



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



Centro de Ciências
e Tecnologia

DISSERTAÇÃO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE CAJU (*Anacardium*
occidentale L.) EM UM SECADOR DE LEITO FIXO**

RODRIGO SÉRGIO FERREIRA DE MOURA

Campina Grande - Paraíba
MARÇO - 2001

RODRIGO SÉRGIO FERREIRA DE MOURA

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE CAJU (*Anacardium occidentale* L.) EM
UM SECADOR DE LEITO FIXO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

Orientadores: Prof^ª Dr^ª Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia – DEAg/CCT/UFPB

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida – DEAg/CCT/UFPB

CAMPINA GRANDE – PB

2001

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

M929e Moura, Rodrigo Sérgio Ferreira de
2001 Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium
occidentale* L.) em um secador de leito fixo/ Rodrigo Sérgio
Ferreira de Moura . – Campina Grande: UFPB, 2001.
80p.

Dissertação (mestrado) – UFPB, CCT
Inclui bibliografia

1. Cinética de Secagem 2. Caju 3. Planejamento
Experimental I. Título.

CDU: 664.8.047

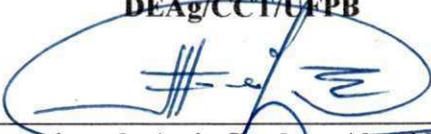
RODRIGO SÉRGIO FERREIRA DE MOURA

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE CAJU (*Anacardium occidentale* L.) EM
UM SECADOR DE LEITO FIXO**

Aprovada em 16.03.2001

BANCA EXAMINADORA

Josivanda P. Gomes de Gouveia
Prof^a Dr^a Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia – Orientadora
DEAg/CCT/UFPB


Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida – Orientador
DEAg/CCT/UFPB


Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva – Examinador
DEQ/CCT/UFPB

Mônica E. Torres Prado
Prof^a Dr^a Mônica Elizabeth Torres Prado – Examinadora
DCA/UFLA

Aos meus pais, irmãos, avós, tios e primos,

Aos meus amigos,

A todos que lutam por um Brasil melhor,

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça concedida de continuar na caminhada, olhando de frente para os desafios e buscando a sua iluminação.

Aos Professores Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia e Francisco de Assis Cardoso Almeida, pelas orientações e ensinamentos concedidos durante todo o curso, e pela atenção e simplicidade.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior, pela bolsa de estudos concedida como forma de investimento em novos profissionais.

Aos Professores Flávio Luiz e Odelsia Sanchez, pelo apoio despendido na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química: Nogueira e José Lopes.

Aos amigos Waldemir Soares, Fábila, Josalice, Elessandra, Manassés, Rivanilda, Aldaniza, Prof. José Dantas Neto, Prof. Juarez Pedroza e todos aqueles que contribuíram durante a minha estada no Mestrado.

A todos os alunos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelo apoio e sincera amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 – INTRODUÇÃO	15
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 – O Cajueiro	17
2.2 – Isoterma de Sorção	19
2.2.1 – Modelos Matemáticos para Ajuste das Isotermas	22
2.3 – Secagem	26
2.3.1 – Período de Secagem à Taxa Constante	27
2.3.2 – Período de Secagem à Taxa Decrescente	28
2.3.3 – Secadores de Leito Fixo	31
2.4 – Planejamento Experimental e Metodologia de Superfícies de Resposta ..	32
3 – MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 – Local de Trabalho e Matéria-prima	36
3.2 – Determinação do Conteúdo de Umidade	37
3.3 – Isotermas de Dessorção	38
3.3.1 – Ajuste dos Modelos	39
3.4 – Planejamento Experimental	40

3.5 – Curvas de Secagem	44
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 – Isotermas de Dessorção do Caju	47
4.2 – Cinética de Secagem	53
4.3 – Planejamento Experimental	55
5 – CONCLUSÕES	67
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
7 – APÊNDICE A	76
8 – APÊNDICE B	77

LISTA DE FIGURAS

1 –	Pseudofrutos do cajueiro - o caju (<i>Anacardium occidentale</i> , L.), da “variedade” vermelha	37
2 –	Secador de leito fixo	44
3 –	Isotermas de dessecção do caju nas temperaturas de 35, 40, 50, 60 e 65° C, ajustadas pelo modelo de GAB	52
4 –	Cinética de secagem do caju para cinco temperaturas e cinco velocidades do ar de secagem	54
5 –	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 0,25 e 0,5 h	63
6 –	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 1,0 e 1,5 h	64
7 –	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 2,0 e 3,0 h	65
8 –	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 4,0 e 5,0 h	66

LISTA DE TABELAS

1 –	Composição físico-química do caju	19
2 –	Valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial 2^2	41
3 –	Valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial completo (2^2 + “configuração estrela”)	42
4 –	Matriz do planejamento dos experimentos em sua forma codificada e real	42
5 –	Forma empregada na apresentação estatística dos dados que validam os modelos testados	43
6 –	Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água em caju, nas temperaturas de 35, 40, 50, 60 e 65° C e diferentes atividades de água	48
7 –	Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 35° C	49
8 –	Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 40° C	49
9 –	Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 50° C	50

10 –	Parâmetros de ajuste da isoterma de dessecção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 60° C	50
11 –	Parâmetros de ajuste da isoterma de dessecção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 65° C	51
12 –	Efeitos principais da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade do caju, para diferentes períodos de secagem	56
13 –	Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de caju	57
14 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 0,25 h	58
15 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 0,5 h	58
16 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 1,0 h	59
17 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 1,5 h	59
18 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 2,0 h	60
19 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 3,0 h	60
20 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 4,0 h	61
21 –	Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 5,0 h	61

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos determinar as isotermas de dessorção do caju (*Anacardium occidentale* L.), “variedade” vermelha, e os efeitos da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem deste produto, visando a obtenção de um modelo empírico que represente esse processo, mediante o emprego de um planejamento experimental. A umidade de equilíbrio foi obtida com o auxílio do equipamento Termoconstanter Novasina TH 200, utilizando-se o método estático-indireto; o ajuste dos dados foi feito através de regressão não linear, pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin, escolhendo-se o melhor mediante o coeficiente de determinação (R^2) e o módulo do desvio médio relativo (P); a cinética de secagem, em camada fina, foi obtida em um secador de leito fixo, nas temperaturas variando de 35 a 65° C e velocidades do ar de secagem de 0,9 a 1,9 m.s⁻¹, conforme o planejamento fatorial completo (2² + configuração estrela). Dentre os modelos ajustados às isotermas estudadas, GAB apresentou melhor ajuste dos dados experimentais, tendo sido escolhido para representar as isotermas de dessorção do caju; observou-se que os parâmetros X_m e C desse modelo, decresceram com o aumento da temperatura; constatou-se mediante as curvas de secagem que o tempo gasto para secar o caju nas temperaturas de 35 e 40° C é o dobro do tempo requerido a 65° C, e que a velocidade do ar de secagem não exerce influência no processo; na construção dos modelos empíricos, o modelo de 2^a ordem apresentou um maior valor de R^2 e a relação entre F calculado e F tabelado variou de 6,04 a 19,83, enquanto que no modelo linear esta relação foi de 0,27 a 5,40. Assim, pode-se concluir que a cinética de secagem é fortemente afetada pela temperatura; o modelo de 2^a ordem é útil para fins preditivos da cinética de

secagem desse produto; e, que a melhor faixa de operação é aquela correspondente à temperatura mais elevada.

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado las isotermas de desorción del cajuil (*Anacardium occidentale* L.) variedad roja, y los efectos de la temperatura y velocidad del aire en la cinética del secado de lo mismo, con vistas a la obtención de un modelo empírico que simbolizase el proceso, mediante un “planeamiento experimental”. La humedad de equilibrio fue obtenida con auxilio del aparato Termoconstanter Novasina TH 200, que emplea el método estático; lo ajuste de los datos se hizo por regresión no lineal, pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin, eligiéndose lo mejor mediante coeficiente de determinación (R^2) y el modulo de la desviación relativa (P); la cinética del secado, en camada fina, fue obtenida en uno secador de lecho fijo, para un rango de temperaturas variando de 35 a 65° C, y velocidades del aire de secado de 0,9 a 1,9 m.s⁻¹, de acuerdo con el planeamiento factorial completo (2² + configuración estrella). Adentren los modelos ajustados para las isotermas estudiadas, GAB fue el mejor, habido escogido para presentar las isotermas de desorción del cajuil; se observó que los parámetros X_m e C de esto modelo, disminuyeron con el aumento de la temperatura; se constató por medio de las curvas de secado que el tiempo gastado para secar el cajuil en las temperaturas de 35 y 40° C es el doble del tiempo requerido a 65° C, y que la velocidad del aire de secado no tiene influencia en el proceso; en la formulación de los modelos empíricos, el modelo de 2^a orden presentó un valor mayor de R^2 y la relación entre F calculado e F tabulado varió de 6,04 a 19,86, aunque para el modelo lineal esta relación fue de 0,27 a 5,40. Así, se pudo concluir que la cinetica de secado es fuertemente afectada pela temperatura; el modelo de

2ª orden es útil para fines predictivos de la cinética de secado de este producto; y, que el mejor rango de operación se dio con la temperatura más elevada.

1 - INTRODUÇÃO

O cajueiro ocupa lugar de destaque entre as plantas frutíferas tropicais, em face da crescente comercialização de seus produtos principais: a amêndoa e o líquido contido no mesocarpo da castanha. Mas, em que pese o fato do cajueiro ser planta nativa do Brasil, a sua cultura em solo pátrio, ao contrário daquela que vem sendo fator de grande expressão na economia de países como a Índia, Moçambique, Quênia e Tanzânia, somente nos últimos anos passou a ser encarada também como promissora fonte de renda nas regiões Norte e Nordeste do país.

O cajueiro produz um fruto reniforme, geralmente conhecido por castanha de caju, e um pseudofruto, que é o pedúnculo hipertrofiado e carnoso – o hipocarpo, geralmente chamado apenas de caju. Este, por sua vez, apresenta mecanismos aceleradores de degradação microbiológica, contribuindo, assim, para a rejeição ou perda de centenas de milhares de toneladas do produto na região (Cruz, 1989).

O caju além de ser um produto altamente perecível, possui, também, uma casca muito frágil, o que dificulta o seu manuseio e transporte das áreas de produção aos mercados de consumo ou à indústria. Sobre a sua casca existe uma mucilagem na qual se fixam os fungos, dando-lhes condições propícias para seu desenvolvimento, que é ainda favorecido quando as condições de temperatura e umidade forem elevadas nas regiões produtoras (Bleinroth, 1978).

Um dos procedimentos mais importantes de conservação de alimentos, por diminuição de sua atividade de água (a_w), é a desidratação ou secagem. Considerando que a

maioria dos produtos vegetais é constituído por mais de 80% de água, o processo de secagem implica em uma considerável redução de custos em transporte e manipulação do produto, além de prolongar a sua vida de prateleira (Gabas, 1998).

A conservação de alimentos pela desidratação constitui-se em uma das formas mais antigas e importantes de se industrializar os produtos alimentícios. É, portanto, a desidratação, um processo combinado de transferência de calor e massa, na qual se reduz a disponibilidade ou atividade de água de um alimento, e conseqüentemente evita-se o crescimento microbiano e as reações químicas e bioquímicas.

De acordo com o que foi relatado anteriormente, este trabalho teve como objetivo geral estudar a secagem do caju – “variedade” vermelha, definindo os melhores parâmetros, mediante acompanhamento de sua cinética em um secador de leito fixo; e, como objetivos específicos:

- 1 - Determinar as isotermas de desorção do caju;
- 2 - Estudar a cinética de secagem para camadas finas, em intervalos de temperatura e velocidade do ar variando de 35 a 65° C e 0,9 a 1,9 m.s⁻¹, respectivamente;
- 3 - Obter um modelo empírico de secagem, a partir de um planejamento experimental, que se ajuste aos dados obtidos no estudo.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - O Cajueiro

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) pertence a família *Anacardiaceae*, a qual inclui outras frutíferas valiosas, como a mangueira, o cajá-manga e o umbuzeiro. É por sua vez, uma planta genuinamente brasileira. Na época do descobrimento já era utilizado pelos indígenas do litoral, que consumiam o caju “in natura” ou sob a forma de bebida fermentada. O cajueiro era, de fato, preciosa fonte de alimento para os índios. Os historiadores citam as grandes lutas travadas entre as tribos do interior nordestino e as do litoral, na época de frutificação (Medina, 1978).

Câmara Cascudo (1983) ao afirmar do armazenamento das castanhas e do fabrico de vinho desta *Anacardiaceae* pelos indígenas, e que estes contavam os anos pela floração desta frutífera, faz, assim, um destaque do cajueiro entre as fruteiras arbóreas existentes no Brasil Colônia. O mesmo autor referencia que posteriormente os portugueses o levaram para a África.

Lima (1988) relaciona diversas “variedades” do caju. Tais “variedades” não são botânicas, mas variações na sua forma, tamanho e coloração. Em território brasileiro os tipos ou denominações mais comuns são: caju amareio, caju anão ou cajuí, caju banana,

caju branco, caju maçã, caju manteiga, caju da praia, caju travoso, caju redondo, caju comprido e caju vermelho.

Em francês o caju é conhecido como cajou e acajou; em espanhol é chamado de marañón, cajuil, merey, acayouba; os ingleses o conhecem por cashew, cashew apple, cashew nut; na Itália chamam-no de anacardio e na Índia de kaju. O certo é que tais denominações derivam da palavra AKAYU, do tupi, que significa pomo amarelo, e é prova da origem brasileira do caju (Cavalcante, 1977).

A castanha, que é o verdadeiro fruto, aderida à extremidade do pedúnculo hipertrofiado ou pseudofruto, é um aquênio, e contém, no seu interior, uma semente grande, reniforme, de cerca de 2,5 cm de comprimento. É a amêndoa comestível do caju, de alto valor nutritivo. O mesocarpo da castanha contém um líquido viscoso, sumamente cáustico, de cor quase negra e sabor picante, conhecido por LCC (Líquido de Castanha do Caju), contendo o ácido anacárdico (90%) e dois fenóis (10%) ou cardol, muito empregado na indústria de plásticos, isolantes, vernizes, inseticidas, etc.

O pseudofruto, de estrutura carnosa e muito suculento, rico em vitamina C, minerais e açúcares, além do consumo ao natural, pelo delicioso sabor, é utilizado na fabricação dos mais variados doces e bebidas, tais como: doce de massa, caju seco (passa), caju ameixa, cristalizados, doce em calda, geléias, sucos, cajuína, vinhos, conhaque, champanha, vinagre, etc.

Bleinroth (1978) revisando trabalhos de vários pesquisadores a partir de 1949, sintetiza na Tabela 1 a composição físico-química das duas principais "variedades" do caju.

Muitas são as possibilidades de industrialização do caju. Embora já venha sendo processado nas formas de doces, sucos, néctares, e outros, o aproveitamento do caju ainda é insignificante em relação à quantidade potencialmente disponível no período de safra.

Tabela 1 – Composição físico-química do caju

Determinações	Vermelhos	Amarelos
Umidade (%)	86,07	86,62
Cinzas (%)	0,38	0,37
Sólidos solúveis (°Brix)	10,38	10,66
Açúcares redutores (%)	8,00	7,95
Açúcares não redutores (%)	0,38	0,38
PH	4,48	4,27
Acidez total titulável (% ác. Málico)	0,336	0,418
Ácido ascórbico (mg/100g)	204	197,5
Tanino (mg/100ml)	0,403	0,345

FONTE: Bleimöller, 1978

2.2 – Isotermas de Sorção

Quando um material biológico é exposto a uma determinada umidade, ele reage no sentido de ajustar sua própria umidade a uma condição de equilíbrio com o ambiente. Isto ocorre quando a pressão de vapor de água na superfície do material se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve (Treybal, 1968). O nível de umidade que o produto alcança, quando deixado por um determinado período de tempo em contato com uma condição atmosférica definida, é conhecido como umidade de equilíbrio (Gustafson e Hall, 1974).

A relação entre a umidade de equilíbrio de um sólido e a atividade de água (a relação entre a pressão de vapor de água no alimento e a pressão do vapor de água pura, medidas à mesma temperatura), em uma dada temperatura, é expressa graficamente através de isotermas de sorção. Estes dados são provenientes do material a ser seco e podem ser úteis na estimativa do tempo de secagem e das condições ótimas de armazenamento (Labuza, 1968; Castañon e Barral, 1988).

De acordo com Spiess e Wolf (1983) a atividade de água pode ser obtida pela relação entre a pressão parcial da água, em uma camada de ar em equilíbrio com uma solução ou alimento (p), e a pressão de vapor de água (p_o) na mesma temperatura, ou seja:

$$a_w = \frac{p}{p_o} \cdot 100 \quad (1)$$

Deste modo seu valor pode ser determinado a partir da umidade relativa da camada de ar em equilíbrio com o alimento:

$$a_w = \frac{\% UR}{100} \quad (2)$$

A isoterma é uma relação de equilíbrio que vincula o conteúdo de água de um produto alimentício com a temperatura e umidade relativa do ar circundante, sendo de fundamental importância no estudo da conservação de alimentos desidratados (Van Den Berg e Bruin, 1981).

As curvas obtidas ao se graficar o conteúdo de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa ou atividade de água de um material, para temperaturas constantes, são denominadas isotermas de sorção. Para o equilíbrio, a atividade de água é relacionada com a umidade relativa do ar circundante. As isotermas de sorção são classificadas como sendo de adsorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umedecimento, ou de dessorção, como no processo de secagem (Labuza, 1968).

Uma isoterma de sorção pode apresentar três regiões, dependendo do estado de água presente no alimento: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água, e está entre 0 e 35% de umidade relativa; a segunda região, que representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada, localiza-se entre 35 e 60% de umidade relativa; a terceira região, localizada acima de 60% de umidade

relativa, representa a água condensada nos poros do material, seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (Labuza, 1968; Lomauro et al., 1985).

A determinação do valor de atividade de água pode ser efetuada por diversos métodos, sendo eles classificados em diretos e indiretos. Muitos pesquisadores têm usado o método gravimétrico estático, em que as amostras são colocadas em dessecadores sob diversas umidades relativas conhecidas, que são obtidas através de soluções de sais ou de ácido sulfúrico.

Um outro método para o levantamento das curvas, também estático, foi utilizado por Capriste e Rotstein (1982), que consiste em um método indireto, ou seja, quantifica a atividade de água, através de um medidor eletrônico, de amostras com diferentes teores de umidade, obtidas à partir de um processo de secagem sob condições suaves. As amostras são retiradas do secador em intervalos de tempo pré-definidos, colocando-as em recipientes herméticos termostizados, a fim de homogeneizar a temperatura e a distribuição da umidade. A vantagem de utilizar esta metodologia é a aquisição de um maior número de dados experimentais, melhorando a precisão da curva de sorção. Como a aquisição de dados é feita através de um processo de secagem, possui a vantagem de diminuir o tempo de equilíbrio e atingir valores de atividade de água altos. Isto é vantajoso em relação ao método gravimétrico, onde muitas vezes perde-se amostras por deterioração, quando estas se apresentam com altos valores de atividade de água (Yoshida, 1997).

Rotstein e Cornish, citados por Capriste e Rotstein (1982), aplicaram o método estático indireto para alimentos que contém açúcares, resultando em bons dados experimentais.

2.2.1 - Modelos Matemáticos para Ajuste das Isotermas

Segundo Iglesias e Chirife (1983), um determinado modelo de isoterma pode ser considerado mais adequado do que outro, principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção ou dessorção para uma ampla faixa de atividade de água. Uma outra característica importante, é a possibilidade destes modelos fornecerem informações importantes acerca do fenômeno de sorção, tais como a água adsorvida na monocamada molecular ou o calor de sorção para a primeira e para as camadas subsequentes.

BET (Brunauer, Emmett e Teller, 1938), baseados no conceito de Langmuir (1918) de adsorção na monocamada molecular e considerando a natureza química da umidade, propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas moleculares, sendo que o fator que limita o número de camadas adsorvida é o diâmetro dos capilares:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{BET} a_w}{1 - a_w} \left\{ \frac{1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1}}{1 - (1 - C_{BET})a_w - C_{BET} a_w^{n+1}} \right\} \quad (3)$$

em que:

a_w = atividade de água;

n = número de camadas moleculares;

C_{BET} = constante de BET;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular.

De acordo com Labuza (1968), esse modelo apresenta dois parâmetros de ajustes (C_{BET} e X_m) que podem ser calculados graficando-se $\{a_w / [(1 - a_w)X]\}$ contra a

a_w . A isoterma de BET é limitada pelo fato de apresentar ajuste, apenas, para dados de sorção com a_w entre 0,1 e 0,5.

Guggenheim (1966), Anderson (1946) e De Boer (1953) estenderam as teorias de adsorção física de Langmuir e BET, resultando numa equação tripáramétrica conhecida como equação de GAB, matematicamente adequada para aplicações em engenharia e que permite um melhor ajuste de dados de sorção de quase todos os alimentos, até atividade de água de 0,9. A equação de GAB é dada por:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)} \quad (4)$$

Em que, C_{GAB} e K_{GAB} são as constantes de adsorção, relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, em um dado sítio de sorção. Observa-se no modelo que quando K_{GAB} for igual a unidade, esta equação se reduz a equação de BET.

Halsey, em 1940, desenvolveu uma equação que considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Ele assumiu que a magnitude do parâmetro "b" caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se b é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se b é pequeno, as forças de atração predominantes são de Van der Waals, e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície. A equação de Halsey é apresentada da seguinte forma:

$$a_w = \exp \left(\frac{-a}{R T \left(\frac{X_e}{X_m} \right)^b} \right) \quad (5)$$

em que:

a_w = atividade de água;

X_e = conteúdo umidade de equilíbrio, expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

a e b = parâmetros de ajuste;

R = constante universal dos gases;

T = temperatura de realização do experimento.

Chirife e Iglesias (1978) simplificaram a equação de Halsey, e encontraram resultados satisfatórios para mais de 220 isothermas experimentais testadas. A forma simplificada da equação é:

$$a_w = \exp\left(\frac{-a''}{X_e^b}\right) \quad (6)$$

em que:

a_w = atividade de água;

a'' e b = parâmetros ajustados pelo modelo acima;

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca.

Os mesmos autores descrevem o modelo de Oswin como sendo uma expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais, podendo ser escrita como:

$$X_e = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b \quad (7)$$

em que:

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca;

a_w = atividade de água;

a e b = parâmetros de ajuste do modelo.

Kiranoudis et al. (1993) determinaram o conteúdo de umidade de equilíbrio de batata, cenoura, tomate, pimentão verde e cebola, para temperaturas de 30, 45 e 60° C e atividades de água de 0,10 a 0,90, usando o método gravimétrico estático padrão, desenvolvido pelo Projeto de Cooperação Europeu COST 90. A equação de GAB foi ajustada aos dados experimentais usando o método de análise de regressão não linear, mostrando um ajuste satisfatório entre os valores experimentais e os valores calculados. Igualmente, Unadi et al. (1998) verificaram para tomate, que a equação de GAB entre as de Henderson, Halsey e Oswin modificadas, foi a que melhor ajustou as isotermas de dessorção desse produto a temperaturas na faixa de 40 a 70° C e umidades relativas de 13 a 57%. Em uma faixa maior de atividade de água (0 a 0,90) e temperaturas (35, 50 e 70° C), Kechaou e Maalej (1999) definiram a equação de GAB como a melhor entre as estudadas para representar as isotermas de dessorção de banana. Esta equação foi também utilizada com bom ajuste aos dados experimentais para as isotermas da casca e polpa de uva, dentro de uma faixa de temperatura que variou de 20 a 70° C e atividades de água de 0,02 a 0,85, por Telis et al. (2000). No entanto, para pimentão verde e vermelho, Kaymak-Ertekin e Sultanoglu (2001) verificaram que o modelo de BET foi o que melhor se ajustou as isotermas de sorção na faixa atividade de água compreendida entre 0,10 e 0,50 e temperaturas de 30, 45 e 60° C.

2.3 – Secagem

Desde os primórdios o homem utiliza o vento e o sol para secar materiais do seu cotidiano. Entretanto, a utilização de secagem artificial, para produtos alimentícios e agrícolas, tem sido empregada, somente, nos dois últimos séculos (Murr, 1992).

O processo de secagem, muitas vezes, é utilizado visando o fator econômico do frete e do manuseio; outras vezes o material é seco para depois sofrer um processo de reidratação a níveis desejáveis. Para os produtos agrícolas e alimentícios, a secagem é usada para conservação, permitindo também o transporte sem a necessidade de refrigeração (Keey, 1972; Daudin, 1983).

A palavra secagem é freqüentemente usada para descrever processos através dos quais haverá a remoção de água do material. É, pois, a secagem, sob o aspecto físico, um processo simultâneo de transferência de calor e massa. A transferência simultânea de calor e massa ocorre num meio capilar-poroso sempre que o meio contiver umidade e estiver sujeito a qualquer ou a todos os gradientes de concentração: pressão parcial de vapor, temperatura, pressão total e campos de força externa (Luiz, 1982).

Com a água evaporada da superfície externa do produto, cria-se um gradiente de concentração nas camadas internas, proporcionando um processo migratório de umidade do centro para a superfície do produto (Puzzi, 1986).

Quando o produto é colocado em contato com o ar de secagem, ocorrerá uma transferência de calor do ar para o produto devido a diferença de temperatura existente entre eles, e, simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ar e a superfície do produto ocasionará uma transferência de massa do produto para o ar. Parte do calor que chega ao produto é utilizado para vaporizar a água, assim, a transferência de massa se faz na forma de vapor d'água (Daudin, 1983; Perry, 1987).

A condição necessária para ocorrer a secagem é que o teor de umidade do produto esteja acima do seu teor de umidade de equilíbrio, para condições preestabelecidas de umidade relativa e temperatura do ar de secagem (Fortes e Okos, 1981).

Brooker et al. (1978) afirmam que há, pelo menos, dois períodos distintos de secagem de um produto agrícola: são o período de taxa de secagem constante, que normalmente ocorre em produtos com mais de 70% de umidade, e o período de taxa de secagem decrescente. O teor de umidade que separa estes dois períodos (teor de umidade crítico) depende da forma do produto e das condições de secagem.

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa, no curso da operação de secagem, faz com que esta seja dividida, esquematicamente, em três períodos de secagem: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem à taxa constante; e período 2 ou período de secagem à taxa decrescente. No período zero, o produto é geralmente mais frio que o ar, e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é débil, e, por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também o são. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto, ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa (Prado, 1998).

2.3.1 – Período de Secagem à Taxa Constante

Neste período, são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto que governam a secagem e fixam a velocidade de secagem. O produto permanece com a superfície coberta por uma camada de líquido, constituindo umidade não ligada, e com temperatura constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar. O líquido absorve

calor e se vaporiza a uma taxa constante. Nesse período, a migração de umidade do interior para a superfície compensa a perda por vaporização; a secagem se comporta como a evaporação de uma superfície líquida. Para alimentos, um período de taxa de secagem constante pode ser observado quando o potencial de secagem do ar é muito baixo ou o teor de umidade do produto é muito alto (Chirife, 1983).

Segundo Fortes e Okos (1981), a velocidade de secagem durante o período de taxa constante depende de três fatores: dos coeficientes de transferência de energia e massa; da área da superfície onde ocorre a troca de energia e de massa e da diferença entre as temperaturas (ou as pressões de vapor) do ar que envolve o produto e da superfície desse produto. O mecanismo interno de migração de água não influencia a velocidade de secagem durante esse período.

Park (1987) relata que o ponto de inflexão do período de taxa constante e decrescente de secagem não representa uma propriedade, dependendo inclusive dos parâmetros operacionais. Portanto, este ponto não deve receber a denominação de “ponto crítico”. A denominação mais correta seria o “ponto de transição” do período de secagem à taxa constante ao período de secagem à taxa decrescente, ou o “ponto de inflexão” das taxas. O ponto crítico na taxa de secagem estaria situado no período de taxa decrescente, representando a transição do estado pendular e fûnicular.

2.3.2 – Período de Secagem à Taxa Decrescente

Com o prosseguimento da secagem, a migração da água para a superfície diminui, não mais compensando a vaporização superficial. A superfície, portanto, deixa de ficar saturada, causando redução na pressão de vapor superficial e da taxa de secagem. As forças motrizes de transporte são as forças capilares e de difusão, que atuam de acordo com

as propriedades do material a ser seco. Assim, em um campo de umidade mais reduzido, o qual depende da natureza da substância e das condições de secagem, a taxa de secagem é influenciada fortemente pelas leis de migração da umidade no interior dos materiais sólidos. O período de taxa decrescente pode ser bem mais dilatado que o período de taxa constante, embora a remoção de umidade seja muito menor.

De acordo com Brooker et al. (1978), predizer teoricamente a taxa de secagem decrescente é mais complexo que a taxa de secagem constante. Pois, devem ser considerados não somente os mecanismos externos de transferência de calor e massa, mas também os mecanismos internos do produto.

Segundo Almeida (1979) e Fortes e Okos (1980), para a maioria dos materiais granulares e sólidos porosos, de modo geral, esse período pode ser subdividido em dois regimes: 1 – a secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, isto é, não existe continuidade de água em toda a superfície de evaporação. A superfície de evaporação diminui, e, portanto, a taxa total de evaporação da superfície decresce – é a zona de superfície insaturada; 2 – a região de vaporização localiza-se no interior do material e a razão de secagem é controlada pelo movimento interno de água, sendo essa etapa pouco influenciada pelas condições ambientais – é a zona de controle interno.

Para a primeira fase do período de secagem à taxa decrescente, os principais mecanismos de transportes sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. Um mecanismo não necessariamente exclui os outros, que podem ocorrer simultaneamente. Na segunda fase deste período, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da saturação, a difusão da fase vapor é provavelmente o mecanismo dominante (Chirife citado por Sousa, 1999).

Segundo Park (1987), as mais importantes teorias de secagem são aquelas que tentam explicar os fenômenos físicos internos, principalmente para materiais biológicos. O autor apresentou, com rápida explanação, algumas teorias que explicam o comportamento da secagem: 1 – teoria difusional, utilizando a 2ª lei de Fick; 2 – teoria capilar, utilizando a lei de Darcy; 3 – teoria de evaporação-condensação, que considera a

transferência simultânea de calor e massa; 4 – teoria de Luikov com aplicação da termodinâmica irreversível; 5 – teoria de Phillip e de Vries.

Keey (1972) mostrou quatro fases no movimento da água na secagem de sólidos porosos e admitiu que uma única teoria não pode incluir todos os mecanismos de transporte de água em sólidos.

Existem métodos empíricos, teóricos e semi-teóricos para descrever matematicamente o processo de secagem. O método empírico é utilizado para análise de secagem usando dados experimentais que podem ser determinados em laboratório e na utilização da análise adimensional. Tal método geralmente se baseia nas condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto, muito embora forneça informações práticas para elaboração de projetos (Fortes e Okos, 1980).

Luikov e Mikhailov (1965) apresentaram o sistema de equações de transferência simultânea de calor e massa, baseados em conceitos da termodinâmica dos processos irreversíveis. Apresentaram, também, um sistema de equações diferenciais obtidas através da introdução de números adimensionais, resultantes da aplicação dos conceitos de similaridade. Park (1990) sugeriu a correlação de dados experimentais de secagem de materiais biológicos utilizando os conceitos dos adimensionais de Luikov e Mikhailov.

A secagem de alimentos é analisada através de curvas de secagem, apresentadas na forma de umidade adimensional $\left(\frac{X}{X_0}\right)$ em função do tempo, da taxa de secagem (N) em função da umidade absoluta (X) e do adimensional de água livre, $Adm = \left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right)$, em função do tempo.

Vergara et al. (1997) analisando o processo de secagem por desidratação osmótica de maçã, utilizaram fatias circulares de maçãs frescas e de maçãs submetidas a processos de osmo-desidratação em xaropes de sacarose. As temperaturas utilizadas foram de 50, 60 e 70° C. A análise das curvas de secagem mostrou que os produtos não apresentaram o período de secagem à taxa constante (exceção para maçãs frescas). No entanto, mostrou a existência de dois períodos de secagem a taxa decrescente. Krokida et

al. (2000) verificaram para este produto, que a cinética de secagem foi grandemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem. Um modelo empírico de transferência de massa, envolvendo uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade superficial), para maçã, pêra, kiwi e banana, foi estudado por Kiranoudis et al. (1997), que estabeleceram a constante de secagem como uma função das variáveis do processo e verificaram que os parâmetros do modelo considerado foram grandemente afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem. O conteúdo de umidade de equilíbrio do material foi ajustado pela equação de GAB.

Em batatas, a temperatura foi tida por McMinn e Magee (1996) como o principal fator controlador do processo, no estabelecimento da cinética de secagem desse produto.

2.3.3 – Secadores de Leito Fixo

Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Este tipo de secador é constituído de uma câmara de secagem, no qual o ar é insuflado por um ventilador. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação, e são muito versáteis, uma vez que podem ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios.

Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto. A troca de umidade, que acontece entre o produto e o ar, ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa, conforme a secagem, dando origem a um

gradiente de umidade, o qual não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final (Nucci citado por Gouveia, 1999).

Lacerda Filho (1986) relata que os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada da amostra e a temperatura de secagem. O gradiente será mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto. Esses fatores também influenciam o consumo de energia e o tempo de secagem do produto.

2.4 – Planejamento Experimental e Metodologia de Superfícies de Resposta

A importância das variáveis em um processo pode ser determinada através da adoção de um método de planejamento experimental, o qual possibilita o planejamento e execução do experimento de forma organizada, com um número de ensaios reduzidos ao mínimo necessário. Este método permite, ainda, a verificação dos efeitos individuais e de interação de todas as variáveis sobre a resposta, a definição das variáveis mais importantes para o processo, a avaliação dos erros experimentais e de regressão, e a modelagem empírica dos resultados em função das variáveis escolhidas, através de programas estatísticos de regressão.

O método do planejamento experimental fatorial é baseado na seleção de dois níveis (nível +1 e nível -1) para cada variável de entrada (variável independente), e, na execução de experimentos para todas as possíveis combinações. Se n fatores (variáveis controladas pelo experimentador) estão envolvidos no estudo de um sistema, o planejamento necessita de 2^n ensaios diferentes, que é o número mínimo para obtenção de um planejamento fatorial completo.

Diversos são os planejamentos que podem ser usados para montar a série de experimentos adicionais. Box e Wilson (citados por Khuri e Cornell, 1987) criaram o chamado Planejamento Composto Central, também denominado de configuração “estrela”. Tal planejamento consiste de um fatorial completo 2^k , replicatas no ponto central e dois pontos sobre o eixo de cada variável a uma distância $\pm \alpha$ do ponto central.

Os métodos de planejamento experimental mais conhecidos para otimização de processos são o simplex seqüencial, o planejamento fatorial e a análise de superfície de resposta. A metodologia de superfícies de resposta é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais, introduzida por G. E. P. Box no ano de 1950, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais. Esta metodologia é constituída de duas etapas distintas: a modelagem e o deslocamento. Ambas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, até que se atinja uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada. A modelagem geralmente é feita ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos fatoriais. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada (Barros Neto et al., 1995).

Sendo o planejamento experimental um método baseado e executado com técnicas estatísticas, é de fundamental importância a avaliação dos modelos empíricos, obtidos através da regressão dos dados experimentais, mediante uma análise estatística, utilizando dois parâmetros muito importantes: o coeficiente de determinação (R^2) e o valor estimado para o teste F .

O coeficiente de determinação é um parâmetro estatístico que compara a variância dos pontos experimentais em relação ao modelo proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais. Quando o valor do coeficiente é 1, a correlação entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais é perfeita. Quando este valor for nulo, não existe correlação. A análise dos valores intermediários não pode ser expressa de forma tão simples, mas em termos qualitativos, quanto mais próximo da

unidade estiver o valor do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste do modelo com os pontos experimentais (Box et al., 1978).

Através da realização do teste F , comparando o valor estimado para F a partir dos dados experimentais com o valor tabelado para uma distribuição de referência, é possível verificar a relevância estatística dos fatores experimentais no valor das respostas. A base do teste F consiste em verificar se existe relação entre as variáveis e a resposta. Quando não existe correlação entre a resposta e a variável, pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas da regressão e dos resíduos (MQ_R/MQ_r) segue uma distribuição F (hipótese nula). Neste caso, a variação nos valores dos resultados foi devido exclusivamente a fatores aleatórios.

A hipótese nula pode ser testada usando o valor efetivamente calculado para MQ_R/MQ_r , e para isto basta compará-lo com o valor de F tabelado. Se as variações nas respostas experimentais apresentarem alta probabilidade de pertencerem a essa distribuição, não há motivos para se questionar a hipótese nula. Então, pode-se dizer que a equação de regressão não é significativa. Se a razão MQ_R/MQ_r for maior que o valor de F tabelado, pode-se afirmar que a equação é estatisticamente significativa e os dados experimentais são representados pelo modelo proposto. A análise dos resíduos é de importância fundamental ao se avaliar a qualidade do ajuste de um modelo. Uma vez que se este deixa resíduos consideráveis, pode se dizer que é um modelo ruim (Barros Neto et al., 1995).

Pode acontecer, porém, que uma regressão, embora significativa 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 Wertz, citados por Barros Neto et al. (1995), sugeriram 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 razão MQ_R/MQ_r deve ser no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F tabelado.

Gouveia (1999) utilizou o planejamento experimental na avaliação da cinética de secagem de gengibre, para a identificação dos efeitos da temperatura e velocidade do ar, e verificou que a temperatura foi o fator que exerceu maior influência no

processo. Observou, ainda, que o modelo de 2ª ordem, fornecido pelo planejamento, foi o melhor na cinética de secagem desse produto.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Local de Trabalho e Matéria-prima

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química, em conjunto com o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, no Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande – PB.

Utilizou-se pseudofrutos do cajueiro – o caju (*Anacardium occidentale* L.), da “variedade” vermelha (Figura 1), adquiridos na EMPASA – Campina Grande, PB, sendo oriundos do Piauí.



Figura 1 - Pseudofrutos do caiueiro - o caiu (*Anacardium occidentale* L.), da “variedade” vermelha

3.2 - Determinação do Conteúdo de Umidade

Para a determinação do conteúdo de umidade do caiu foi utilizado o método descrito pela A.O.A.C. (1984) para produtos açucarados, que recomenda o uso de cadinhos de papel alumínio, com massa conhecida, secos a 100° C em estufa com circulação forçada de ar. As amostras do produto de ± 4 g, em triplicatas, foram levadas a estufa a uma temperatura de 100° C por 3 horas. Todas as medidas de massa foram feitas em balança analítica.

3.3 - Isotermas de Dessorção

Para o levantamento dos dados das isotermas de dessorção do caju, foi utilizado o equipamento Termoconstanter Novasina TH200. Este instrumento é projetado para a medida de atividade de água com a temperatura controlada. Podendo também ser usado como uma câmara com temperatura controlada para análise de crescimento microbiológico.

Nesse equipamento, a temperatura da câmara de medição, onde são colocadas as amostras, é regulada por meio de um controlador localizado na frente do mesmo, que serve para fixar o valor da temperatura desejada com uma variação menor que 0,2° C, em toda a sua escala de trabalho que é de 0 a 50° C. A referida câmara, combinada com o regulador de temperatura, forma um mini gabinete climático. A mesma é equipada com um sensor de umidade e de temperatura – o enBSK Novasina. Este sensor mede atividade de água e temperatura de quantidades de amostras pequenas do material, como pós, granulados, pastas e líquidos. Este equipamento possui o transmissor RTD-200, que converte os sinais da célula de medição. Os valores medidos de umidade relativa (atividade de água) e de temperatura, podem ser lidos diretamente no mostrador no painel dianteiro.

As isotermas de sorção foram determinadas utilizando-se o Método Estático-indireto, baseado no estudo efetuado por Capriste e Rotstein (1982). Inicialmente, as amostras de 4,5 g aproximadamente – pedaços pequenos do caju, foram colocadas dentro de células, que acompanham o aparelho, e após serem pesadas foram levadas à estufa regulada à 65° C por um período de quatro horas, onde sofreram um processo suave de secagem.

Após esse período na estufa, as amostras eram retiradas e colocadas em um dessecador, afim de uniformizar a distribuição de água na amostra. Posteriormente, as células, contendo as amostras, eram levadas ao equipamento Termoconstanter Novasina TH200 para a determinação da atividade de água das amostras, através do sensor enBSK NOVASINA. No processo se utilizou temperaturas de 35, 40 e 50° C. As amostras ficavam

no equipamento até que a leitura da atividade de água se estabilizasse, para então, serem retiradas e pesadas em uma balança analítica. Depois de pesadas, estas retornavam para a estufa e aí permaneciam por trinta minutos, para em seguida se fazer uma nova leitura. A sucessão dessas leituras indicava os pontos da curva da isoterma de dessorção do caju, para uma dada temperatura. Posteriormente à determinação desses pontos, as amostras eram levadas à mesma estufa, onde permaneciam por mais 24 horas para determinação da massa seca.

As umidades de equilíbrio (em base seca) foram calculadas pelo emprego da fórmula abaixo:

$$X_e = \frac{m_e - m_s}{m_s} \quad (8)$$

em que:

X_e = umidade de equilíbrio em base seca;

m_e = massa da amostra quando atingido o equilíbrio;

m_s = massa seca da amostra.

3.3.1 - Ajuste dos Modelos

O ajuste dos modelos de sorção foi feito utilizando-se o programa computacional STATISTICA versão 5.0, com um critério de convergência de 0,0001, através de regressão não linear, considerando-se a temperatura e a umidade relativa como variáveis independentes, para os modelos de BET (Equação 3), GAB (Equação 4), Halsey (Equação 6) e Oswin (Equação 7).

Os critérios usados para a escolha do melhor ajuste, dos modelos aos dados experimentais, foram o coeficiente de determinação (R^2), entre as respostas observadas e os valores previstos pelo modelo ajustado, e o módulo do desvio médio relativo (P), definido como a média da porcentagem de diferença relativa entre valores experimentais e preditos (Lomauro et al., 1985). Segundo Wang e Brennan (1991), o parâmetro P é usado na literatura para avaliar o melhor ajuste de diferentes expressões matemáticas aplicadas em dados experimentais. É, geralmente, considerado que valores de P abaixo de 10%, indicam um ajuste razoável para o propósito prático. O valor de P é obtido pela seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - Mp_i)|}{M_i} \quad (9)$$

em que:

M_i = valores obtidos experimentalmente;

Mp_i = valores preditos pelo modelo;

n = número de dados experimentais.

3.4 - Planejamento Experimental

Definiu-se a temperatura e a velocidade do ar como as variáveis do processo de secagem, dependentes do tempo de secagem. Estas variáveis foram estudadas em dois níveis, codificados como -1 e $+1$. Os valores reais correspondentes a estes níveis foram definidos com base na literatura. A temperatura em 40°C (-1) e 60°C ($+1$), e a velocidade do ar em $1,0\text{ m.s}^{-1}$ (-1) e $1,8\text{ m.s}^{-1}$ ($+1$) foram fixadas, variando-se o tempo, conforme o decorrer da secagem, em intervalos regulares.

O número de experimentos foi 2^n (n é o número de variáveis) e uma triplicata no ponto central. Na Tabela 2 encontram-se os valores reais e codificados para o planejamento fatorial 2^2 .

Tabela 2 - Valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial 2^2

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	40	50	60
Velocidade do ar (m.s^{-1})	1,0	1,4	1,8

Ampliou-se as faixas de variação no estudo das variáveis observadas, realizando-se um planejamento fatorial 2^2 + "configuração estrela" com deslocamento axial (níveis $-\alpha$ e $+\alpha$). Obteve-se modelos matemáticos empíricos de 1^a e 2^a ordem, modelo linear e quadrático, respectivamente.

No deslocamento axial utilizou-se a equação desenvolvida por Box e Wilson (1951):

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (10)$$

em que:

K = número de variáveis independentes ($K=2$), logo:

$$\alpha = 1,4142.$$

Na Tabela 3 encontram-se os valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial completo. Onde, os valores reais dos níveis codificados $-1,4142$ e $+1,4142$ são 35 e 65°C para a temperatura e $0,9$ e $1,9\text{ m.s}^{-1}$ para a velocidade do ar; e, na verdade, esses valores seriam 36 e 64°C para a temperatura e $0,8$ e

2,0 m.s⁻¹ para a velocidade do ar. Este ajuste se deu por motivos de limitações do equipamento utilizado. A Tabela 4 mostra a matriz do planejamento de experimentos.

Tabela 3 - Valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial completo (2² + “configuração estrela”)

Variáveis	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
Temperatura (° C)	35	40	50	60	65
Velocidade do ar (m.s ⁻¹)	0,9	1,0	1,4	1,8	1,9

Tabela 4 - Matriz do planejamento dos experimentos em sua forma codificada e real

Ensaio	Temperatura		Velocidade do ar	
	codificada	real (° C)	codificada	real (m.s ⁻¹)
01	-1	40	-1	1,0
02	+1	60	-1	1,0
03	-1	40	+1	1,8
04	+1	60	+1	1,8
05	0	50	0	1,4
06	0	50	0	1,4
07	0	50	0	1,4
08	-1,4142	35	0	1,4
09	0	50	+1,4142	1,9
10	+1,4142	65	0	1,4
11	0	50	-1,4142	0,9

A apresentação da análise estatística, que valida o ajuste dos modelos testados, foi feita obedecendo recomendação de Silva (1998), conforme a Tabela 5.

As superfícies de resposta foram definidas a partir da escolha dos melhores modelos, obtidos por regressão dos dados experimentais.

Tabela 5 – Forma empregada na apresentação estatística dos dados que validam os modelos testados

Método				
Devido a regressão	SQ_R	MQ_R	$L - 1$	MQ_R/MQ_T
Resíduos	SQ_T	MQ_T	$N - L$	-
Falta de ajuste	SQ_{faj}	MQ_{faj}	$M - L$	-
Erro puro	SQ_{ep}	MQ_{ep}	$N - M$	-
Total	SQ_T	-	$N - 1$	-
Coefficiente de determinação	$R^2 = SQ_R/SQ_T$	-	-	-
F tabelado	-	-	-	$F_{confianca, L-1, N-L}$

em que:

SQ_R = soma quadrática devida à regressão (modelo ajustado);

MQ_R = média quadrática devida à regressão;

SQ_T = soma quadrática residual (desvio);

MQ_T = média quadrática residual;

SQ_{faj} = soma quadrática devida à falta de ajuste;

MQ_{faj} = média quadrática devida à falta de ajuste;

SQ_{ep} = soma quadrática devida ao erro puro;

MQ_{ep} = média quadrática devida ao erro puro;

SQ_T = soma quadrática em torno da média;

L = número de termos do modelo completo;

M = número de níveis distintos;

N = número total de experimentos.

3.5 – Curvas de Secagem

A secagem do caju foi realizada em um secador de leito fixo (Figura 2) existente no Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química/CCT/UFPB, Campus II – Campina Grande – PB.

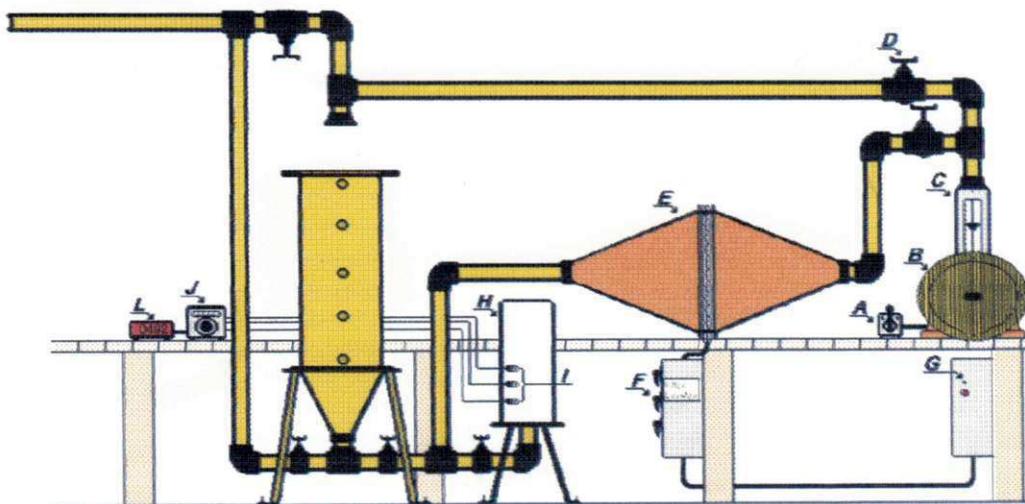


Figura 2 - Secador de leito fixo: A – chave do compressor; B – compressor radial; C – medidor de vazão; D – válvula reguladora; E – aquecedor elétrico; F – chave das resistências; G – chave do sistema de controle; H – câmara de secagem; I – termopares; J – controlador de temperatura; L – milivoltímetro digital

A câmara de secagem é formada por uma coluna cilíndrica de 17,8 cm de diâmetro e 60,0 cm de altura. Possui uma seção inferior troncônica, que funciona como distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro para permitir que o escoamento do ar seja uniforme em todo o leito. A coluna é isolada termicamente com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais, existem furos, onde são colocados os termopares para medição da temperatura do ar de secagem. Existe, também, um outro termopar colocado no fundo, na seção cônica, que serve para enviar sinal para o controlador de temperatura.

Antes do início de cada ensaio, o equipamento foi colocado em funcionamento, nas condições experimentais de secagem definidas pelo planejamento experimental, anteriormente referenciado (Tabela 4). Com o compressor radial ligado, a vazão do ar foi regulada através da válvula reguladora, e, com um anemômetro de hélices, colocado na boca de saída do secador, conseguiu-se medir a velocidade do ar de secagem. O sistema de aquecimento foi ligado a partir da chave do sistema de controle, e, com as resistências ligadas, pôde-se ajustar as temperaturas de secagem através do controlador de temperatura, que emitia para o milivoltímetro a leitura referente a cada temperatura desejada.

Os cajus foram cortados em fatias transversais. A espessura dos cortes das amostras foram de aproximadamente 0,5 cm. De acordo com Carnegie (1991), o corte na fruta em metades já reduz o tempo de secagem em até um terço. Optou-se, ainda, por não descascar o caju, visto que a área da secção do corte é bem maior do que a área da casca.

As amostras foram colocadas em uma cesta de material metálico, em tela de arame de malha fina. E, tendo-se ajustado o equipamento às condições desejadas, o conjunto (cesta + amostra) foi pesado e colocado na câmara de secagem, procedendo-se ao início da operação. O conteúdo de umidade perdido durante a secagem foi obtido por pesagens descontínuas das amostras. O esquema de pesagem seguiu intervalos de 5, 10, 30 e 60 minutos até o final do processo. As pesagens eram realizadas até que as variações de peso fossem insignificantes. Depois disto, as amostras eram colocadas em estufa à temperatura de 65° C por 24 horas, para determinação da massa seca.

Para a análise da cinética de secagem, foram graficadas as curvas de secagem, expressas pela unidade adimensional $(X-X_e)/(X_o-X_e)$ em função do tempo.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Isotermas de Dessorção do Caju

Os conteúdos de umidade de equilíbrio, obtidos experimentalmente a diferentes temperaturas para a dessorção do caju, são apresentados na Tabela 6. Observa-se que os mesmos decrescem com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa, o que ocorre para a maioria dos produtos higroscópicos, como observado por Silva (1999).

Estes dados foram obtidos a temperaturas de 35, 40, 50, 60 e 65° C, e ajustados aos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin pelas equações 3, 4, 6 e 7, respectivamente, através de análise de regressão não linear.

As Tabelas 7 a 11 contêm os valores dos parâmetros estimados, obtidos pela regressão não linear para os modelos testados (BET, GAB, Halsey e Oswin), para o ajuste das isotermas de dessorção do caju em cada uma das temperaturas estudadas; bem como, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios médio relativos.

Tabela 6 – Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água em caju, nas temperaturas de 35, 40, 50, 60 e 65° C e diferentes atividades de água

Temperatura (° C)	Atividade de água	Umidade de equilíbrio
35	0,292	0,067
	0,340	0,092
	0,468	0,133
	0,607	0,234
	0,736	0,443
	0,824	0,815
40	0,308	0,064
	0,343	0,070
	0,371	0,083
	0,498	0,144
	0,643	0,248
	0,781	0,518
50	0,225	0,020
	0,256	0,025
	0,261	0,033
	0,377	0,054
	0,472	0,088
	0,650	0,189
60	0,802	0,512
	0,110	0,004
	0,208	0,010
	0,293	0,017
	0,497	0,055
	0,631	0,132
65	0,674	0,184
	0,745	0,378
	0,109	0,002
	0,212	0,005
	0,285	0,008
	0,495	0,034
	0,625	0,104
	0,666	0,166

Nas Tabelas 7 e 8, pode-se verificar que todos os modelos testados obtiveram um bom ajuste aos dados experimentais das isotermas de dessorção do caju para as temperaturas de 35 e 40° C, levando-se em conta que o coeficiente de determinação (R^2)

ficou acima de 0,998 e o desvio médio relativo (P) ficou abaixo de 7,04%. Verifica-se, ainda, que GAB foi o modelo que apresentou menor desvio nas duas temperaturas.

Tabela 7 - Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 35° C

Modelos	Parâmetros			R^2	P (%)
BET	Xm 0,188285	C 0,652535	n 150	0,998	7,04
GAB	Xm 0,116611	C 1,529153	k 1,055473	0,999	2,27
Halsey	a'' 0,165589	b 0,759231		0,999	2,45
Oswin	a 0,149378	b 1,092874		0,998	6,69

Tabela 8 - Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 40° C

Modelos	Parâmetros			R^2	P(%)
BET	Xm 0,148354	C 0,893693	n 150	0,999	2,61
GAB	Xm 0,115068	C 1,286035	k 1,039326	0,999	1,88
Halsey	a'' 0,149160	b 0,771344		0,999	4,83
Oswin	a 0,139902	b 1,026300		0,999	2,60

Para a isoterma de dessorção do caju à temperatura de 50° C, o modelo de Halsey foi o único que apresentou um desvio elevado (11,71%), apesar do coeficiente de determinação ter sido muito bom (Tabela 9). Já para isoterma de 60° C, tem-se que as equações de BET e GAB podem descrevê-la satisfatoriamente, visto que apresentaram

bons coeficientes de determinação e valores de P abaixo de 7,13%, conforme mostrado na Tabela 10. No entanto, GAB apresentou um menor P e maior R^2 .

Tabela 9 - Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 50° C

Modelos	Parâmetros			R^2	P(%)
BET	Xm	C	n	0,999	6,19
	0,165359	0,387763	150		
GAB	Xm	C	k	0,999	6,88
	0,088298	0,860243	1,067046		
Halsey	a''	b		0,999	11,71
	0,141768	0,662468			
Oswin	a	b		0,999	5,46
	0,093584	1,212083			

Tabela 10 - Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 60° C

Modelos	Parâmetros			R^2	P(%)
BET	Xm	C	n	0,994	7,13
	63,182000	0,000501	150		
GAB	Xm	C	k	0,999	3,56
	0,062617	0,413187	1,176398		
Halsey	a''	b		0,999	10,24
	0,193248	0,430082			
Oswin	a	b		0,998	11,75
	0,047840	1,919372			

Para a temperatura de 65° C o melhor ajuste foi obtido por GAB, sendo os outros modelos inadequados para representar bem esta isoterma, por apresentarem valores elevados para o desvio médio relativo.

Tabela 11 - Parâmetros de ajuste da isoterma de desorção do caju aos modelos testados, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), para a temperatura de 65° C

Modelos	Parâmetros			R²	P(%)
BET	Xm	C	n	0,977	28,10
	65,11402	0,000392	150		
GAB	Xm	C	k	0,999	1,72
	0,053139	0,191001	1,260162		
Halsey	a''	b		0,999	13,36
	0,219781	0,339698			
Oswin	a	b		0,998	12,16
	0,033451	2,294283			

Pela análise das Tabelas 7 a 11, observou-se que GAB foi o único modelo que apresentou um bom ajuste para todas as isotermas estudadas, sendo o melhor em quatro das cinco temperaturas estudadas. Dessa forma, utilizou-se neste trabalho a equação de GAB para ajustar as isotermas de desorção do caju (Figura 3).

Este modelo é amplamente utilizado, para descrever o comportamento de isotermas de alimentos por diversos pesquisadores: Kiranoudis et al. (1993) utilizaram o modelo de GAB para descrever isotermas de alguns vegetais, para temperaturas de 30, 45 e 60° C e atividades de água entre 0,10 e 0,90; Kiranoudis et al. (1997), ajustaram as isotermas de sorção de maçã, pêra, kiwi e banana ao referido modelo; Unadi et al. (1998), observaram que GAB foi a equação de sorção mais satisfatória para prever as isotermas de desorção de tomate; Kechaou e Maalej (1999) verificaram que GAB representou satisfatoriamente as isotermas de desorção de banana para temperaturas de 35, 50 e 70° C e valores de atividade de água de 0 a 0,90; Telis et al. (2000) obtiveram um bom ajuste de GAB aos dados experimentais de isotermas de casca e polpa de uva, para temperaturas de 20 a 70° C e atividades de água entre 0,02 e 0,85. A escolha deste modelo encontra respaldo, ainda, em Rao e Rizvi (1986), para quem a equação de GAB descreve a sorção de água de quase todos os alimentos com atividade de água variando de 0 a 0,9, por ter uma base teórica fundamentada e apresentar três parâmetros, relativamente simples, que

têm significado físico do processo, e por ser capaz de descrever algum efeito da temperatura no processo de sorção.

Conforme evidenciado nas Tabelas apresentadas (7 a 11), o conteúdo de umidade da monocamada (X_m) e o parâmetro C , para o modelo de GAB, decresceram com o aumento da temperatura. Resultados semelhantes foram obtidos por McLaughlin e Magee (1998) para X_m , nas isotermas de batatas. Decréscimo similar se deu para o parâmetro C do referido modelo, para as isotermas de sorção do milho superdoce (Yoshida, 1997).

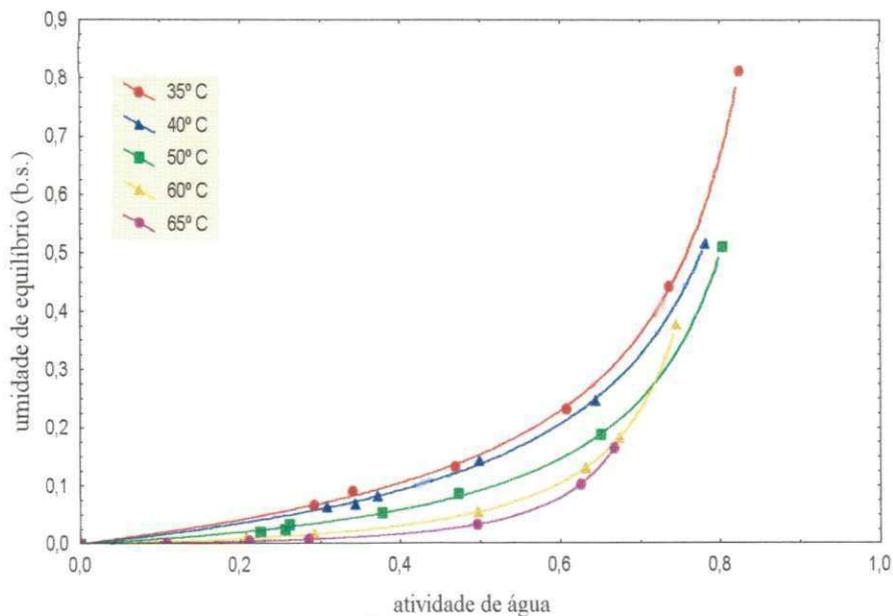


Figura 3 – Isotermas de dessorção do caju nas temperaturas de 35, 40, 50, 60 e 65° C, ajustadas pelo modelo de GAB

Pela Figura 3, observa-se que a quantidade de água sorvida a uma determinada atividade de água, aumenta com a diminuição da temperatura. E, que o aumento da temperatura resulta em aumento da atividade de água pelo mesmo conteúdo de umidade de equilíbrio. Esses resultados foram também observados por Adam et al. (2000), para isotermas de sorção de cebola, e encontram-se respaldados em Rizvi (1986), para

quem este comportamento é geralmente atribuído à uma redução no número de sítios ativos, devido a mudanças químicas e físicas provocada pela temperatura. No entanto, a extensão dessas mudanças depende da natureza ou constituição do alimento. A partir de valores de atividade de água acima de 0,70 observa-se uma tendência à inversão da dependência da temperatura, ou seja, em o caju dessecar mais umidade em temperaturas mais altas. Isto pode ser explicado devido à dissolução dos açúcares da fruta, que aumenta significativamente quando a temperatura é aumentada (Gabas, 1998).

4.2 – Cinética de Secagem

A cinética de secagem do caju, em camada fina, e os efeitos das principais variáveis do processo: temperatura e velocidade do ar de secagem, é apresentada na forma de adimensional do conteúdo de umidade, $(X-X_c)/(X_0-X_c)$, no Apêndice A, e em forma gráfica na Figura 4.

Pode-se verificar pela Figura 4, que ocorre uma diminuição no tempo gasto para secar o caju em função da elevação da temperatura, ou seja, as curvas de secagem mostram que para um mesmo tempo do processo, quanto maior for a temperatura, maior é a taxa de secagem, e mais rapidamente esta se processa. Observa-se que o tempo gasto (12 horas) para secar o caju a temperaturas mais baixas (35 e 40° C) é o dobro do tempo despendido pela temperatura mais elevada (65° C). Nota-se que nesta temperatura o produto começa a entrar em equilíbrio a partir de 2,5 horas; enquanto que nas temperaturas mais baixas este momento se dá a partir de 7 horas de secagem.

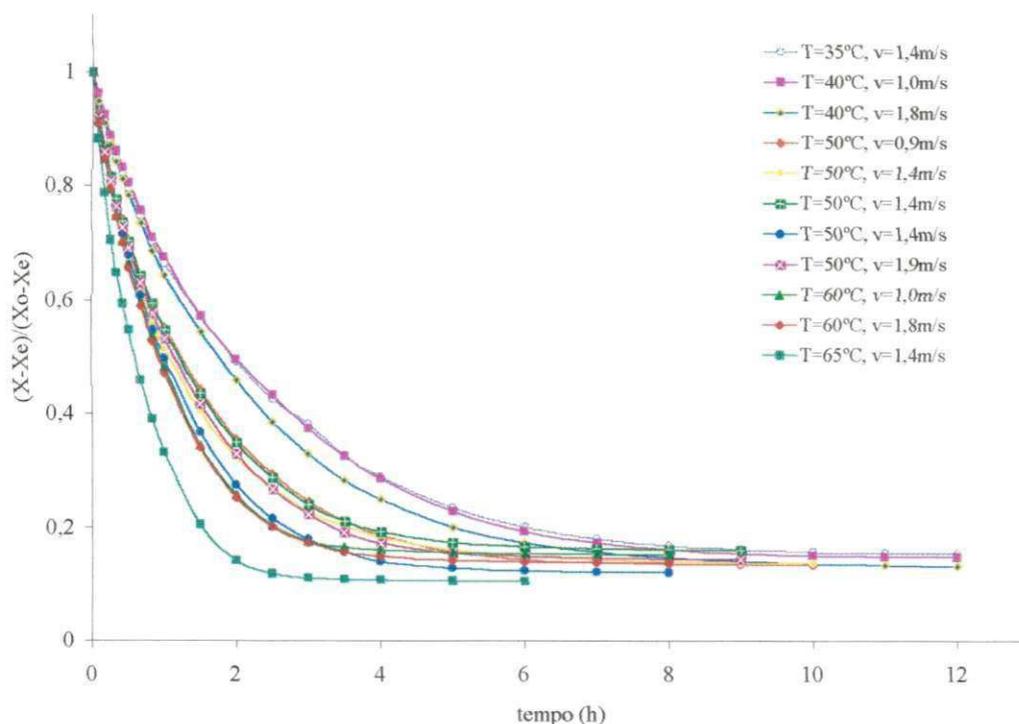


Figura 4 – Cinética de secagem do caju para cinco temperaturas e cinco velocidades do ar de secagem

Observa-se, ainda, na referida Figura, que a taxa de secagem praticamente não é afetada pela velocidade do ar, verificando-se, apenas, que para a temperatura de 40° C, a velocidade menor (1,0 m.s⁻¹) teve uma pequena influência para que a secagem se desse de forma mais lenta. Deste modo, pôde-se considerar que esta variável não exerceu importância sobre o processo de secagem.

Mediante a exposição dos dados, verificou-se que a temperatura é o principal fator que governa o processo de secagem. Estes resultados encontram-se respaldados por vários pesquisadores, que consideraram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerceu maior influência na cinética de secagem de alimentos. Dentre eles pode-se citar: Yoshida (1997), Prado (1998) e Silva (1999), secando milho superdoce, tâmaras e algaroba, respectivamente.

Analisando-se as curvas do adimensional de umidade versus o tempo de secagem, observou-se que o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente, não apresentando um período de taxa constante definido. Daí pode-se inferir que o mecanismo de difusão é o que governa o movimento da umidade através da estrutura do material. De acordo com Keey (1975), a ausência do período de secagem à taxa constante pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois, mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor de água pura. A ausência do período à taxa constante, também foi observada por Gabas (1998), estudando a secagem de uva; Vergara et al. (1997), para maçãs e Gouveia (1999), para gengibre.

4.3 – Planejamento Experimental

Os dados obtidos a partir do planejamento experimental (Tabela 12) mostram os efeitos principais da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade do caju, em cada tempo de secagem. Observa-se mediante a referida tabela, que esses efeitos são crescentes até o tempo de 1,5 h. E, como os dados submetidos a análise se encontravam na forma adimensional de umidade (Adm), verifica-se que nesse tempo de secagem a mudança do nível -1 (40° C) para o nível +1 (60° C), ocasiona uma redução de 0,238 Adm no conteúdo de umidade do caju. Este efeito negativo, ocasionado pela mudança do nível inferior para o nível superior de temperatura, resultando na queda da umidade do produto, também foi observado por Gouveia (1999) na secagem de gengibre, utilizando faixa semelhante de temperatura. Isto ocorre devido ao efeito significativo da temperatura sobre o processo de secagem, controlando a perda de umidade do produto.

Para a faixa de velocidade do ar de secagem estudada (0,9 a 1,9 m.s⁻¹) não verificou-se efeito significativo sobre o processo.

Tabela 12 – Efeitos principais da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade do caju, para diferentes períodos de secagem

Tempo (h)	Efeitos
0,25	- 0,105
0,50	- 0,154
1,00	- 0,209
1,50	- 0,238
2,00	- 0,235
3,00	- 0,185
4,00	- 0,121
5,00	- 0,078

Os valores da análise de variância (ANOVA) e dos coeficientes de regressão, para os tempos de secagem de 0,25, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 h, bem como os modelos fornecidos pelo planejamento experimental, estão apresentados nas Tabelas B.1 a B.8 do Apêndice B. Para a validação dos modelos, utilizou-se como parâmetros o coeficiente de determinação (R^2) e o teste F.

Observou-se que em cada tempo de secagem, onde o efeito da temperatura foi significativo, para a construção dos modelos empíricos, o modelo de segunda ordem ou quadrático, apresentou um maior valor de R^2 , e que a relação F calculado frente ao F tabelado (ao nível de 95% de confiança), variou de 6,04 a 19,83 para o modelo quadrático; enquanto que para o modelo linear, esta relação variou apenas de 0,27 a 5,40. Verificou-se, então, que o modelo quadrático apresentou-se melhor que o modelo linear ou de primeira ordem para descrever a cinética de secagem do caju. Resultado esse, que se respalda nos obtidos por Gouveia (1999).

A Tabela 13 contem os modelos empíricos de 2^a ordem, ajustados para cada tempo de secagem das amostras de caju. Onde, têm-se que os parâmetros destacados foram

aqueles estatisticamente significativos. Nas Tabelas 14 a 21 se encontram os resultados da ANOVA para o modelo quadrático, nos tempos de 0,25 a 5,0 h.

O coeficiente de determinação (R^2) dos dados contidos nas tabelas 14, 15, 16, 20 e 21, ficou abaixo de 0,90, que se interpretado isoladamente poderia recomendar um ajuste não muito bom do modelo. No entanto, observando-se a relação de F calculado/F tabelado, encontra-se valores de 8,62, 12,14, 13,73, 9,12 e 6,04, respectivamente, indicando que os valores para F calculado variaram de 6,04 a 13,73 vezes o valor de F tabelado. Isto adverte que esses modelos podem ser utilizados para fins preditivos, pois, para que isto ocorra, Box e Wetz, citado por Barros Neto (1995), recomendam que F tabelado deva ser no mínimo 4 a 5 vezes o valor de F tabelado.

Tabela 13 – Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de caju

Tempo (h)	Modelo
0,25	$Adm = 0,817 - 0,052 T + 0,002 T^2 - 0,004 V + 0,013 V^2 + 0,004 TV$
0,50	$Adm = 0,701 - 0,077 T + 0,003 T^2 - 0,006 V + 0,017 V^2 + 0,004 TV$
1,00	$Adm = 0,538 - 0,104 T + 0,002 T^2 - 0,009 V + 0,024 V^2 + 0,005 TV$
1,50	$Adm = 0,423 - 0,119 T + 0,003 T^2 - 0,008 V + 0,024 V^2 + 0,006 TV$
2,00	$Adm = 0,340 - 0,118 T + 0,009 T^2 - 0,010 V + 0,022 V^2 + 0,008 TV$
3,00	$Adm = 0,243 - 0,093 T + 0,021 T^2 - 0,010 V + 0,015 V^2 + 0,011 TV$
4,00	$Adm = 0,194 - 0,060 T + 0,019 T^2 - 0,008 V + 0,009 V^2 + 0,006 TV$
5,00	$Adm = 0,169 - 0,039 T + 0,013 T^2 - 0,006 V + 0,006 V^2 + 0,004 TV$

$$Adm = (X - X_e) / (X_o - X_e)$$

Tabela 14 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 0,25 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,021938	0,021938	1	44,14
Resíduos	0,004475	0,000497	9	-
Falta de ajuste	0,004305	0,000617	7	-
Erro puro	0,000170	0,000085	2	-
Total	0,026413	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,83	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	8,62

Tabela 15 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 0,5 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,047728	0,047728	1	62,15
Resíduos	0,006909	0,000768	9	-
Falta de ajuste	0,006489	0,000927	7	-
Erro puro	0,000420	0,000210	2	-
Total	0,054637	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,87	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	12,14

Resultados e discussão

Tabela 16 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 1,0 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,087322	0,087322	1	70,31
Resíduos	0,011181	0,001242	9	-
Falta de ajuste	0,009906	0,001415	7	-
Erro puro	0,001275	0,000638	2	-
Total	0,098503	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,89	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	13,73

Tabela 17 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 1,5 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,113182	0,113182	1	95,67
Resíduos	0,010646	0,001183	9	-
Falta de ajuste	0,008365	0,001195	7	-
Erro puro	0,002281	0,001141	2	-
Total	0,053136	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,91	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	18,69

Resultados e discussão

Tabela 18 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 2,0 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,110755	0,110755	1	101,52
Resíduos	0,009817	0,001091	9	-
Falta de ajuste	0,006933	0,000990	7	-
Erro puro	0,002884	0,001442	2	-
Total	0,120572	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,92	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	19,83

Tabela 19 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 3,0 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,068468	0,068468	1	82,10
Resíduos	0,007505	0,000834	9	-
Falta de ajuste	0,005457	0,000780	7	-
Erro puro	0,002048	0,001024	2	-
Total	0,075973	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,90	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	16,04

Tabela 20 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 4,0 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,029189	0,029189	1	46,70
Resíduos	0,005623	0,000625	9	-
Falta de ajuste	0,004076	0,000582	7	-
Erro puro	0,001547	0,000774	2	-
Total	0,034812	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,84	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	9,12

Tabela 21 – Resultados da ANOVA para o modelo quadrático no tempo 5,0 h

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,012179	0,012179	1	30,91
Resíduos	0,003545	0,000394	9	-
Falta de ajuste	0,002481	0,000354	7	-
Erro puro	0,001064	0,000532	2	-
Total	0,015724	-	10	-
Coefficiente de determinação	0,77	-	-	-
F tabelado	-	-	-	5,12
F calc /F tab	-	-	-	6,04

Nas Tabelas 17, 18 e 19, se encontram coeficientes de determinação acima de 0,90, e a relação de F_{cal}/F_{tab} é de 18,69, 19,83 e 16,04, respectivamente, bem acima do mínimo recomendado que é de 4 a 5.

Pela análise de variância, pode-se indicar que o modelo de 2ª ordem é útil para fins preditivos da cinética de secagem do caju. No entanto, por ser uma equação de natureza empírica, deve ser usada para a secagem desse produto nas condições em que foi conduzido a pesquisa.

A partir dos modelos ajustados para cada tempo de secagem, gerou-se as superfícies de resposta – ferramenta do planejamento experimental que possibilita uma fácil compreensão e visualização gráfica da tendência das respostas do processo em estudo.

Nas Figuras de 5 a 8, observa-se a redução do conteúdo de umidade do caju, na forma adimensional, em função da temperatura, velocidade do ar e tempo de secagem. A análise destas figuras, mostra que a queda do conteúdo de umidade do caju é fortemente influenciada pelo aumento da temperatura – o que vem ilustrar os resultados obtidos pelo planejamento experimental e pelo comportamento das curvas de secagem. Nota-se que, em todas as superfícies de resposta obtidas, há uma tendência de maximização da redução do conteúdo de umidade na faixa mais elevada de temperatura, independentemente da velocidade do ar de secagem utilizada. Isto porque, como visto anteriormente, as faixas de velocidades do ar estudadas não apresentaram efeitos significativos no processamento da secagem do caju.

Resultados semelhantes foram obtidos por McMinn e Magee (1996), no estudo dos efeitos da velocidade e da temperatura do ar na taxa de secagem de batatas, onde verificaram ser a temperatura o principal fator controlador do processo; Kiranoudis et al. (1997) investigaram uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar (temperatura, umidade e velocidade superficial), na cinética de secagem de maçã, pêra, kiwi e banana, e verificaram que os parâmetros, do modelo considerado, foram grandemente afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem; Krokida et al. (2000) estudando os efeitos de vários fatores no processo de secagem de maçãs, verificaram que a cinética de secagem foi fortemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem.

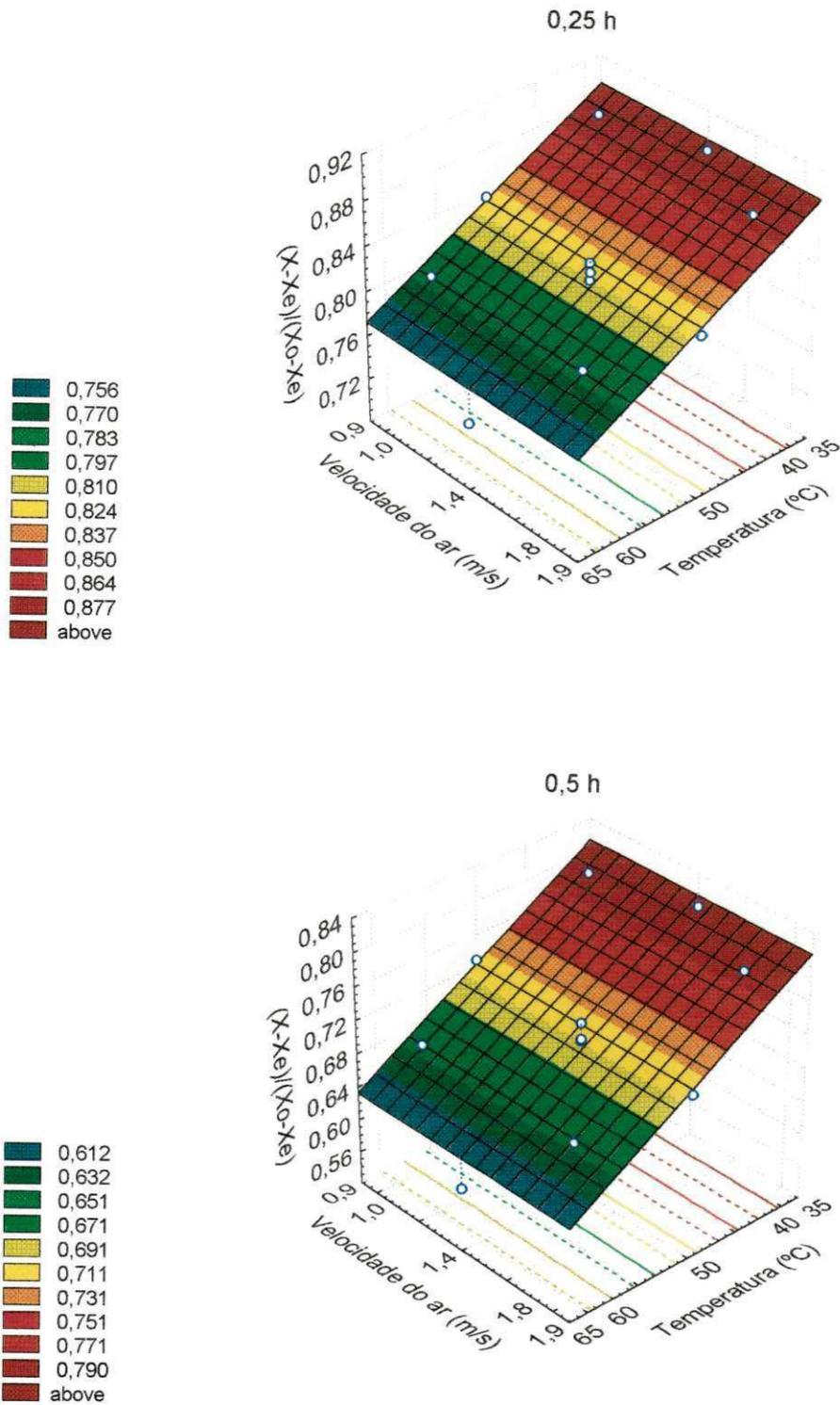


Figura 5 – Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 0,25 e 0,5 h

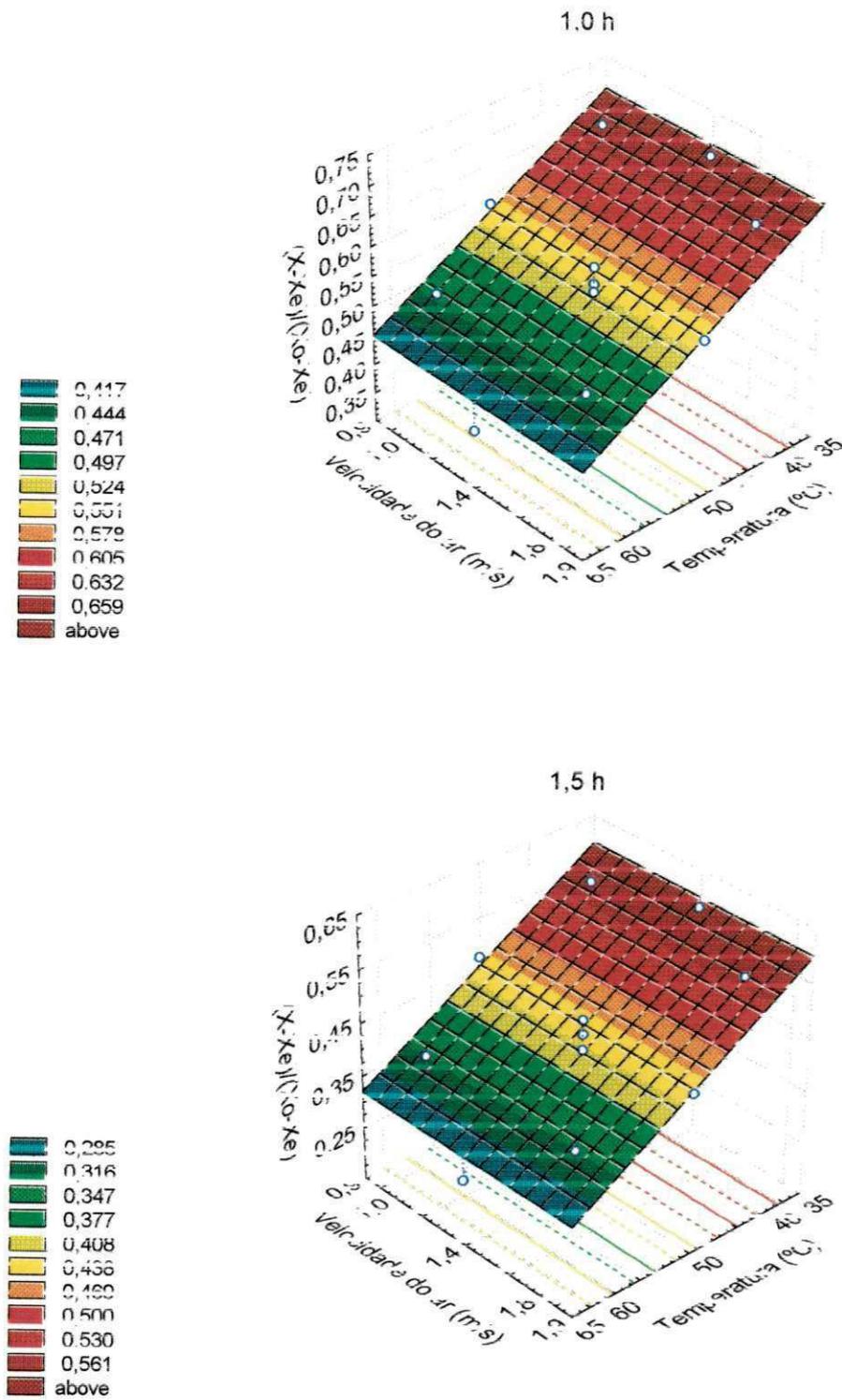


Figura 6 – Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 1,0 e 1,5 h

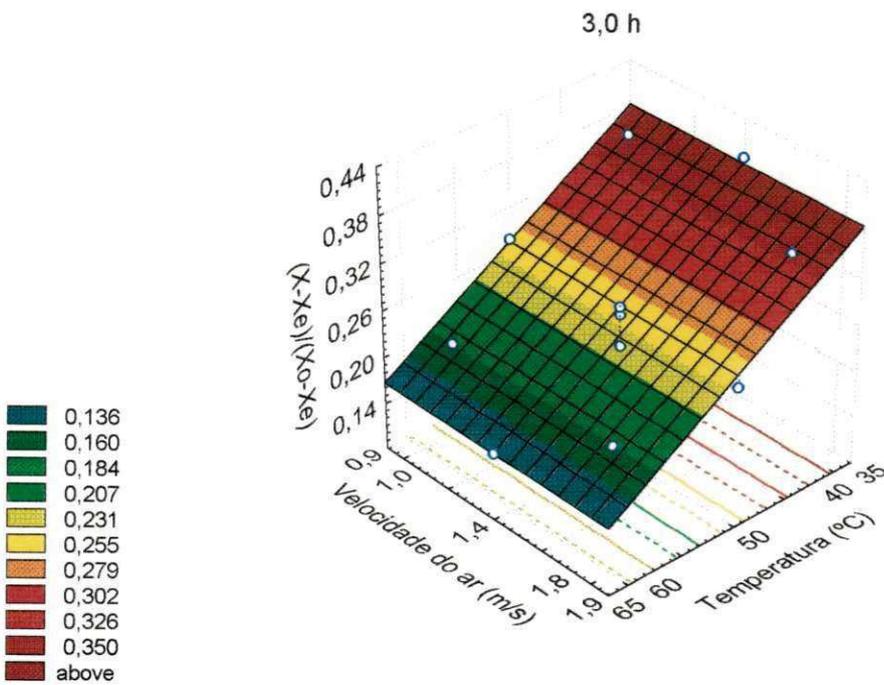
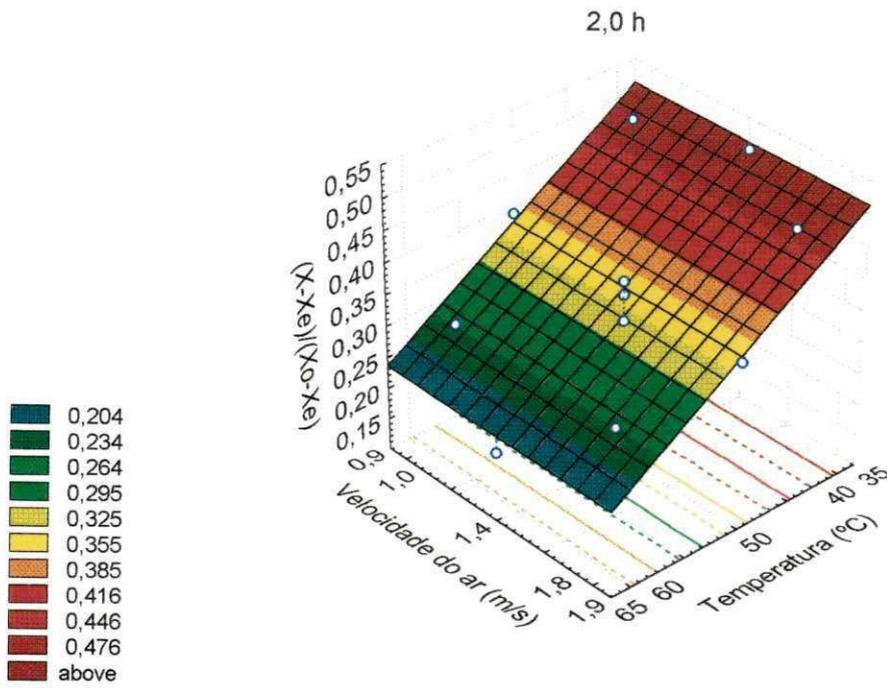


Figura 7 – Superfícies de resposta do adimensional 7 de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 2,0 e 3,0 h

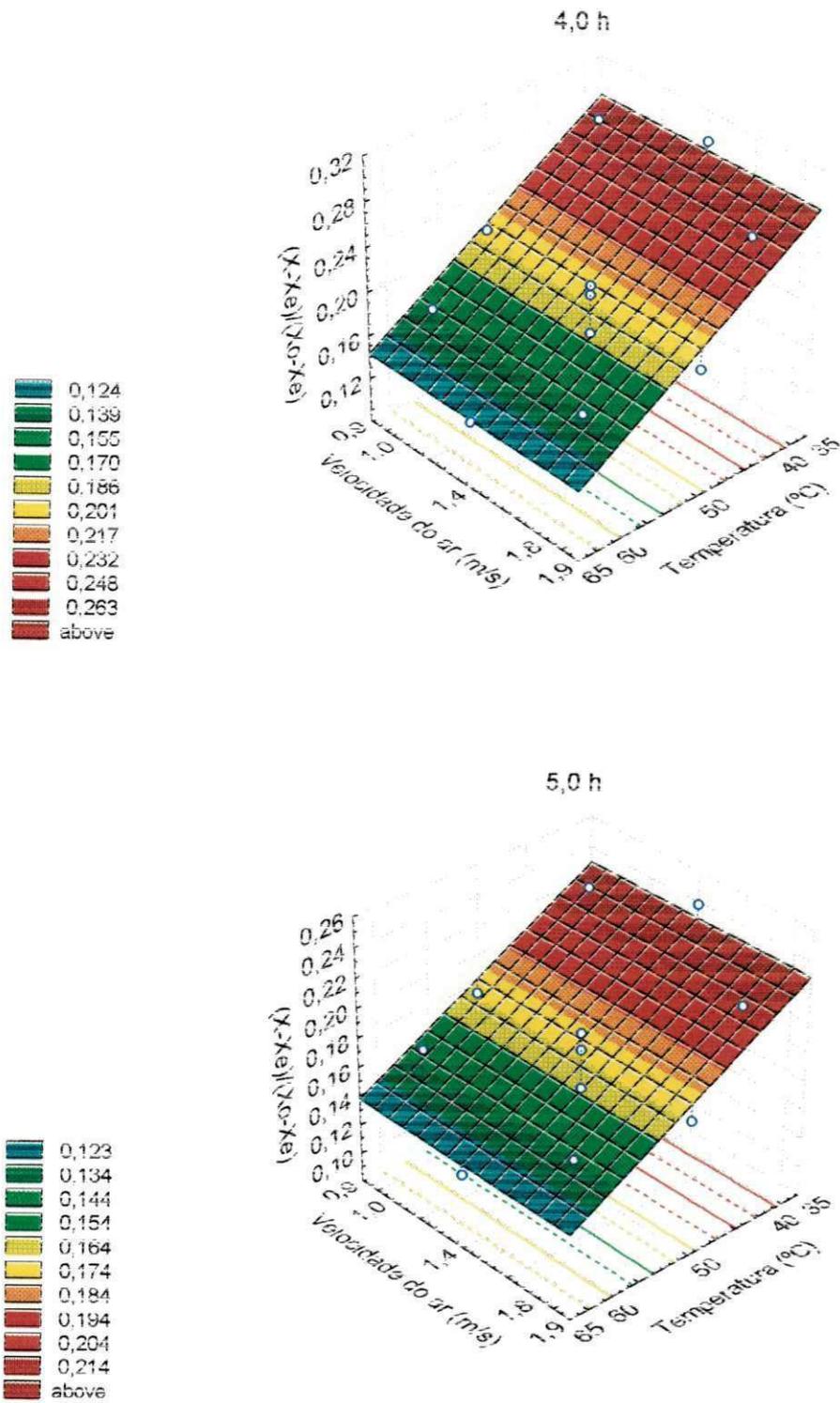


Figura 8 – Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 4,0 e 5,0 h

5 – CONCLUSÕES

Para as condições em que realizou-se este trabalho, pode-se concluir que:

1 – A equação de GAB foi a que melhor se ajustou aos dados das isotermas de desorção do caju;

2 – O tempo gasto para secar o produto em temperaturas mais baixas (35 e 40° C) foi o dobro do tempo utilizado na temperatura mais elevada (65° C) – que é de seis horas;

3 – Os resultados obtidos no planejamento experimental mostraram efeitos significativos, apenas, para a temperatura do ar de secagem;

4 – O modelo empírico de 2ª ordem é o que melhor representa a cinética de secagem, podendo ser utilizado para fins preditivos;

5 – As superfícies de resposta evidenciaram ser a temperatura o fator controlador do processo, indicando a melhor faixa de trabalho àquela correspondente à temperatura mais elevada.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, E., MUHLBAUER, W., ESPER, A., WOLF, W. F., SPIESS, W. Effect of temperature on water sorption equilibrium of onion (*Allium cepa* L.). **Drying Technology**, v.18, n.9, p.2117-2129, 2000.

ALMEIDA, B. V. **Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*)**. Viçosa: Imprensa Universitária/UFV, 1979. 70 p. (Dissertação de Mestrado)

ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. **Journal of American Chemical Society**, v.68, p.686, 1946.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**. 14. ed. Arlington, Virginia, 1984. 1.v. (várias paginações)

BARROS NETO, B. de, SCARMÍNIO, I. S., BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. 299 p.

BLEINROTH, E. W. Matéria-prima. In: MEDINA, J. C. et al. **Frutas tropicais: Caju**, v.4. Campinas: ITAL, 1978. p.67-88.

BOX, G. E. P., WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal Royal Statistics Society**, p.38, 1951.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction designs, data analysis and model building**. Nova York: Wiley, 1978.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. H. **Drying cereal grains**. Westport: The Publishing Company, 1978. 265 p.

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

CÂMARA CASCUDO, Luiz. **História da alimentação no Brasil**. Belo Horizonte: Itatiaia/Edusp, 1983. p.683, v.2.

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

CARNEGIE, E. J. **Solar Fruit Drying**. Amsterdã: Elsevier, 1991. 335 p. (Solar Energy in Agriculture)

CASTAÑON, C. A., BARRAL, A. O. Sorption isotherms of raw squid (*Illex argentinus*) muscle. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.21, n.4, p.212-215, 1988.

CAVALCANTE, R. D. **Cultura do caju**. Recife: SUDENE/UFRPE, 1977. 45 p. (Curso de Especialização em Fruticultura)

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.). **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1983. p.73-102.

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

CRUZ, V. M. F. da. **Secagem de produtos agrícolas: obtenção de fruta-passa a partir do pseudofruto do cajueiro (*Anacardium occidentale*, L.)**. Natal: Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1989. 101 p. (Dissertação de Mestrado)

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des. **Science Aliments**, v.3, n.1, p.1-36, 1983.

De BOER, J. H. **The dynamical character of adsorption**. Oxford: Clarend Press, 1953.

FORTES, M., OKOS, M. R. Drying theories; their bases and limitacions as applied to foods and grains. In: MUJUNDAR, A. S., (ed.). **Advances in drying**. New York: Science Press, 1980. p.153-162.

FORTES, M., OKOS, M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.4, p.756-760, 1981.

GABAS, A. L. **Secagem de uva Itália em leito fixo**. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1998. 135 p. (Dissertação de Mestrado)

GOUVEIA, J. P. G. de. **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zinger officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo**. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimento, 1999. 161 p. (Tese de Doutorado)

GUGGHENHEIM, E. A. **Applications of statistical mechanics**. Oxford: Clarendon Press, 1966. 86 p.

- GUSTAFSON, R. J., HALL, G. E. Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155 F. **Transaction of the ASAE**, v.17, n.1, p.120-124, 1974.
- IGLESIAS, H. A., CHIRIFE, J. **Handbook of Food Isotherms: Water sorption parameters for food and food components**. Orlando: Academic Press, 1983.
- KAYMAK-ERTEKIN, F., SULTANOGLU, M. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. **Journal of Food Engineering**, v.47, n.3, p.225-231, 2001.
- KECHAOU, N., MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banana. **Drying Technology**, v.17, n.6, p.1201-1213, 1999.
- KEEY, R. B. Moisture: solid relationships. In: KEEY, R. B. **Drying principles and practices**. Oxford, 1972. p.19-49.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practices**. First Edition Reprinted, Pergamon Press, GB, 1975.
- KHURI, A., CORNELL, J. A. **Response surface: designs and analyses**. American Society for quality Control, 1987.
- KIRANOUDIS, C. T., MAROULIS, Z. B., TSAMI, E., MARINOSKOURIS, D. Equilibrium moisture-content and heat of desorption of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, v.20, n.1, p.55-74, 1993.
- KIRANOUDIS, C. T., TSAMI, E., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits. **Drying Technology**, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.
- KROKIDA, M. K., KIRANOUDIS, C. T., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. Drying related properties of apple. **Drying Technology**, v.18, n.6, p.1251-1267, 2000.

Referências Bibliográficas

- LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, v.22, n.3, p.263-272, 1968.
- LACERDA FILHO, A. F. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café**. Viçosa: UFV, 1986. 136 p. (Dissertação de Mestrado)
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases and plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of American Chemical Society**, v.46, p.1361-1403, 1918.
- LIMA, V. P. M. S. Botânica. In: LIMA, V. P. M. S., et al. **A cultura do cajueiro no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: BNB, 1988. p.31-35.
- LOMAURO, C. J., BAKSHI, A. S., LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies**, v.18, p.112-22, 1985.
- LUIKOV, A. V., MIKHAILOV, Y. O. **Teory of energy and mass transfer**. Oxford: Pergamon, 1965. 329 p.
- LUIZ, A. M. **Modelos para pesquisas de secagem de meios porosos**. Rio de Janeiro: COOPE, UFRJ, 1982. 278 p. (Tese de Doutorado)
- McLAUGHLIN, C. P., MAGEE, T. R. A. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption por potatoes. **Journal of Food Engineering**, v.35, n.3, p.267-280, 1998.
- McMINN, W. A. M., MAGEE, T. R. A. Air drying kinetics of potato cylinders. **Drying Technology**, v.14, n.9, p.2025-2040, 1996.

MEDINA, J. C. Cultura. In: MEDINA, J. C. et al.. **Frutas tropicais**: Caju, v.4. Campinas: ITAL, 1978. p.67-88.

MURR, F. E. X. **Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*, L. Cultivar Bintje)**. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1992. 188 p. (Tese de Doutorado)

PARK, K. J. **Cinética de secagem**. Campinas, 1990. (Apontamentos do curso de pós-graduação – FEAGRI/UNICAMP)

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

PERRY, J. H. **Chemical Engineer's Handbook**. 6. ed. New York: Mc Graw-Hill, 1987.

PRADO, M. E. T. **Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa**. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, 1998. 149 p. (Tese de Doutorado)

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos**: Armazéns e silos. São Paulo: Agronômica Ceres, 1986. 405 p.

RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. Nova Yorque: Marcel Dekker, 1986. 398 p.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, 1986. p.155-165.

- SILVA, F. L. H. **Modelagem, simulação e controle de fermentação alcoólica extrativa**
Campinas: FEA/DEA/UNICAMP, 1998. 162 p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, J. E. da. **Secagem de vagens de algaroba *Prosopis juliflora* (S.W.) D.C. em
laboratório e a nível de fazenda**. Campina Grande: COPEAG/CCT/UFPB, 1999. 78
p. (Dissertação de mestrado)
- SOUSA, S. **Desenvolvimento experimental de passa de umbu (*Spondias tuberosa*,
Arruda Câmara)**. Campina Grande: COPEAG/CCT/UFPB, 1999. 98 p. (Dissertação
de mestrado)
- SPIESS, W. E. L., WOLF, W. F. The results of the Cost 90 project on water activity. In:
JOWITT, R. (ed) **Physical Properties of Foods**. London and New York: Applied
Science Publishers, 1983. p.65-91.
- TELIS, V. R. N., GABAS, A. L., MENEGALLI, F. C., TELIS, R. J. Water sorption
thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochemica
Acta**, v.343, n.1-2, p.49-56, 2000.
- TREYBAL, R. B. Drying. In: **Mass transfer operations**. New York: McGraw-Hill, 1968.
p.569-575.
- UNADI, A., FULLER, R. J., MACMILLAN, R. H. Prediction of the equilibrium moisture
content of tomatoes. **Food Australia**, v.50, n.4, p.200-203, 1998.
- VAN DEN BERG, C., BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems:
theoretical aspects. In: **Water activity: influences on food quality**. Ed. L. B.
Rockland and G. F. Stewart: Academic Press, 1981.

VERGARA, F., AMEZAGA, E., BARCENAS, M. E., WELTI, J. Analysis of the drying processes of osmotically dehydrated apple using the characteristic curve model. **Drying Technology**, v.15, n.3-4, p.949-963, 1997.

WANG, N., BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.14, n.1, 1991.

YOSHIDA, C. M. P. **Cinética de secagem do milho doce**. Campinas: Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, 1997. 149 p. (Dissertação de Mestrado)

A.1 – Resultados da cinética de secagem do caju

	T=35° C Var=1,4ms ⁻¹	T=40° C Var=1,0ms ⁻¹	T=40° C Var=1,8ms ⁻¹	T=50° C Var=0,9ms ⁻¹	T=50° C Var=1,4ms ⁻¹	T=50° C Var=1,4ms ⁻¹	T=50° C Var=1,4ms ⁻¹	T=50° C Var=1,9ms ⁻¹	T=60° C Var=1,0ms ⁻¹	T=60° C Var=1,8ms ⁻¹	T=65° C Var=1,4ms ⁻¹
tempo (min)	(adm)*										
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,948	0,963	0,950	0,926	0,919	0,921	0,910	0,919	0,914	0,910	0,883
10	0,914	0,925	0,911	0,866	0,852	0,865	0,847	0,860	0,848	0,848	0,787
15	0,879	0,889	0,873	0,820	0,797	0,816	0,805	0,808	0,795	0,796	0,705
20	0,847	0,861	0,843	0,778	0,756	0,776	0,760	0,765	0,746	0,746	0,648
25	0,821	0,833	0,813	0,741	0,715	0,737	0,716	0,727	0,703	0,702	0,594
30	0,795	0,805	0,784	0,707	0,677	0,703	0,680	0,693	0,664	0,658	0,547
40	0,748	0,757	0,735	0,645	0,615	0,644	0,609	0,631	0,596	0,591	0,459
50	0,703	0,710	0,687	0,590	0,558	0,595	0,548	0,577	0,536	0,528	0,391
60	0,665	0,676	0,644	0,553	0,513	0,547	0,498	0,533	0,482	0,471	0,333
90	0,573	0,573	0,545	0,444	0,405	0,436	0,369	0,418	0,345	0,341	0,205
120	0,493	0,497	0,460	0,356	0,325	0,351	0,276	0,330	0,258	0,254	0,142
150	0,428	0,434	0,387	0,295	0,268	0,289	0,217	0,269	0,204	0,203	0,119
180	0,383	0,376	0,331	0,247	0,229	0,241	0,180	0,224	0,177	0,174	0,111
210	0,328	0,327	0,283	0,212	0,203	0,211	0,158	0,192	0,166	0,158	0,109
240	0,291	0,287	0,251	0,187	0,184	0,194	0,141	0,174	0,162	0,151	0,108
300	0,236	0,229	0,201	0,158	0,161	0,175	0,130	0,156	0,158	0,144	0,107
360	0,202	0,194	0,174	0,145	0,150	0,168	0,125	0,150	0,156	0,142	0,106
420	0,181	0,174	0,158	0,140	0,144	0,164	0,123	0,148	0,155	0,140	
480	0,170	0,162	0,148	0,138	0,141	0,163	0,123	0,146	0,154	0,139	
540	0,163	0,156	0,142	0,137	0,139	0,162		0,146			
600	0,159	0,153	0,138	0,136	0,138						
660	0,157	0,151	0,135								
720	0,156	0,150	0,134								

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

B.1 – ANOVA para o tempo = 0,25 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,007440	0,021938	1	1	0,007440	0,021938	1,79	44,14	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,002084	0,004475	5	9	0,004168	0,000497	-	-	Fc/Ft R	0,27	8,62
F. de ajuste	0,001914	0,004305	3	7	0,000638	0,000617	7,51	7,26	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,000170	0,000170	2	2	0,000085	0,000085	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,39	0,38
Total	0,009524	0,026413	6	10	-	-	0,78	0,83			

Modelo Linear → $Adm = 0,824 - 0,043 T - 0,004 V + 0,004 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,817 - 0,052 T + 0,002 T^2 - 0,004 V + 0,013 V^2 + 0,004 TV$

B.2 – ANOVA para o tempo = 0,5 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,017919	0,047728	1	1	0,017919	0,047728	25,10	62,15	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,003570	0,006909	5	9	0,000714	0,000768	-	-	Fc/Ft R	3,80	12,14
F. de ajuste	0,003150	0,006489	3	7	0,001050	0,000927	5,00	4,41	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,000420	0,000420	2	2	0,000210	0,000210	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,26	0,23
Total	0,021489	0,054637	6	10	-	-	0,83	0,87			

Modelo Linear → $Adm = 0,710 - 0,067 T - 0,007 V + 0,004 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,701 - 0,077 T + 0,003 T^2 - 0,006 V + 0,017 V^2 + 0,004 TV$

B.3 – ANOVA para o tempo = 1,0 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	Gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,033584	0,087322	1	1	0,033584	0,087322	28,13	70,31	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,005971	0,011181	5	9	0,001194	0,001242	-	-	Fc/Ft R	4,26	13,73
F. de ajuste	0,004696	0,009906	3	7	0,001565	0,001415	2,45	2,22	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,001275	0,001275	2	2	0,000638	0,000638	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,13	0,11
Total	0,039555	0,098503	6	10	-	-	0,85	0,89			

Modelo Linear → $Adm = 0,547 - 0,092 T - 0,011 V + 0,005 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,538 - 0,104 T + 0,002 T^2 - 0,009 V + 0,024 V^2 + 0,005 TV$

B.4 – ANOVA para o tempo = 1,5 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	Gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,046604	0,113182	1	1	0,046604	0,113182	35,68	95,67	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,006532	0,010646	5	9	0,001306	0,001183	-	-	Fc/Ft R	5,40	18,69
F. de ajuste	0,004251	0,008365	3	7	0,001417	0,001195	1,24	1,05	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,002281	0,002281	2	2	0,001141	0,001141	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,06	0,05
Total	0,053136	0,123828	6	10	-	-	0,88	0,91			

Modelo Linear → $Adm = 0,431 - 0,108 T - 0,008 V + 0,006 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,423 - 0,119 T + 0,003 T^2 - 0,008 V + 0,024 V^2 + 0,006 TV$

B.5 – ANOVA para o tempo = 2,0 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	Gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,049430	0,110755	1	1	0,049430	0,110755	31,40	101,52	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,007871	0,009817	5	9	0,001574	0,001091	-	-	Fc/Ft R	4,75	19,83
F. de ajuste	0,004987	0,006933	3	7	0,001662	0,000990	1,15	0,69	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,002884	0,002884	2	2	0,001442	0,001442	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,06	0,04
Total	0,057301	0,120572	6	10	-	-	0,86	0,92			

Modelo Linear → $Adm = 0,346 - 0,111 T - 0,010 V + 0,008 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,340 - 0,118 T + 0,009 T^2 - 0,010 V + 0,022 V^2 + 0,008 TV$

B.6 – ANOVA para o tempo = 3,0 h

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	Gl 1ª ordem	Gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,031662	0,068468	1	1	0,031662	0,068468	22,70	82,10	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,006977	0,007505	5	9	0,001395	0,000834	-	-	Fc/Ft R	3,43	16,04
F. de ajuste	0,004929	0,005457	3	7	0,001643	0,000780	1,60	0,76	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,002048	0,002048	2	2	0,001024	0,001024	R²	R²	Fc/Ft Fa	0,08	0,04
Total	0,038639	0,075973	6	10	-	-	0,82	0,90			

Modelo Linear → $Adm = 0,244 - 0,089 T - 0,012 V + 0,011 TV$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,243 - 0,093 T + 0,021 T^2 - 0,010 V + 0,015 V^2 + 0,011 TV$

De nada sabemos.

Entretanto, somos capaces

De realizar tudo aquilo

Que temos interesse.