem e de rastreabilidade da produção.

No final da década de 90, começou a ser desenvolvido um programa próprio para controlar a aplicação de agrotóxicos, padronizar as frutas e inspecionar a fase de pós-colheita, a fim de minimizar danos mecânicos nos produtos. O “Selo de Qualidade” da rede de supermercados “Carrefour” é um exemplo. Entre os 30 países onde o Carrefour atua, a filial do Brasil é a que mais se empenhou nesse programa. Já existem 33 produtos com o

selo. No setor de FLV (frutas, legumes e verduras) já existem fornecedores GO (garantia de origem) para maçã, limão, manga, uva, alho, batata, banana, cenoura, abacaxi, laranja e mamão papaia. As exigências vão da sanidade do produto (rastreadibilidade e eliminação dos ingredientes polêmicos), sabor (frescor, maturação), aspecto visual (prazer), proteção ao meio ambiente (respeito ao meio ambiente) até o social (funcionários registrados, treinados, sem menores, higienização).

Outro nicho dentro das cadeias produtivas de frutas, CARTHOUT *et al* (1992), consiste no negócio para os derivados processados, tais como frutas desidratadas a vácuo, sucos e polpas, frutas minimamente processadas e outros. Esses derivados têm boa aceitação e consumo crescente no mercado internacional. Com bom trabalho de divulgação no exterior o setor de sucos e polpas tropicais (excetuando o suco de laranja) poderá triplicar o volume exportado.

Por se tratar de uma atividade mais intensiva em mão-de-obra e com uma rentabilidade superior por hectares do que as culturas de grãos (como o arroz, feijão, milho, soja, entre outros) a produção integrada e a implantação de sistemas agroecológicos para frutas têm atraído uma quantidade crescente de agricultores familiares. Em um balcão de exposição no 39º Encontro de Comércio Exterior (Encomex), realizado em janeiro de 2002, em Recife, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento apresentou dados que comprovam a crescente presença da produção da agricultura familiar no quadro das exportações do país na área da fruticultura, cumprindo as metas do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf), do Avança Brasil. Os dados do ministério mostram que pequenos produtores de castanha de caju, melão e artesanato ganham espaço na pauta das exportações brasileiras. Em 2001, a agricultura familiar exportou US\$ 4,4 bilhões, ou seja, 32,54% das vendas do agronegócio. Em relação à soja e seus derivados, contribuiu, no ano passado, com US\$ 1,6 bilhão de um total de US\$ 5,2 bilhões, CARTHOUT *et al* (1992).

### **3.2. Cultura do cajá (*Spondias Mombin*)**

A cajazeira (*Spondias mombin* L.) é uma espécie frutífera da família Anacardiaceae, originária da região tropical do continente americano. Árvore de médio a grande porte, a cajazeira é uma espécie frutífera que tem como origem a América Tropical. Encontra-se amplamente disseminada em quase todos os quadrantes do Brasil. Na Amazônia é vulgarmente conhecida por Tapereba; em São Paulo, Minas Gerais, por cajazeira miúda ou cajá pequeno; nos estados do Sul, por cajá mirim. Na região sudeste da Bahia, a cajazeira é

encontrada como árvore produtora de frutos que servem como importante fonte de renda adicional para o produtor e também é usada para sombreamento permanente do cacaueteiro. Os frutos da cajazeira são muito apreciados pelo excelente sabor de sua polpa. Além disso, apresentam boas características agroindustriais como rendimento de polpa de 56 % em média e suas características químicas, SOUZA (1999).

Na maioria dos Estados do Nordeste é simplesmente conhecido por cajá. Ocorre espontaneamente em condições silvestre competindo com outras espécies vegetais, ou em quintais, sítios e, até mesmo, na proteção e sombreamento do cacaueteiro.

Em espanhol é conhecida como jobo ou ciruela amarilla; em inglês como hog-plum ou Mexican-plum, MURAYMA (1973).

Considerada de grande importância na recuperação da vegetação degradada, pela sua rusticidade, rapidez de crescimento e disseminação e atração para a fauna em geral. A polpa de cajá está entre as mais comercializadas na região.

Nas diversas regiões produtoras, os frutos são comercializados em feiras livres e beiras de estradas, juntamente com outras frutas regionais, entretanto, a maior parte da produção é vendida para agroindústrias regionais. Após o processamento, a polpa é comercializada congelada, em embalagens ou em tabuleiros.

O fruto do cajá, mostrado na Figura 2, é um produto recente no mercado nacional, e a atual produção, considerando a grande demanda, não atende as necessidades do mercado interno, ficando ainda muito restrito às regiões Norte e Nordeste, portanto, existe um amplo mercado interno e externo a ser explorado.



Figura 02 - Estádios do cajá.



### 3.2.1. Utilização atual e potencial

Segundo AJAO, SHONUKAN, FEMI-ONADEKO (1985) E MATOS (1994):

**Na indústria** - os frutos possuem excelente sabor e aroma, além de rendimento acima de 60% em polpa, e por isso são amplamente utilizados na confecção de suco, néctar, sorvetes, geléias, vinhos, licores, etc. Devido a sua acidez, normalmente não é consumido ao natural. Apesar da polpa de cajá possuir grande demanda, em algumas regiões do país, a sua industrialização é totalmente dependente das variações das safras, considerando a forma de exploração extrativista do cajá e a grande perda de frutos devido a problemas de colheita e de transporte. Desse modo, a atual produção industrializada não é suficiente para atender nem o mercado interno consumidor do Norte e Nordeste.

**Na medicina popular e na indústria farmacêutica** - é crescente a utilização do cajá. A casca é aromática, adstringente e emética, constituindo-se um bom vomitório nos casos de febres biliosas e palustres, tem reputação de antidiarréica, antidesintérica, antiblenorrágica e anti-hemorroidária, sendo a última propriedade também atribuída à raiz. As folhas são úteis contra febres biliosas, constipação do ventre, dores do estômago etc. Nos últimos anos, descobriu-se que o extrato das folhas e dos ramos da cajazeira continham taninos elágicos com propriedades medicinais para o controle de bactérias gram negativas e positivas (Ajao *et al.*, 1985), do vírus da herpes simples (Corthout *et al.*, 1992) e da herpes dolorosa (Matos, 1994); inclusive já existem produtos à base do extrato das folhas e dos ramos da cajazeira, industrializados e comercializados na cidade de Fortaleza, CE, para combate à herpes labial.

**Na alimentação animal** - As folhas são alimentos prediletos do animal na época da seca.

**Outras** - A cajazeira é utilizada também para extração de madeira, a qual é amarelada, quase branca, mole, leve, de qualidade inferior, sendo muito susceptível ao ataque de insetos e por isso é muito usada para caixões e, mais raramente, para construções internas. Atualmente, a polpa congelada de cajá é uma das mais apreciadas em nível nacional e a demanda a cada dia aumenta apesar da inexistência de plantios comerciais.

### 3.2.2. Caracterização

A caracterização do cajá, em dois estádios de maturação, encontra-se na Tabela 1. Apesar da fina camada de polpa o rendimento em peso é alto, pois o caroço, apesar de

volumoso, tem pouco peso. Dados citados por Sacramento e Souza (2000) informam variação na porcentagem de casca do cajá entre 8,4 e 18,7%, e na de endocarpo, entre 15,7 e 46,0%. O conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e a acidez total titulável (ATT), no final da maturação, indicam uma polpa de sabor adocicado e acentuadamente ácido. Os açúcares redutores representam aproximadamente 90% dos açúcares solúveis totais no final da maturação. Pelos resultados para rendimento em polpa, acidez, sólidos solúveis e amido, principalmente, verifica-se que o cajá atinge qualidade máxima para o consumo ou industrialização ao final da maturação. Antes disso, há comprometimento, principalmente do sabor, pela excessiva acidez e teor de amido alto, para polpa de fruta. Observaram-se poucas variações no teor de pectina, quando analisada a polpa integral na atividade enzimática e nos teores de compostos fenólicos. Porém, o fracionamento das pectinas se torna bem mais solúveis com o amadurecimento, GOMES (1992).

Tabela 01 - Caracterização da porção comestível do cajá em dois estádios de maturação.

Características*	Predominantemente Amarelo			Amarelo		
	A.M.	B.M.	PROT.	A.M.	B.M.	PROT.
Peso total (g)	15,91			19,92		
Comprimento (mm)	39,70			43,10		
Diâmetro (mm)	28,10			32,20		
Sólidos Solúveis Totais(°Brix)	10,30			11,56		
Acidez Total Titulável (%)	1,07			1,03		
Sólidos Solúveis/Acidez	9,56			11,23		
pH	3,10			3,17		
Açúcares Solúveis Totais (%)	7,22			8,41		
Açúcares Redutores (%)	6,28			7,65		
Amido (%)	1,92			0,52		
Pectina Total (%)	0,13			0,28		
Pectina Solúvel (%)	0,09			0,07		
Pectina Fracionada (% - em	A.M.	B.M.	PROT.	A.M.	B.M.	PROT.
Pectinametilsterase (UAE)	305,22			362,31		
Poligalacturonase (UAE)	19,78			18,32		
Vitamina C Total (mg/100g)	36,87			36,86		
Fenólicos Solúveis em H <sub>2</sub> O (%)	0,10			0,12		
Fenólicos Solúveis em	0,10			0,11		
Fenólicos Solúveis em Metanol	0,13			0,14		

\*SIA – sólidos insolúveis em álcool; A.M. – alta metoxilação; B.M. – baixa metoxilação; PROT. – protopectina; UAE – unidades de atividade enzimática.

Fonte: Embrapa, Fortaleza, CE, Brasil, 2000.

As propriedades nutritivas são mostradas na Tabela 02, por 100 gramas da fruta (polpa) :

Tabela 02 - Propriedades nutritivas do cajá.

Vitamina A (mg)	Vitamina B1 (mg)	Vitamina B2 (mg)	Vitamina C (mg)	Niacina (mg)	Calorias (kcal)	Glicídios (g)	Proteínas (g)	Lipídios (g)	Cálcio (mg)	Fósforo (mg)	Ferro (mg)
64,00	50,00	40,00	35,90	0,26	45,00	11,60	0,80	0,20	56,00	67,00	0,30

Fonte: Embrapa, Fortaleza, CE, Brasil, 2000.

### 3.2.3. Outras características

Outro aspecto importante do cajá, Figura 03, é a possibilidade da utilização de uma determinada espécie como porta-enxerto de outra espécie.



Figura 03 - Imagem do cajá.

### 3.3. Planejamento experimental

O planejamento experimental é uma ferramenta poderosa para estudar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma variável resposta de interesse. Uma das técnicas mais conhecidas é o planejamento fatorial, no qual estão envolvidos  $k$  fatores (ou variáveis) cada um deles presente em diferentes níveis. O caso mais simples é aquele em que cada fator  $k$  está presente em apenas dois níveis. Na realização de um experimento com  $k$  fatores em dois níveis, são feitas  $2 \times 2 \times \dots \times 2$  ( $k$  vezes) =  $2^k$  observações da variável resposta e, portanto, este planejamento é denominado experimento fatorial  $2^k$  (NEVES E SCHVARTZMAN, 2002).

A Figura 04 mostra esquematicamente um certo número de fatores  $k$  atuando sobre o sistema em estudo, produzindo as respostas  $R_1, R_2, \dots, R_j$ . O sistema atua como uma função

desconhecida que opera sobre as variáveis de entrada, os fatores, e produz como saída às respostas observadas. O objetivo do planejamento experimental é descobrir essa função, ou obter uma aproximação satisfatória para ela. Com o conhecimento desta função poderá escolher as melhores condições de operação do sistema.



Figura 04 - Sistema representando uma função ligando os fatores às respostas  
(BARROS NETO *et al*, 1995, p. 84).

### 3.3.1. Planejamento fatorial

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas e é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo.

Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes níveis desses fatores. A seguir são realizados experimentos para todas as combinações possíveis dos níveis selecionados.

De um modo geral, o planejamento fatorial pode ser representado por  $b^k$ , onde "k" é o número de fatores "b" é o número de níveis escolhidos. Isso só acontece com b igual para todos os fatores.

Em geral, os planejamentos fatoriais do tipo  $2^k$  são os mais comuns. Um dos aspectos favoráveis deste tipo de planejamento é a realização de poucos experimentos. Torna-se óbvio que com um número reduzido de níveis não é possível explorar de maneira completa uma grande região no espaço das variáveis. Entretanto, pode-se observar tendências importantes para a realização de investigações posteriores, VIEIRA (1999).

### 3.3.2. Algumas definições

**Fatores ou variáveis independentes** - são características que podem ser variadas no sistema; por exemplo, concentração de reagentes, força iônica, pH, temperatura, etc.

**Níveis** - é o grau ou faixa de variação que um fator sofrerá;

**Resposta ou variável dependente** - é a variável em que se está interessado e sofre efeito dos diferentes fatores.

### 3.3.3. Realização de experimentos e estimativa do erro experimental

Alguns cuidados devem ser observados para que se possa obter o máximo de informação na realização do planejamento fatorial. Dentre estes se encontra a necessidade de realizar repetições de alguns ensaios para que se possa estimar o erro experimental. As replicatas devem ser repetições autênticas, devendo representar adequadamente o espaço experimental no qual o planejamento fatorial foi desenvolvido. Outro cuidado a ser observado refere-se à realização dos experimentos. É importante que todos os ensaios e replicatas previstos no desenvolvimento do fatorial sejam realizados de forma aleatória. Estes cuidados visam evitar distorções estatísticas que possam comprometer a qualidade dos resultados obtidos e dos efeitos calculados para as variáveis estudadas, BRASIL *et al* (2007).

Nos planejamentos experimentais onde as variáveis são exploradas em 2 níveis é comum codificá-los usando os sinais (+) e (-). A atribuição destes sinais aos níveis superiores ou inferiores é feita de forma arbitrária e não interfere na realização dos experimentos ou interpretação dos resultados, além de permitir esquematizar o planejamento na forma de matrizes de planejamento. Esta codificação de variáveis, embora pareça desnecessária, é de grande ajuda quando se realizam os cálculos para determinar qual a influência das variáveis estudadas e das suas interações no sistema em estudo.

### 3.3.4. Cálculo dos efeitos principais e de interações

Os efeitos são definidos como "a mudança ocorrida na resposta quando se move do nível baixo (-) para o nível alto (+)" e podem ser classificadas em duas categorias: efeitos principais e efeitos de interações.

Para o cálculo dos efeitos, além da codificação das variáveis utilizando os sinais (+) e (-), é necessário incluir mais colunas na matriz de planejamento. O conteúdo destas colunas representa o efeito de interação entre as variáveis e é obtido levando-se em consideração os sinais já atribuídos às variáveis envolvidas, como se fosse uma operação matemática de multiplicação.

### 3.3.5. Cálculo do desvio padrão para os efeitos

Pode-se demonstrar que, para um fatorial do tipo  $2^k$ , a estimativa da variância dos efeitos pode ser dada por:

$$S_p^2 = \frac{1}{n2^{k-2}} S^2 \quad (01)$$

onde:  $n$  corresponde ao número de replicatas de cada conjunto,  $k$  é o número de fatores e  $S^2$  é o estimador da variância da população.

Assumindo-se que existem  $n$  replicatas para cada um dos  $2^k$  experimentos do planejamento (no caso,  $2^3$ ), e se  $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}$  são observações do  $i$ -ésimo experimento, pode-se então dizer que:

$$S_i^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (02)$$

é uma estimativa da variância para o  $i$ -ésimo experimento, onde  $i=1,2,3,\dots, 2^k$  e  $\bar{y}_i$  a respectiva média. Combinando-se as estimativas dos  $2^k$  experimentos, tem-se a estimativa da variância total:

$$S^2 = \frac{1}{2^k (n-1)} \sum_{i=1}^{2^k} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (03)$$

Considerando-se então que  $S^2$  é um estimador da variância populacional  $\sigma^2$ , pode-se escrever que:

$$S_p^2 = \pm \sqrt{\frac{1}{n2^{k-2}} S^2} \quad (04)$$

Talvez o planejamento fatorial não determine valores ótimos em uma única etapa, porém este procedimento indica satisfatoriamente o caminho a ser tomado para que se possa atingir o objetivo proposto.

### 3.3.6. Planejamento fatorial composto central

O planejamento fatorial é empregado para se obter as melhores condições operacionais de um sistema sob estudo, realizando-se um número menor de experimentos

quando comparado com o processo univariado de otimização. O planejamento fatorial determina que fatores têm efeitos relevantes na resposta e, também, como o efeito de um fator varia com os níveis dos outros fatores. Também, o planejamento fatorial permite medir as interações entre diferentes fatores. Essas interações são a principal componente de muitos processos de otimização. Sem o uso de planejamentos fatoriais de experimentos, importantes interações de fatores não são detectadas e a otimização máxima do sistema pode levar mais tempo para ser alcançada, BRITO *et al* (2003).

### 3.3.7. Passos para um planejamento fatorial composto central

Segundo Montgomery (1984) os passos para um planejamento fatorial completo são:

- Definição da função objetiva;
- Definição das variáveis do processo em estudo e suas restrições;
- Elaboração do planejamento fatorial completo;
- Análise dos efeitos dos fatores nas respostas desejadas;
- Análise estatística e interpretação dos resultados;
- Ajuste de modelos;
- Verificação da validade dos modelos utilizando Análise de Variância - ANOVA;
- Análise de Superfície de Resposta: definição das faixas ótimas de operação.

### 3.3.8. Interpretação geométrica dos efeitos

Pode-se dar uma interpretação geométrica dos efeitos que foram calculados se o planejamento experimental for representado num sistema cartesiano em que cada eixo corresponda a um fator. Quando são apenas dois fatores, o espaço definido por eles é um plano, no qual os quatro ensaios ocupam vértices de um quadrado. Os efeitos principais são diferenças médias entre valores situados em arestas opostas e perpendiculares ao eixo do fator em questão. Assim, a Figura 05 mostra o efeito da força  $F$ , o efeito do ângulo  $\theta$  e o efeito de interação, que é a diferença média entre valores situados nas duas arestas diagonais do quadrado, sendo considerada positiva a diagonal que liga o ensaio (- -) ao ensaio (+ +).

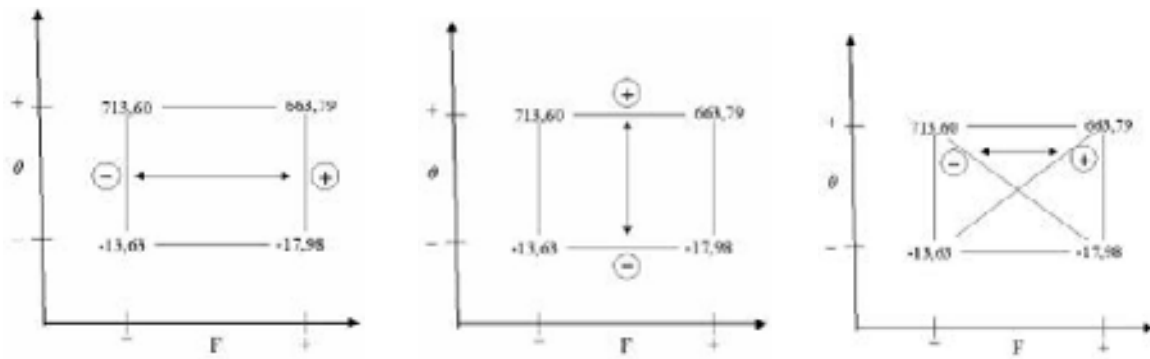


Figura 05 - Interpretação geométrica dos efeitos em um planejamento  $2^2$ .

### 3.3.9. Método dos mínimos quadrados (MMQ)

No planejamento experimental com  $n$  variáveis o modelo empírico usado para aproximar a relação entre os fatores e a(s) resposta(s) é um polinômio de grau um ou grau superior. A expressão usada para calcular esse polinômio é dada por:

$$Y = f(X) + e \quad (05)$$

Onde  $f(X) = [f(x_1, K, x_n)]^T$  é um polinômio de grau um ou grau superior. O vetor coluna  $Y$  contém as respostas observadas e o vetor coluna  $e$  contém os resíduos. O polinômio  $f(X)$  pode ser representado na notação matricial:

$$f(X) = [X][b] \quad (06)$$

Onde o vetor coluna  $[b]$  contém os coeficientes desconhecidos e  $[X]$  é a matriz formada pelos valores observados no planejamento fatorial. Denotando por  $N$  o número total de pontos no espaço experimental, o processo para calcular os coeficientes  $[b]$  é minimizar a soma dos quadrados dos resíduos:

$$Sr = \sum_{i=1}^N (y_i - f(X_i))^2 \quad (07)$$



Os resultados deste processo são as equações normais que podem ser expressas na forma matricial como:

$$[X]^T[X][b]=[X]^T[Y] \quad (08)$$

Assim, os coeficientes podem ser calculados usando uma simples multiplicação de matrizes:

$$[b]=\{[X]^T[X]\}^{-1}[X]^T[Y] \quad (09)$$

A Equação 09 será utilizada na determinação da superfície que se aproxima dos pontos do planejamento no espaço experimento, chamada Superfície de Resposta (SR). A vantagem de usar a Equação 09 é o baixo custo computacional necessário para determinar os coeficientes da superfície de resposta. É importante notar que para calcular os coeficientes é necessário um número de pontos maior do que o número de termos no polinômio ou SR.

### 3.3.10. Análise dos resíduos

Nas seções anteriores, obtiveram-se superfícies que ajustam aos dados, mas não se sabe ainda a qualidade desses ajustes. Ou seja, ainda não se tem uma ferramenta capaz de avaliar se a superfície ajustada (ou modelo) é uma representação adequada para a função. Além disso, caso esta representação seja adequada, deseja-se saber em que faixa de variação pode-se considerar tal ajuste. A análise dos resíduos é fundamental na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo. Um modelo que deixe resíduos consideráveis é obviamente um modelo ruim. O modelo ideal não deixaria resíduo algum: todas as suas previsões coincidiriam com os resultados observados.

### 3.3.11. Teste de significância do ajuste

Procedimentos de teste de significância são úteis para aferir a qualidade da aproximação gerada a partir de um conjunto de dados. Tais testes são baseados na análise da variância e requerem a obtenção dos seguintes parâmetros estatísticos (média e somas dos quadrados dos desvios):

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (10)$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (11)$$

$$SQ_E = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ri})^2 \quad (12)$$

$$SQ_R = \sum_{i=1}^N (y_{ri} - \bar{y})^2 \quad (13)$$

$$SQ_T = SQ_R + SQ_E \quad (14)$$

Lembrando que  $N$  é o número total de observação,  $y_i$  é o valor observado (ou obtido da função dada) e  $y_{ri}$  a previsão do modelo para o valor  $y_i$ . A Equação 14 mostra que a soma total dos quadrados é particionada na soma dos quadrados devidos aos erros e na soma dos quadrados devida ao modelo ou devida à regressão. Quanto maior for a fração descrita pela regressão, melhor será o ajuste do modelo. De posse destes parâmetros que são as parcelas nas quais foi decomposta a variabilidade total do modelo, constrói-se a Tabela 03, conhecida como Tabela ANOVA (análise da variância). Nesta tabela,  $MS_R$  e  $MS_E$  são os quadrados médios (variâncias) e  $p$  é o número de parâmetros estimados do modelo.

Tabela 03 - Tabela de análise da variância (ANOVA).

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Grau de Liberdade Estatístico	Quadrados Médios	Estatística $F_0$
Modelo	$SQ_R$	$(p-1)$	$MS_R = \frac{SQ_R}{p-1}$	$F_0 = \frac{MS_R}{MS_E}$
Erro	$SQ_E$	$(N-p)$	$MS_E = \frac{SQ_E}{N-p}$	
Total	$SQ_T$	$(N-1)$		

A métrica  $F_0$  é usada para testar a hipótese de que todos os coeficientes do ajuste são nulos (ajuste absurdo). Para tanto, ela é comparada com o valor tabelado  $F_{\alpha, (p-1), (N-p)}$ , correspondente à distribuição padrão de Fisher. Para isto, torna-se necessário fixar um nível de significância  $\alpha$  para um teste com  $(p-1)$  graus de liberdade da soma  $SQ_R$  e  $(N-p)$  graus de liberdade da soma  $SQ_E$ . Caso a estatística obtida seja maior do que a tabelada, rejeita-se a

hipótese (pelo menos um dos coeficientes do ajuste é não-nulo) e o procedimento de aproximação está estatisticamente validado.

Quanto maior o valor de  $F_o$ , melhor é o ajuste. Pois, quando  $MS_E$  é suficientemente pequeno, implica que  $SQ_E$  também é pequeno, o que significa que  $y_{ri}$  está próximo de  $y_i$ .

Pode acontecer, porém, que uma regressão, embora estatisticamente validada do ponto de vista do teste F, não seja útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Box e Hunter (1978) sugerem que, para que isso não ocorra, isto é, para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos, o valor da métrica  $F_o$  deve ser no mínimo de quatro a cinco vezes o valor de  $F_{\alpha}$ ,  $(p-1)$ ,  $(N-p)$ . Além do teste de hipóteses básico, apresentado acima, os parâmetros de soma dos quadrados podem ser empregados em outras verificações quanto à qualidade do ajuste.

### **3.3.12. Análise de superfície de respostas empregando planejamento composto central**

Os métodos de superfícies de respostas são utilizados para examinar as relações entre uma ou mais variáveis e um conjunto quantitativo de fatores experimentais. Esses métodos estatísticos são empregados após uma triagem dos fatores importantes, que geralmente é realizada previamente por um planejamento fatorial. Após isso, é preciso encontrar um dos níveis de fatores que otimizam a resposta para posterior análise da superfície de resposta, KRURI (1987).

### **3.3.13. A metodologia de Superfície de Resposta (MSR)**

A metodologia de superfície de resposta (MSR) pode ser definida como um método estatístico que utiliza dados quantitativos de um desenho experimental adequado para determinar e simultaneamente solucionar equações multivariadas. Essas equações podem ser representadas graficamente como superfícies de resposta, que podem ser usadas de três formas: descrever como as variáveis em teste afetam as respostas; para determinar as inter-relações entre as variáveis em teste; e para descrever efeitos combinados de todas as variáveis em teste sobre a resposta, MONTGOMERY (1984). Basicamente a MSR é um processo em quatro etapas:

**1-Identificar os fatores:** O primeiro passo é identificar até cinco fatores que sejam críticos ao estudo, ou seja os fatores responsáveis pela maior variação no processo. Esta etapa presume que o pesquisador conheça quais são os fatores que influenciam o processo. Se os fatores não forem conhecidos devem-se realizar experimentos preliminares para identificar os principais fatores.

**2-Definir os níveis:** O segundo passo consiste em definir a faixa em que os fatores estarão contidos. Se a faixa for muito ampla corre-se o risco de não se encontrar o ótimo. Nesse caso um segundo planejamento com uma faixa mais restrita deve ser realizado.

Deve-se definir alguns termos para uma maior compreensão do texto.

**3-Escolher o desenho experimental apropriado:** Os desenhos estabelecem uma ordem em como os experimentos devem ser realizados. Ao cobrir toda a faixa escolhida para o experimento enfatizam-se os pontos mais próximos ao ponto médio (ponto central), ao mesmo tempo em que são reduzidos os números de experimentos.

**4-Análise dos dados:** O quarto passo é analisar os dados usando um programa computacional adequado. As conclusões desses experimentos devem ser confirmadas por experimentos posteriores na condição considerada ótima. Como em qualquer outro estudo científico, os resultados não podem ser extrapolados para além dos limites estabelecidos.

### 3.3.14. Usos da MSR

A MSR apresenta uma ampla aplicação na pesquisa, porque ela considera vários fatores em níveis diferentes e as interações correspondentes entre esses fatores e níveis.

No contexto do planejamento de experimentos, o principal objetivo dos pesquisadores é caracterizar a relação entre uma ou mais variáveis resposta e um conjunto de fatores de interesse. Isso pode ser executado através da construção de um modelo que descreva a variável resposta em função dos valores aplicáveis desses fatores.

Segundo Branco (2003) certos tipos de problemas científicos envolvem a expressão de uma variável resposta, tal como o rendimento de um produto, como uma função empírica de um ou mais fatores quantitativos, tais como a temperatura de reação e a pressão. Isso pode ser efetuado utilizando-se uma *superfície de resposta* para modelar a relação Rendimento =  $f$  (temperatura de reação, pressão). O conhecimento da forma funcional de  $f$ , freqüentemente obtido com a modelagem de dados provenientes de experimentos planejados, permite tanto sumarizar os resultados do experimento quanto prever a resposta para valores dos fatores quantitativos. Assim, a função  $f$  define a superfície de resposta.

No planejamento de experimentos para estudar ou ajustar superfícies de resposta, a função de resposta é caracterizada em uma região de interesse do pesquisador, para que seja possível utilizá-la na prática. Após o ajuste do modelo aos dados, é possível estimar a sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais a resposta é ótima (por exemplo, máxima ou mínima). Quando a superfície de resposta é função de um único fator, a resposta pode ser plotada como uma curva em duas dimensões conforme Figura 06:

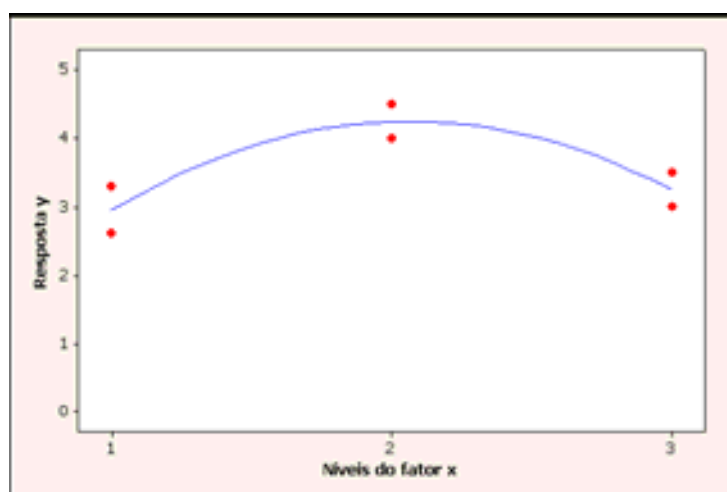


Figura 06 - Curva em 2D plotada como resposta de um único fator.

Nesse caso, os pontos plotados representam pares de respostas observadas ( $y$ ) para cada um dos três níveis quantitativos do fator ( $x$ ). O modelo ajustado representado pela curva caracteriza a superfície de resposta e identifica onde a resposta máxima é obtida.

Quando a superfície de resposta é uma função de dois ou mais fatores, as situações experimentais ainda podem ser descritas graficamente. Gráficos de contorno e superfície são úteis para estabelecer condições de operação para se obter valores desejáveis da resposta.

- Em um gráfico de contorno, os valores dos dois fatores são representados nos eixos  $x$  e  $y$ , enquanto os valores da resposta são representados por regiões sombreadas, chamados contornos. Um gráfico de contorno é como um mapa topográfico.
- Em um gráfico de superfície, os valores dos dois fatores são representados nos eixos  $x$  e  $y$ , enquanto os valores da resposta são representados no eixo  $z$ . Esse gráfico fornece uma visão tridimensional que pode exibir um desenho mais claro da superfície de resposta.

A Figura 07 mostra um gráfico de contorno e um gráfico de superfície para os mesmos dados. Os menores valores de  $Y$  são encontrados onde  $X_1$  e  $X_2$  são ambos iguais a zero. À medida que  $X_1$  e  $X_2$  se afastam de zero, os valores de  $Y$  aumentam consistentemente.

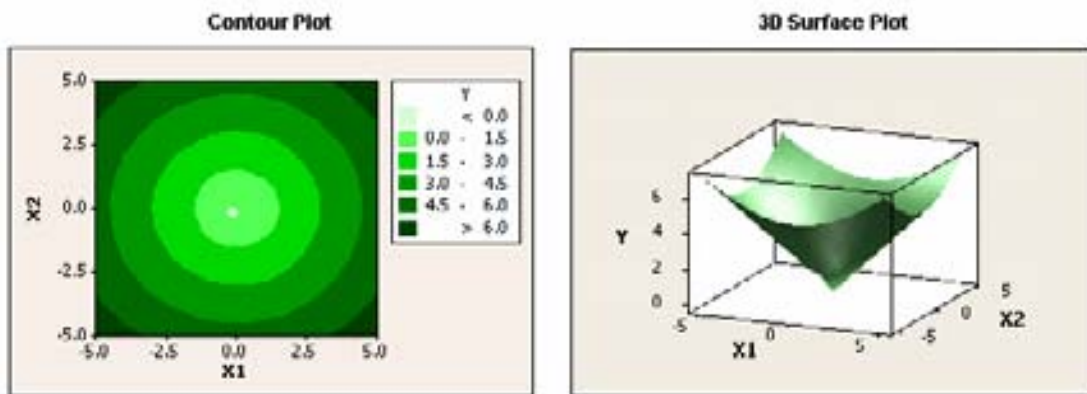


Figura 07 - Gráfico de contorno e superfície de resposta.

Na ferramenta de Superfície de Resposta, tem-se a metodologia de *experimentos centrais compostos*, através da qual pode-se criar experimentos centrais com ou sem blocos.

Um experimento composto central com dois fatores é mostrado na Figura 08. Os pontos no diagrama representam os ensaios experimentais que são realizados:

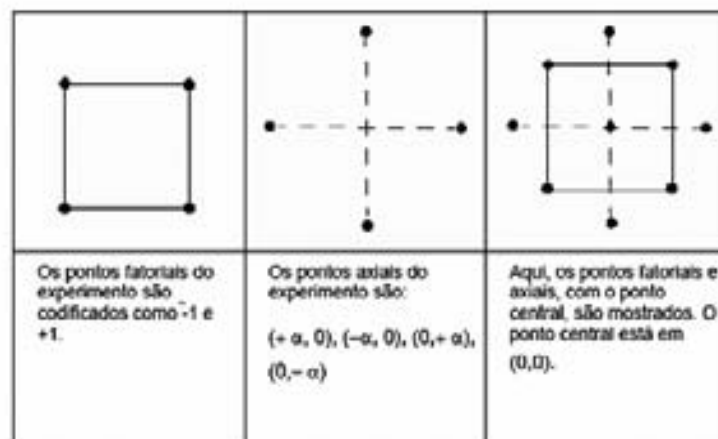


Figura 08 - Representação de um experimento composto central com dois fatores.

O número total de ensaios em um experimento central composto baseado em um experimento fatorial completo é  $n = 2k + 2k + m$ , onde:

$2k$  – número de pontos fatoriais

$2k$  – número de pontos axiais (de estrela)

$m$  – número de replicações do ponto central

### 3.3.15. Otimização

Em processos industriais, de desenvolvimento e de pesquisa, é muito comum a existência de vários fatores ou variáveis que afetam a qualidade global do produto final. A tarefa de otimização pode ser prolongada e dispendiosa se uma ferramenta adequada não for utilizada. A metodologia de Planejamento Experimental e Análise de Superfície de Resposta vem sendo considerada como uma ferramenta eficaz e imprescindível para o desenvolvimento de processos, principalmente quando um grande número de variáveis está envolvido.

O avanço da informática e o uso rotineiro de microcomputadores viabilizaram o uso de *softwares* de última geração, exigindo do usuário somente conhecimentos básicos de informática e estatística para interpretação dos resultados.

Ao profissional cabe, então, investir mais tempo na compreensão do processo, definindo as variáveis relevantes a serem estudadas (temperatura, composição do produto, tempo de reação, concentrações, etc.) e as respostas desejadas (consistência, sabor, cor, aroma, pureza, rendimentos, produtividades, etc.).

Assim, é possível otimizar as condições de processo, maximizando rendimentos, produtividades e viabilidade comercial, minimizando custos, ou mesmo conduzindo o processo à obtenção de um produto com as especificações desejadas, com o uso da metodologia de Planejamento Experimental e Análise de Superfície de Resposta, obtendo resultados com altos índices de confiabilidade.

Os passos a serem tomados para a otimização do processo são:

- Maximizar uma resposta;
- Minimizar uma resposta;
- Encontrar uma região de estabilidade;
- Encontrar um compromisso entre várias respostas;
- Descrever variações nas respostas por modificação nas variáveis de controle.

Os modelos têm que ser polinômios com termos quadráticos. Os métodos mais utilizados são:

- CCD (Planejamento composto central)
- BBD (Planejamento Box - Behnken 3k - 3 Níveis)

### **3.3.15.1. Planejamento composto central - C C D**

Consiste de um fatorial completo, um planejamento estrela e replicatas do ponto central, e gera uma superfície de resposta que possibilita identificar o ponto ótimo do sistema. É uma extensão do modelo  $2^k$  (Linear).

### **3.3.15.2. Planejamento Box - Behnken 3k - 3 Níveis - BBD**

No modelo de Box – Behnken, as variáveis têm 3 níveis: cúbico baixo, central e cúbico alto. Cada experiência cruza o nível extremo das duas ou três variáveis do projeto com os valores médios das outras. Além disso, inclui também pontos centrais.

## **3.4. Secagem**

Como a comercialização dos frutos está restrita a sua época de safra, e a sua perecibilidade é alta, necessita-se, para viabilizar as diversas agroindústrias, de unidades de processamento que possam alimentar as indústrias fora do período de safra. Uma das técnicas que vem sendo desenvolvida nos últimos anos é a secagem, que tem por finalidade transformar a polpa da fruta em um produto seco, permitindo um armazenamento prolongado e uma maior estabilidade e longevidade do produto, de modo a ter uma maior vida de prateleira, podendo o consumidor ter acesso a esse produto durante todo ano, e não apenas no período de safra da fruta.

Existe uma gama muito ampla de produtos que requerem a utilização do sistema de secagem, que mantém as propriedades físico-químicas dos produtos e em alguns casos chega a melhorar essas propriedades.

Segundo Gaspareto (2005) existem diversos métodos de secagem, mas a sua escolha vai ser determinada pela natureza do alimento, pela forma e qualidade que se deseja dar ao produto processado, pelo valor econômico e pelas condições de operação.

Entende-se por secagem a transferência de um líquido presente num dado material para uma fase gasosa não saturada, ver Figura 09. A secagem ocorre sempre que a pressão de vapor do líquido presente no material for maior que a pressão parcial do vapor deste líquido na fase gasosa.



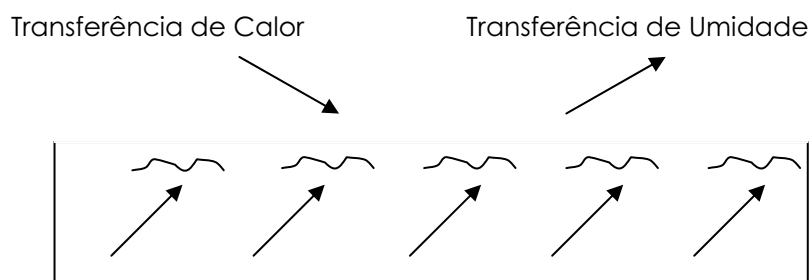


Figura 09 - Representação da transferência de calor e umidade de um material.

Os objetivos principais de um processo de secagem são:

- Preservação de produtos biológicos;
- Acondicionamento para armazenagem;
- Acondicionamento no pré-processamento de materiais;
- Diminuição peso/volume para efeito de transporte;
- Aumento da eficiência de combustíveis sólidos.

Segundo Strumillo e Kudra (1986), a água de um sólido pode ser dividida em água de superfície, livre ou capilar. A água de superfície pode ser definida como uma película que cobre a superfície externa do material devido aos efeitos da tensão superficial. A umidade interna de um material sólido não higroscópico é considerada livre. Ou no caso de um material higroscópico o conteúdo de água no equilíbrio corresponde à umidade neste equilíbrio. Com relação a um leito de partículas ou um corpo poroso, a água livre pode-se apresentar em dois estados:

- **Estado Funicular** - o líquido no interior do corpo poroso se distribui de forma contínua. O movimento do líquido na superfície externa do material ocorre devido à ação capilar. Conforme a umidade é removida, a continuidade da fase líquida é quebrada pela sucção do ar para os poros, surgindo o estado Pendular.
- **Estado Pendular** - O líquido entre partículas discretas é descontínuo e a umidade é separada por bolhas de ar.

Tendo em vista a complexidade do comportamento e o desconhecimento das características do produto, geralmente, procede-se um estudo experimental do processo de secagem, onde se obtém as informações através de parâmetros que serão representados graficamente. Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função do tempo (t) e a velocidade de secagem ( $dU/dt$ ) em função da umidade ( $U_{bs}$ ).

No estudo da secagem de um material, os resultados experimentais relacionam em geral o teor de umidade com o tempo. As Figuras 10 e 11 mostram as curvas características de secagem. Toda a secagem ocorre no período transitório, durante o qual o material se adapta às condições de secagem e sua temperatura aumenta com o tempo.

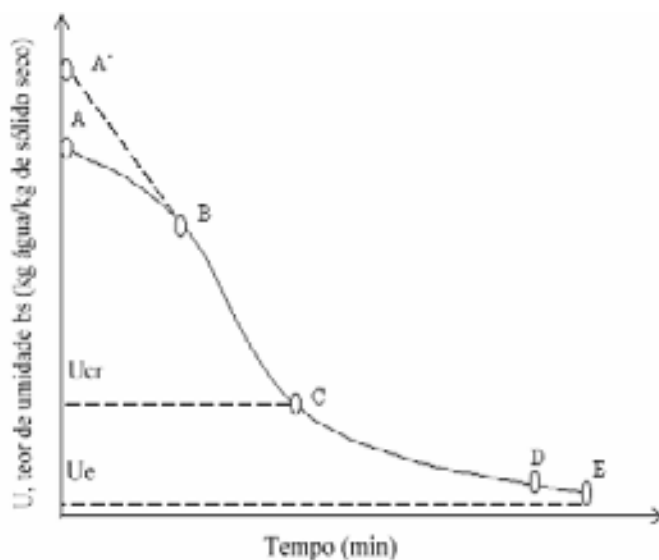


Figura 10 - Teor de umidade versus tempo de secagem.

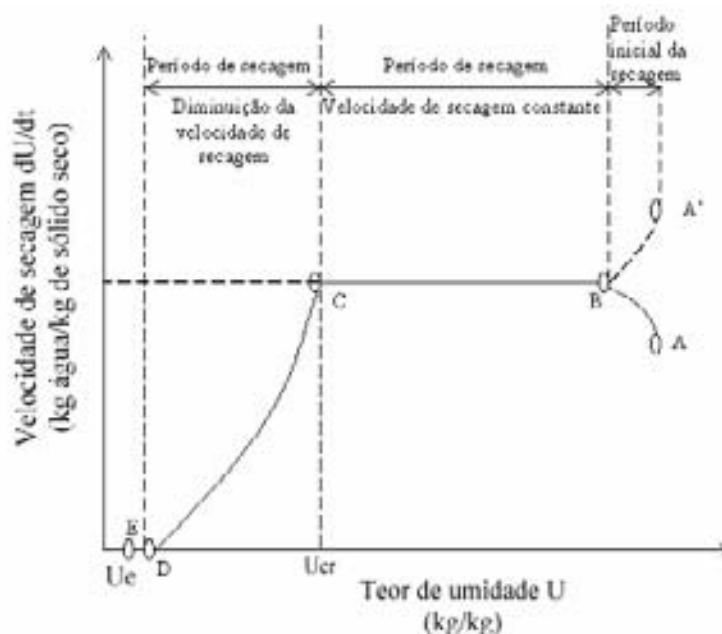


Figura 11 - Velocidade de secagem versus teor de umidade.

Onde:

- AB - Fase inicial da secagem quando o sólido é aquecido desde a temperatura  $T_0$  até a temperatura de equilíbrio  $T_s$  ou  $T_{ws}$  (temperatura de bulbo úmido).

- BC – Corresponde ao período de velocidade constante que termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico,  $U_{cr}$ .
- CD - Corresponde ao 1º período de velocidade decrescente, onde na maioria dos casos, a velocidade decresce linearmente - zona de secagem da superfície insaturada.
- DE - Corresponde ao 2º período de velocidade decrescente - zona em que o movimento interno da umidade é controlante; a secagem cessa quando a pressão de vapor do líquido contido no sólido é igual a pressão parcial do vapor de água no gás secante afluente. Nestas condições a umidade do sólido atinge o valor  $U_e$  (teor de umidade no equilíbrio), umidade que permanece no sólido independente do tempo de secagem, desde que as condições de operação não se modifiquem.

### 3.4.1. Comportamento da secagem

Na secagem de um material sólido a transferências de calor e massa ocorrem simultaneamente. Em geral os processos de secagem sofrem influência considerável dos agentes externos e da estrutura interna do material a ser seco. As influências desses fatores são diferentes para cada período da secagem. No período de taxa constante, a transferência de calor e massa depende principalmente do mecanismo de transporte na superfície do sólido, mas no período de taxa decrescente este mecanismo depende da resistência interna do material à secagem.

A velocidade de secagem é definida como a umidade removida do material na unidade de tempo e por unidade de área, como definida na equação abaixo:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{m_s}{A_s} \frac{dU_{bs}}{dt} \quad (15)$$

Onde:

$dX/dt$  → taxa de secagem (kg/m<sup>2</sup>.s);

$U_{bs}$  → umidade do material (kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido seco);

$m_s$  → massa do material isento de umidade (kg).

$A_s$  → Área superficial de partícula (m<sup>2</sup>)

### 3.4.2. Período de velocidade constante

Sempre que um sólido se encontra saturado com água e é submetido a uma condição favorável de secagem, ocorre inicialmente transferência de vapor de água da superfície do material para o meio externo. Nessa fase, a umidade do sólido movimenta-se suficientemente rápida para manter a condição de saturação da superfície do material, e a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de transferência de calor do sólido para a superfície. Como a superfície se mantém saturada, existe uma película contínua de líquido sobre toda a superfície de secagem, e a taxa de evaporação é essencialmente independente da natureza do sólido. Em regime estacionário a temperatura da superfície do sólido é igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, implicando em uma taxa constante de transferência de calor, que resulta numa velocidade de secagem constante. Esta etapa é denominada período de taxa constante e seu final é marcado por uma redução na taxa de secagem, dando origem a um ponto chamado de umidade crítica, como se observa na Figura 10.

Na maioria dos processos de secagem o líquido evaporado é a água e o gás de secagem é o ar atmosférico. Para se calcular as taxas de secagem ou vazão mássica são utilizadas as equações de transferência de massa e de calor.

Equação de transferência de massa:

$$\frac{dm}{dt} = K_p (P_s - \bar{P}) A_c \quad (16)$$

Onde:

$P_s$  → Pressão de vapor do líquido na temperatura  $T_s$  (condição de saturação) (atm);

$\bar{P}$  → Pressão parcial do vapor de água no ar de secagem à temperatura  $T_g$  - (atm);

$A_c$  → Área de contato líquido-gás (área de transferência de massa)- ( $m^2$ );

$\frac{dm}{dt}$  → Velocidade mássica de secagem (kg/s), e

$K_p$  → coeficiente de transferência de massa ( $kg/s \cdot m^2 \cdot atm$ ).

Equação de transferência de calor:

A transferência de calor está relacionada com a velocidade de secagem quando o fluxo calor para a evaporação, durante o período de velocidade constante, é favorecido por um gás

quente, há um equilíbrio dinâmico entre a velocidade de transferência de calor para o material e a velocidade de remoção do vapor da superfície.

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{dm}{dt} \quad (17)$$

Onde:

$dQ/dt$  → Velocidade de transferência de calor (J/s);

$\lambda$  → Calor latente de vaporização na  $T_s$  (J/kg).

Através da equação de balanço de calor pode-se calcular a velocidade de secagem neste período. Devido à superfície do material estar úmida e a temperatura deste ser igual à de bulbo úmido do ar de secagem, desprezando-se a transferência de calor por condução e radiação, a velocidade de secagem é calculada:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{hA(T_a - T_{bu})}{\lambda} \quad (18)$$

Onde:

$dm/dt$  → Velocidade mássica de secagem (kg/s);

$h$  → Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ );

$A_s$  → Área de superfície exposta ( $m^2$ );

$T_a$  → Temperatura ambiente ( $^\circ C$ );

$T_{bu}$  → Temperatura de bulbo úmido ( $^\circ C$ ) e

$\lambda$  → Calor latente de vaporização (J/kg).

### 3.4.3. Considerações sobre umidade crítica

Ao final do período de taxa constante o material atinge uma umidade caracterizada como crítica, que depende de uma série de fatores, tais como da profundidade do leito ou espessura da amostra, da taxa de secagem e da porosidade do material ou do leito. O teor de umidade crítico, Figura 12, depende da facilidade com que a umidade se desloca desde o interior do sólido até a superfície, dependendo, portanto, da estrutura porosa do sólido.

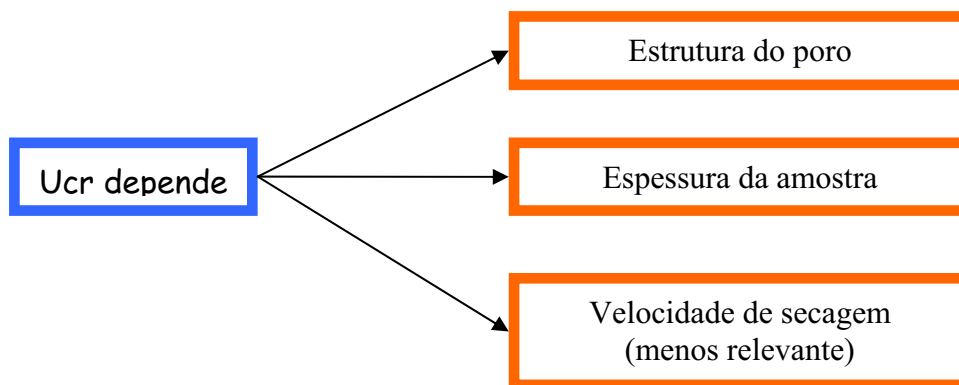


Figura 12 - Esquema do teor de umidade crítico.

### 3.4.4. Períodos de velocidade decrescente

O ponto em que termina o período de velocidade constante, ponto crítico ( $U_{cr}$  das Figuras 10 e 11), marca o instante em que a água líquida que está sobre a superfície é insuficiente para manter uma película contínua que envolva toda superfície de secagem.

- Para sólidos não porosos o ponto crítico é alcançado quando se evapora a umidade superficial;
- Para sólidos porosos o ponto crítico é alcançado quando a velocidade de fluxo de umidade para a superfície é insuficiente para igualar a taxa de evaporação requerida para manter as condições de saturação na superfície.

A forma da curva no período de taxa decrescente, Figura 13 depende do tipo de material submetido à secagem.

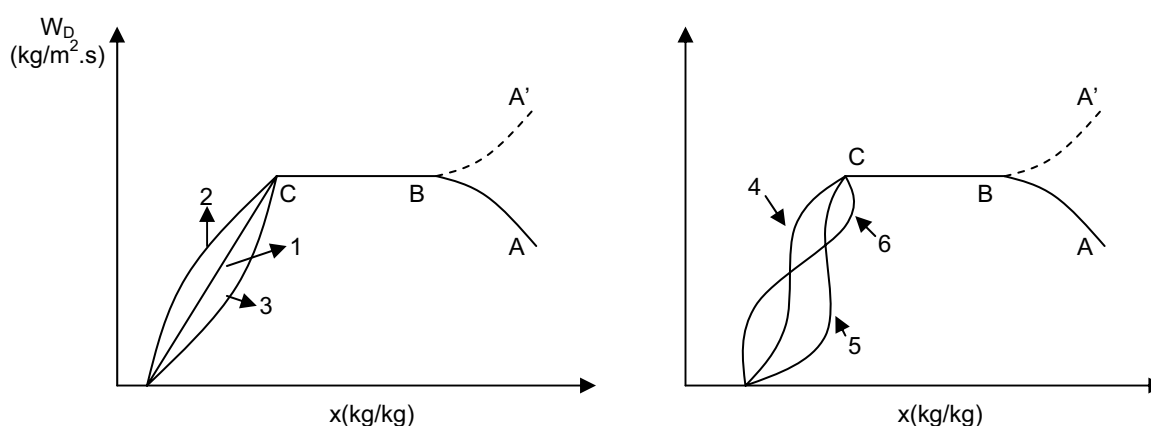


Figura 13 - Curvas a e b características de sólidos porosos com elevada superfície específica de evaporação.

A curva 1 é representada para o papel ou papelão fino; a 2 para tecidos, couro fino; a 3 e 4 são típicas de materiais como argilas e cerâmicas. Outros tipos de curvas são características de sólidos capilares com baixa superfície específica de evaporação. As curvas 4, 5 e 6 são características de materiais coloidais capilares porosos, tais como milho, pão e trigo.

Na etapa do processo denominado período de velocidade decrescente a velocidade de secagem diminui continuamente ao longo de todo o ciclo de secagem, Strumillo e Kudra (1986). Nas Figuras 10 e 11 esta etapa esta representada pelos segmentos CD e DE onde se caracterizam duas fases:

- Primeiro período de velocidade decrescente (CD) onde parte da superfície evaporante se mantém insaturada, uma vez que a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície. Os principais mecanismos de transporte de massa sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor;
- Segundo período de velocidade decrescente (DE) predomina a difusão de vapor durante o estado pendular, onde toda a evaporação ocorre no interior do sólido, pois toda a superfície evaporante esta insaturada e o plano de evaporação desloca-se para o interior deste. A velocidade de secagem é controlada pela velocidade da umidade interna.

### 3.5. Modelo difusional

A teoria da migração de água por difusão baseia-se principalmente na lei de Fick expressa em termos de gradientes de concentração. LEWIS (1921) fez referência à lei de Fick em seus primeiros trabalhos, onde observou que o processo de secagem nos sólidos era difusional. Esta idéia levou a SHERWOOD (1931) a desenvolver trabalhos sobre secagem de sólidos, propondo explicitamente que a transferência da umidade num sólido podia ocorrer por mecanismo de difusão líquida, permitindo a aplicação da lei de Fick para descrever o mecanismo de transporte da umidade.

Para geometrias simples e transferência de matéria unidirecional, a lei de Fick pode ser escrita como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^q} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{r^q} \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (19)$$

Onde:

$D_{r,q}$  → coeficiente de difusão;

$r$  → raio ou profundidade;

$q$  → coeficiente que corrige a geometria do sistema, onde:

$q = 0$ , para placa plana;

$q = 1$ , para cilindro;

$q = 2$ , para esfera.

A Equação 19 tem sido usada para várias formas de sólidos na secagem de diversos materiais, assumindo para geometria esférica, as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$U(r,0) = U_i \quad (20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r}(0,t) = 0 \quad (21)$$

$$U(r,t) = U_{eq} \quad (22)$$

Onde  $r$  é a coordenada espacial e representa o raio da esfera ou cilindro ou espessura da placa e a condição da Equação 22 justifica o caso em que a resistência externa é desprezível e o processo é controlado pela difusão interna.

CRANK (1975) e KEEY (1997) apresentaram as soluções analíticas da Equação 19 para as três geometrias, citadas acima, para variáveis unidirecional.

Para a geometria de placa plana, CRANK (1975) apresentou a Equação 23:

$$\frac{\bar{U} - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2}\right) \quad (23)$$

Tendo como condição inicial umidade uniforme em toda placa, e como condição de contorno, a velocidade de evaporação nula no centro da placa e umidade de equilíbrio na superfície, onde  $L$  representa a metade da espessura da placa.

A Equação 23 para tempos longos (regime regular) converge rapidamente, podendo-se utilizar o primeiro termo da série como boa aproximação,



$$\frac{\bar{U} - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2}\right) \quad (24)$$

Onde:

$\bar{U}$  → Umidade média (em base seca) em t, (kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido);

$U_e$  → Umidade de equilíbrio, (kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido);

$U_0$  → Umidade inicial, (kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólido).

A partir da linearização da Equação 24 obtém-se a Equação 25,

$$\ln\left[\frac{\bar{U} - U_e}{U_0 - U_e}\right] = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{ef}}{L^2} t \quad (25)$$

Definindo-se,

$$U^* = \frac{\bar{U} - U_e}{U_0 - U_e} \quad (26)$$

Onde a equação empírica do ajuste,

$$\ln U^* = B - Kt \quad (27)$$

onde:

$$K = \frac{\pi^2 D_{ef}}{L^2} t \rightarrow \text{Constante de velocidade}$$

$$B = \text{coeficiente linear} = \ln(8/\pi^2)$$

O coeficiente de difusão é obtido através de ajustes nas curvas a partir de resultados experimentais de secagem e é denominado difusão efetiva,  $D_{ef}$ .

---

# Capítulo 4

## Estado da arte

---

## 4. Estado da arte

Há muito tempo vem se estudando sobre a cinética de secagem, onde diversos autores em todo o mundo buscam formas de ajustar algum tipo de modelo ao processo, bem como novas metodologias de secagem. Estes autores analisam o fator econômico, como também fatores ambientais e nutricionais, sendo que esta combinação responderá pelo sucesso ou fracasso do ajuste de um modelo matemático. Alguns autores estudaram a cinética usando ou não planejamento experimental, em temperaturas variadas, bem como utilizando outras velocidades. Desta forma, alguns destes trabalhos serão descritos, enfatizando os métodos e os resultados obtidos por estes pesquisadores.

Sankat, Castaigne e Maharaj (1996) estudaram o comportamento da secagem da banana fresca com pré-tratamento osmótico. Fatias de banana de aproximadamente 1 cm foram tratados osmoticamente em soluções de 35°, 50° e 65°Brix por 36 horas. Na secagem as temperaturas usadas foram as seguintes 40°, 50°, 60°, 70° e 80°C e a velocidade do ar foi de 0,62 m/s. Para a temperatura de 60°C também se utilizou as velocidades de 0,823 e 1,03 m/s. Variou-se também a espessura da banana fresca e a desidratada osmoticamente a 65°Brix (2,0; 1,0 e 0,5 cm). A modelagem dos dados foi feita baseado nas equações de difusão propostas por Fick. As difusividades encontradas foram de  $34,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para a fruta fresca e de  $8,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para a banana tratada a 65°Brix, com uma espessura de 1cm.

Park, Sandrini e Brod (2000) estudaram processo de secagem visando à redução do teor de água fazendo com que a atividade da água dos produtos *in natura* diminuísse drasticamente, aumentando o tempo de conservação e a vida útil do produto e facilitando seu transporte, manuseio e armazenamento. Através de um secador convectivo de bandejas com fluxo de ar vertical, determinou-se às curvas de secagem da melissa (*Melissa officinallis* L.) nas temperaturas de 35, 45 e 55 °C e velocidades do ar de 0,5 e 1,0 m s<sup>-1</sup>. A partir dessas curvas, determinou-se a influência dos parâmetros no processo, difusividade efetiva (variando de  $1,398 \times 10^{-11}$  a  $7,914 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e na energia de ativação ( $61,97 \text{ kJ mol}^{-1}$  a  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  e  $66,68 \text{ kJ mol}^{-1}$  a  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ).

Park, Yado e Brod (2001) trabalharam com pêra bartlett (*Pyrus* sp.) usando o secador convectivo de bandejas obtiveram as curvas de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s. Através destas curvas o estudo da secagem foi conduzido avaliando as difusividades efetivas e as energias de ativação. Os valores da difusividade aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem (estes valores

variam de  $5,564 \times 10^{-9}$  até  $1,370 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ), mostrando a diminuição das resistências internas de secagem com o aumento da temperatura.

Gouveia *et al.* (2002) estudaram a cinética de secagem de caju em um secador de leito fixo, utilizando um planejamento experimental. As temperaturas utilizadas foram de 35 a 65°C e as velocidades do ar de 0,9 a 1,9 m/s, formavam as variáveis do processo. Os pseudofrutos foram fatiados em pedaços circulares de aproximadamente 0,5 cm de espessura. Mediante análise de regressão, verificou-se efeito significativo da temperatura sobre a redução da razão de umidade do caju e, ainda, que o modelo quadrático foi o que melhor representou os dados experimentais, sendo a temperatura o fator controlador do processo.

El-Aquar e Azoubel (2002) avaliaram a cinética da secagem de mamão formosa utilizando o modelo difusional (Segunda Lei de Fick) adaptando uma geometria cúbica. O processo de secagem foi realizado nas temperaturas (40 e 60°C) e velocidades do ar (1,25 e 3,25 m/s). O aumento da temperatura favoreceu a diminuição do tempo de secagem do produto final. A velocidade do ar não exerceu praticamente influência alguma na cinética de secagem.

Honorato (2002) avaliou o mecanismo do processo difusional em sólidos (cefalotórax do camarão) usando a segunda Lei de Fick considerando o coeficiente de difusão constante. O material foi submetido à secagem em sistema de leito fixo com velocidade do ar e temperatura constantes, respectivamente 0,33 m/s e 60°C. O material foi disposto em bandejas com diversas espessuras em camadas dispersas e compactas. O coeficiente de difusão efetivo (Def) foi determinado para espessuras definidas. Em um leito compacto com espessura de 1,1 cm obteve-se um Def médio de  $3,6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  e quando esta espessura foi elevada para 2,8 cm este valor aumentou para  $7,8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Para o mesmo produto variando apenas a disposição do material na bandeja se obteve resultados, para a geometria esférica, da ordem de grandeza  $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Mason, Richard e Hess (1946) utilizaram três modelos distintos para o estudo da desidratação da banana com vários tipos de pré-tratamento e modelagem estatística. Foram feitas amostras sem tratamento, com branqueamento (3 min em água fervendo), resfriamento (a 0°C por 24 horas), congelamento (1 hora a -35°C e 24h a -18) e branqueados e congelados. Após o tratamento as bananas eram colocadas em bandejas e levadas para secar a uma temperatura de  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ , a umidade relativa do ar de secagem era de 10-35% e a velocidade de 3,1 m/s. As amostras eram secas até uma umidade final de 25% da umidade inicial. Os modelos utilizados foram, o modelo simples, onde as equações de difusão são calculadas pela segunda Lei de Fick. O modelo de Glenn, que propõe melhorar os modelos

de secagem utilizando uma parte das séries infinita derivada de uma solução geral da equação da difusão, este modelo assume que a difusividade é constante, não importando as condições limitantes e a geometria da partícula. E o modelo de Page é uma modificação empírica do modelo exponencial simples. Os melhores resultados foram obtidos com o modelo de Glenn, onde os resultados teóricos foram os mais condizentes com os dados reais obtidos.

Gouveia *et al.* (2005) estudaram, experimentalmente, a cinética de secagem do cajá (*Spondias lutea* L.), em um secador de leito fixo, utilizando temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C e velocidade do ar de secagem de 1,0 e 1,5 m/s. Foram utilizados frutos no estágio maduro proveniente do comércio local. De acordo com a análise dos dados, a cinética de secagem do cajá ocorreu no período de taxa decrescente sendo fortemente influenciada pela temperatura em relação à velocidade do ar do processo. As equações polinomiais encontradas ajustam-se eficientemente para valores dentro da faixa de temperatura e velocidade do ar estudada.

Murr, El-Aquar e Azoubel (2003) verificaram que a segunda Lei de Fick com ajustes propostos por Crank e Azuara foram suficientes para obtenção das difusividades estudadas para o mamão em cubos, tratados com duas soluções distintas de sacarose a 70°Brix, uma com a adição de lactato de sódio 2,4% p/p e ácido láctico 0,1M e a outra com lactato de sódio 2,4% p/p e ácido cítrico 0,1M. A razão fruta/solução foi de 1:10. O modelo difusional foi realizado para geometria cúbica, utilizando os primeiros 15 termos da série, sem considerar o encolhimento, o modelo mostrou um bom ajuste apenas para a amostra tratada com ácido cítrico. As difusividades para as amostras tratadas com ácido láctico e cítrico foram  $4,66 \times 10^{-10}$  e  $5,03 \times 10^{-10}$ , respectivamente. Constatou-se que a amostra que preservou melhor as características da fruta fresca foi a tratada com ácido láctico.

Gaspareto e Branco (2003) estudaram o comportamento reológico da mistura ternária de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura, nas temperaturas de 10 e 600 °C. As proporções dos componentes foram determinadas através da metodologia de superfície de resposta para mistura. As medidas experimentais foram realizadas no reômetro Haake Rotovisco RV-20 e as curvas de escoamento foram ajustadas ao modelo de Ostwald- De Waele. Os parâmetros reológicos foram utilizados como resposta no delineamento e verificou-se que os parâmetros índice de consistência e índice de comportamento do fluido, nas duas temperaturas, foram melhores ajustados com os modelos linear e quadrático, respectivamente.

Brizio *et al* (2005) estudaram a secagem de cebola para a busca de novos canais de comercialização, uma vez que é realizado o aproveitamento de bulbos considerados “fora do padrão” para a obtenção de um produto de maior valor agregado. Utilizou a secagem em leito

fixo com escoamento de ar reverso, para aumentar a produção de cebola (*Allium cepa* L.) desidratada, mantendo as características de cor, pungência e reidratação do produto final. As cebolas foram fatiadas na espessura de 3mm, dispostas em bandeja de tela perfurada, com carga de 22 kg, e inseridas no secador com escoamento de ar perpendicular, com reversão do sentido do escoamento a cada 10 minutos. A temperatura de secagem foi de 70°C na primeira hora e 60°C nas três horas subseqüentes, para obter um produto desidratado de 6-8% de umidade final (b.u.). A capacidade de produção final foi o dobro da obtida no secador em camada delgada, a pungência do material desidratado apresentou uma perda de aproximadamente 30% em relação à cebola *in natura*, e a cor apresentou-se similar à obtida em secadores tradicionais. Em relação ao produto reidratado, o valor de umidade final foi de 92% da umidade inicial.

Matias *et al.* (2005) realizaram o estudo de secagem dos bagaços de caju e de goiaba, visando sua utilização no enriquecimento de biscoitos. Determinou-se pH; sólidos solúveis, acidez total titulável, proteína, lipídios, fibras, cinzas, umidade e açúcares redutores e redutores totais. Foram realizadas também as contagens de coliformes totais e fecais e de bolores e leveduras. Adicionou-se aos biscoitos bagaços desidratados de caju e goiaba em percentuais de 5, 10 e 15%. Os atributos avaliados nos biscoitos com e sem adição de bagaços desidratados foram aparência, cor, odor, sabor e textura. Os resultados da caracterização físico-química foram coerentes com os da literatura consultada. As partículas retidas das peneiras entre 65 e 100 mesh foram consideradas as mais adequadas a serem incorporadas ao alimento. As formulações com 10% de bagaço desidratado de caju e 5% de bagaço desidratado de goiaba apresentaram os maiores índices de aceitabilidade com relação ao sabor, 84,9% e 81,8%, respectivamente. Através dos resultados experimentais determinou-se a difusividade efetiva para o bagaço de caju ( $2,8539 \times 10^{-9}$  e  $2,9890 \times 10^{-9}$ ) e goiaba ( $1,6211 \times 10^{-9}$  e  $2,1277 \times 10^{-9}$ ).

Almeida *et al.* (2006) estudaram a cinética de secagem de acerola em um secador de leito fixo com temperatura de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 e 1,5 m/s. De acordo com as análises dos dados, a cinética de secagem ocorreu no período de taxa decrescente, verificando-se influências das variáveis velocidade do ar de secagem e temperatura, no entanto, a temperatura foi o fator que apresentou maior influência.

Park *et al.* (2006) estudaram a inulina que é um oligossacarídeo encontrado em diversos produtos agrícolas, dentre os quais o alho, a banana, a alcachofra de Jerusalém e a raiz de chicória. Os experimentos constituíram-se na secagem das raízes fatiadas em um secador convectivo com fluxo do ar perpendicular, com base em um planejamento fatorial.

Pôde-se determinar a difusividade efetiva (variável dependente) para cada uma das combinações das variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar), sendo as curvas desses resultados ajustadas pela solução da segunda Lei de Fick e pelo modelo de Page. A difusividade efetiva variou de  $3,51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  até  $10,36 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Concluiu-se que, para a região de valores estudada, somente a temperatura do ar é estatisticamente significativa. Obteve-se, assim, um modelo matemático de primeira ordem, representando o comportamento da difusividade efetiva em função da temperatura do ar. A melhor condição de secagem obtida foi a que utiliza a maior temperatura de ar de secagem.

Park, Kurdzawa e Murr (2006) otimizaram o processo de desidratação osmótica de fatias de batata doce (*Ipomoea batatas*) usando a Metodologia de superfície de resposta (MSR). Foram analisadas as perdas de água (PA), o ganho de sólidos (GS) e a atividade de água ( $a_w$ ) durante desidratação osmótica de fatias de batata doce, tendo como variáveis independentes a temperatura da solução osmótica (30-50°C), a concentração de sacarose (40-60% p/p) e a concentração de sal (0-10% p/p). Equações de regressão quadráticas que descrevem o efeito das variáveis independentes do processo foram desenvolvidas. Foi verificado que as concentrações de sacarose e de sal seguidos da temperatura, em menor intensidade, foram os fatores mais significantes para a PA e para o GS durante a desidratação osmótica de batata doce. Os efeitos da concentração de sal e da concentração de sacarose foram mais pronunciados para  $a_w$  que a temperatura de solução. Aplicando a MSR encontrou-se que a condição ótima para a desidratação de fatias de batata doce foi de 40°C, 50% p/p de sacarose e 5% p/p de sal.

---

# Capítulo 5

## Materiais e métodos

---



## 5. Materiais e métodos

### 5.1 Matéria-prima

A matéria prima utilizada neste trabalho, fornecida pela indústria “Delícia da Fruta” em Natal/RN, foi o bagaço de cajá (*Spodias mombin*), este é rejeito do processamento da polpa de fruta. A Figura 14 descreve o processo de separação do bagaço da polpa de fruta, realizado na indústria.

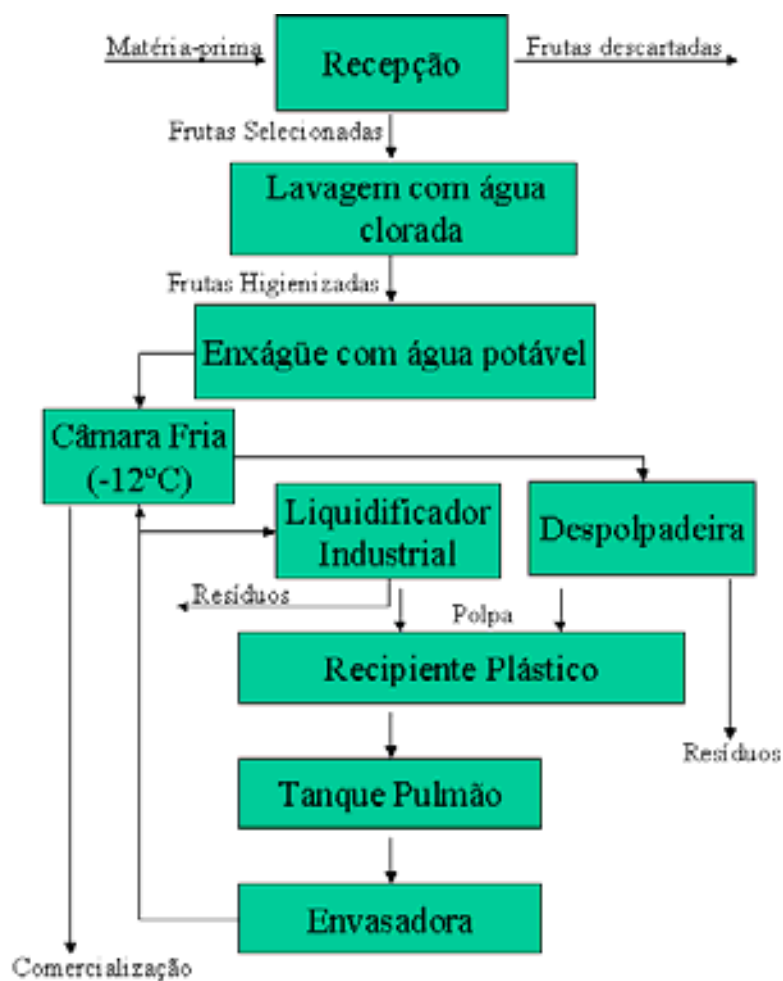


Figura 14 - Fluxograma do processamento da polpa de fruta.

A indústria, acima citada, forneceu dois lotes de bagaço de cajá, *in natura*, ambos com as mesmas características de grau de maturidade, consistência e cores semelhantes. Os mesmos foram acondicionados em sacos plásticos, pesados, lacrados e armazenados a  $-18^{\circ}\text{C}$  em *freezer* no Laboratório de Tecnologia de Alimento da UFRN. Para cada experimento de secagem, o bagaço era descongelado a temperatura ambiente (as condições de

descongelamento foram mantidas em todos os experimentos). As Figuras 15 e 16 mostram o fluxograma básico do procedimento utilizado na secagem e a matéria prima em processo de descongelamento.

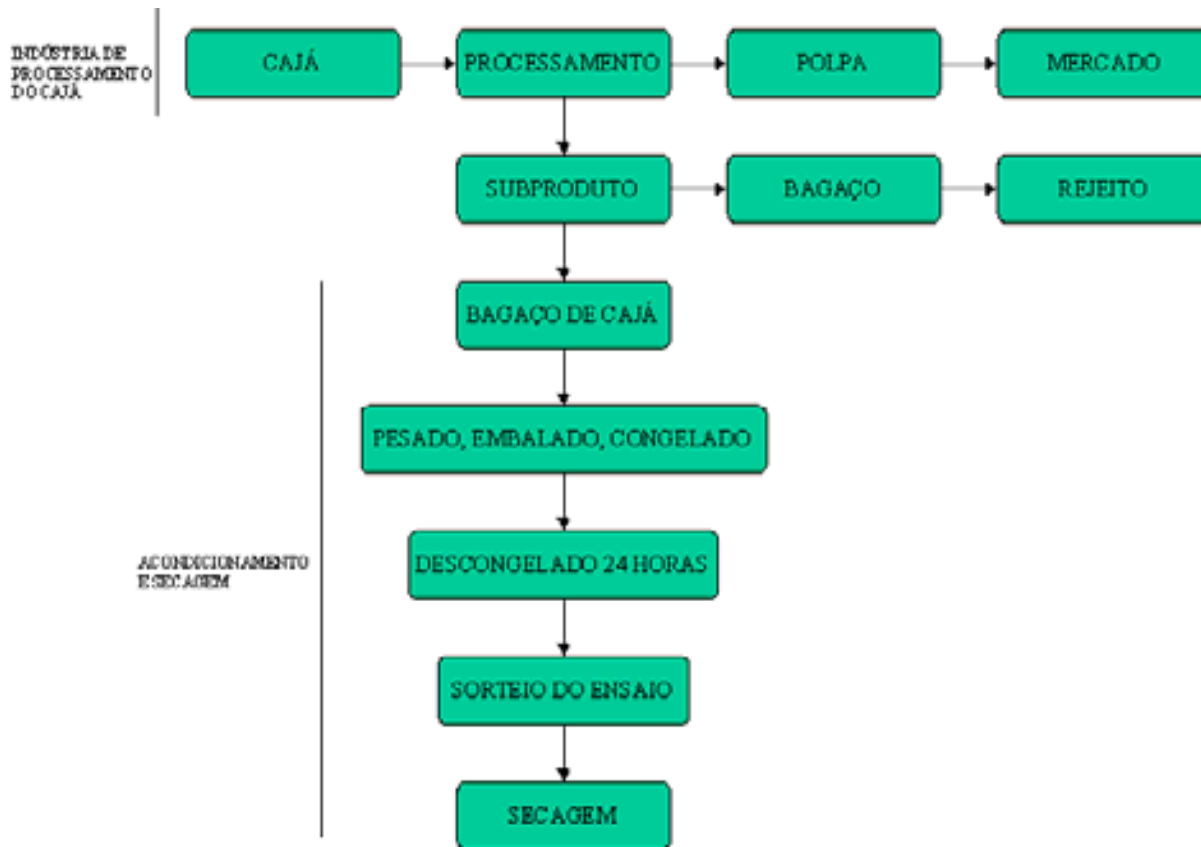


Figura 15 - Fluxograma básico do procedimento utilizado na secagem do bagaço de cajá.



Figura 16 - Bagaço de cajá *in natura* em processo de descongelamento.

## 5.2 Planejamento fatorial

Para o planejamento fatorial aplicado neste trabalho, com relação as análises estatísticas a serem efetuadas, foram definidas as variáveis dependentes: temperatura (T), velocidade (v) e espessura da torta ( $\delta$ ), objetivando o efeito das variáveis no processo de secagem com o mínimo de experimentos para determinar a variável de interesse – umidade em base seca ( $U_{BS}$ ). De modo que o planejamento empregado foi o fatorial  $2^3$  com cinco pontos centrais e sua extensão axial, totalizando 19 ensaios. A Tabela 04 apresenta os níveis para os fatores e seus valores codificados.

Tabela 04 - Níveis para os fatores e seus valores codificados para a secagem do bagaço de cajá.

Fator Nível	T (°C)	v (m/s)	$\delta$ (cm)
-1	55	3,2	0,8
0	65	4,6	1,2
+1	75	6,0	1,6

Na análise do planejamento experimental fatorial foi utilizado um pacote computacional STATISTICA *for Windows* versão 7.0.

## 5.3 Secagem

As amostras do bagaço de cajá foram retiradas do freezer e colocadas a temperatura ambiente por 24 horas, para que seu descongelamento ocorresse de forma homogênea. Estas amostras foram dispostas em camadas com 0,8 e 1,6 cm de espessura, em bandejas de alumínio perfuradas, e levadas ao secador convectivo por um período de 3 horas e 40 minutos, definido em estudo preliminar. Os experimentos foram realizados em secador convectivo usando uma bandeja, com amostra do material *in natura*. Apenas a parte fatorial do planejamento experimental foi utilizada para o procedimento de secagem que corresponde as seguintes condições de operação: a temperatura 55° e 75 °C e velocidade do gás de secagem 3,2 e 6,0 m/s, conforme Tabela 05.

Tabela 05 - Condições de operação dos experimentos.

Ensaio	T (°C)	v (m/s)	$\delta$ (cm)
01	55	3,2	0,80
02	75	3,2	0,80
03	55	6,0	0,80
04	75	6,0	0,80
05	55	3,2	1,60
06	75	3,2	1,60
07	55	6,0	1,60
08	75	6,0	1,60

As espessuras das bandejas, 1,6 e 0,8 cm, correspondem, respectivamente, a massa de 480 e 240 g do bagaço de cajá.

### 5.3.1 Equipamento de secagem

O sistema usado no processo de secagem, mostrado na Figura 17, é composto de um soprador de 4 cv que força uma corrente de ar através de uma caixa com quatro resistências (Figura 18), para aquecimento e redução da umidade relativa do gás de secagem. O gás quente introduzido no secador, em contato com o material na bandeja, é descartado para atmosfera pela parte superior do secador. A temperatura é controlada diretamente por termostato, ligado a uma resistência de 1000 W, que também determina a variação de temperatura admitida no sistema. O controle de velocidade do gás é regulado através de uma válvula de escape e uma válvula de admissão do ar disposta ao longo do sistema conforme Figura 17.

Para verificar a variação da temperatura ambiente, da bandeja e da saída do secador foram usados termômetros digitais. As umidades do ambiente e na saída do gás de secagem foram medidas através de um termohigrômetro. Também foram realizadas medidas de velocidade do gás, na saída do secador, com um anemômetro digital. E a variação da massa, no decorrer do tempo de processamento, foi determinada por uma balança com precisão de duas casas decimais e tolerância de  $\pm 0,04$  g.

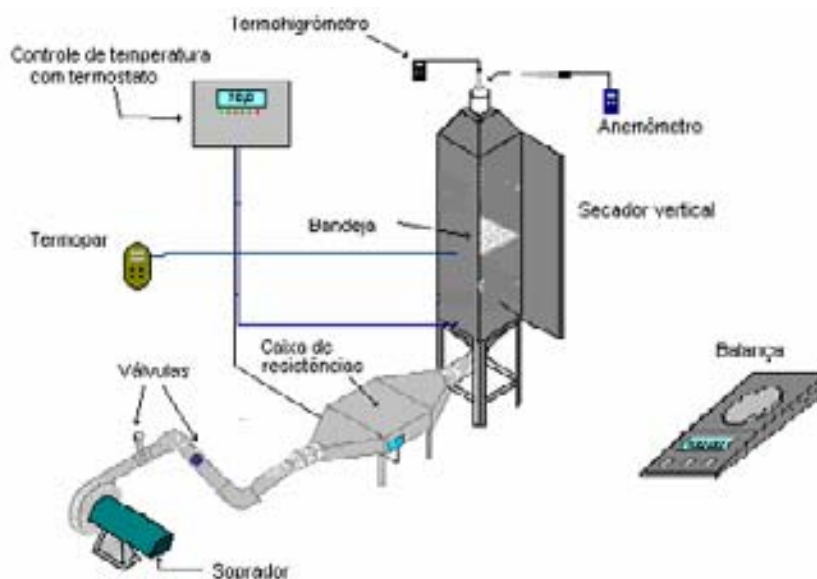


Figura 17 - Esquema do sistema de secagem - secador convectivo de bandejas.

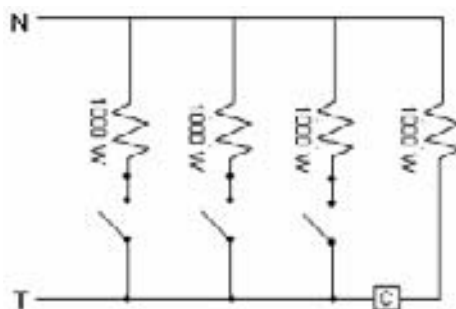


Figura 18 - Esquema de distribuição das resistências na fonte externa do secador.

### 5.3.2 Operação do equipamento

Para iniciar cada ensaio, ligava-se o soprador e em seguida o controlador de temperatura até que as oscilações da temperatura se estabilizem. A partir do planejamento experimental, sorteava-se um ensaio e preparava-se o equipamento em função dos parâmetros (temperatura, velocidade e espessura da bandeja) estabelecidos pelo mesmo. Em seguida, a bandeja era preparada com o material *in-natura* e posicionada no centro do secador, conforme Figura 17.

As medidas de temperatura, velocidade, umidade e perda de massa eram realizadas a cada 10 minutos na primeira hora, 15 minutos na segunda hora e 20 minutos até o tempo estabelecido do processo. Ao final da secagem o sistema era desligado, tomando-se o cuidado de desligar primeiro as resistências e depois o soprador. Após este procedimento, o material

seco era retirado do secador e levado para determinação do teor de umidade final, segundo as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985).

## **5.4 Métodos analíticos**

Todas as análises foram feitas, em triplicatas, para bagaço de cajá *in-natura*. Para o bagaço seco foi medido apenas o teor de umidade.

### **5.4.1 Análises físico-químicas**

Foram realizadas as seguintes análises para a caracterização físico-química do bagaço de cajá *in-natura*, segundo as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985):

- pH – diretamente no potenciômetro DIGIMED - DMPH – 2;
- Acidez total titulável utiliza-se uma solução de hidróxido de sódio (NAOH) a 0,1 ou 0,01 N;
- Sólidos solúveis (° Brix) medidos em refratômetro RL-2 NR-2720;
- Atividade de água medida no Aqualab;
- Teor de umidade em estufa com circulação de ar, até peso constante.

---

# Capítulo 6

## Resultados e Discussões

---

## 6. Resultados e discussões

### 6.1 Caracterização físico-química

A caracterização físico-química da matéria prima foi realizada em bagaço de cajá *in natura* e os resultados são apresentados na Tabela 06.

Tabela 06 - Resultados de análises físico-químicas para o bagaço de cajá *in-natura*.

Análises	Bagaço de cajá <i>in-natura</i>
Umidade b.u (%)	83,3
Atividade de água ( $a_w$ )	0,98
pH	3,1
Sólidos solúveis (°Brix)	11,2
Acidez total titulável mg Ac. Cítrico / 100 mg	1,5

Os resultados apresentados na Tabela 06 mostram que o bagaço do cajá apresentou teor de umidade e atividade de água elevada. Dessa forma, a secagem do produto garante um maior tempo de vida de prateleira, uma vez que a elevada atividade de água é propícia ao crescimento de microrganismos. O valor do pH e de acidez indicam que o produto apresenta caráter ácido. Comparando-se os valores da Tabela 06 com os valores da Tabela 01, constata-se que praticamente não existem variações significativas entre a fruta *in natura* e o bagaço.

Já o produto seco apresentou um teor de umidade de 18,9 %.

### 6.2 Secagem do bagaço de cajá

Neste trabalho estudou-se a cinética de secagem do bagaço de cajá, em secador de leito fixo, analisando-se a influência das variáveis operacionais: temperatura, velocidade do ar de secagem e espessura da torta.

As Figuras 19 e 20 mostram o comportamento cinético para as diferentes temperaturas 55 e 75 °C, respectivamente. Observa-se nas figuras acima que nem todos os ensaios foram até o período de taxa constante, portanto foi realizada uma extrapolação visual até taxa zero, nesses casos. As curvas de secagem comportaram-se similarmente, estas foram representadas na forma adimensional da razão de umidade,  $U^*$  em função do tempo. O processo de secagem ocorreu no período de velocidade decrescente para as condições estudadas.



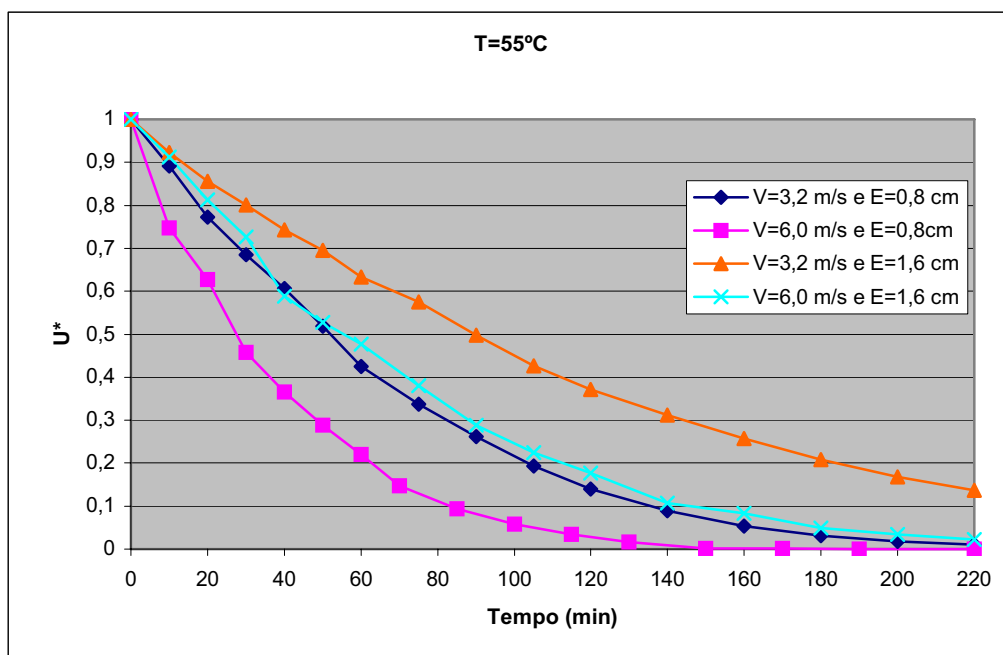


Figura 19 - Cinética de secagem do bagaço de cajá para duas espessuras e duas velocidades do ar de secagem a uma temperatura de 55°C.

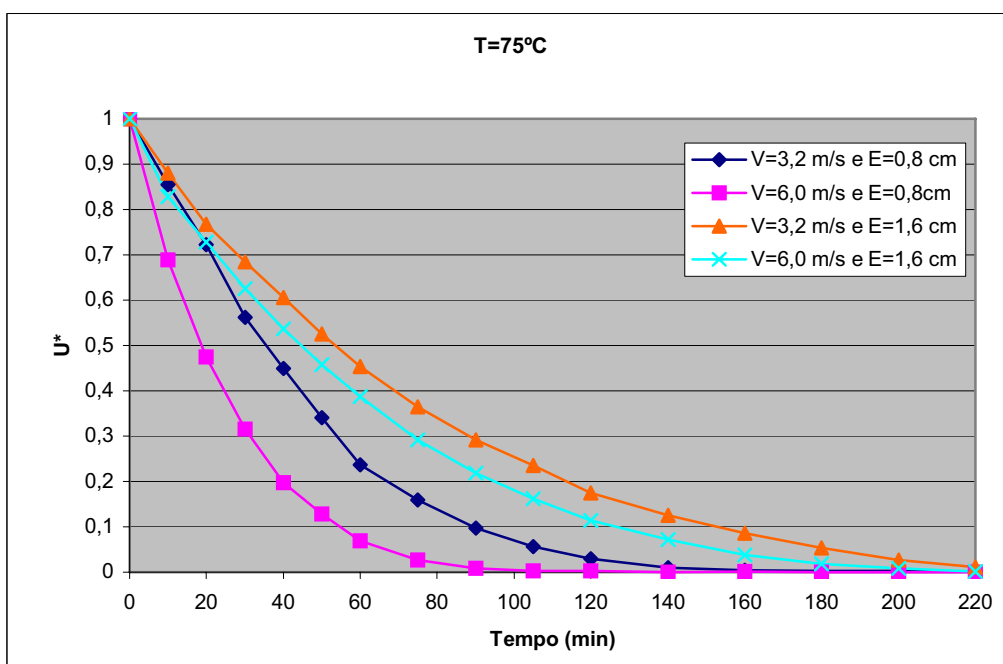


Figura 20 - Cinética de secagem do bagaço de cajá para duas espessuras e duas velocidades do ar de secagem a uma temperatura de 75°C.

Nas Figuras 19 e 20 pode se também que a velocidade de secagem aumenta quando a espessura do bagaço diminui, portanto o tempo de secagem foi inferior, para cada curva. Esta

depende da velocidade do ar de secagem e da temperatura. Verifica se também que a velocidade do ar de secagem tem menor influência no processo, Figura 21 e 22, mas que o controle da secagem depende da difusão interna do material. Por outro lado, pode-se concluir que a temperatura e a espessura da bandeja são as variáveis de maior influência neste processo, nas condições de operações realizadas.

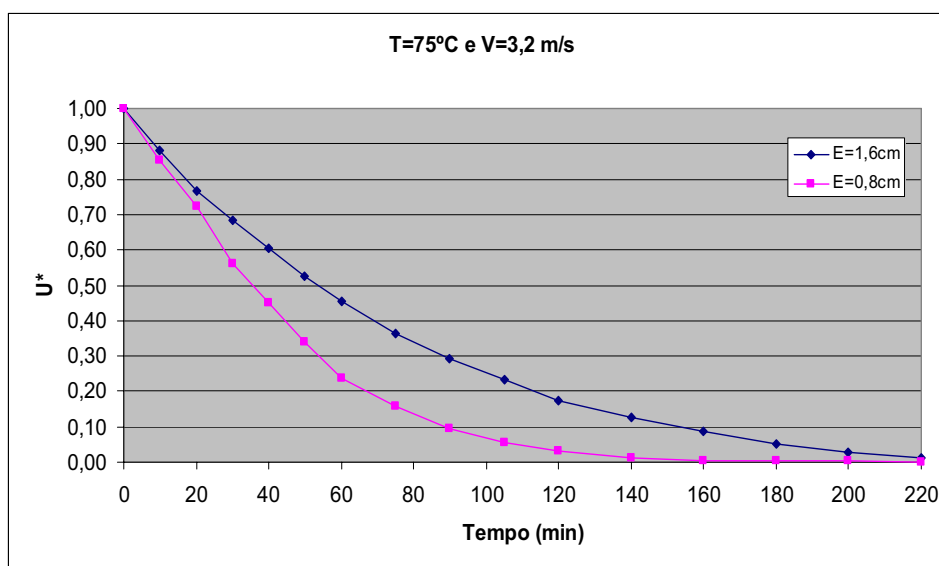


Figura 21 - Razão de umidade em função do tempo com espessura variável.

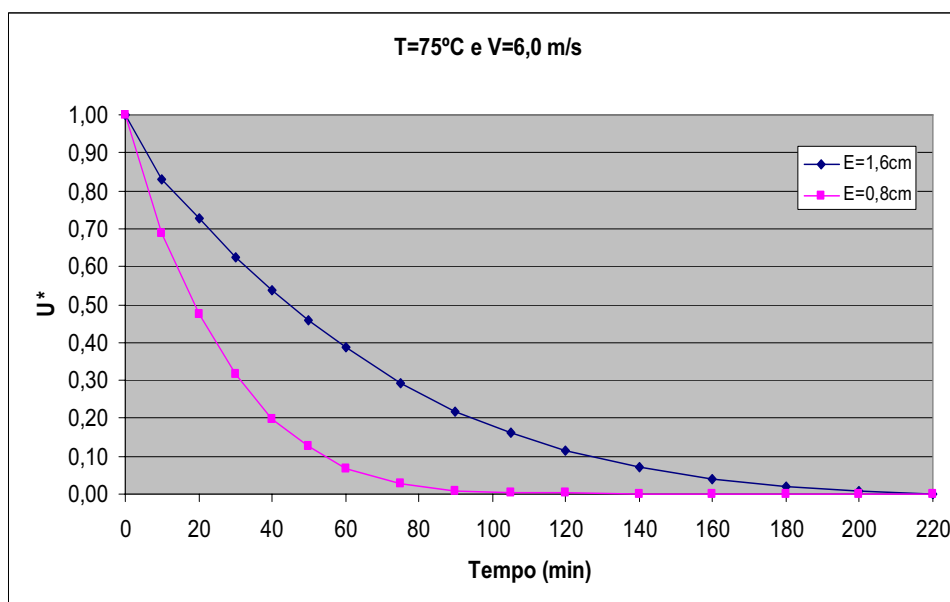


Figura 22 - Razão de umidade em função do tempo com espessura variável.

Analisando ainda as Figuras 19 e 20, a perda de umidade no material é bem mais rápida no início do processo de secagem, em 60 minutos de secagem à temperatura de 55 °C a

razão de umidade foi de 0,22 enquanto que na temperatura de 75 °C foi de 0,07. Moura *et al* (2001) também encontraram resultados semelhantes ao afirmarem que o tempo gasto para secar caju em temperaturas mais baixas (35 e 40 °C) foi o dobro do tempo utilizado em temperatura mais elevada (65 °C) que foi de 6 h.

De acordo com as Figuras 19 e 20, para algumas condições operacionais, as umidades de equilíbrio não foram atingidas nos 220 minutos de processo. Esta mesma característica foi encontrada por Sankat *et al* (1996) ao tratar fatias de banana.

Com base na linearização das curvas das Figuras 19 e 20 foram calculadas as constantes de secagem como mostra a Figura 23.

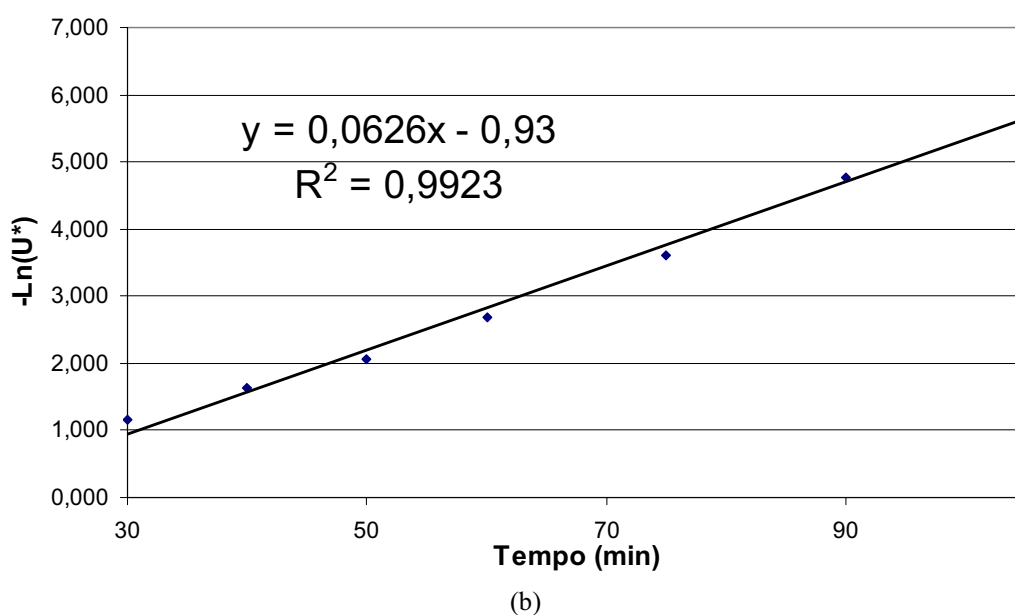
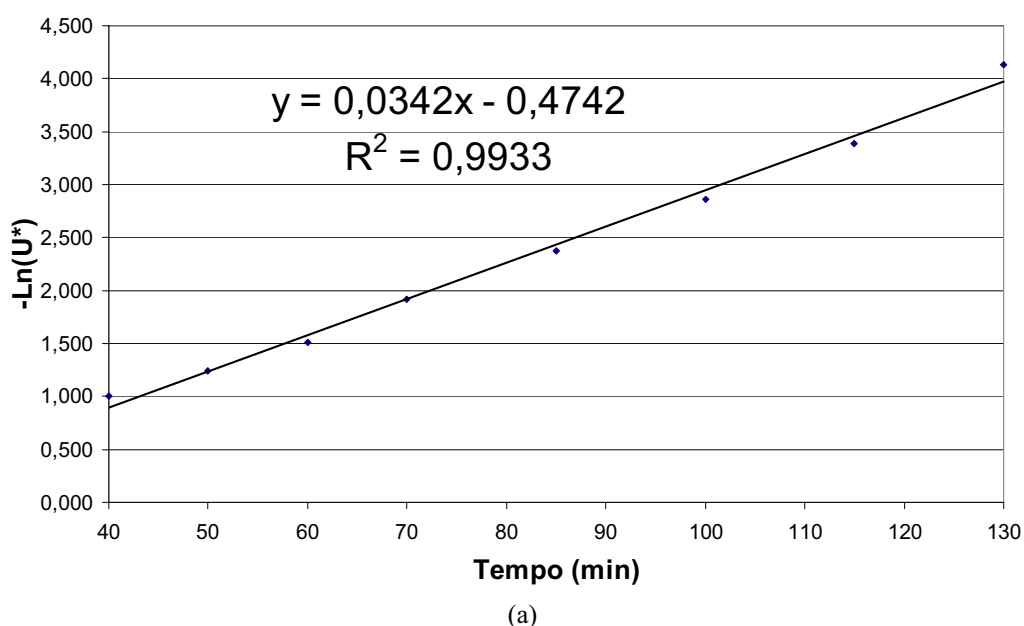


Figura 23 –  $\ln(U^*)$  em função do tempo de secagem (espessura de 0,8 cm, velocidade de 3,2 m/s e temperatura de 55 °C (a) e 75°C (b)).

A partir de gráficos como o da Figura 23, determinaram-se os parâmetros do processo que são mostrados na Tabela 07.

Tabela 07 - Resultados obtidos do modelo difusional da cinética de secagem do bagaço de cajá para o período de velocidade decrescente.

Ensaio	Condições	k (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	Difusividade x 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> /s)
01	T=55°C; V=3,2 m/s; E=0,8 cm	0,0250	0,9964	2,70464
02	T=75°C; V=3,2 m/s; E=0,8 cm	0,0375	0,9864	4,05696
03	T=55°C; V=6,0 m/s; E=0,8 cm	0,0342	0,9933	3,69995
04	T=75°C; V=6,0 m/s; E=0,8 cm	0,0626	0,9923	6,77242
05	T=55°C; V=3,2 m/s; E=1,6 cm	0,0098	0,9992	4,24088
06	T=75°C; V=3,2 m/s; E=1,6 cm	0,0182	0,9942	7,87591
07	T=55°C; V=6,0 m/s; E=1,6 cm	0,0195	0,9973	8,43848
08	T=75°C; V=6,0 m/s; E=1,6 cm	0,0221	0,9906	9,56361

O coeficiente linear “B” foi característico de uma placa plana para algumas amostras estudadas. O modelo difusional da Equação 24 descreve satisfatoriamente o processo experimental com R<sup>2</sup> superior a 98,0%, portanto permite a determinação das constantes de secagem para as condições operacionais de trabalho. Observa-se também, que os valores da constante de secagem indicam que a temperatura e a espessura tem pouca influencia na cinética de secagem do produto. Para cada condição, conforme a Tabela 07, verifica-se que, quanto maior a espessura da torta menor é a constante de secagem devido a maior espessura dificultar a transferência da umidade interna no material.

Resultados similares foram encontrados por Matias *et al* (2004) que mostraram valores da constante de secagem entre  $1,62 \times 10^{-9}$  a  $2,99 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, estudando a secagem do bagaço de caju e goiaba à temperatura de 55 e 65°C.

### 6.3 Análise dos ensaios de secagem através do planejamento experimental

A análise dos resultados obtidos para a temperatura, velocidade e espessura, tendo como resposta a umidade em base seca, foi realizada através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “Statistica” versão 7.0 de acordo com o planejamento fatorial completo 2<sup>3</sup> com cinco repetições no ponto central e extensão axial, cuja a matriz do planejamento é apresentada na Tabela 08.

Tabela 08 - Planejamento composto central com matriz das variáveis independentes codificadas e reais e, variável resposta para os ensaios de secagem.

Ensaio	T <sub>Codificada</sub>	T <sub>Real</sub>	V <sub>Codificada</sub>	V <sub>Real</sub>	$\delta$ <sub>Codificada</sub>	$\delta$ <sub>Real</sub>	U <sub>Final(bs)</sub>
01 (01)	-	55	-	3,2	-	0,80	0,099
02 (17)	+	75	-	3,2	-	0,80	0,009
03 (16)	-	55	+	6,0	-	0,80	0,120
04 (04)	+	75	+	6,0	-	0,80	0,013
05 (14)	-	55	-	3,2	+	1,60	0,800
06 (13)	+	75	-	3,2	+	1,60	0,215
07 (15)	-	55	+	6,0	+	1,60	0,205
08 (05)	+	75	+	6,0	+	1,60	0,048
09 (11)	0	65	0	4,6	0	1,20	0,044
10 (06)	0	65	0	4,6	0	1,20	0,016
11 (09)	0	65	0	4,6	0	1,20	0,025
12 (03)	0	65	0	4,6	0	1,20	0,017
13 (08)	0	65	0	4,6	0	1,20	0,008
14 (10)	-	55	0	4,6	0	1,20	0,306
15 (12)	$\alpha$	81,8	0	4,6	0	1,20	0,055
16 (19)	0	65	-	3,2	0	1,20	0,202
17 (18)	0	65	$\alpha$	6,952	0	1,20	0,048
18 (07)	0	65	0	4,6	-	0,80	0,014
19 (02)	0	65	0	4,6	$\alpha$	1,87	0,678

### 6.3.1 Análise dos Efeitos

A Tabela 09 e Figura 24 apresentam os efeitos principais e de interação das variáveis independentes, tendo como resposta à umidade em base seca para um modelo quadrático, considerando as interações entre as variáveis com um limite de confiança de 95%. Os dados foram obtidos considerando o erro puro. Conforme mostra o gráfico de Pareto (Figura 24) que envolve a variável temperatura (T), velocidade (v), espessura ( $\delta$ ) e a interação entre elas, os efeitos foram estatisticamente significativos sobre a variável resposta, umidade em base seca (U<sub>BS</sub>).

Tabela 09 - Efeitos estimados do planejamento composto central.

Efeitos Estimados; $R^2=0,92195$ ; Ajuste: 0,8439					
MS Erro Puro =0,0001875					
	Desvio Padrão		t(4)	p	Limite de Confiança $\pm 95, \%$
	Efeito	Erro Puro			
<b>Média/Interação</b>	0,035094	0,005735	6,1192	0,003612	(0,019171; 0,051016)
Temperatura (T) L	-0,234641	0,013336	-17,5944	0,000061	(-0,271668; -0,197614)
Temperatura (T) Q	0,180379	0,016877	10,6878	0,000434	(0,133521; 0,227238)
Velocidade (V) L	-0,222655	0,013336	-16,6957	0,000075	(-0,259682; -0,185628)
Velocidade (V) Q	0,080292	0,016877	4,7574	0,008922	(0,033433; 0,127150)
Espessura ( $\delta$ ) L	0,430671	0,013336	32,2937	0,000005	(0,393644; 0,467698)
Espessura ( $\delta$ ) Q	0,374427	0,016877	22,1854	0,000024	(0,327568; 0,421285)
T e V	0,184498	0,017386	10,6120	0,000446	(0,136227; 0,232769)
T e $\delta$	-0,244651	0,017386	-14,0718	0,000148	(-0,292921; -0,196380)
V e $\delta$	-0,353284	0,017386	-20,3203	0,000035	(-0,401555; -0,305014)

Observa-se na Tabela 09 que o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  foi de aproximadamente 92%, indicando que um modelo quadrático representa bem a relação entre os efeitos e a resposta. Entretanto, para se conhecer se o modelo quadrático proposto possui significância estatística e se é útil para fazer previsão deve-se fazer uma análise de variância (ANOVA).

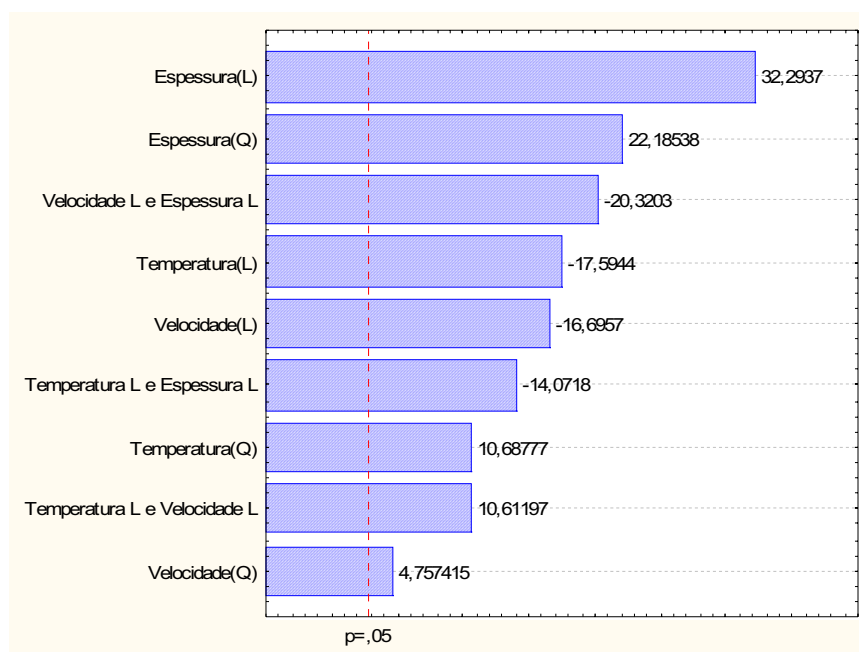


Figura 24 - Diagrama de Pareto do planejamento composto central mostrando a influência dos fatores estudados.

A Figura 24 mostra o diagrama de Pareto, uma das formas de se avaliar visualmente a influência dos fatores estudados na resposta. A magnitude dos efeitos é representada pelas colunas enquanto que a linha transversal às colunas representa a magnitude dos efeitos com significado estatístico para  $p=0,05$ , ou seja, os fatores que são estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

Analisando-se a Figura 24 observa-se que o fator espessura ( $\delta$ ) foi o que influenciou de forma mais significativa atingindo um efeito estimado de aproximadamente 32,3. Uma possível explicação para que a espessura tenha sido a variável de maior influência deve-se ao fato do tempo de secagem ter sido fixo em 220 minutos. O sinal positivo indica que a diminuição da espessura da torta facilita a secagem do bagaço de cajá. Uma possível explicação para essa facilidade seria uma menor resistência para a transferência de calor e massa ao se utilizar uma torta de menor espessura. Destaca-se que, como os efeitos principais e de interação foram significativos, não se deve analisar as variáveis independentes isoladamente. Os resultados apresentados pelo planejamento composto central estão em concordância com a cinética do processo.

De acordo com a Tabela 09 e partindo-se dos efeitos significativos propõe-se o modelo:

$$\hat{y} = 0,04 - 0,46T - 0,44v + 0,86\delta + 0,36T^2 + 0,16v^2 + 0,74\delta^2 + 0,36Tv - 0,48T\delta - 0,70v\delta$$

A síntese dos resultados da análise de regressão para todas as variáveis respostas analisadas é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da análise de regressão para temperatura, velocidade e espessura.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F
Regressão	0,838297	9,00	0,0931	11,95
Resíduos	0,070154	9,00	0,0078	74,03
Falta de Ajuste	0,069404	5,00	0,0139	
Erro Puro	0,000750	4,00	0,0002	
Total	0,908451	18,00		

A análise da ANOVA mostra que o modelo proposto possui significância estatística, ao nível de 95% de confiança, uma vez que o valor de F (calculado) é 3,8 vezes maior que F (tabelado) = 3,18. Entretanto a ANOVA mostra também que o modelo proposto não é útil para fazer previsões, uma vez que a relação entre F (calculado) e F(tabelado) para a falta de ajuste e o erro puro é muito maior que 1, na ordem de 11,83 vezes. O coeficiente de

determinação  $R^2$  foi de aproximadamente 92%, indicando que o modelo consegue explicar 92% da variação total em torno da média.

A avaliação do modelo também pode ser feita através da observação do gráfico dos valores preditos versus os valores observados que são mostrados na Figura 25. Os valores preditos pelo modelo são representados pela reta, enquanto que os valores observados representam-se pelos pontos. Salienta-se que, embora o modelo não seja preditivo, os valores preditos se aproximam dos valores observados.

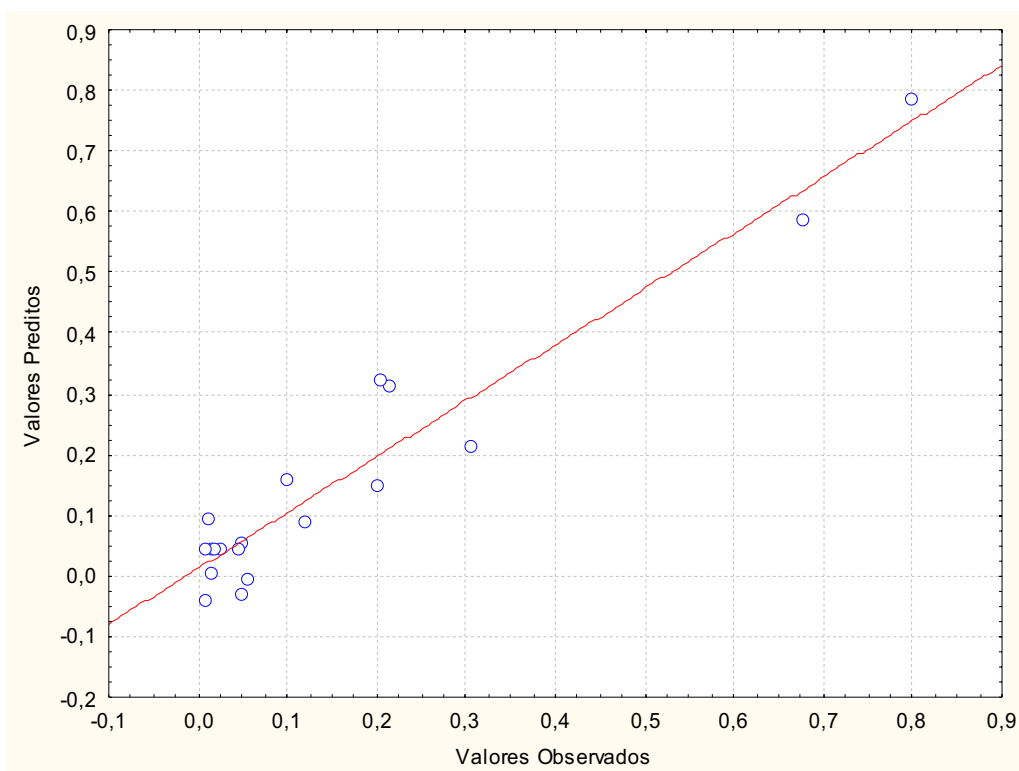


Figura 25 - Valores observados versus valores preditos para a umidade em base seca do processo de secagem do bagaço de cajá.

Observando as superfícies de respostas obtêm-se também indícios que um modelo quadrático parece representar bem a relação entre a resposta ( $U_{bs}$ ) e os fatores estudados. A Figura 26 mostra a superfície de resposta para a umidade em base seca em função da temperatura (T) e velocidade (v) para o bagaço de cajá no ponto central.



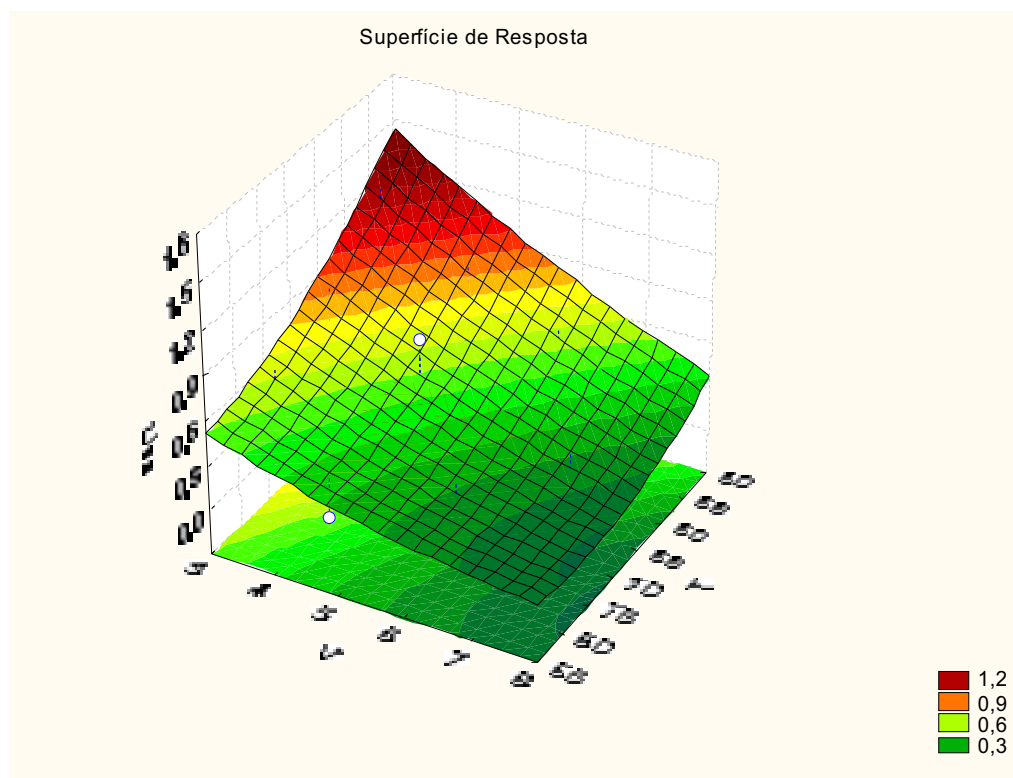


Figura 26 - Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da temperatura (T) e velocidade (v) para o bagaço de cajá no ponto central - espessura.

A Figura 26 mostra que a velocidade de secagem para o bagaço de cajá aumenta com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem onde a umidade ótima, em base seca, aproxima-se de 0,3 (kg de  $H_2O$ /kg de sólido seco).

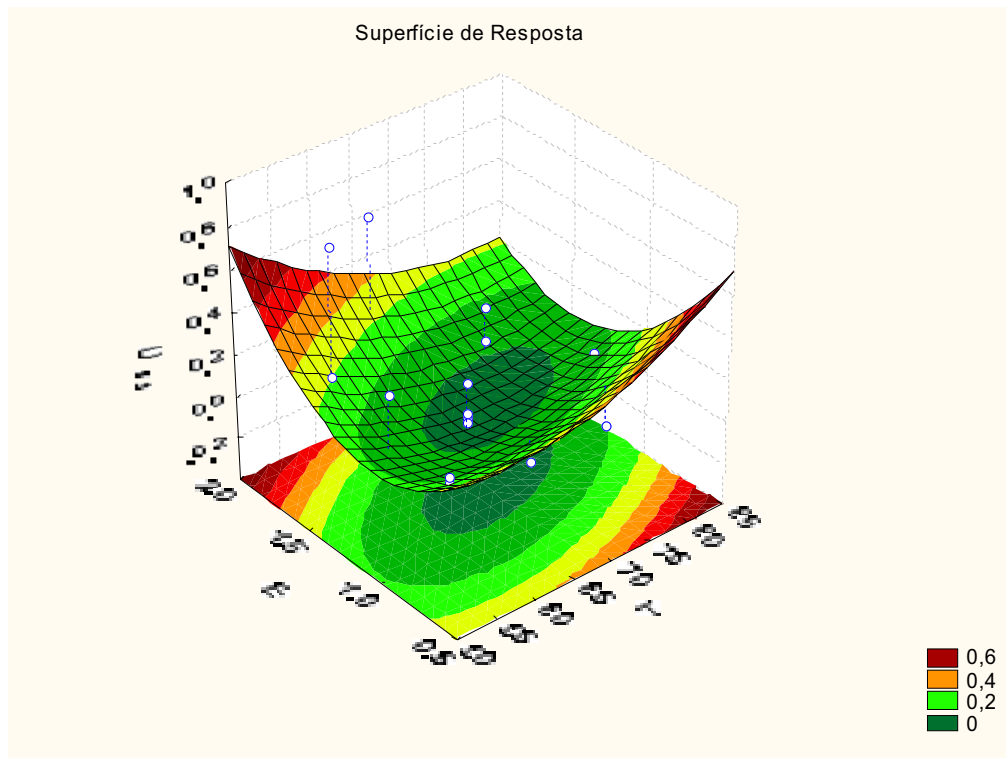


Figura 27 - Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da espessura (E) e temperatura (T) para o bagaço de cajá no ponto central - velocidade.

A Figura 27 ilustra a região ótima para a redução de umidade do bagaço de cajá em função da temperatura e espessura, no ponto central. Observa-se que o ponto ótimo para a secagem do bagaço foi com uma temperatura de 75 °C e uma espessura de 0,8 cm.

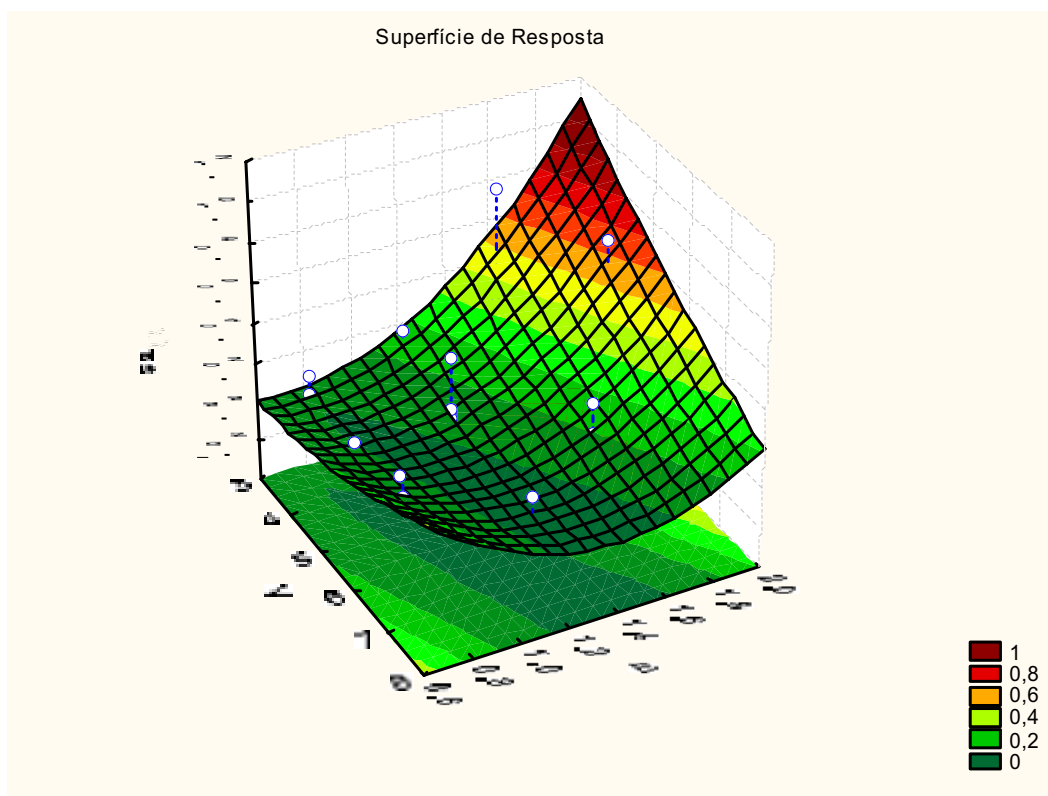


Figura 28 - Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) em função da espessura (E) e velocidade (v) para o bagaço de cajá no ponto central - temperatura.

A Figura 28 mostra que a secagem do bagaço de cajá com uma espessura da torta menor e uma velocidade maior tende a atingir uma umidade de aproximadamente 0,2 (kg de  $H_2O$ /kg de sólido seco).

Estes resultados mostram que a melhor condição para se a secagem do bagaço de cajá foi com temperatura de 75°C, velocidade de 6,0 m/s e espessura da torta de 0,8 cm para o tempo de 220 minutos.

---

# Capítulo 7

## Conclusões

---

## 7. Conclusões

A seguir apresentam-se as principais conclusões.

- **Com relação à secagem:**

1. O modelo difusional ajustou bem os resultados experimentais da secagem do bagaço de cajá quando foram utilizadas temperaturas de 55 e 75°C, velocidade de 3,2 e 6,0 m/s e espessura do leito de 0,8 e 1,6 cm com tempo de 220 minutos.
2. Os resultados mostraram que o modelo difusional baseado em Fick descreve bem o processo de secagem e que a melhor condição foi com a temperatura de 75°C, velocidade do ar de secagem de 6,0 m/s e espessura da torta de 0,8 cm onde a constante de secagem calculada foi de  $6,772 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .
3. Observou-se que o processo ocorreu no período de velocidade de secagem decrescente não sendo observado período de velocidade de secagem constante.

- **Com relação ao planejamento composto central:**

4. Observou-se que todos os efeitos principais e suas interações foram significativos, ao nível de 95% de confiança.
5. Neste caso, o fator mais significativo foi a espessura da torta, seguida da temperatura e velocidade do ar de secagem.
6. O modelo quadrático ajustou bem os dados experimentais com  $R^2 = 92\%$ . O modelo mostrou significância estatística, porém não é preditivo.
7. A análise da superfície de resposta mostrou que a melhor condição para a secagem do bagaço de cajá foi com temperatura de 75°C, velocidade de 6,0 m/s e espessura da torta de 0,8 cm para o tempo de 220 minutos.

---

Capítulo 8  
Referências Bibliográficas

---

## 8. Referências bibliográficas

AJAO, A.; SHONUKAN, O.; FEMI-ONADEKO, B. Antibacterial effect of aqueous and alcohol extracts of *Spondias mombin* and *Alchornea cordifolia* - two local antimicrobial remedies. *International Journal of Crude Drug Research*, v. 23, p.67-72, 1985.

ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A.; SILVA, L. F. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 6, n.1, 2006.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. *Planejamento e otimização de experimentos*. Editora da Unicamp, Campinas, 1995.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statistics for experiments as introduction to design, data analysis and model building*. New York: John Wiley and Sons, p.510-539, 1978.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C. A. *Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo do efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 23(Supl): 166-171, dez. 2003.

BRASIL, J. L.; VAGHETTI, J. C. P.; ROYER, B.; SANTOS, A. A.; SIMON, N. M.; PAVAN, S. A.; DIAS, S. L. P.; LIMA, E. C. *Planejamento estatístico de experimentos como uma ferramenta para otimização das condições de bio sorção de Cu(II) em batelada utilizando-se casca de nozes pecã como bio sorvente*. *Química Nova*, Vol. 30, No. 3, 548-553, Porto Alegre, 2007.

BRITO, E. S.; PINTO, G. A. S.; BRUNO, L. M.; AZEREDO, H. M. C. *A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) na otimização de processos biológicos: A determinação dos valores de Ph e temperatura ótimos para a atividade enzimática*. Embrapa Agroindústria Tropical, 2003.

BRIZIO, A. P. R.; WESKA, R. F.; RIZZI, J. e PINTO, L. A. A. *Secagem de cebola (allium cepa l.) em leito fixo utilizando escoamento de ar reverso*. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, UNICAMP, 2005.

CORTHOUT, J.; PIETERS, L.; CLAEYS, M.; VANDEN BERGHE, D.; VLIETINCK, A. Antiviral caffeoyl esters from Spondias mombin. *Phytochemistry*, v.31, n.6, p.1979-1981, 1992.

CRANK, J. A. *The mathematics of diffusion*. 2 ed. Oxford: University Press. 1975, 414 p.

EL-AQUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p.102-107, 2002.

FIGUEIRA, G. M. *Desenvolvimento Agrotecnológico da espécie Cichorium Intybus L.* Unicamp, Campinas, 2000.

GASPARETO, C. A.; BRANCO, I.G. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo do efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 23 (Supl), 166-171, dez, 2003.

GASPARETO, O.C.P. *Secagem osmo-convectiva de banana nanica (Musa Cavendishii, L.), mamão formosa (Carica Papaya, L.) e jaca (Artocarpus Integrifolia, L.)*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2005, 119f..

GOMES, Raimundo Pimentel. *Fruticultura brasileira*. São Paulo: Nobel, 1972.

GOUVEIA, J. P. G.; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, A. M. V. O.; SILVA, M. M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. *Revista Bras. Eng. Agr. e Amb.*, v.6, n.3, p.471-474, 2002.



GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; FARIAS, E. S.; SILVA, M. M.; CHAVES, M. C. V.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, Especial, n.1, p. 65-68, 2005.

HONORATO, G.C. *Aproveitamento do Cefalotórax de Camarão na Produção de Farinha para Complemento Alimentar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2002, 87f.

<http://www.cnpat.embrapa.br/2000>.

KEEY, R. B. Tópicos em transferência de calor e massa. *Avanços em cinética de secagem*, 1997.

KHURI, A.I. and CORNELL, J.A. *Response Surfaces: Designs and Analyses*. Marcel Dekker, Inc, 1987.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. In: *The Symposium on Drying*. The Journal of I. & Engineering Chemical, v.13, n.5, p.427-432,1921.

MASON, R. L.; RICHARD, F. G.; HESS, J. L. *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science*. Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics, 1946.

MATIAS, M. F. O.; OLIVEIRA, E. L.; GERTRUDES, E.; MAGALHÃES, M. M. A. Use of fibres obtained from the cashew (*anacardium occidentale* L) and guava (*psidium guayava*) fruits for enrichment of food products. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v.48, Special n., p. 143-150, jun, 2005.

MATOS, F.J.A. Cajazeira *Spondias mombin* Jacq. (Anacardiaceae) In: MATOS, F.J.A. *Farmacia viva: sistema de utilização de plantas medicinais projetado para pequenas comunidades*. 2. ed. Fortaleza: EUFC, 1994. p.67-68.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. N. York: Wiley, 1984.

MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M.; FIGUEIREDO NETO, A. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de caju. Anais...In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Pelotas, 2001.

MURAYAMA, Shizuto (1973). *Fruticultura*. (2 ed.). Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola.

MURR, F. E. X.; EL-AQUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p.085-091, 2003.

NEVES, C. F. C.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; Jordão, E.; *Quim Nova*, 25, 327, 2002.

NORMAS ANALÍTICAS DO INSTITUTO ADOLFO LUTZ. *Métodos químicos e físicos para análise de alimentos*. 3 ed. São Paulo – SP, 1985.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. *Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, jan./abr. 2006.

PARK, K. J.; OLIVEIRA, W. P.; OLIVEIRA, R. *Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, jan/abr, 2006.

PARK, K.J.; SANDRINI, D.; BROD, F. P.R. *Avaliação dos parâmetros de secagem da melissa (melissa officinallis l.)*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.20, n.2, p.179-187, mai. 2000.

PARK, K. J.; KURDZAWA, L. E.; MUR, F. E. Otimização da desidratação osmótica de batata doce utilizando metodologia de superfície de resposta. *Brz. J. Food Thecnol.*, v.9, n.2, p.135-141, abr/jun, 2006.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P.R. Estudo da secagem de pêra bartlett (pyrus sp.) em fatias. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 21(3), 288-292, set/dez, 2001.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Manual de Engenharia Química*, 5 ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980.

SACRAMENTO, C.K., SOUZA, F.X. *Cajá (Spondias mombin L.)*. Jaboticabal: Funep, 2000. 42p. (Funep.Série Frutas Nativas, 4).

SANKAT, C.; CASTAIGNE, F.; MAHARAJ, R. The Air Drying Behaviour of fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices. *International Journal of Food Science and Technology*, v.31, p.123-135, 1996.

SHERWOOD, T. K. Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids. *Transation Am. Inst. Chemical Engineering*, v.27, p. 310-333, 1931.

SOUZA, F. X.; ARAÚJO, C. A. T. *Avaliação dos métodos de propagação de algumas Spondias agroindustriais*. Fortaleza: Embrapa-CNPAT, 1999. p. 1-4 (Comunicado técnico, 31).

SOUZA, J. S. Estudo da desidratação de tomates (*Lycopersicum esculentum*) em pedaços com pré-tratamento osmótico. Junho/2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN.

STRUMILLO, C.; KUDRA. *Topics in Chemical Engineering; Drying: principles, applications and design*. Gordon and Breach Science Publishers S. A., 1986.

VIEIRA, S. *Estatística experimental*. 2 ed. São Paulo, Atlas, 1999.

VOET, J.; VOET, D. *Biochemistry*. John Wiley & Sons, New York, 2001.