

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM DE CASCA DE CAROÇO DE ALGODÃO EM LEITO FIXO

THOMPSON FERNANDES MARIZ

Campina Grande - Paraíba
março de 1986

THOMPSON FERNANDES MARIZ

SECAGEM DE CASCA DE CAROÇO DE ALGODÃO EM LEITO FIXO

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para ob
tenção do **Grau de Mestre**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Operações e Processos

PROFESSOR ORIENTADOR: Odelsia Leonor Sánchez de Alsina

CAMPINA GRANDE

1986



M343s Mariz, Thompson Fernandes.
Secagem de casca de caroço de algodão em leito fixo /
Thompson Fernandes Mariz. - Campina Grande, 1986.
126 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1986.
"Orientação : Profa. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina".
Referências.

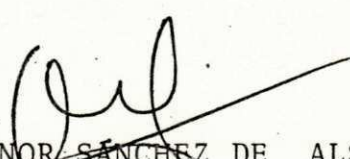
1. Algodão - Secagem Industrial. 2. Secagem -
Agricultura - Algodão. 3. Secadores Industriais. 4. Casca
de Algodão - Uso. 5. Dissertação - Engenharia Química. I.
Alsina, Odelsia Leonor Sánchez de. II. Universidade Federal
da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 66.047:633.511(043)

SECAGEM DE CASCA DE CAROÇO DE ALGODÃO EM LEITO FIXO

THOMPSON FERNANDES MARIZ

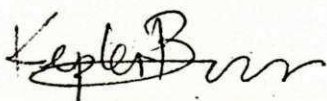
Dissertação Aprovada em 12.03. 86



ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA
Orientador



MICHEL FRANÇOIS FOSSY
Componente da Banca



KEPLER BORGES FRANÇA
Componente da Banca

Campina Grande
março/86

DEDICATÓRIA

A meus pais, irmãos e esposa, pelo amor
e apoio a realização deste trabalho

AGRADECIMENTOS

À Professora Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, pela contribuição nos trabalhos de computação, pela orientação, amizade e apoio a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Química, por me ter concedido lecionar apenas uma disciplina durante o período do Curso de Pós-Graduação.

Ao Núcleo de Tecnologia de Armazenamento do DEAg e, em especial, ao Prof. Mário E.R.M. Cavalcanti Mata pelo apoio na concessão de material bibliográfico e equipamentos de laboratório.

Ao Prof. Michel Fossy, pelos relevantes serviços prestados ao curso e, por conseguinte, aos alunos do Mestrado.

Ao Senhor José Marques da Cunha, pela ajuda prestada no laboratório, ao Senhor Geraldo Marinho de Figueiredo, pela doação da casca de caroço de algodão e a Sra. Maria José Bezerra Cavalcanti, pela atenção dispensada aos alunos do mestrado, pela amizade e datilografia do original.

RESUMO

A casca de caroço de algodão é um subproduto da indústria de extração de óleos vegetais, obtida com cerca de 13,7% de umidade em base seca após operação de descorticamento. É um material heterogêneo, fibroso e de alta porosidade. Sua produção é bastante elevada e possui eficiência de queima da ordem de 87%, constituindo-se, portanto, em material factível de ser usado em caldeiras ou em secadores de grãos como combustível substituto da lenha e do óleo de petróleo. Sabe-se que a eficiência de queima dos resíduos aumenta com a diminuição do teor de umidade com um conseqüente melhoramento no balanço térmico e, portanto, a secagem favorece em geral o balanço econômico de qualquer equipamento ou instalação industrial que venha a usá-lo como combustível. A casca tem sido utilizada como ração animal e, sendo assim, precisa ser armazenada em condições ideais, de modo que não se deteriore sob a ação de fungos e outros microorganismos que agem nos materiais armazenados com teores de umidade elevados, o que justificaria por si só, a secagem de casca com vistas a comercialização como ração animal. Nosso objetivo, face ao exposto acima, foi levantar as curvas de secagem, em condições distintas de temperatura e vazão do ar, umidade inicial da amostra e espessura do leito, propondo equações que predissessem com boa margem de segurança o comportamento

cinético da casca submetida a secagem. O estudo, além de contribuir para o conhecimento da secagem dos materiais particulados em geral, fornecerá parâmetros básicos necessários para posterior modelagem e projeto de secadores industriais.

ABSTRACT

The cottonseed hull is a by-product from extraction in industry of vegetal oils, obtained with an average of 13.7% of humidity on the dry basis after the cutting operation. It is an heterogeneous material, fibrous with high porosity. It has great production and its burning efficiency is 87%, therefore, it is feasible to be used in steam generator or in seed dryers substituting the wood and the petrol as a fuel. The burning efficiency of the residue increases as far as the humidity decreases so in general the drying will favour the economic balance of either equipment or industrial plant that will intend to use them as a fuel. The hull has been used as animal ration so it should be stored under ideal conditions in order to avoid to be spoilt from the fungus and other microorganism that acting on stored materials with high level of humidity, where this would justify the drying before to be traded as animal ration. Our purpose, according to what was mentioned above, were to obtain the drying curves at different temperatures, air outlet, initial humidity of the sample and the bed thickness in order to propose equations that will predict the kinetic behaviour of the hull, when are submitted to drying. The study, beyond of the cooperation for the knowledge of the drying of this type of material in general, will possibly give the necessary basic para

meters to later modeling and design of industrial dryers.

SIMBOLOGIA

- A** Altura do Leito (cm)
- An** Coeficiente que depende da geometria da partícula, equação 5.3
- Ao** Constante da equação 4.11
- A₁** Constante da equação 4.11
- A₂** Constante da equação 4.11
- a₁** Constante da equação de Henderson
- a** Coeficiente linear, equação 5.8
- Bn** Coeficiente que depende da geometria da partícula, equação 5.3
- b** Coeficiente angular, equação 5.8
- b₁** Constante da equação de Henderson
- C** Constante da equação D.04, modelo BET
- C_h** Condutividade hidráulica (s^{-1}), equação 2.7
- Cm₁** Capacidade específica isotérmica de massa na região I, modelo Luikov
- Cm₂** Capacidade específica isotérmica de massa na região II, modelo Luikov
- D** Coeficiente de difusão líquida (m^2/s)
- Do** Coeficiente de difusão líquida para $E=0$ (m^2/s)
- d** Densidade real da água (kg/m^3)
- dI** Densidade parcial da água (kg/m^3)
- E** Energia de ativação (Jkg^{-1})

| | |
|-------------|--|
| G | Velocidade mássica superficial ($\text{kg/m}^2\text{h}$), equação 2.22 |
| H | Umidade absoluta do ar |
| Hr | Umidade relativa do ar |
| \vec{J} | Fluxo capilar líquido, equação 2.7 |
| L | Espessura da placa, equação 2.3 |
| m | Massa de ar no cilindro 1, figura 4.1 |
| m_1 | Nova massa de ar no cilindro 1, figura 4.1 |
| m_2 | Massa de ar no cilindro 2, figura 4.1 |
| n | Número de termos de uma série a que pertence |
| n | Número de camadas adsorvidas, modelo BET |
| P | Pressão (Capilar ou Total) (Nm^{-2}) |
| \bar{P}_a | Pressão parcial do vapor |
| P_a | Pressão de vapor do líquido na temperatura do gás |
| P_1 | Pressão no cilindro 1, figura 4.1 |
| P_2 | Pressão no cilindro 2, figura 4.1 |
| q | Constante da equação 2.1 |
| R | Constante do Vapor de água ($\text{Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$) |
| r | Coordenada espacial (raio, cm), equação 2.1 |
| S | Saturação do sólido, equação 2.9 |
| T | Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_s | Temperatura do sólido, equação 2.22 |
| T_1 | Temperatura de entrada do ar, equação 2.22 |
| T_2 | Temperatura da saída do ar, equação 2.22 |
| t | Tempo de secagem (min ou segundo) |
| U | Teor de umidade do produto (bs) decimal |
| U^+ | Relação de umidade (bs) decimal |
| \bar{U} | Teor de umidade médio no corpo (bs) decimal |
| U_e | Teor de umidade de equilíbrio (bs) decimal |

| | |
|------------|--|
| U_i | Teor de umidade inicial da amostra (bs) decimal |
| U_m | Umidade de monocamada, modelo BET |
| V | Vazão do ar de secagem (m^3/h) |
| V_i | Velocidade intersticial da água, equação 2.8 |
| V_1 | Volume de ar no cilindro 1, figura 4.1 |
| V_2 | Volume de ar no cilindro 2, figura 4.1 |
| W | Peso da amostra em função do tempo (g) |
| W_i | Peso inicial da amostra (g) |
| W_f | Peso final da amostra (g) |
| W_s | Peso seco da amostra (g) |
| K | Constante de Secagem |
| K_{ij} | Coefficientes fenomenológicos |
| ϵ | Porosidade |
| α_n | Raízes da função de Bessel de ordem zero, equação 2.5 |
| λ | Calor latente de vaporização da água, equação 2.22 |
| ρ | Massa específica do sólido (kg/m^3) |
| ρ_A | Densidade aparente da amostra (kg/m^3) |
| θ_n | Parâmetros da equação a que pertence |
| ϕ | Potencial de umidade da equação D.03 |
| $\phi(t)$ | Potencial de umidade de transição entre as regiões I e II, da equação D.03 |
| ∇^2 | Operador de Laplace |

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|----|
| CAPÍTULO | I - Introdução..... | 01 |
| CAPÍTULO | II - Revisão da Literatura..... | 05 |
| | 2.1.- Teoria da Difusão Líquida..... | 08 |
| | 2.2 - Teoria Capilar..... | 12 |
| | 2.3 - Teoria de Luikov..... | 15 |
| | 2.4 - Outras Teorias..... | 18 |
| | 2.5 - Equações de Secagem Empíricas..... | 20 |
| | 2.6 - Secagem em Camada Espessa..... | 24 |
| CAPÍTULO | III - Equipamentos Utilizados..... | 26 |
| | 3.1 - Projeto e Construção da Câmara de Secagem..... | 26 |
| | 3.2 - Descrição dos Equipamentos..... | 27 |
| CAPÍTULO | IV - Material e Métodos..... | 30 |
| | 4.1 - Material Utilizado..... | 30 |
| | 4.2 - Determinação da Porosidade..... | 32 |
| | 4.3 - Levantamento das Curvas de Secagem | 37 |
| | 4.4 - Tratamento dos Dados Experimentais. | 39 |
| | 4.5 - Determinação da Umidade Inicial.... | 40 |
| | 4.5.1-Método da Estufa..... | 41 |
| | 4.5.2-Método do Dessecador Infra-vermelho LP 15..... | 41 |
| | 4.5.3-Comparação dos Métodos..... | 42 |
| | 4.6 - Determinação da Umidade Relativa do Ar..... | 43 |

| | |
|---|-----|
| 4.7 - Determinação da Umidade de Equilí brio..... | 44 |
| CAPÍTULO V - Resultados e Discussões..... | 46 |
| 5.1 - Influência da Umidade Inicial da Amostra..... | 49 |
| 5.2 - Influência da Vazão do Ar de Seca gem..... | 49 |
| 5.3 - Influência da Temperatura do Ar de Secagem..... | 55 |
| 5.4 - Influência da Altura do Leito..... | 59 |
| 5.5 - Análise e Correlação dos Resultados | 65 |
| CAPÍTULO VI - Conclusão..... | 79 |
| CAPÍTULO VII - Sugestões Para Pesquisas Futuras..... | 81 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 82 |
| APÊNDICE A - Tabelas de Dados Obtidos na Câmara de Seca gem..... | 91 |
| APÊNDICE B - Programa de Computação..... | 106 |
| APÊNDICE C - Tabelas Obtidas no Computador Utilizando a equação 5.2..... | 109 |
| APÊNDICE D - Isotermas de Equilíbrio Higroscópico..... | 121 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A casca de caroço de algodão é um subproduto da indústria de extração de óleos vegetais e é hoje comercializada unicamente como farelo (torta) de algodão ou misturado a este, destinado a ração animal. Sua produção, segundo o Relatório ESTUDO DO PRODUTO: FURFURAL (1981), é de cerca de 10.000 a 15.000 toneladas/ano no estado da Paraíba, estando a mesma atrelada a produção de algodão, que por sua vez, está condicionada aos períodos chuvosos da região.

A casca é obtida na indústria com cerca de 13,7% de umidade em base seca, JORDÃO (1971), depois da operação de descorticamento. Durante a passagem pelas superfícies cortantes das barras do descorticador a casca é rompida, separando-se das amêndoas por meio de peneiras vibratórias e separador de ar. Muitas indústrias, dada a grande quantidade de casca obtida e sem nenhuma outra alternativa de uso, preferem não processar a separação entre casca e amêndoas. Com isto, sequência à operação de descorticamento: a trituração, cozimento e prensagem mecânica. De sorte que a torta hoje comercializada na Paraíba, tem grande percentagem de casca em sua composição.

Segundo DUNNING (1948), o potencial industrial de uso para as cascas de caroço de algodão pode ser classificado em

dois grupos. O grupo I compreende aqueles usos nos quais a casca é empregada como enchimento ou carga, sem nenhum tratamento prévio, tais como: uso como ração animal, como condicionador de solos e uso em plásticos fenólicos. O grupo II compreende aqueles usos nos quais os muitos constituintes da casca são alterados por processos químicos, assim como: casca como fonte de obtenção de tanina, celulose, carboidratos, furfural, ácido acético, metanol e gases, depois de uma operação chamada "Destructive Distillation".

A casca de caroço de algodão contém pentosanas, celulose, ligninas, taninas, vários pigmentos e resinas. Segundo SAKOSHCHIKOV et alii (1934), a tanina, pigmentos, resinas e um pouco de cinzas podem ser extraída das cascas de caroço de algodão com água quente.

A casca de caroço de algodão, material de constituição fibrosa, sem forma definida e muito heterogênea, possui poder calorífico de 2800 Kcal/Kg com uma eficiência de queima da ordem de 87%, além de produzir, em caldeira NEPAN, 10.000 Kg/hora de vapor para uma alimentação de 2500 Kg/hora de casca, segundo PEREIRA (1985)

Dada sua grande quantidade e seu poder calorífico, podemos admitir a possibilidade de utilizá-la como combustível sólido, tendo em vista, o mau aproveitamento desse resíduo agro-industrial e ser o Brasil, ainda, um país dependente da importação de petróleo, encontrando-se empenhado em programas de substituição de fontes de energia. Deste modo, estudos que visam a poupança de combustível derivado do petróleo, tem particular interesse.

A secagem da casca de caroço de algodão, em que pese

seu baixo teor umidade, passa a ter grande importância na medida em que para fins de comercialização como ração animal ou qualquer outro uso, ela precisa ser armazenada de forma a evitar a deteriorização como produção de fungos e ação de outros microorganismos, fato comumente observado nos galpões das fábricas onde é armazenada com teores de umidade elevados. A operação secagem passa a ser importante também se observarmos a necessidade de melhorar a eficiência de queima da casca, que pode ser obtida diminuindo seu teor de umidade, a exemplo do bagaço de cana que sai das moendas com 55% de umidade e é secado de forma a ficar com cerca de 40%, permitindo um melhor controle e maior eficiência na operação das caldeiras e com isto economia de combustível.

Esta pesquisa visa dar uma contribuição ao conhecimento acerca da secagem de materiais particulados (heterogêneos), além de apresentar como alternativa de uso ou como forma de melhor aproveitar este resíduo, melhorando a eficiência e portanto o balanço térmico, na utilização como combustível em diversos equipamentos, como secadores de grãos em unidades agrícolas, na complementação das necessidades energéticas das indústrias geradores desses resíduos, etc.

O presente trabalho limita-se apenas a verificar a influência das variáveis: umidade inicial da amostra, temperatura e vazão do ar de secagem e espessura da camada, num leito fixo com escoamento de ar percolante.

Vamos propor equações que pre-digam, com boa margem de segurança, a cinética de secagem da casca de caroço de algodão, de forma que possamos utilizar essas informações para um projeto de construção de um secador de fluxo cruzado, apro

veitando a casca como fonte primária de energia.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

A operação unitária de secagem de sementes agrícolas e de material higroscópico capilar poroso é de fundamental importância na Engenharia Agrícola, Química, Hidráulica e etc., constituindo-se basicamente de remoção de umidade da superfície e do interior do sólido.

Na determinação da variação do teor de umidade com o tempo para um material, obtemos uma curva na qual se pode obter a velocidade de secagem (Fig. 2.1). Observando esta figura, percebe-se que a curva contém duas zonas distintas: período a velocidade constante e período a velocidade de crescente.

Segundo COULSON & RICHARDSON (1974), no período a velocidade constante, a umidade vaporiza para a corrente de ar e o fator que controla é o coeficiente de transferência por convecção através do filme gasoso. Para explicar a remoção de umidade no período a velocidade decrescente, duas idéias polarizam a discussão: uma é a teoria da difusão e a outra é a teoria da capilaridade. Na primeira supõe-se que a velocidade do movimento da água para a interface com o ar é governada por equações semelhantes às de transferência de calor, enquanto que na teoria capilar se supõe que as forças que controlam o movimento tem origem na capilaridade e

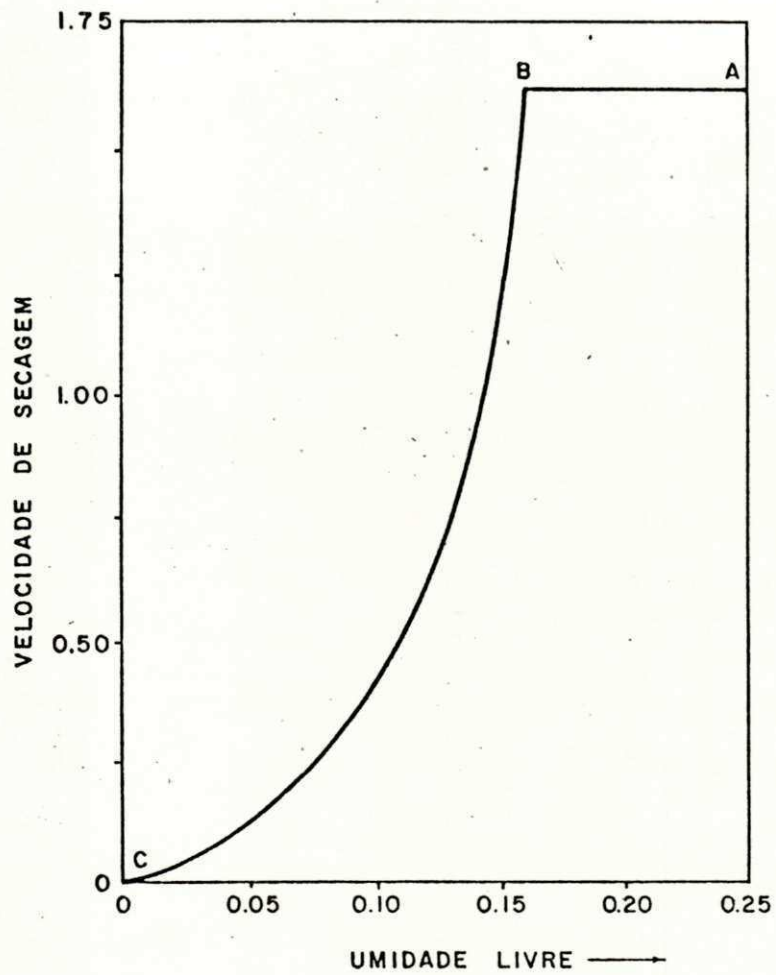


FIGURA 2.1 - CURVA DE SECAGEM.

- AB - PERÍODO DE VELOCIDADE CONSTANTE
- BC - PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE
- B - TEOR CRÍTICO DE UMIDADE

resultam da existência de poros diminutos entre as diversas partículas.

VAN ARSDEL (1963) e BROOKER et alii (1974), citam os mecanismos propostos para explicar a migração da umidade dentro do sólido que se seca:

- 1 - Difusão líquida, devida ao gradiente de concentração.
- 2 - Difusão de vapor, devida ao gradiente de pressão parcial de vapor (causada pelo gradiente de temperatura)
- 3 - Fluxo de líquido e de vapor, devidos a diferenças de pressão total, causadas por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.
- 4 - Escoamento por efusão (escoamento de Knudsen). Ocorre quando o caminho livre das moléculas de vavapor for da mesma ordem de grandeza que o diâmetro dos poros.
- 5 - Movimento de líquido, devido à força gravitacional.
- 6 - Difusão superficial.

Segundo KITIC (1982), todos os mecanismos propostos se podem agrupar em dois grandes grupos: difusão na fase de vapor ou transporte na fase líquida.

Baseando-se nos mecanismos para o movimento de água em sólidos, varias teorias foram propostas para explicar esse fenômeno: teoria da difusão líquida, teoria capilar, teoria da vaporização-condensação, teoria de Luikov, teoria de Philip e DE Vries, teoria de Berger e Pei e teoria de Fortes e Okos, entre outras.

A teoria do modelo difusional e do modelo capilar, foram desenvolvidas em forma paralela. WHITAKER (1977) apresenta uma revisão de ambos pontos de vista, assinalando que historicamente o modelo difusional foi adotado pelos cientistas ligados à Engenharia Química, enquanto que o modelo capilar, pelos Engenheiros de Solos, Ceramistas e atividades afins. Os pesquisadores ligados a secagem e armazenamentos de grãos de cereais tem considerado a difusão, em seus diferentes aspectos, o mecanismo básico de secagem, considerando normalmente a força motriz o gradiente de concentração de umidade ou o gradiente de pressão de vapor.

Dentre a vasta literatura que aborda as teorias da difusão e da capilaridade, pode-se citar como representativos os trabalhos de SHERWOOD (1931), HENRY (1939, 1948), CASSIE (1940) com enfoque difusional, os de HAINES (1927), CEAGLSKE e HOUGEN (1937), PEARSE et alii (1949) utilizando a teoria capilar.

2.1. - Teoria da Difusão Líquida

Os primeiros trabalhos de importância no campo da cinética de secagem foram desenvolvidos por SHERWOOD (1929a, 1929b, 1930, 1932), que propõe explicitamente que o movimento de água dentro de um sólido ocorre por um mecanismo de difusão líquida, permitindo a aplicação da lei de Fick para prever a velocidade de secagem de materiais, expressada como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^q} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^q \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

em que

U = teor de umidade (b.s)

D = coeficiente de difusão líquida (m^2/s)

t = tempo (s)

r = coordenada espacial

q = 0, para placa plana

q = 1, para cilindro

q = 2, para esfera

Em geral, o coeficiente de difusão líquida é considerado constante e às vezes dependente da temperatura, segundo uma equação do tipo Arrhenius:

$$D = D_0 \text{ Exp } (-E/RT) \quad (2.2)$$

em que

D_0 = coeficiente de difusão para $E=0$ (m^2/s)

E = energia de ativação (Jkg^{-1})

R = constante do vapor de água ($0,4620 \times 10^3 Jkg^{-1} K^{-1}$)

CRANK (1975) apresenta as seguintes soluções analíticas da equação 2.1, com coeficiente de difusão constante, distribuição inicial uniforme e controle difusional interno, isto é, teor de umidade na superfície constante:

a - Placa Plana

$$U^+ = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp} \left[\frac{-(2n+1)^2 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t}{4 L^2} \right] \quad (2.3)$$

em que

U^+ = relação de umidade (b.s) adimensional

\bar{U} = teor de umidade médio no corpo (amostra)

U_i = umidade inicial da amostra

U_e = umidade de equilíbrio (valor na superfície externa)

t = tempo (s)

L = semi-espessura (m)

Esta equação supõe que a secagem se dá a partir de am bas as superfícies. Quando a secagem se dá a partir de uma su perfície, L é a espessura total. Para tempos de secagem lon gos basta usar o primeiro termo da equação, obtendo-se por derivação:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{\pi^2 D (\bar{U} - U_e)}{4L^2} \quad (2.4)$$

b - Cilindro Infinito

$$U^+ = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \alpha_n^2} \text{Exp} [- D \alpha_n^2 t] \quad (2.5)$$

em que

r = raio equivalente (cm)

α_n = Raízes da função de Bessel de ordem zero

c - Esfera

$$U^+ = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{Exp} \left[- \frac{D n^2 \pi^2 t}{r^2} \right] \quad (2.6)$$

O modelo difusional sofreu críticas, devido as discrepâncias observadas entre os valores experimentais e preditos. As principais falhas podem ser atribuídas à consideração do coeficiente de difusão constante (independente da temperatura e do teor de umidade) e à modificação da forma e tamanho do sólido durante a secagem.

Van Arsdel, citado por CHEN & JOHNSON (1969), afirmam que no período a velocidade decrescente os coeficientes não poderiam ser considerados constantes, já que na fase final deste período havia discrepâncias entre os valores teóricos e observados.

CHEN & JOHNSON (1969) afirma que o que contribuiu para as discrepâncias observadas é a contração dos materiais biológicos durante a secagem. ALSINA & QUIRINO (1983) observaram a influência do encolhimento do sabugo de milho durante a secagem.

BABBIT (1950) afirma que o coeficiente de difusão através do sólido depende da pressão e não da concentração. A relação entre pressão e concentração nem sempre é linear, por causa da complexidade dos fenômenos de sorção. As equações, em termos de concentração, devem ser evitadas, porque falham na distinção entre difusão e outros mecanismos, que podem

ocorrer simultaneamente.

Melhoramentos do modelo difusional levando em conta ditas variáveis tem sido propostos e são citadas brevemente no ponto 2.4.

2.2 - Teoria Capilar

CEAGLSKE & HOUGEN (1937) e COMINGS & SHERWOOD (1934), postulam que na secagem de sólidos granulares o fluxo de água está totalmente determinado por forças capilares e é independente da concentração de água. Consideram que a umidade contida nos interstícios e na superfície do sólido está sujeita a movimentos por gravidade e capilaridade.

Um material poroso possui uma estrutura interior muito complexa, formada por poros de diferentes tamanhos intercomunicados, cuja secção transversal varia grandemente. Sobre a superfície existem aberturas de poros de tamanhos variados. A medida que se retira água por evaporação se forma um menisco em cada poro, que desenvolve forças capilares causando uma tensão interfacial entre a superfície e o sólido. Estas forças capilares possuem componentes perpendiculares a superfície do sólido e fornecem a força impulsora para o movimento da água através dos poros em direção a superfície.

A intensidade das forças capilares depende da curvatura do menisco, a qual é função da secção transversal do poro. Os poros pequenos desenvolvem forças capilares maiores que os poros grandes e, por conseguinte, os poros menores podem ex

trair água dos poros maiores.

HOUGEN (1940) verificou experimentalmente que o fluxo de água pode ir da direção de concentração mais alta para a mais baixa. MILLER & MILLER (1975), citados por ALVARENGA et alii (1980), explicam o fato dizendo que a força que induz o evento é um gradiente de tensão.

LUIZ & SAMPAIO (1981) concluíram, na secagem de materiais granulares, que os poros menores drenam água dos poros maiores em qualquer direção. Entretanto, como normalmente o fluxo de ar na secagem incide sobre a superfície inferior do leito poroso, num secador de fluxo cruzado, a direção do fluxo de água é preferencialmente vertical e, para que isto ocorra, é necessário que as forças capilares superem o peso da coluna de líquido entre a base e o topo do meio poroso.

A teoria capilar é baseada no conceito de potencial capilar, que pode ser definido como a diferença de pressão entre a água e o ar na interface água-ar presente no capilar. Segundo BAVER et alii (1972), a curvatura na interface é produzida pela tensão superficial da água.

A equação de fluxo capilar líquido é dada, segundo PHILIP & DE VRIES (1957), por:

$$\vec{J} = C_h \cdot \rho \cdot \nabla U \quad (2.7)$$

em que,

C_h = Condutividade hidráulica (s^{-1})

ρ = Massa específica do sólido seco (kgm^{-3})

Considerando um meio poroso como uma mistura, LUIZ & SAMPAIO (1981), escreveram a equação da continuidade para a fase líquida do seguinte modo:

$$\frac{\partial d_l}{\partial t} = - \operatorname{div} (d_l \times V_i) \quad (2.8)$$

onde d_l é a densidade parcial da água, t é o tempo, V_i é a velocidade intersticial da água. Designando por ϵ a porosidade, por S a saturação e por d a densidade real da água, obtiveram:

$$d_l = \epsilon \times S \times d \quad (2.9)$$

Como durante a secagem o escoamento é muito lento, puderam generalizar a lei de Darcy, usando a seguinte hipótese:

$$\epsilon S V_i = C_h \operatorname{grad} (P - X) \quad (2.10)$$

onde C_h é a condutividade hidráulica, X é a altura do ponto em relação à base do meio poroso e P é a pressão capilar. Considerando os pontos ao longo do eixo de simetria do meio poroso, disseram que as variáveis S , C_h e P dependem somente de X e t . A pressão capilar é definida pela diferença de pressão do ar e da água. Além disso, supondo d e ϵ constantes

e usando as equações 2.8, 2.9 e 2.10, teremos:

$$\epsilon \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial X} \left[C_h \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial C_h}{\partial X} \quad (2.11)$$

A equação 2.11 é a equação diferencial apropriada para o estudo da transferência de massa durante a secagem de meios porosos, segundo LUIZ & SAMPAIO (1981).

Cumpra acrescentar que é freqüente a afirmação de que o transporte capilar, como único mecanismo de movimento de umidade, não tem sido aplicado a materiais biológicos, já que por si só é insuficiente para explicar o comportamento, especialmente no período pendular e últimos estágios de secagem, segundo WHITAKER (1977).

2.3 - Teoria de Luikov

Do ponto de vista da termodinâmica dos processos irreversíveis, a teoria de Luikov propõe que a água move-se em meios capilares-porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Este potencial de transferência de massa foi criado por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura, LUIKOV (1966).

LUIKOV et alii (1966), segundo BROOKER et alii (1974), baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis e le

vando em consideração os mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e difusão e convecção de água no interior do meio poroso, propuseram o seguinte modelo de secagem:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} U + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} U + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} U + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P \quad (2.14)$$

em que

U = Teor de umidade do produto, decimal (b.s)

T = Temperatura do produto (K)

P = Pressão total ($N.m^{-2}$)

K_{ij} = Coeficientes fenomenológicos ($i=j$)

K_{ij} = Coeficientes combinados ($i \neq j$)

∇^2 = Operador de Laplace

Uma vez que o gradiente de pressão total só é significativo na secagem para temperaturas do produto bem acima da faixa empregada para secagem de grãos, e materiais biológicos em geral, as equações 2.12, 2.13 e 2.14, se tornam:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = v^2 K_{11} U + v^2 K_{12} T \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v^2 K_{21} U + v^2 K_{22} T \quad (2.16)$$

As equações acima foram aplicadas para vários produtos por HUSAIN et alii (1972), citados por BROOKER et alii (1974), os quais concluíram que o efeito combinado de temperatura e umidade na análise da secagem de grãos só é requerido para um número muito limitado de grãos. Portanto, as equações 2.15 e 2.16 tornam-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = v^2 K_{11} U \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v^2 K_{22} T \quad (2.18)$$

Por outro lado, na prática, os gradientes de temperatura no produto não são considerados. Assim as equações acima se transformam na última simplificação das equações de Luikov:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = v^2 K_{11} U \quad (2.19)$$

Uma vez que o escoamento de umidade dentro do grão ocor

re, geralmente, por difusão, o coeficiente K_{11} é substituído pelo coeficiente de difusão. Como, muitas vezes, o coeficiente de difusão é considerado constante a equação 2.19 fica reduzida à equação 2.1 cujas soluções, expressa em termos do teor de umidade médio, estão dadas pelas equações 2.3, 2.5 e 2.6.

2.4 - Outras Teorias

Existem na literatura várias teorias mais complexas de secagem. dentre elas, podemos citar as de Philip e DE Vries, Henry, Berger e Pei, Whitaker e Fortes e Okos.

HENRY (1939), considera a difusão simultânea de calor e massa e, pressupõe que os poros tenham uma rede contínua de espaços incluídos no sólido. Considera, ainda, por conveniência matemática, que o total de vapor no sólido varia linearmente de acordo com a concentração de água e a temperatura.

WHITAKER (1977), propõe uma teoria de difusão em sólidos que tem em conta a transferência de quantidade de movimento, calor e massa, para a formulação das equações diferenciais resultantes que regem o processo de secagem. O conjunto de equações resultantes representa um modelo complexo e muito difícil de manejar pela quantidade de variáveis independentes e a dificuldade de impor condições de contorno necessárias para resolver o sistema.

Em linhas gerais, as teorias de PHILIP & DE VRIES (1957) e BERGER & PEI (1973), segundo ALVARENGA et alii

(1980), consideram que água se move em meios porosos basicamente por meio dos mecanismos de difusão líquida e capilaridade.

Com base nos conceitos de termodinâmica de processos irreversíveis, FORTES & OKOS (1978), propuseram um modelo que incorpora a maioria das pesquisas mais recentes de fenômenos de secagem, segundo MARTINS & MATA (1984), aceitando o princípio de equilíbrio local e a validade dos seguintes itens :

1. A equação de Gibbs para condições de não equilíbrio;
2. As leis fenomenológicas lineares;
3. As relações fundamentais de Onsager;
4. Um sistema pode ser tomado como contínuo;
5. A água migra nas fases de líquido e de vapor;
6. A razão de transferência de calor e massa é mais lenta que a razão de mudança de fase; e
7. O princípio de Curie é válido.

FORTES & OKOS (1978) aceitam que para os meios porosos a equação das isotermas de adsorção é fundamental e que é esta a relação básica que governa o mecanismo de secagem. A força motriz para o movimento isotérmico, tanto do líquido quanto do vapor, é um gradiente do teor de umidade de equilíbrio e não o teor de umidade. Assim, o teor de umidade de equilíbrio é apresentado como uma escolha mais natural para o potencial de transporte de massa que o conceito proposto por Luikov.

Todas estas teorias sofrem limitações, e portanto, dificultam suas aplicações num caso real. Independente de qual seja o mecanismo pela qual se realiza a secagem, o processo

pode dividir-se nas duas etapas: secagem a velocidade constante, com controle externo na transferência de massa e, secagem a velocidade decrescente, com controle interno ou mixto na transferência de massa.

2.5 - Equações de Secagem Empíricas

Na tentativa de correlacionar os dados experimentais de um dado material submetido a secagem, de forma que se possa encontrar uma equação, ou mesmo um modelo, representativo da cinética de secagem desse material, os pesquisadores, que tratam da operação unitária de secagem, têm difundido uma enorme quantidade de modelos matemáticos e equações empíricas e semi-empíricas, derivados dos modelos clássicos propostos.

BRUNELLO et alii (1984), no estudo preliminar da secagem de uma pasta celulósica branquada de eucalipto, em leito fixo, concluíram que as curvas de secagem dependem da temperatura e velocidade do ar de secagem, da umidade inicial da amostra e do leito, verificando, ainda, que o modelo que melhor representa o fenômeno é o da capilaridade.

Na secagem de grãos de arroz com casca, GUNTHER et alii (1983), utilizaram dois modelos derivados da 2^a lei de Fick, para geometria de placa plana e esfera, tomando os quatro primeiros termos das séries 2.3 e 2.6, para condições isotérmicas mais um termo de correção, e concluíram que é possível correlacionar os dados de secagem de arroz com cas

ca em monocamada, usando modelos isotérmicos derivados da lei de Fick.

VILLA et alii (1979) adaptaram um modelo matemático, para prever o processo de secagem das raspas de mandioca, a partir dos trabalhos de THOMPSON et alii (1968). O modelo apresentou boa previsão das condições experimentais, podendo ser usado para projetar sistemas de secagem de raspas de mandioca, deixando-se com 13% de umidade e em condições de armazenamento e comercialização.

Uma simplificação da equação em coordenadas esféricas, séries 2.6, tem sido usada para prever a secagem de grãos. Ao invés de um número infinito de termos, somente o primeiro é empregado para calcular a taxa de secagem, segundo BROOKER et alii (1974). Com isto tem-se:

$$U^+ = (6/\pi^2) \text{Exp} (-Kt) \quad (2.20)$$

em que

$K = D \cdot \pi^2 / r^2 = \text{constante de secagem (s}^{-1}\text{)}$

$t = \text{tempo (s)}$

$U^+ = \text{relação de umidade decimal (b.s)}$

THOMPSON et alii (1968), desenvolveu para o milho um modelo de secagem em camada fina, para o intervalo de temperatura de 333 a 422 K:

$$t = 3600 (\theta_1 \ln U^+ + \theta_2 (\ln U^+)^2) \quad (2.21)$$

em que

$$\theta_1 = - 4,10497 + 0,008784 T$$

$$\theta_2 = 1,66209 \cdot 10^9 \text{ Exp } (-5,94180 \cdot 10^{-2} T)$$

Simulando a secagem de milho em várias condições, com o objetivo de predizer o desempenho de secadores, THOMPSON et alii (1968) concluíram que os secadores de fluxo cruzado supersecam os grãos no local de entrada do ar e os subsecam no local de saída do ar do secador.

A secagem de resíduos agrícolas e agro-industriais não é muito difundida, entretanto, já existem trabalhos nesse sentido como é o caso da pasta de eucalipto, feita por BRU NELLO et alii (1984), da casca de amendoim, casca de arroz, casca de caroço de algodão e palha de milho, feita por ALSI NA & QUIRINO (1983), da secagem do sabugo de milho, feita também por ALSINA & QUIRINO (1983), do bagaço de cana, feita por MARANHÃO (1979), RAJAGOPAL (1983), VALENÇA & MASSARANI (1981, 1982) e MEDEIROS & MASSARANI (1982, 1983).

VALENÇA & MASSARANI (1982), verificaram que os resultados experimentais da secagem de bagaço de cana, em camada delgada, podem ser expressos pela equação de TSAO & WHEELock (1967):

$$U^+ = U_i \text{ Exp } ((-G^n \Delta T / CA^m \lambda) t) \quad (2.22)$$

em que

$$C = 0,095 (g)^{2,3} \cdot (^\circ C) / (cm)^{3,5} \cdot (min)^{0,5} \text{ Cal}$$

$$m = 0,90$$

$$n = 1,30$$

$$\Delta T = (T - T_s)_m = ((T_1 - T_s) - (T_2 - T_s)) / \ln (T_1 - T_s) / (T_2 - T_s)$$

Esta equação foi testada para camadas entre 4,6 e 14 cm de altura, temperaturas do gás na alimentação entre 105 e 220°C e vazões mássicas do ar entre 0,26 e 0,90 g/cm².min. O tempo de secagem obtido a partir da equação 2.22 mostrou que o regime de taxa variável é rapidamente atingido na secagem de bagaço de cana em camada delgada.

FARINATTI & SUAREZ (1985) estudando a cinética de secagem de sementes de algodão, encontraram que enquanto o caroço inteiro apresenta um comportamento não fickiano, as curvas de secagem da semente descascada são bem representadas pela solução da lei de Fick para esferas. Atribuíram então essa anomalia à heterogeneidade da semente inteira, argumento reforçado pelo fato de que o teor de umidade de equilíbrio do endosperma é menor que o correspondente da casca, de acordo com as isotermas de equilíbrio higroscópico por eles determinadas.

Um estudo do comportamento durante a secagem da casca isolada, poderia elucidar estas e outras questões relacionadas com a cinética do caroço inteiro, sendo este um dos objetivos que nos propusemos ao planejar o presente trabalho.

SHARMA et alii (1982) num estudo sobre secagem de arroz e BRUNELLO (1974), na secagem de malte verde de cevada, também encontraram comportamento diferente para a casca

e o interior do grão.

COURA & ALSINA (1985) propuseram para a cinética de secagem da casca de caroço de algodão, em camada delgada, a partir de um modelo difusional, uma equação análoga as soluções em série da lei de Fick:

$$U^+ = \theta_1 \cdot \text{Exp} (-Kt) + (1-\theta_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{Exp} [-((2n+1)^2 + 1)Kt] \quad (2.23)$$

Os valores dos parâmetros da equação 2.23, encontrados mediante regressão não linear, foram de 0,133 para θ_1 e $0,0273 \text{ min}^{-1}$ para K (constante de secagem), com um desvio padrão da ordem de 0,019. Os θ_1 da equação 2.23 são os parâmetros da equação, t o tempo e U^+ , a razão de umidade decimal (b.s).

2.6 - Secagem em Camada Espessa

A secagem de um só grão individualmente ou de uma só camada de grãos não altera as condições do ar significativamente. Entretanto, quando os grãos são amontoados dentro de um secador formando camadas espessas, o ar que passa por essas camadas se modifica. Sua temperatura diminui ao ceder calor sensível para os grãos e sua umidade aumenta ao receber a água evaporada do produto. Conseqüentemente, seu po

tencial de secagem diminui.

Um modelo matemático completo que possa simular o processo de secagem nessa situação deve conter equações que calculem todas as variações de temperatura e umidade, tanto para o produto como para o ar, VILELA (1977), citado por MARTINS & MATA (1984).

Existem, hoje, vários modelos matemáticos desenvolvidos que relacionam o teor de umidade da matriz sólida com a altura da camada, o tempo de secagem, a vazão e a temperatura do ar. Todos, entretanto, presupõem condições e simplificações que os limitam, quase sempre, aos produtos estudados. Não obstante, vários pesquisadores lançam mãos destes modelos para simulação de secagem em secadores de tipos diversos. A modelagem matemática, que compreende as equações representativas dos balanços de massa e de energia para a matriz sólida e para o ar, da secagem de qualquer produto estará sempre a depender da confiabilidade destas equações como também das propriedades físicas envolvidas, tais como porosidade, capacidade calorífica, umidade de equilíbrio, etc.

Na maioria das modelagens é utilizada uma equação empírica de secagem em camada fina. Daí a importância de dispor de uma equação para a cinética, obtida em condições operacionais semelhantes e que forneça um ajuste com exatidão suficiente como foi assinalado no capítulo I. O presente trabalho tem como objetivo principal obter, a partir de medições experimentais uma equação cinética que cumpra ditos requisitos.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1 - Projeto e Construção da Câmara de Secagem

Para obtenção dos dados, projetou-se e construiu-se uma câmara de secagem de leito fixo, com diâmetro de 17,8 cm e altura de 80 cm, que podia ser percorrida por corrente ascendente de ar aquecido (Fig. 3.1). Para uma melhor distribuição do fluxo de ar de secagem, adaptou-se uma peça tronco-cônica (funil) na entrada da câmara, colocando sobre esta, uma tela de arame com esferas de vidro uniforme, empilhadas aleatoriamente.

A câmara, isolada com cordão de amianto, possui seis furos, três em cada lado, distanciados por oito centímetros. No seu interior, dois centímetros acima dos dois primeiros furos, existe uma saliência com vedação de asbesto para fixar o suporte contendo a amostra. Nos dois primeiros furos, estão os termopares de controle de temperatura, temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco do ar de secagem (referência temperatura ambiente). Conforme a altura do leito com que se estiver trabalhando, coloca-se nos furos superiores, outros dois termopares que medirão as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de saída. A temperatura de bulbo seco do ar de saída é lida num registrador, as outras

temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco são lidas num mili voltímetro, que as distinguem por meio de chave seletora.

A faixa de temperatura do ar com que se trabalhou na câmara foi de 38 a 82 °C, variando a vazão do ar em 120, 160, 180, 200 e 240 m³/h e a altura da camada em 1,0; 3,0; 5,0 e 10,0 cm.

3.2 - Descrição dos Equipamentos

O conjunto de equipamentos utilizados para funcionamento da câmara e obtenção dos dados requeridos na mesma e fora dela, são:

- 01 - Compressor Radial, tipo exportação, fabricado pela Lavagem Americana Garantia, dotado de motor assíncrono trifásico, tipo S100 L2, com 4 CV e 2920 RPM, fabricado pela Metalúrgica Abramo Eberle S/A - Caxias do Sul - Ind. Brasileira.
- 02 - Manômetro DOX, capacidade de 2 kg/cm², fabricado pela IMC - Indústria Brasileira.
- 03 - Rotâmetro, tipo R2-V.C HASTE, capacidade de 400 m³/h, fabricado pela OMEL/SA - Ind. Brasileira.
- 04 - Aquecedor de Ar, tipo RM 2560.9, com 22,5 KW, fabricado pela PALLEY - Ind. Brasileira.
- 05 - Controlador de Temperatura Proporcional, tipo P300, faixa de operação entre 20-200 °C, fabricado pela EURO-CONTROL AUT. Ind. LTDA.

- 06 - Registrador, tipo H/CG, fabricado pela INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS - CG - LTDA - Ind. Brasileira.
- 07 - Milivoltímetro, tipo MD-045, fabricado pela EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS DO BRASIL - Ind. Brasileira.
- 08 - Auto-Transformador Variável, tipo 2/6 B, com INV 240 e OUT de 0-280, fabricado por THE SUPERIOR ELECTRIC Co. BRISTOL CONN-USA.
- 09 - Balança Mettler PC 440, capacidade de 420 g, com precisão de leitura de 0,001 g, fabricado pela METTLER INSTRUMENT AG-Suíça.
- 10 - Dessecador Infra-vermelho LP-15, fabricado pela METTLER INSTRUMENT AG - Suíça.
- 11 - Balança, tipo Triple Beam, capacidade de 2610 g com precisão de leitura de 0,1 g, fabricado pela OHAUS - USA.
- 12 - Estufa de Secagem, modelo 315SE, fabricado pela FANEM -São Paulo - Ind. Brasileira.
- 13 - Termopares, tipo ferro-constantan.
- 14 - Picnômetro de Comparação a ar, fabricado pelo Núcleo de Armazenamento do DEAg da UFPb, com capacidade em cada cilindro de 1890 ml.

- A - Compressor Radial
- B - Rotômetro
- C - Aquecedor de Ar
- D - Câmara de Secagem
- E - Chave Seletora: 1 - Temperatura b. u. de entrada
2 - Temperatura b. s. de entrada
3 - Temperatura b. u. de saída
- F - Milivoltímetro Digital
- G - Controlador de Temperatura
- H - Registrador (Temperatura b. s. de saída)

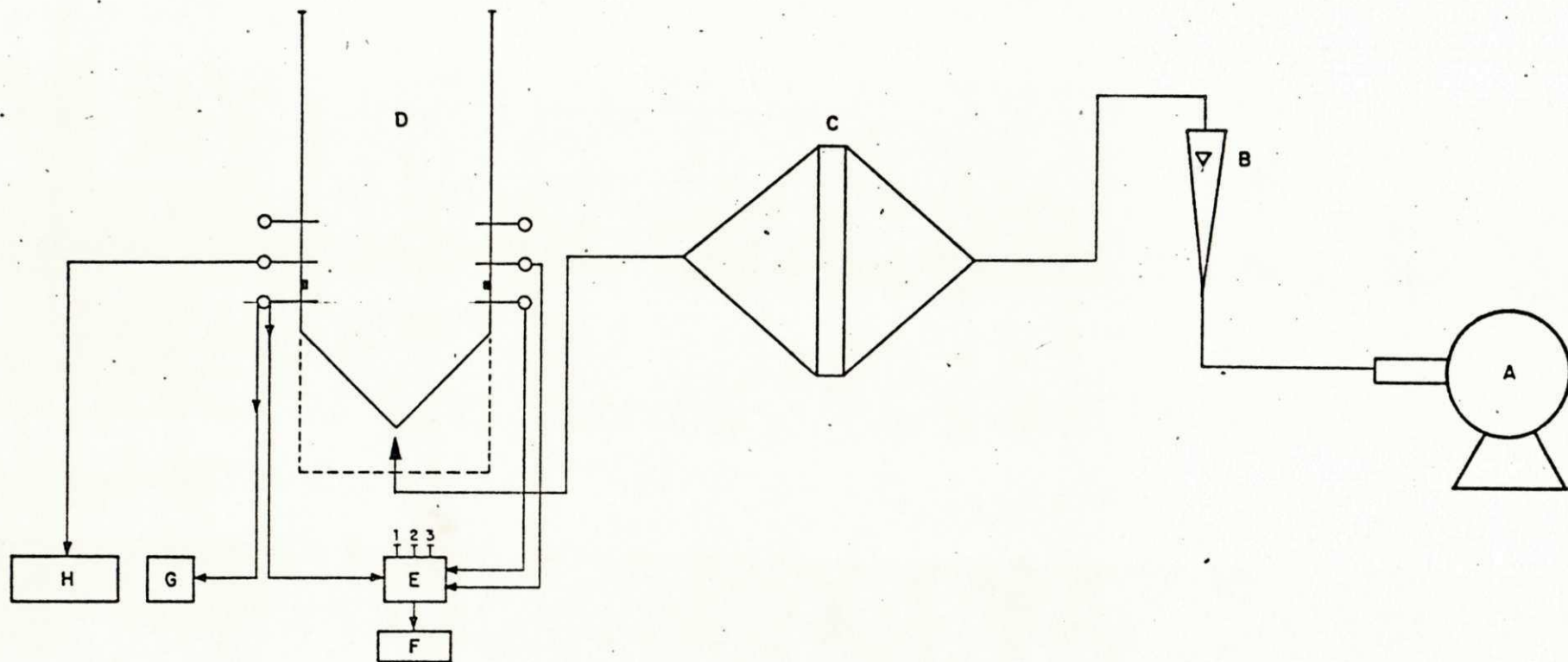


FIGURA 3.1 - ESQUEMA DA APARELHAGEM

CAPÍTULO IV
MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - Material Utilizado

O material utilizado foi a casca de caroço de algodão, com predominância do tipo herbáceo misturado com pequenas quantidades de casca de algodão híbrido, colhida no estado em que sai da decorticadora, numa indústria de Campina Grande.

A casca de caroço de algodão é um material fibroso, heterogêneo e de alta porosidade. Sua composição, segundo DUNNING (1948), em base seca:

| | |
|-----------------|--------|
| Pentosanas..... | 21,00% |
| Celulose..... | 35,10% |
| Ligninas..... | 16,80% |

DUNNING & LATHROP (1945), apresentam valores médios, tomados de vários autores, do que seria a composição da casca, em base seca:

| | |
|-----------------|--------|
| Pentosanas..... | 29,50% |
| Celulose..... | 43,90% |
| Ligninas..... | 21,95% |
| Cinzas..... | 1,80% |
| Proteínas..... | 3,30% |

| | |
|----------------------------------|--------|
| Fibra Crua..... | 49,20% |
| Ac. Acético por hidrólise..... | 5,00% |
| Álcool-Benzeno por extração..... | 5,10% |

Numa análise elementar aproximada da casca de caroço de algodão, obtem-se a seguinte composição, segundo PEREIRA (1985):

| | |
|-----------------|--------|
| Carbono..... | 51,05% |
| Hidrogênio..... | 6,52% |
| Oxigênio..... | 41,70% |
| Cinzas..... | 1,50% |

A variação na composição da casca é devido a muitos fatores, tais como origem da semente, clima, solo, tempo de colheita do algodão, condições de armazenamento e dos métodos de análises, SAKOSHCHIKOV & IVANOVA (1934).

Segundo DUNNING (1948) a densidade, que depende do empacotamento, é aproximadamente 10 lb/ft^3 e, segundo PEREIRA (1985), o poder calorífico é de 2800 Kcal/Kg. No material que utilizamos não foi determinada a composição. Porém, as propriedades físicas relevantes para a interpretação dos dados cinéticos da secagem foram determinadas: porosidade, densidade aparente do leito, densidade real da casca e higroscopicidade.

A higroscopicidade foi determinada em trabalhos anteriores: COURÂ & ALSINA (1984) e ALSINA et alii (1985), e os resultados podem ser consultados no apêndice D. A porosidade e a densidade podem ser determinadas simultaneamente a partir de medições realizadas com um picnômetro de compara

ção a ar. O método se descreve no ponto seguinte.

Dada a heterogeneidade da casca de caroço de algodão, com forma indefinida e de difícil manuseio, torna-se impossível a verificação ou determinação do seu diâmetro equivalente. As propriedades termofísicas: calor específico, difusividade e condutividade térmica não foram medidas, já que no presente trabalho não é levado em conta o transporte de energia, considerando em primeira aproximação condições isotérmicas. Como será demonstrado nos capítulos seguintes, o efeito de temperatura não é apreciável, a não ser pela influência na umidade de equilíbrio. Porém será necessário considerá-los em estudos futuros visando simulação e modelagem, assunto sobre o qual voltaremos no capítulo VII sobre sugestões para trabalhos futuros.

4.2 - Determinação da Porosidade

A porosidade é definida pela razão do volume de espaços vazios ao volume do leito. Conforme a definição, a porosidade se relaciona com a densidade do material mediante a equação (GUSTAFSON & HALL (1972)):

$$\epsilon = 1 - (\rho_A / \rho) \quad (4.1)$$

em que

ϵ = porosidade (decimal)

ρ_A = densidade aparente (kg/m^3)

ρ = densidade real (kg/m^3)

A densidade aparente é definida como a massa de sólido dividida pelo volume do leito, e a densidade real, definida pela massa do sólido dividida pelo volume do sólido.

Vários trabalhos de determinação de porosidade têm sido feitos utilizando o método de DAY (1964). Na figura 4.1 apresentamos um esquema do aparelho que é um picnômetro de comparação a ar. O princípio do método baseia-se na suposição de comportamento de gás ideal e condições isotérmicas. O método de operação consiste no seguinte:

Inicialmente todo o sistema se encontra a pressão atmosférica. Injeta-se ar no cilindro 1, ver figura 4.1, através de um compressor de ar, com a válvula de conexão fechada. Neste instante teremos no cilindro 1:

$$P_1 V_1 = mRT \quad (4.2)$$

em que

P_1 = pressão no cilindro 1 ($N.m^{-2}$)

V_1 = volume de ar no cilindro 1 (m^3)

m = massa de ar no cilindro 1 (kg)

R = constante específica do gás ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

T = temperatura (K)

Ao abrirmos a válvula de admissão de ar do cilindro 1 para o cilindro 2, que por sua vez estará repleto de cascas, teremos no cilindro 1:

$$P_2 V_1 = m_1 RT$$

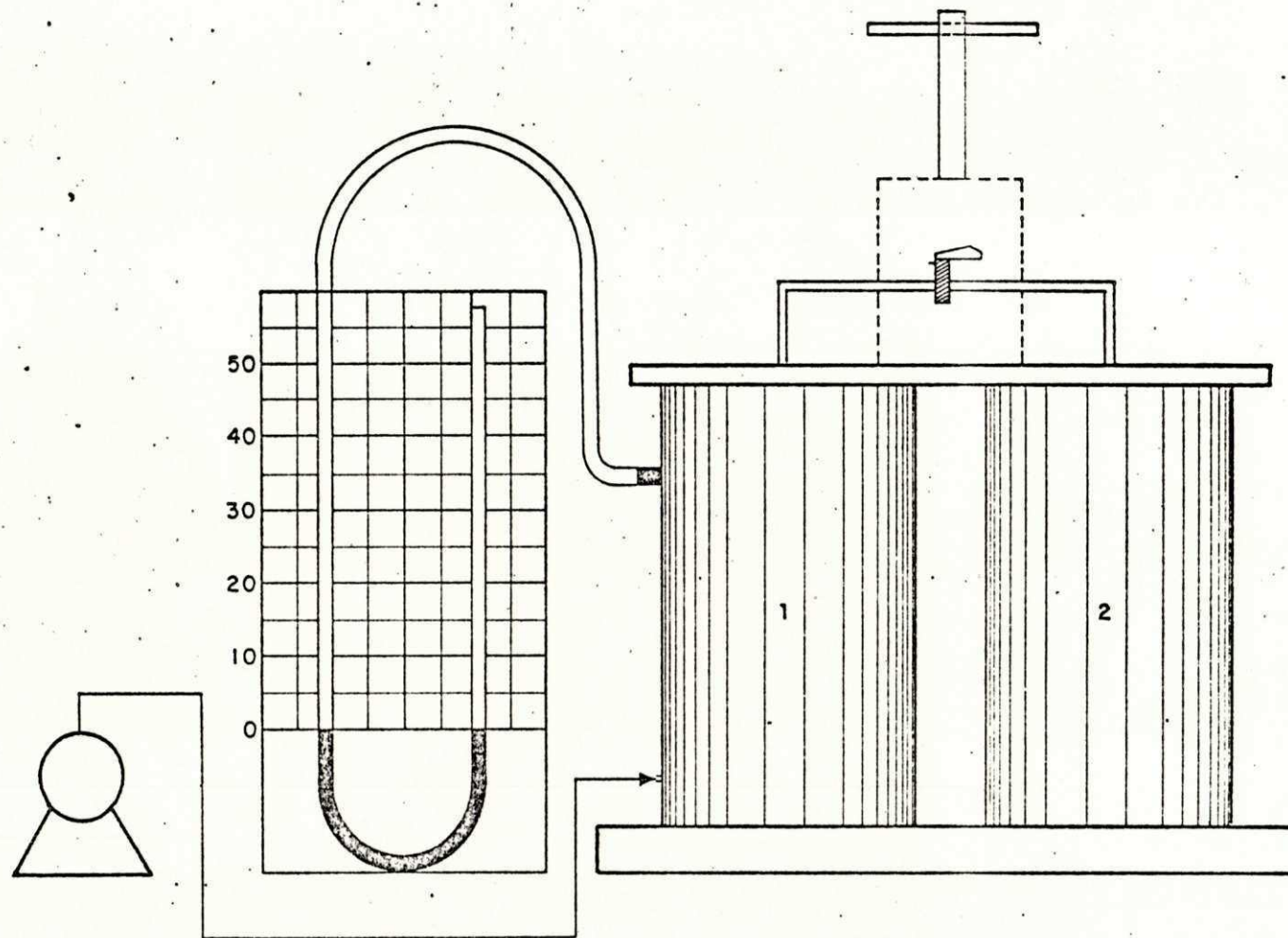


FIG. 4.1 - PICNÔMETRO DE COMPARAÇÃO A AR.

e no cilindro 2:

$$P_2 V_2 = m_2 RT$$

em que

P_2 = pressão no cilindro 2 ($N \cdot m^{-2}$)

V_2 = volume de ar no cilindro 2 (m^3)

m_1 = nova massa de ar no cilindro 1 (kg)

m_2 = massa de ar no cilindro 2 (kg)

Como as pressões medidas são relativas à atmosférica e o volume de ambos cilindros é o mesmo, segue que:

$$V_2/V_1 = (P'_1 - P'_2)/P'_2 \quad (4.3)$$

onde P' é igual a pressão relativa medida. Como V_2/V_1 é igual a porosidade, tem-se:

$$\epsilon = (P'_1 - P'_2)/P'_2 \quad (4.4)$$

A densidade aparente foi calculada dividindo a massa de casca de caroço de algodão contida no cilindro 2 pelo volume do cilindro. Conhecidas a porosidade e a densidade aparente, a densidade do sólido se calcula a partir da equação 4.1.

Foram feitas cinco experiências com amostras de umidades diferentes e, conforme tabela 4.1, verifica-se apenas uma tendência da porosidade diminuir com o aumento do teor

de umidade, mas suficiente para acordar com resultados encontrados na literatura para outros tipos de materiais: porosidade decrescente com o aumento do teor de umidade.

CHUNG & CONVERSE (1971), citados por ALMEIDA et alii (1979), estudaram o efeito do teor de milho e trigo sobre as propriedades físicas e, constataram que a porosidade de cresce linearmente com o aumento do teor de umidade. Esta ocorrência foi constatada por WRATTEN et alii (1969), ao estudarem a porosidade de grãos de arroz médios e longos.

PRADO et alii (1979) verificando a porosidade de semente de cacau durante o processo de secagem, em camadas finas, concluíram entre outras coisas, que a relação porosidade versus teor de umidade varia com a temperatura do ar de secagem, e que a porosidade torna-se mais alta para temperaturas maiores.

ALMEIDA et alii (1979) concluíram, para amêndoas de cacau, que a porosidade decresce linearmente, tanto com o aumento do teor de umidade, quanto com o aumento da massa específica aparente. MATA & FILHO (1984) concluíram, para sementes de mamona e de algaroba, que porosidade cresce linearmente com o aumento do teor de umidade.

Tabela 4.1

Determinação da Porosidade (ϵ)

Volume do cilindro = 1890 ml

| m (gramas) | ϵ (%) | | | | | ϵ_m (%) | U_i (%) | D_p | ρ (g/cm ³) | ρ_A (g/cm ³) |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------------|-------|--------------------------------|----------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | |
| 162,3 | 93,48 | 91,18 | 93,69 | 94,69 | 90,99 | 92,76 | 15,55 | 1,609 | 1,186 | 0,086 |
| 185,0 | 91,98 | 91,11 | 91,30 | 91,65 | 91,27 | 91,46 | 21,16 | 0,457 | 1,125 | 0,098 |

D_p = Desvio padrão; U_i = Umidade inicial; ρ = Densidade da amostra; m = massa da amostra ϵ_m = Porosidade média; ρ_A = Densidade aparente da amostra.

4.3 - Levantamento das Curvas de Secagem

Chama-se curva de secagem a evolução do teor de umidade da amostra com o tempo quando submetida a dita operação. A determinação experimental foi realizada no equipamento da figura 3.1 conforme o procedimento seguinte:

- 1 - Escolhe-se a vazão de trabalho mediante a válvula reguladora e a temperatura de operação mediante o uso do controlador.
- 2 - São acionados o compressor e o sistema de aquecimento do ar.
- 3 - Uma vez atingidas as condições de temperatura constante no ar que ingressa na coluna é colocada na câmara de secagem uma massa pesada da amostra, contida em suportes que variam de acordo com a altura do lei

to.

4 - A amostra junto com o suporte é retirada da câmara para determinar o peso em intervalos regulares durante uma hora, registrando-se o peso e as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar na entrada e na saída do leito.

As pesagens, conforme peso da amostra, foram feitas em balança mettler PC 440, com precisão de leitura de 0,001g e em balança de tipo comum, com precisão de leitura de 0,1g. Durante os primeiros dez minutos, fazia-se quatro pesagens para cada 150 segundos e dos dez aos trinta, pesava-se para cada cinco minutos. Finalmente dos trinta aos sessenta minutos, pesava-se para cada dez minutos. Retirar o suporte com a amostra, pesá-lo e recolocá-lo na câmara de secagem, durava em média dez segundos.

As leituras das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, anotadas antes de cada pesagem, eram lidas em um milivoltímetro, a exceção da temperatura de bulbo seco do ar de saída, lida em um registrador, conforme esquema mostrado no capítulo anterior.

As temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco na entrada e saída do ar de secagem, foram medidas com termopares Fe-Constantan. A temperatura de bulbo seco do ar de entrada da câmara de secagem, mantinha-se constante num intervalo de ± 1 °C, mediante controlador de temperatura, conforme figura 3.1.

4.4 - Tratamento dos Dados Experimentais

Para efeito de interpretação dos dados obtidos, da maneira usual na bibliografia sobre secagem, foi calculada a relação de umidade U^+ :

$$U^+ = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} \quad (4.5)$$

onde,

$$\bar{U} = (\bar{W} - W_s)/W_s \quad (4.6)$$

em que,

U_e = umidade de equilíbrio (g de água/g de sólido seco)

U_i = umidade inicial da amostra (g de água/g de sólido seco)

\bar{U} = umidade da amostra em função do tempo (g de água/g de sólido seco)

\bar{W} = peso da amostra em função do tempo (g)

W_s = peso seco da amostra (g)

t = tempo (min)

O peso seco pode ser obtido segundo uma equação simples, do tipo abaixo:

$$W_s = W_i/(1 + U_i) \quad (4.7)$$

onde W_i é o peso inicial da amostra.

A determinação da umidade inicial e da umidade de

equilíbrio se descreve nos pontos seguintes.

Daqui em diante chamaremos de curva de secagem a evolução de U^+ com o tempo.

Os dados de cada ensaio foram graficados na forma $\ln U^+$ vs t , método recomendado na literatura para uma melhor análise dos resultados.

4.5 - Determinação da Umidade Inicial

O material colhido na indústria, após a operação de descorticamento, era umidificado artificialmente em um dessecador contendo um recipiente com água, durante mais ou menos sete dias, de modo que as experiências fossem realizadas com uma amostra contendo teor de umidade entre 15 e 30%, em base seca.

Antes de submeter a casca de caroço de algodão ao processo de secagem, retirava-se alíquotas de várias partes diferentes da amostragem para determinar a umidade inicial, de forma que esta determinação de umidade fosse a mais representativa possível.

Essas alíquotas eram divididas em duas partes iguais e submetidas a dois processos diferentes de determinação da umidade inicial.

4.5.1 - Método da Estufa

A estufa é o aparelho normalmente usado em muitos laboratórios para a determinação de umidade, normalmente controlada com temperaturas superiores a 100°C , com variações de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas.

A estufa aqui utilizada foi regulada a 80°C , contendo pequenas amostras de sílica-gel em pratos de alumínio, de forma a obter-se uma umidade relativa do ar ao redor de 2%, segundo HOUGEN et alii (1972).

As amostras colocadas na estufa eram pesadas diariamente, até atingir peso constante, em balança mettler PC 440 com precisão de leitura de 0,001g. Dependendo do controle na variação de temperatura da estufa, o método aqui utilizado, poderá dar bons resultados, entretanto não é aconselhável, na medida em que o tempo de duração é sempre superior a 24 horas.

4.5.2 - Método do Dessecador Infra-Vermelho LP 15

Quando sobre um corpo incidem raios infra-vermelho, cedem ao mesmo uma parte da energia que contém: o corpo irradiado se esquentam e as substâncias voláteis se evaporam. Baseado neste princípio, este método torna-se mais rápido que o da estufa, onde o calor é transmitido por convecção.

O tempo de secagem depende: do grau de esquentamento ajustado; do peso da amostra; da distribuição e da cor do

produto.

O dessecador pode ser adaptado sobre diferentes tipos de balanças mettler eletrônicas e serve para determinação do conteúdo de umidade inicial e de matéria seca de amostras diversas. As variações do peso podem ser lidas continuamente de forma digital na balança.

Uma das partes da amostra mencionada acima, destina a este método. A amostra é pesada e colocada no dessecador infra-vermelho a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingir peso constante.

4.5.3 - Comparação dos Métodos

A umidade inicial, definida com a diferença de peso inicial menos o peso final dividido pelo peso final, foi obtida para que pudessemos calcular a umidade da amostra em função do tempo de secagem.

$$U_i = (W_i - W_f) / W_f \quad (4.8)$$

De acordo com a tabela 4.2 pode-se verificar que o teor de umidade inicial pelo método do LP 15, é sempre superior aos obtidos pelo método da estufa. Tomando como valores mais exatos as umidades iniciais obtidas com o LP 15, o erro relativo foi de no máximo 6%, conforme tabela 4.2.

Tendo em conta este estudo, feito previamente, as umidades iniciais utilizadas nos cálculos deste trabalho foram

as obtidas pelo método do infra-vermelho.

Tabela 4.2

| Experiência | Umidade Inicial | | Erro % |
|-------------|----------------------------------|--------------------------|--------|
| | LP 15 a 105 \pm 2 $^{\circ}$ C | Estufa a 80 $^{\circ}$ C | |
| 01 | 15,10% | 14,22% | 5,83% |
| 02 | 16,30% | 15,37% | 5,71% |
| 03 | 17,63% | 16,80% | 4,71% |
| 04 | 15,90% | 14,95% | 5,97% |
| 05 | 20,97% | 19,99% | 4,67% |
| 06 | 25,38% | 24,35% | 4,06% |
| 07 | 26,09% | 25,10% | 3,79% |
| 08 | 30,24% | 29,25% | 3,27% |
| 09 | 31,17% | 30,13% | 3,34% |
| 10 | 36,97% | 35,84% | 3,06% |

4.6 - Determinação da Umidade Relativa do Ar

A umidade absoluta (H) do ar, é o número de kilogramas de vapor de água contidos num kilograma de gás livre de vapor. Com esta definição a umidade absoluta do ar depende somente da pressão parcial da água na mistura, quando a pressão total estiver fixada. Para a pressão total de 1 atm, a pressão parcial de vapor de água é, por conseguinte:

$$P\bar{a} = (H.M_B)/(H.M_B + M_A) \quad (4.9)$$

sendo M_A e M_B , os pesos moleculares da água e do ar, respectivamente.

Transformando para graus centígrados, com auxílio de tabela do HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS (1982), as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de entrada, e fazendo uso do diagrama psicrométrico (HIMMELBLAU (1984)), determina-se a umidade absoluta e, conseqüentemente, a pressão parcial do vapor de água e a umidade relativa do ar de entrada, definida pela equação abaixo:

$$Hr = (P\bar{a}/Pa) \times 100\% \quad (4.10)$$

sendo $P\bar{a}$ igual a pressão parcial do vapor e Pa , a pressão de vapor do líquido na temperatura do gás. Geralmente se expressa sobre uma base percentual, de forma que a umidade de 100%, corresponde a um gás saturado e a 0,0%, um gás seco. A pressão de vapor do líquido (Pa) foi determinada, utilizando a tabela do PERRY CHILTON (1980), com a temperatura de bulbo seco do ar de entrada.

4.7 - Determinação da Umidade de Equilíbrio

A umidade de equilíbrio (U_e) da casca de caroço de algodão, nas temperaturas 34, 50 e 80 °C, podem ser obtidas nas isotermas de equilíbrio higroscópico, levantadas por

ALSINA et alii (1985), pelo método BET (1938), pela equação de Henderson-Thompson e pelo modelo de Luikov.

Por regressão não linear determinaram-se os parâmetros da equação abaixo:

$$U_e = (\ln(1 - Hr) / -(A_0 + A_1 T))^{1/A_2} \quad (4.11)$$

em que

U_e = Umidade de equilíbrio da casca

Hr = Umidade relativa do ar de secagem

T = Temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$)

A_0 = 0,9414

A_1 = 0,7515

A_2 = 1,5660

A equação 4.11 apresenta bons resultados para temperaturas na faixa de $40^{\circ}C$. Com isto, as umidades de equilíbrio dos ensaios na faixa de temperatura de $40^{\circ}C$, foram calculadas utilizando a equação 4.11. Nas temperaturas 50, 60 e $80^{\circ}C$, preferiu-se utilizar as U_e dinâmicas obtidas por COURA & ALSINA (1985) em condições idênticas de temperatura e umidade relativa, já que estas apresentavam valores superiores as obtidas pelo método estático (Isoterma de equilíbrio higroscópico). No apêndice D encontram-se, determinadas por métodos distintos, as isotermas de equilíbrio da casca de caroço de algodão.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

COURA & ALSINA (1985) estudaram a secagem de casca de caroço de algodão, em camadas finas, verificando as influências das temperaturas e vazões do ar, assim como a influência da umidade inicial da amostra. Para dar continuidade, ou de certa forma completar as informações, passamos a estudar os efeitos das temperaturas e vazões do ar em camadas espessas, verificando também as influências dessas espessuras na cinética de secagem das cascas.

Nosso trabalho restringiu-se a estudar os efeitos das variáveis acima mencionadas, propondo uma equação que representasse, com boa margem de segurança, o comportamento da cinética de secagem da amostra em questão.

Com esses objetivos foram realizados um total de 18 ensaios, nas condições que se encontram nas tabelas 5.1 e 5.2. No apêndice A podem ser consultados detalhes das medições.

Como foi indicado no capítulo IV, a interpretação dos ensaios foi realizada mediante a análise das curvas de secagem U^+ vs t , representadas nas figuras 5.1 a 5.12.

Nas diferentes condições operativas das tabelas 5.1 e 5.2, e de conformidade com todas as curvas de secagem aqui plotadas, se verifica a ausência do período de velocidade

Tabela 5.1
Condições Operativas dos Ensaios

| Ensaio | Vazão do Ar | Espessura do leito | Temperatura Ar | Umidade Inicial | Densidade Aparente |
|--------|-----------------------|--------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| 01 | 240 m ³ /h | 1,0 cm | 41,00°C | 32,06% | 0,0807 |
| 02 | 240 m ³ /h | 1,0 cm | 80,00°C | 30,93% | 0,0816 |
| 03 | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 41,00°C | 32,06% | 0,0810 |
| 04 | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 50,25°C | 20,76% | 0,0849 |
| 05 | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 59,00°C | 25,16% | 0,0878 |
| 06 | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 80,00°C | 30,94% | 0,0818 |
| 07 | 240 m ³ /h | 5,0 cm | 41,75°C | 18,99% | 0,0813 |
| 08 | 240 m ³ /h | 5,0 cm | 80,50°C | 17,68% | 0,0847 |
| 09 | 240 m ³ /h | 10,0 cm | 41,75°C | 19,62% | 0,0820 |
| 10 | 240 m ³ /h | 10,0 cm | 80,50°C | 17,26% | 0,0841 |
| 11 | 180 m ³ /h | 3,0 cm | 50,00°C | 25,71% | 0,0811 |
| 12 | 180 m ³ /h | 3,0 cm | 80,00°C | 25,38% | 0,0807 |
| 13 | 120 m ³ /h | 3,0 cm | 50,00°C | 19,38% | 0,0805 |
| 14 | 120 m ³ /h | 3,0 cm | 80,50°C | 18,24% | 0,0888 |

Tabela 5.2Ensaio Para Verificação do Efeito da U_i

| Ensaio | Vazão do Ar | Espessura do leito | Temperatura Ar | Umidade inicial |
|--------|-----------------------|--------------------|----------------|-----------------|
| A | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 40,00°C | 16,50% |
| B | 240 m ³ /h | 3,0 cm | 40,00°C | 28,80% |
| C | 240 m ³ /h | 5,0 cm | 81,00°C | 29,28% |
| D | 240 m ³ /h | 5,0 cm | 81,00°C | 15,01% |

de secagem constante. O fato pode estar associado à quantidade de água presente na casca, já que, segundo KITIC (1982), é muito mais factível que o período de velocidade de secagem constante se apresente em um material com um elevado conteúdo de água.

5.1 - Influência da Umidade Inicial da Amostra

Segundo COURA & ALSINA (1985), a umidade inicial da amostra, em camada fina, não exerce influência na curva de secagem da casca de caroço de algodão. Como forma de verificar a afirmativa, realizaram-se quatro ensaios, tabela 5.2, e verificou-se que, segundo as figuras 5.1 e 5.2, os pontos correspondentes aos ensaios A e B, assim como os pontos dos ensaios C e D, coincidem praticamente numa única curva.

Os resultados, correspondentes a dois níveis de temperatura (40 e 80 °C), e com duas alturas do leito (3 e 5 cm) confirmam, portanto, as observações de COURA & ALSINA (1985) de que a evolução da relação de umidade com o tempo independe do teor de umidade inicial.

5.2 - Influência da Vazão do Ar de Secagem

Para efeito de verificação da influência da vazão, manteve-se a temperatura e a altura do leito constantes e variou-se, de forma que pudéssemos, em faixas de temperatu

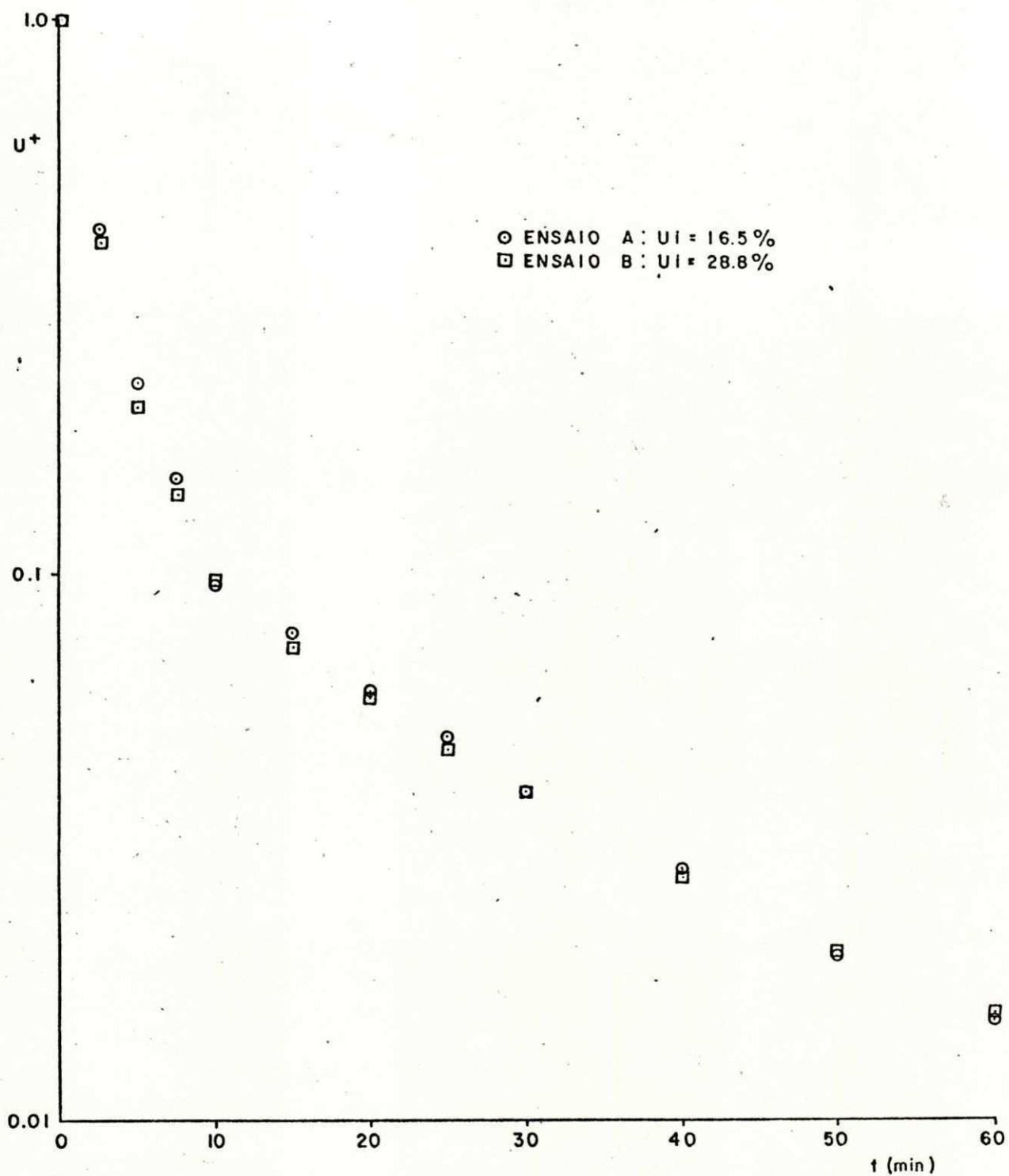


FIGURA 5.1 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA UMIDADE INICIAL DA AMOSTRA.
 $V = 240 \text{ m}^3/\text{h}$; $A = 3.0 \text{ cm}$; $T = 40^\circ\text{C}$

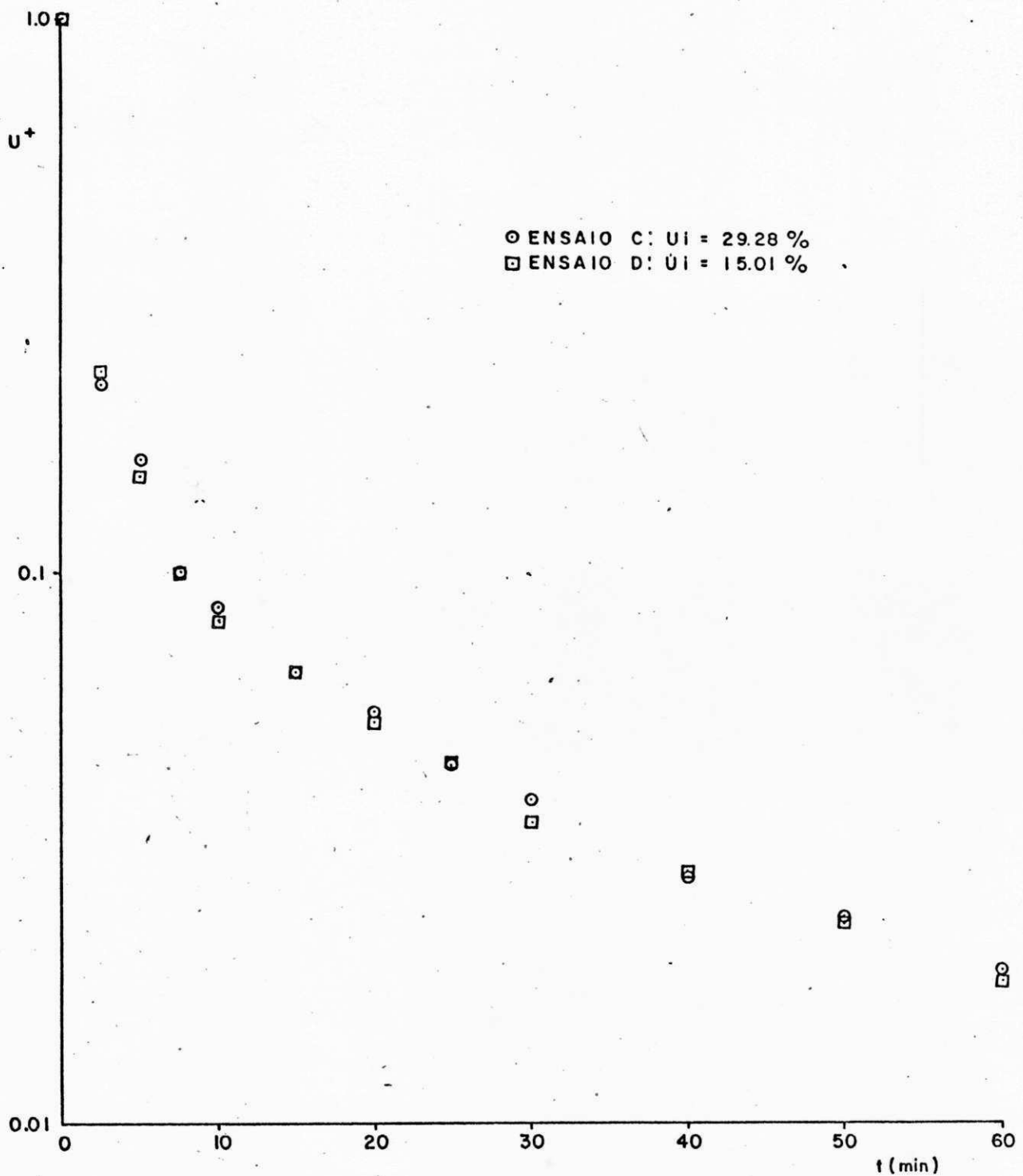


FIGURA 5.2 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA UMIDADE INICIAL DA AMOSTRA.
 $V = 240 \text{ m}^3/\text{h}$; $A = 5.0 \text{ cm}$; $T = 81^\circ\text{C}$.

ras distintas (50 e 80 °C), observar os efeitos dessa variável no processo de secagem da casca. A altura escolhida, entre as quatro estudadas, foi a de 3 cm, por esta oferecer condições de operacionalização mais eficiente e, portanto, com menor margem de erros, já que para alturas maiores, o peso da amostra e suporte ultrapassavam a capacidade da balança mettler PC 440, onde pode-se ler com maior rapidez e precisão o peso da amostra.

Na figura 5.3 estão representados os ensaios 4,11 e 13, e na figura 5.4, os ensaios 6,12 e 14.

Mediante observação das figuras 5.3 e 5.4, verifica-se que nos primeiros minutos de secagem, em qualquer uma das três vazões, a taxa de remoção de água é elevado com evaporação rápida da camada de água existente na parte superficial. No início da secagem há sempre um trecho irregular na curva de secagem, durante o qual a distribuição de temperatura e umidade da amostra deve se adaptar às condições de secagem, sendo de se esperar, portanto, que ocorram pequenas irregularidades no início do processo. Para tempos superiores a 10 minutos, os pontos representativos de cada vazão praticamente se sobrepõem. Portanto, constata-se o que COURA & ALSINA (1985) em camada fina, concluíram a respeito: as curvas de secagem da casca de caroço de algodão não dependem da vazão do ar de secagem.

Quando a velocidade de secagem é sensível à variação do gás de secagem, indica uma resistência externa predominante. A transferência de matéria independe das condições de escoamento quando a resistência externa é desprezível. Dado

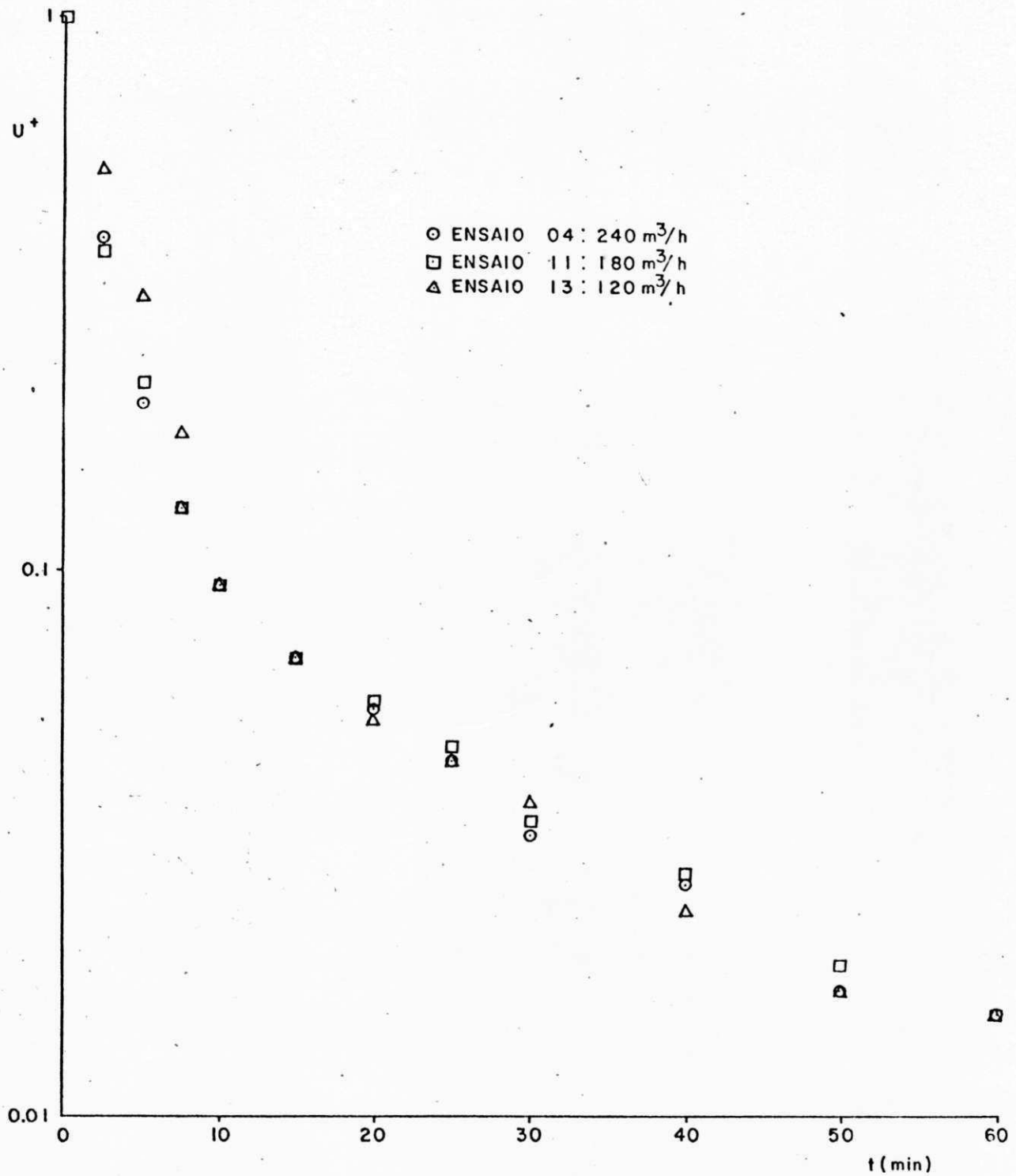


FIGURA 5.3 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM.
 $A = 3,0$ cm; $T = 50^{\circ}\text{C}$.

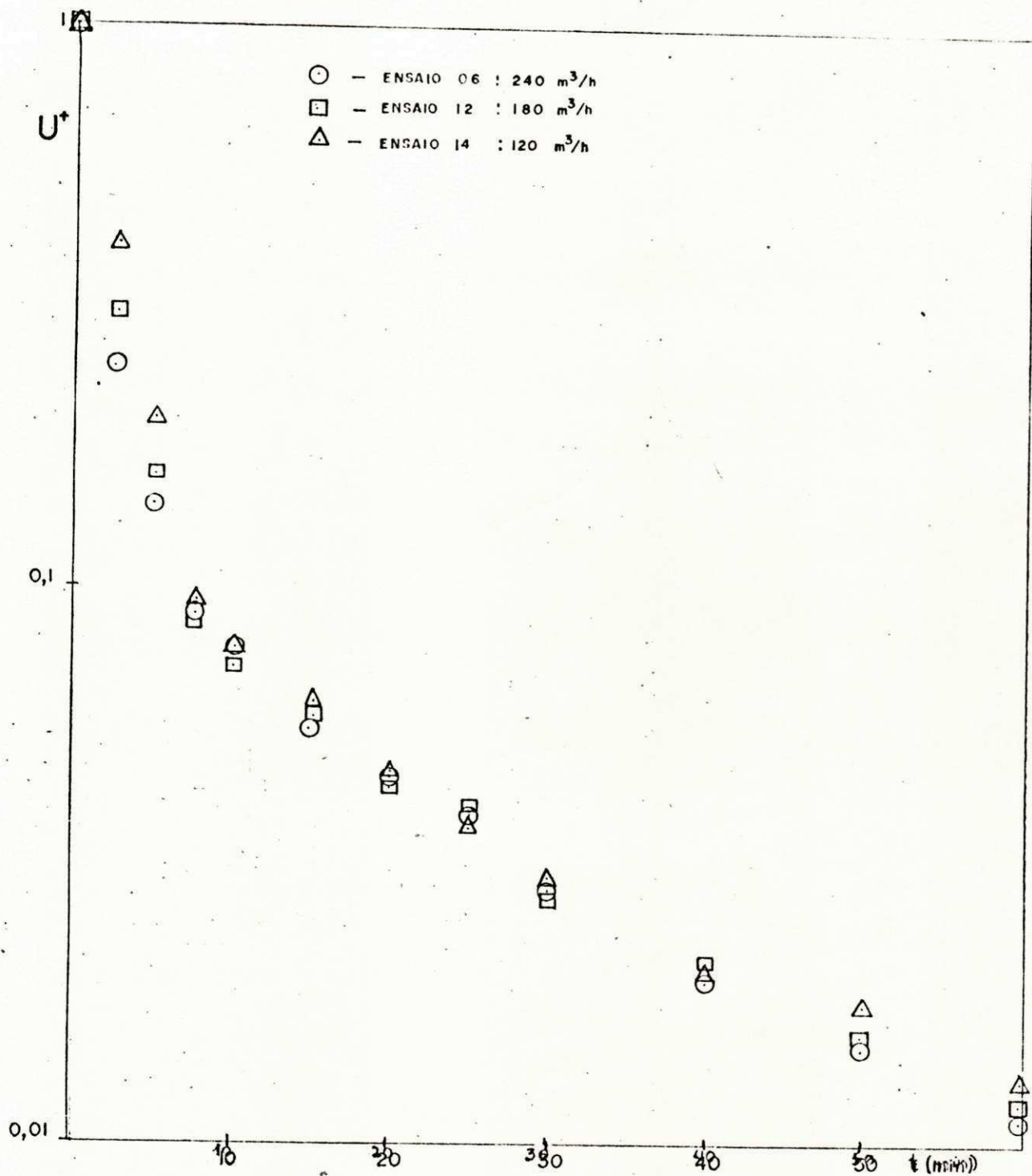


FIG. 54 — CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR
 A = 3,0cm, T = 80°C

que não foi observada influência da vazão nos ensaios realizados, podemos concluir que, desde um ponto de vista difusional, para o sistema em estudo o controle da transferência é difusional interno na faixa operacional utilizada.

5.3 - Influência da Temperatura do Ar de Secagem

O efeito da temperatura sobre a secagem da casca foi observado em diferentes condições de altura do leito e de vazão do ar de secagem, conforme tabela 5.1.

Para uma altura de 1 cm e uma vazão de $240 \text{ m}^3/\text{h}$, temos na figura 5.5 o comportamento da secagem da casca de caroço de algodão em faixas de temperaturas diferentes: 40 e 80 °C. Embora a variação de temperatura seja da ordem de 40 °C, verifica-se apenas uma leve influência desta variável, apresentando uma distorção nos últimos pontos, que pode ser atribuída a pesagem da amostra, já que esta é afetada pela absorção de umidade do ar quando se estar pesando. Estas flutuações são mais sensíveis na região de baixas umidades, quando o sólido se aproxima do seu peso seco.

Para altura do leito de 10 cm, com vazão de $240 \text{ m}^3/\text{h}$, temos a figura 5.6 e, para altura de 3 cm, com vazão de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, temos a figura 5.7. Na figura 5.6 o intervalo de temperatura é de 40 °C e na figura 5.7, o intervalo é de 30 °C.

Em todos os outros ensaios o comportamento é semelhante, na medida em que se verifica pouca influência da tempe

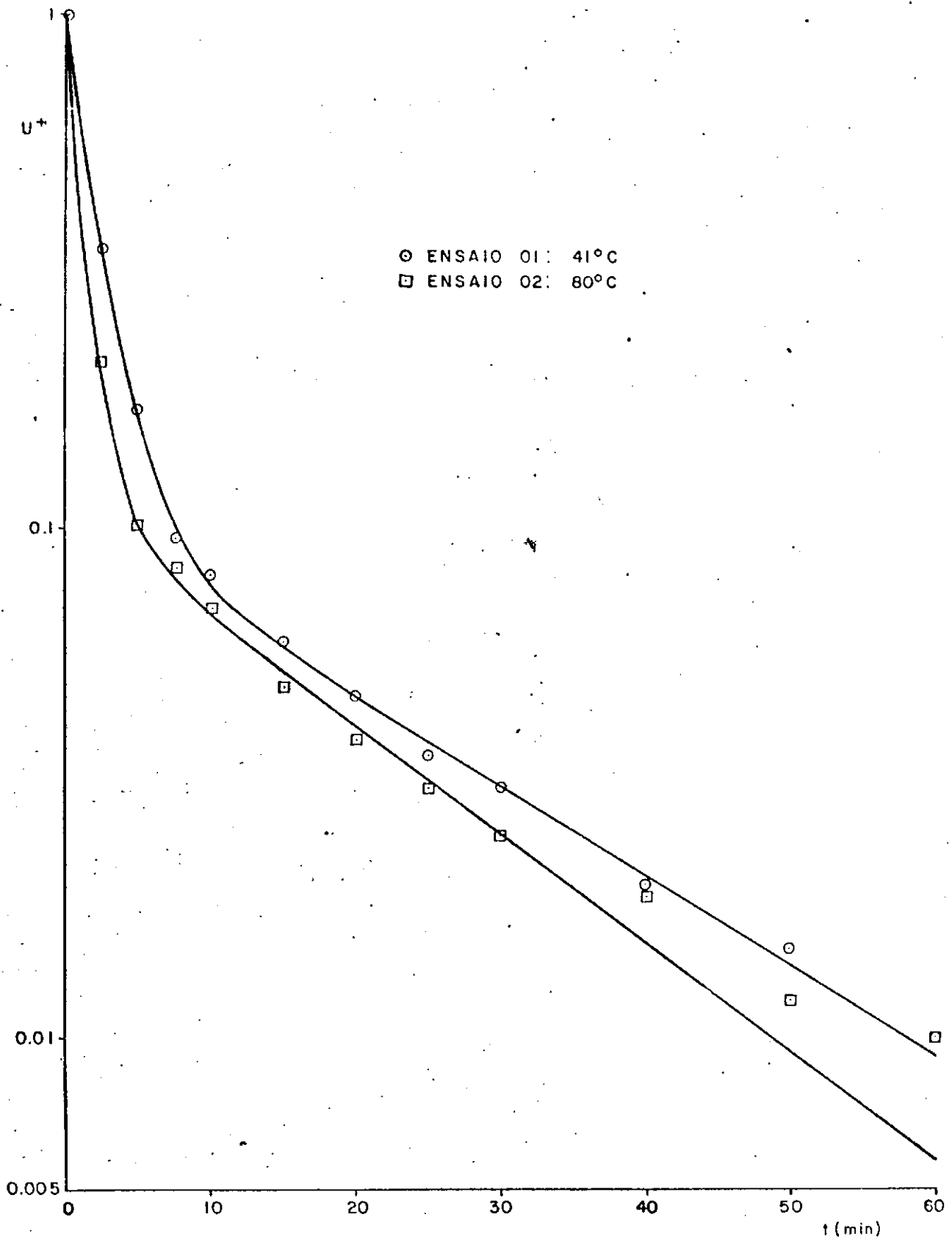


FIGURA 5.5 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM.
 $V = 240 \text{ m}^3/\text{h}$; $A = 1.0 \text{ cm}$

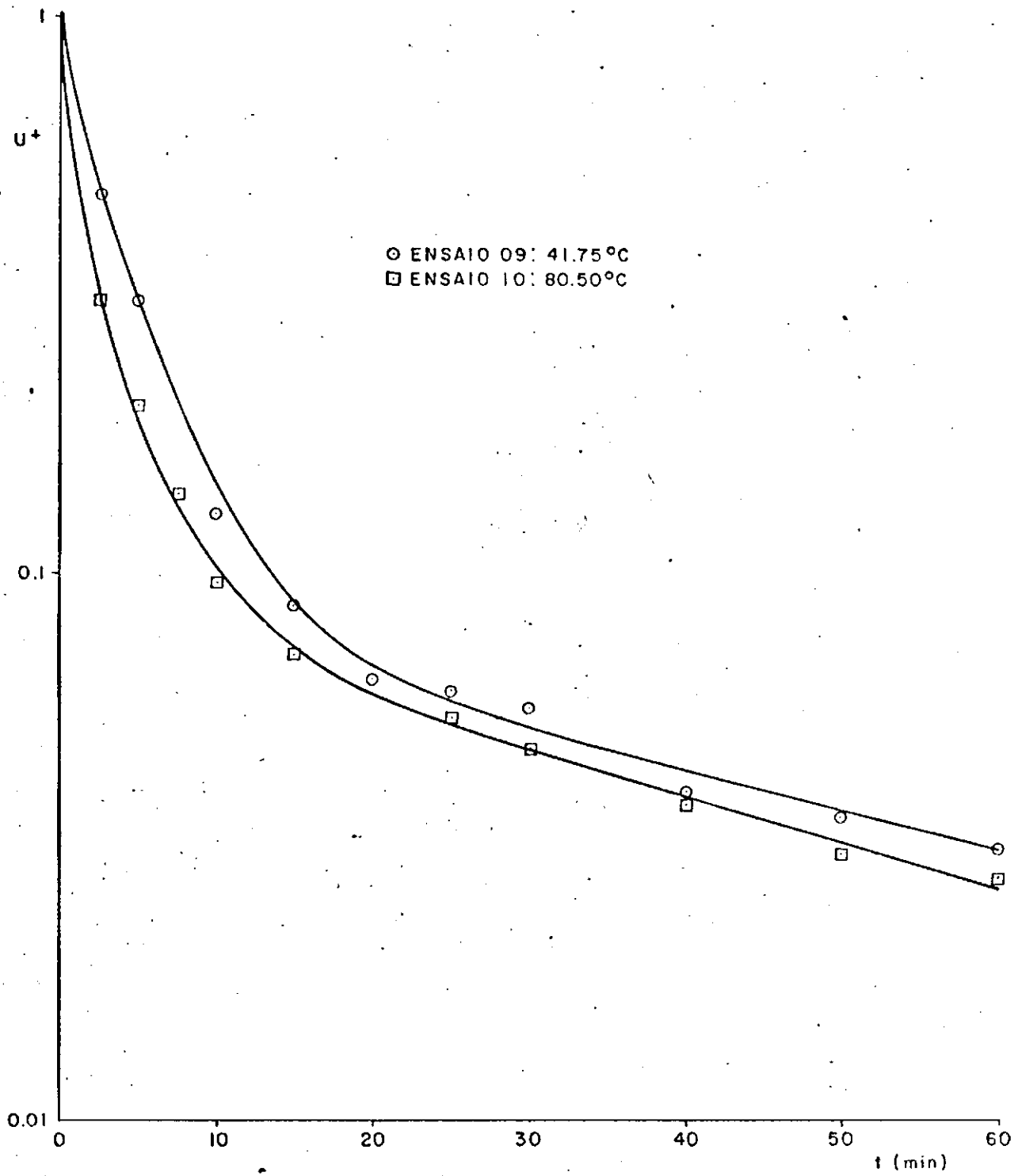


FIGURA 5.6 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM.

$V = 240 \text{ m}^3/\text{h}$; $A = 10 \text{ cm}$.

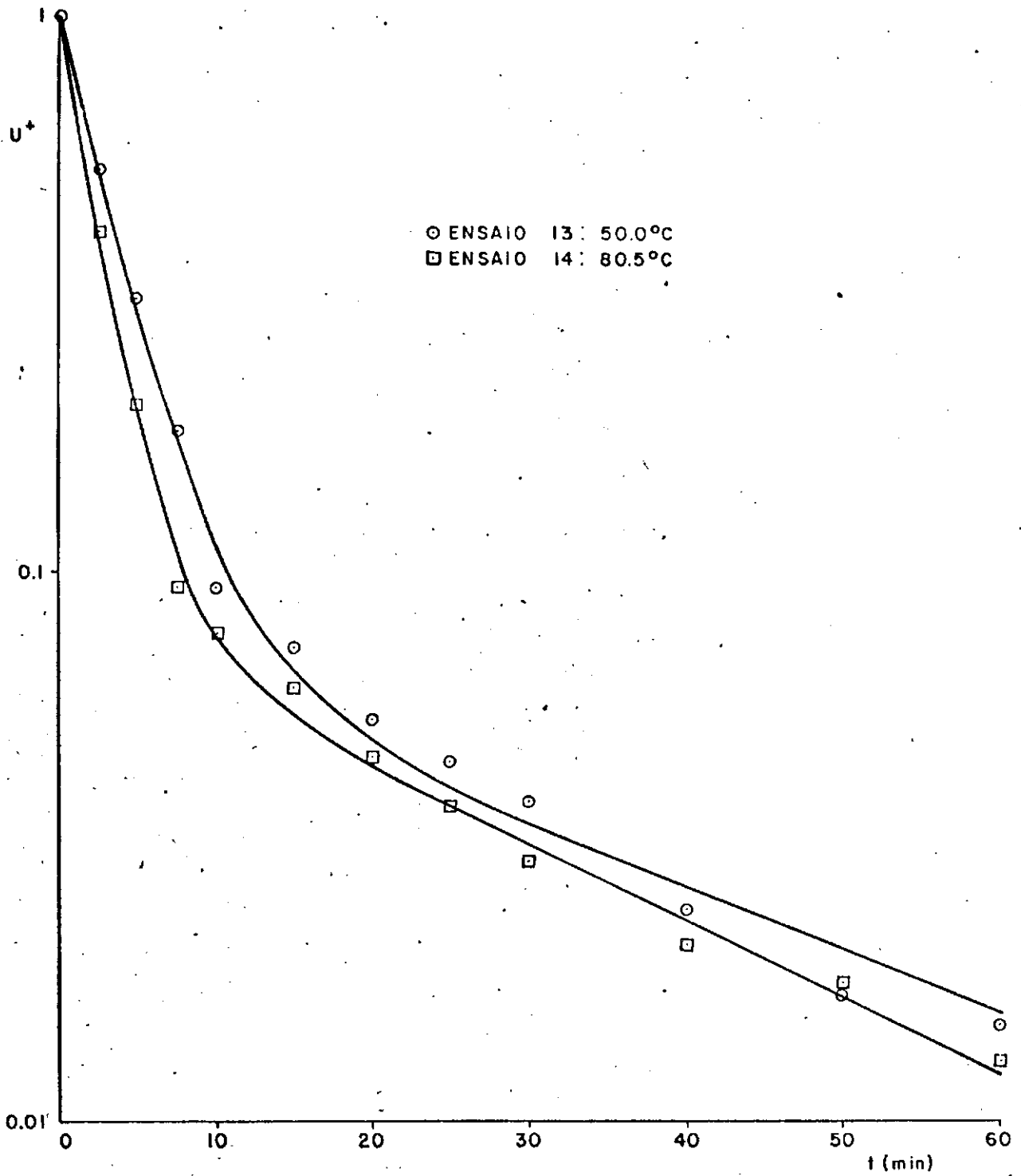


FIGURA 5.7 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM.
 $V = 120 \text{ m}^3/\text{h}$; $A = 3.0 \text{ cm}$

ratura na secagem de casca, observando-se sempre, uma queda brusca do conteúdo de umidade nos primeiros minutos de secagem.

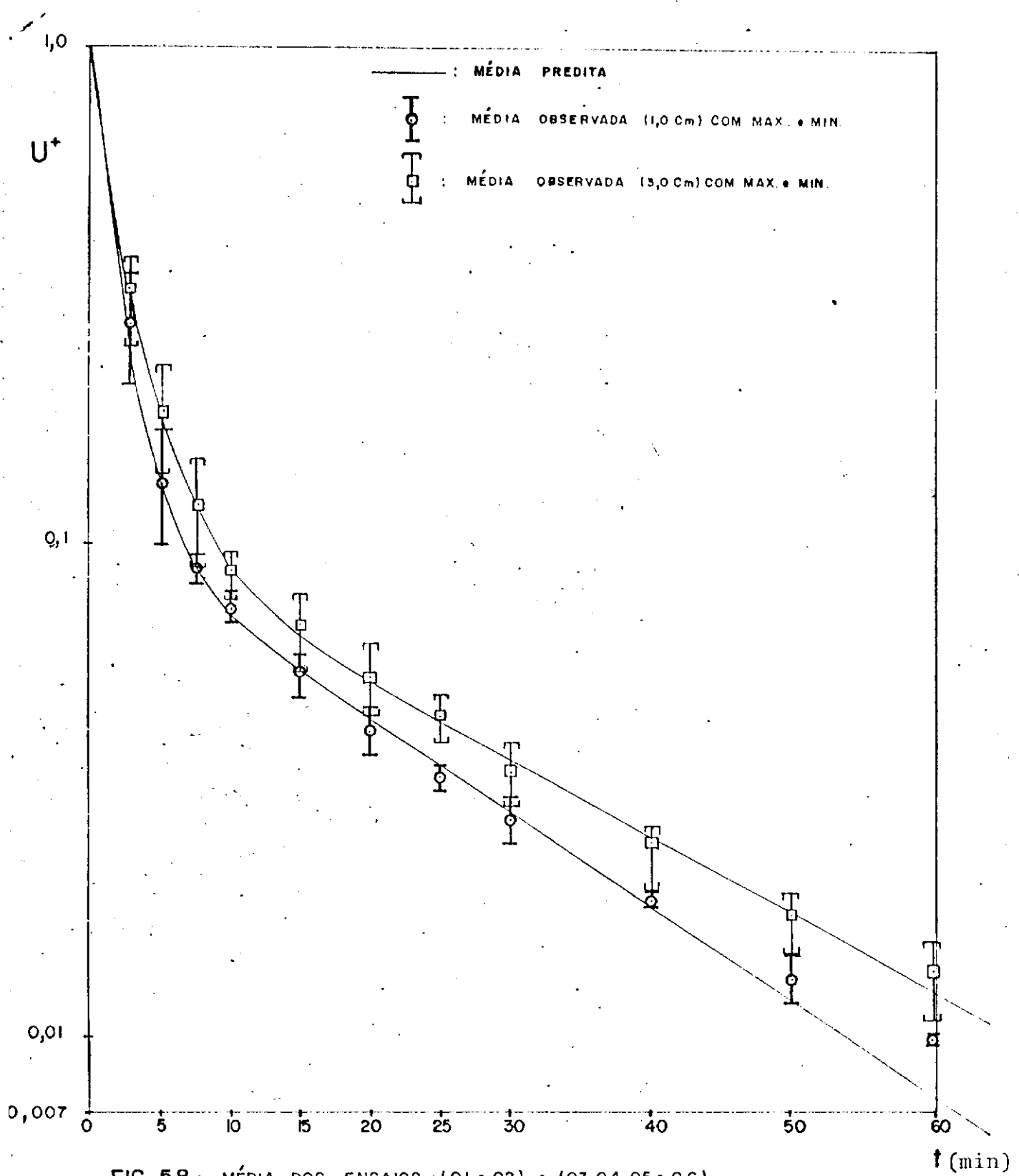
COURA & ALSINA (1985) verificaram, em camadas finas, que a temperatura não influencia significativamente a cinética de secagem da casca. Para alturas de até 10 cm, podemos concluir também que a temperatura influencia de forma pouco acentuada, sendo mais visível esta influência na primeira parte das curvas de secagem. O fato da não isotermicidade da amostra, ou seja, período na qual a amostra leva para se esquentar, explica essa maior influência da temperatura nos primeiros minutos de secagem.

Desprezando a pouca influência da temperatura, torna-se possível promediar ensaios com temperaturas diferentes, mas com iguais alturas, sem comprometer a interpretação dos resultados. As figuras 5.8 e 5.9 mostram a evolução da relação de umidade U^+ em função do tempo t , numa vazão de $240 \text{ m}^3/\text{h}$ e alturas variando de 1 a 10 cm, com valores médios dos ensaios a diferentes temperaturas.

Feita as médias dos ensaios fica claro que a temperatura não é muito significativa, principalmente para tempos longos, quando a dispersão dos pontos em torno do valor médio é pequena.

5.4 - Influência da Altura do Leito

Para efeito de análise da influência da espessura do



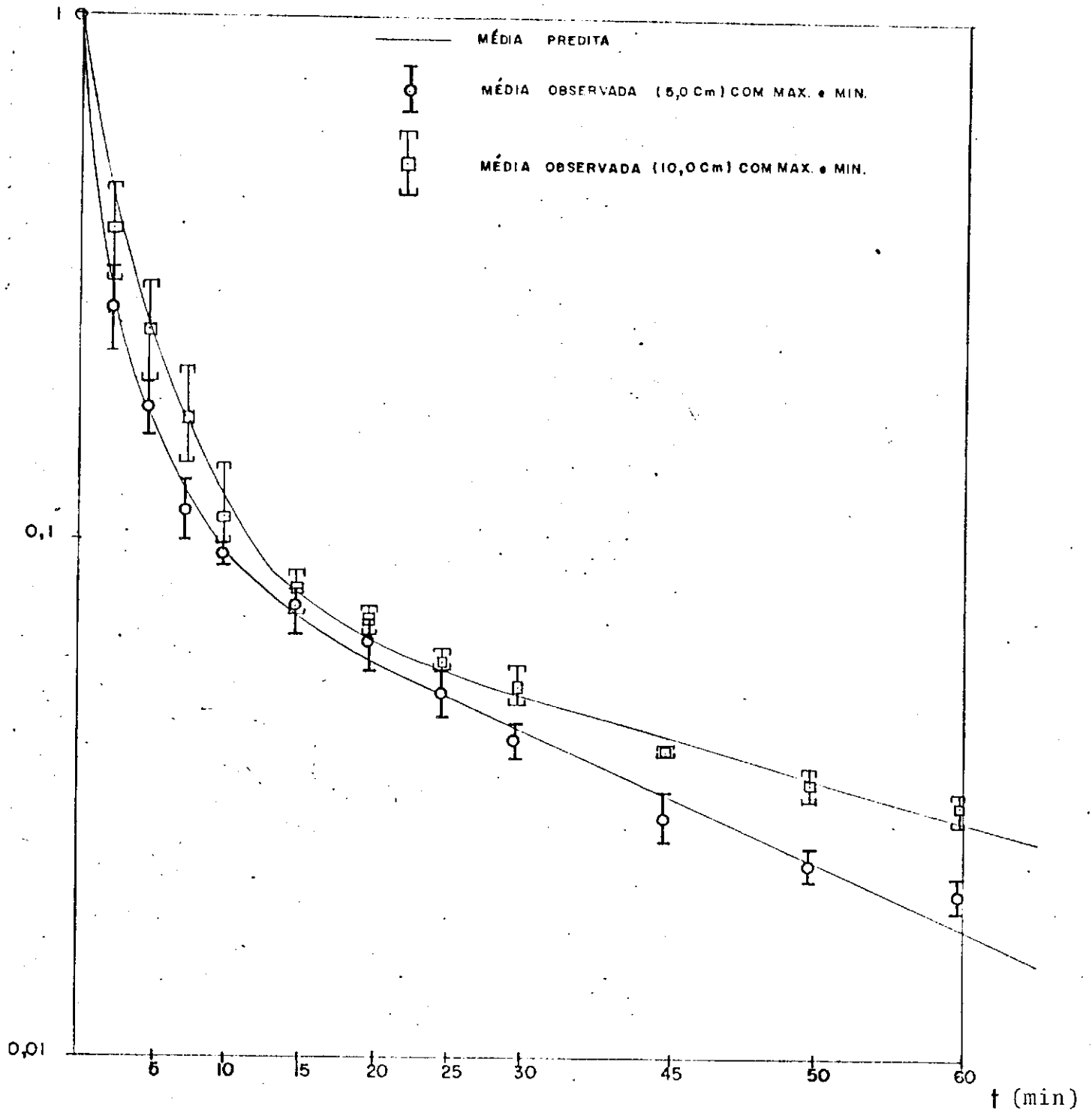


FIG. 5.9 — MÉDIA DOS ENSAIOS : (07 e 08) e (09 e 10)

leito, no comportamento cinético da secagem da casca, foram comparados os ensaios 1, 3, 7 e 9, realizados com uma temperatura de secagem de 40 °C e vazão do ar de 240 m³/h representados na figura 5.10. Com o mesmo objetivo foram comparados os ensaios 2, 6, 8 e 10, realizados com a mesma vazão dos anteriores, mas com temperatura de 80 °C, representados na figura 5.11.

Em qualquer das duas figuras citadas, para tempos superiores a 10 minutos, quanto menor é a altura do leito, maior é sua inclinação, obtendo-se, portanto, relação de umidade menores. Para tempos iguais, temos relação de umidade de maior para alturas maiores. Como a umidade inicial não influencia a secagem da casca, se verifica pois, que a velocidade de secagem diminui com a altura do leito.

Observa-se na figura 5.10 que nos primeiros 10 minutos, a curva de secagem de 5 cm apresenta relação de umidade menor do que a curva de secagem de 3 cm. Entretanto, a partir dos 15 minutos, apresenta o comportamento esperado: maior relação de umidade para maior altura do leito. A não isothermicidade da amostra pode explicar o fato, já que para alturas maiores, o tempo de distribuição ou de uniformização da temperatura na amostra é maior. Apesar de termos verificado que a umidade inicial da amostra não influencia, chamamos a atenção para o fato de que, nos primeiros minutos de secagem, esta variável associada a porosidade, ver capítulo IV, pode influenciar, sobretudo neste caso, quando a diferença de altura é de 2 cm e a de umidade inicial é de 13 pontos percentuais.

Na figura 5.11, o fato acima mencionado: inversão da

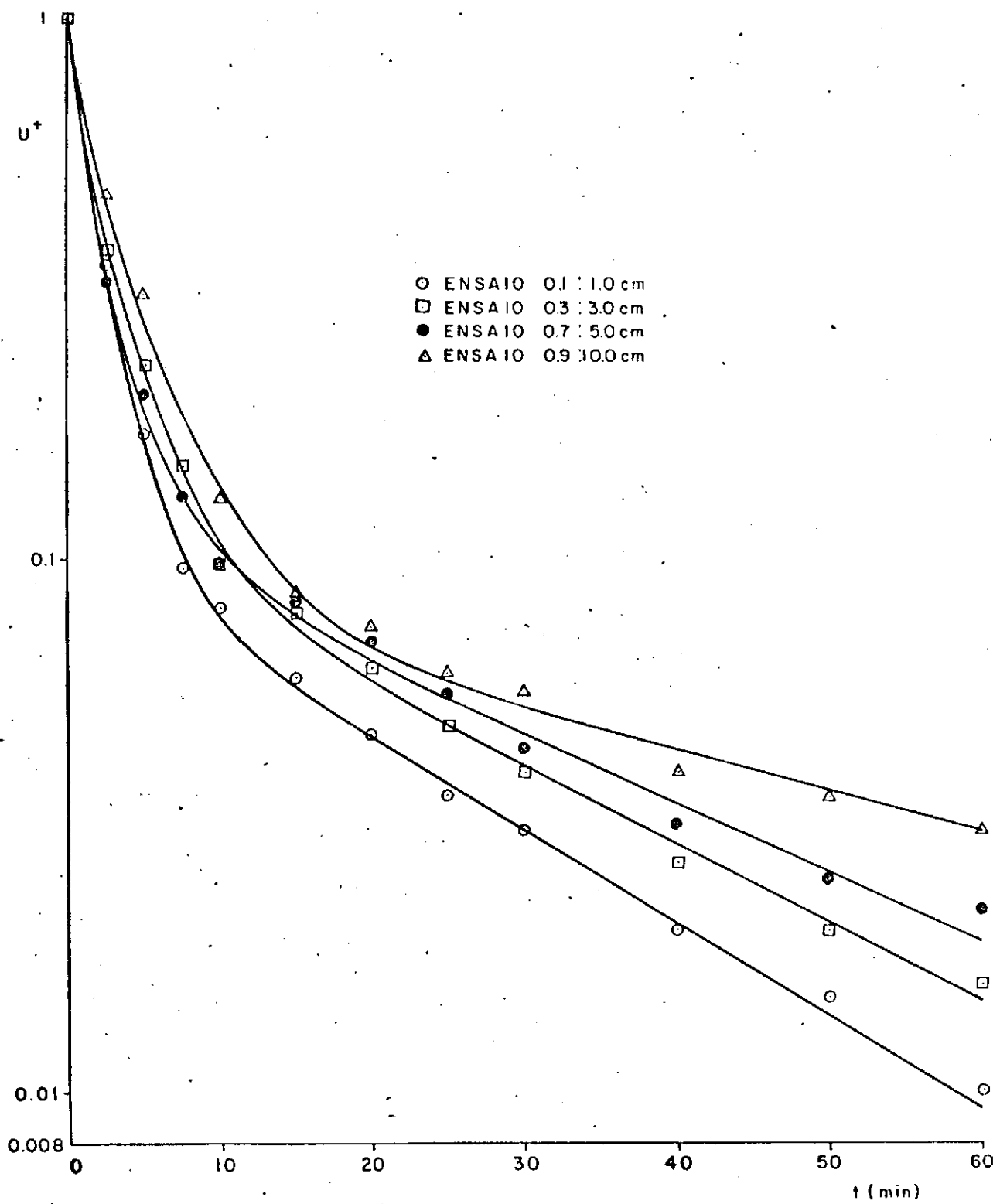


FIGURA 5.10 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO.

$V = 240 \text{ m}^3/\text{h}$; $T = 41.5^\circ\text{C}$

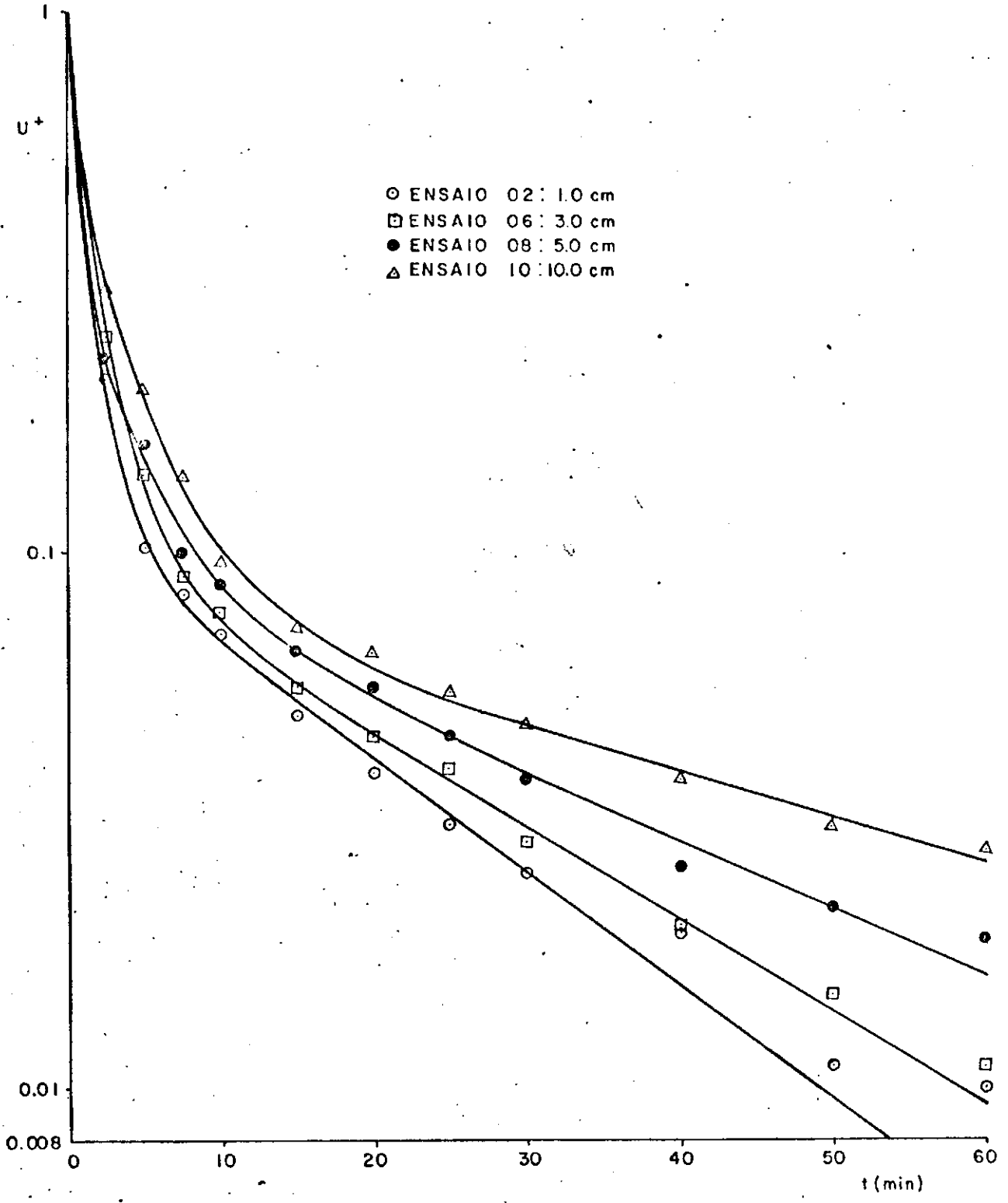


FIGURA 5.11 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO.
V = 240 m³/h; T = 80.25°C

tendência geral nas curvas de 3 cm e 5 cm de altura do leito, repete-se apenas no primeiro ponto, que pode ser atribuído a erros de leitura. Se aceitarmos a hipótese anterior, de que o período de uniformização da temperatura é responsável pela anomalia observada, verifica-se que quando se utiliza temperatura de secagem maior, esse tempo é sensivelmente menor, sendo de aproximadamente 10 minutos para 40 °C e em torno de 2,5 minutos, para 80 °C.

A câmara de secagem foi preparada de forma a garantir, o máximo possível, um processo adiabático e como a temperatura de entrada no leito, durante a realização de um ensaio, permanece constante, seja 40 ou 80 °C, a quantidade de energia fornecida ao sistema, durante todo o processo, permanece a mesma, ou seja, é constante. Logo, é de se esperar, que a temperatura média da amostra para alturas maiores seja menor.

Segundo KITIC (1982), a influência da altura se manifesta através da história térmica do material: uma temperatura média da amostra menor em leitos profundos dá como resultado um menor coeficiente de difusão.

5.5 - Análise e Correlação dos Resultados

De acordo com a forma geral das curvas e com o objetivo de propor equações empíricas, para a cinética de secagem, a análise dos ensaios nas condições que se encontram na tabela 5.1, foi feita por regressão não linear, utilizando sub

rotina DPENLN, com uma equação a 6 parâmetros,

$$U^+ = \theta_1 \text{Exp}(-\theta_2 \cdot t) + \theta_3 \text{Exp}(-\theta_4 \cdot t) + \theta_5 \text{Exp}(-\theta_6 \cdot t) \quad (5.1)$$

onde,

U^+ = relação de umidade (adimensional)

t = tempo de secagem (min)

θ_n = parâmetros da equação

os resultados do ajuste se encontram na tabela 5.3.

Verificando uma forte correlação entre os parâmetros θ_4 e θ_6 na maioria dos ensaios, conforme tabela 5.3, propomos uma nova equação com apenas quatro parâmetros, eliminando os θ_5 e θ_6 da equação 5.1.

Os dados experimentais também foram tratados com o modelo proposto por THOMPSON (1968), equação 2.21. No entanto, este modelo, ajustava apenas parte dos dados, apresentando desvios consideráveis no restante, o que naturalmente foi descartado, já que nos interessava um modelo, ou equação, que pudesse realmente representar de forma satisfatória a cinética de secagem da casca nas condições estudadas.

Tomando apenas dois termos da equação 5.1, resulta:

$$U^+ = \theta_1 \text{Exp}(-\theta_2 t) + \theta_3 \text{Exp}(-\theta_4 t) \quad (5.2)$$

Na tabela 5.4 encontram-se os valores dos parâmetros, obtidos mediante ajuste dos dados dos ensaios por regressão não linear com a equação 5.2. Conforme tabela 5.4, os desvios padrões dos valores estimados pela equação 5.2, em rela

Tabela 5.3

Resultados do Ajuste dos Dados Experimentais pela eq. 5.1

| Ensaio | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_6 | Desvio Padrão |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| 01 | 0,1046714 | 0,0403498 | 0,2260203 | 0,4633599 | 0,5890646 | 0,4659023 | $0,372 \times 10^{-2}$ |
| 03 | 0,1267370 | 0,0336501 | 0,4563888 | 0,3018660 | 0,1323929 | 0,3017768 | $0,646 \times 10^{-2}$ |
| 06 | 0,0992433 | 0,0386948 | 0,3170575 | 0,4162502 | 0,1364987 | 0,4169196 | $0,306 \times 10^{-2}$ |
| 09 | 0,0865825 | 0,0167555 | 0,4946765 | 0,2370847 | 0,2244751 | 0,2366650 | $0,942 \times 10^{-2}$ |
| 12 | 0,0709795 | 0,0345109 | 0,6637025 | 0,4255722 | 0,0183152 | 0,4178699 | $0,589 \times 10^{-2}$ |
| 13 | 0,0764010 | 0,0260059 | 0,5301825 | 0,2789916 | 0,3981194 | 0,2787260 | $0,127 \times 10^{-2}$ |
| 14 | 0,0852822 | 0,0320654 | 0,4381980 | 0,4160535 | 0,5006381 | 0,4160422 | $0,861 \times 10^{-2}$ |

ção aos valores observados, estão na faixa de 0,00107 a 0,00769. Estes valores de desvios padrões são satisfatórios, conforme se verifica nas figuras 5.5 a 5.11, em que os pontos experimentais coincidem, dentro de uma margem razoável, com as curvas preditas, ver também Apêndice C.

Para verificação de como se comporta cada parâmetro com a vazão, temperatura e altura, distribuimos os valores em quatro tabelas (5.5 a 5.8), podendo-se rapidamente ler o comportamento individual de cada parâmetro.

Para tempos grandes, o primeiro termo da equação 5.2 governa a parte reta da curva de secagem. Estabelecendo uma equação linear para esta parte da curva, teríamos então, como coeficiente linear o $\ln \theta_1$, que é a intersecção com o eixo das ordenadas, e θ_2 , como coeficiente angular ou inclinação da reta. Logo, conforme as conclusões do ponto anterior, seria de se esperar que θ_1 e θ_2 na tabela 5.4, obtidos com a equação 5.2, tivessem o seguinte comportamento: quanto maior a altura, maior θ_1 e menor θ_2 , sendo de se esperar que os parâmetros fossem pouco influenciados pela vazão e temperatura do ar. Na verdade, apenas θ_2 , cumpre com esta condição. Enquanto que para θ_1 , além de não se poder concluir uma tendência, não obedece ao comportamento esperado acima. O fato, contrário as nossas previsões, de θ_1 estar diminuindo com a altura será discutido mais adiante.

Não influenciando as curvas de secagem, pode-se fazer uma média dos ensaios que foram feitos com temperaturas e alturas iguais e vazões diferentes, ou com vazão e alturas iguais e temperaturas diferentes, conforme tabela 5.9.

Tabela 5.4

Resultados do Ajuste dos Dados Experimentais pela eq. 5.2

| E | V (m ³ /H) | T (°C) | A (cm) | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | Desvio Padrão |
|----|--------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| 1 | 240 | 41 | 1,0 | 0,104660 | 0,040346 | 0,815016 | 0,465150 | 0,00315 |
| 2 | 240 | 80 | 1,0 | 0,112494 | 0,049484 | 0,880501 | 0,822953 | 0,00697 |
| 3 | 240 | 41 | 3,0 | 0,112682 | 0,033653 | 0,588783 | 0,301856 | 0,00546 |
| 4 | 240 | 50 | 3,0 | 0,123349 | 0,039635 | 0,827300 | 0,423437 | 0,00316 |
| 5 | 240 | 59 | 3,0 | 0,102083 | 0,034018 | 0,550183 | 0,375530 | 0,00156 |
| 6 | 240 | 80 | 3,0 | 0,099242 | 0,038694 | 0,453554 | 0,416449 | 0,00259 |
| 7 | 240 | 42 | 5,0 | 0,119358 | 0,030661 | 0,526922 | 0,348201 | 0,00472 |
| 8 | 240 | 81 | 5,0 | 0,093115 | 0,028937 | 0,295542 | 0,284984 | 0,00516 |
| 9 | 240 | 42 | 10,0 | 0,086589 | 0,016757 | 0,719165 | 0,236965 | 0,00769 |
| 10 | 240 | 81 | 10,0 | 0,085898 | 0,019387 | 0,439803 | 0,260947 | 0,00369 |
| 11 | 180 | 50 | 3,0 | 0,102065 | 0,032706 | 0,634943 | 0,317639 | 0,00412 |
| 12 | 180 | 80 | 3,0 | 0,089301 | 0,034519 | 0,663735 | 0,425600 | 0,00498 |
| 13 | 120 | 50 | 3,0 | 0,076397 | 0,026004 | 0,928303 | 0,278876 | 0,00107 |
| 14 | 120 | 81 | 3,0 | 0,085284 | 0,032066 | 0,938843 | 0,416052 | 0,00728 |

Tabela 5.5
Comportamento do Parâmetro θ_1

| T(°C) | A | | 1 cm | 3 cm | 5 cm | 10 cm |
|--------|-----|--|----------|----------|----------|----------|
| | V* | | | | | |
| 41 ± 1 | 240 | | 0,104660 | 0,112682 | 0,119358 | 0,086589 |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 50 ± 1 | 240 | | - | 0,123348 | - | - |
| | 180 | | - | 0,102065 | - | - |
| | 120 | | - | 0,076397 | - | - |
| 60 ± 1 | 240 | | - | 0,102083 | - | - |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 80 ± 1 | 240 | | 0,112494 | 0,099242 | 0,093115 | 0,085979 |
| | 180 | | - | 0,089302 | - | - |
| | 120 | | - | 0,085284 | - | - |

Tabela 5.6
Comportamento do Parâmetro θ_2

| T(°C) | A | | 1 cm | 3 cm | 5 cm | 10 cm |
|--------|-----|--|----------|----------|----------|----------|
| | V* | | | | | |
| 41 ± 1 | 240 | | 0,040346 | 0,033653 | 0,030661 | 0,016757 |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 50 ± 1 | 240 | | - | 0,039635 | - | - |
| | 180 | | - | 0,032706 | - | - |
| | 120 | | - | 0,026004 | - | - |
| 60 ± 1 | 240 | | - | 0,034018 | - | - |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 80 ± 1 | 240 | | 0,049484 | 0,038694 | 0,028937 | 0,019387 |
| | 180 | | - | 0,034519 | - | - |
| | 120 | | - | 0,032066 | - | - |

* m³/h

Tabela 5.7
Comportamento do Parâmetro θ_3

| T(°C) | A | | 1 cm | 3 cm | 5 cm | 10 cm |
|--------|-----|--|----------|----------|----------|----------|
| | V* | | | | | |
| 41 ± 1 | 240 | | 0,815015 | 0,588783 | 0,526922 | 0,719165 |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 50 ± 1 | 240 | | - | 0,827300 | - | - |
| | 180 | | - | 0,634943 | - | - |
| | 120 | | - | 0,928303 | - | - |
| 60 ± 1 | 240 | | - | 0,550183 | - | - |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 80 ± 1 | 240 | | 0,880501 | 0,453554 | 0,295542 | 0,439803 |
| | 180 | | - | 0,663735 | - | - |
| | 120 | | - | 0,938843 | - | - |

Tabela 5.8
Comportamento do Parâmetro θ_4

| T(°C) | A | | 1 cm | 3 cm | 5 cm | 10 cm |
|--------|-----|--|----------|----------|----------|----------|
| | V* | | | | | |
| 41 ± 1 | 240 | | 0,465150 | 0,301856 | 0,348201 | 0,236965 |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 50 ± 1 | 240 | | - | 0,423437 | - | - |
| | 180 | | - | 0,317639 | - | - |
| | 120 | | - | 0,278876 | - | - |
| 60 ± 1 | 240 | | - | 0,375530 | - | - |
| | 180 | | - | - | - | - |
| | 120 | | - | - | - | - |
| 80 ± 1 | 240 | | 0,822953 | 0,416450 | 0,284984 | 0,260947 |
| | 180 | | - | 0,425600 | - | - |
| | 120 | | - | 0,416052 | - | - |

* m³/h

Os valores médios dos dados dos ensaios, conforme tabela 5.9, foram tratados com a mesma equação 5.2 a quatro parâmetros, por regressão não linear, apresentando desvios padrões da mesma ordem.

A equação 5.2 ajusta melhor os pontos para tempos curtos. Estes pontos exercem muita influência no ajuste dos últimos pontos, que por sua vez são sempre passíveis de erros de leitura, já que possuem baixas umidades.

A exceção de θ_1 e θ_3 , na tabela 5.9, todos os parâmetros diminuem com a elevação da altura. Pode-se perceber que os θ_1 não são tão diferentes, levando a crer que para pequenas alturas eles são praticamente da mesma ordem nas médias dos ensaios realizados nas distintas condições de temperaturas e vazões para as diversas alturas.

Analisando todas as figuras plotadas com $\ln U^+$ vs t , observa-se uma analogia com as soluções em série da lei de Fick para esfera, placa e cilindro. Estas três soluções clássicas da lei de Fick, têm sido usadas para representar as curvas de secagem de cereais. O modelo escolhido não está, em geral, relacionado com a forma dos grãos, assim, para milho e arroz, tem sido usado o modelo de difusão em esfera, embora, ele fosse melhor para grãos de dimensões mais uniformes como sorgo ou soja, segundo GUNTHER et alii (1983).

No começo do período de secagem o valor absoluto da inclinação da tangente à curva é decrescente com o tempo até atingir um valor constante para tempos grandes, em que os pontos experimentais tendem a se ordenar seguindo uma reta.

Portanto a relação entre U^+ e t é exponencial para tempos grandes. Esta observação é melhor visualizada quando o tempo é bem superior ao deste trabalho.

COURA & ALSINA (1985) propuseram que a lei de Fick descreve o comportamento da secagem da casca de caroço de algodão em camada fina. As soluções da lei de Fick com condição inicial $U^+(0)=1$, concentração na interfase constante e igual ao valor de equilíbrio, são da forma, segundo LUIKOV (1966):

$$U^+ = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Exp} (- B_n Kt) \quad (5.3)$$

onde K = constante de secagem. Depende do coeficiente de difusão, da geometria e tamanho de partícula. Em geral é função da temperatura.

A_n e B_n = coeficiente que dependem da geometria da partícula.

Nos ensaios realizados, todos em camada espessa e tratados com a equação 5.2, assim como nos ensaios feitos por COURA & ALSINA (1985) em camada fina e tratados com a equação 5.3, a taxa de secagem nos instantes iniciais é maior que a correspondente as soluções para placa plana, esfera ou cilindro e em consequência a intersecção da porção linear, A_1 da equação 5.3 e $\ln \theta_1$ da equação 5.2, é menor. O fato foi explicado, em camada fina, devido ser a casca de caroço de algodão um material heterogêneo, de geometria indefinida com presença de fibras e principalmente po

Tabela 5.9

Resultados do Ajuste dos Ensaios Promediados pela eq. 5.2

| Ensaios Promediados | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | Desvio Padrão |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| 04+11+13 | 0,098793 | 0,032432 | 0,777746 | 0,323465 | 0,004648 |
| 06+12+14 | 0,090927 | 0,034995 | 0,685023 | 0,418557 | 0,004673 |
| 01+02 | 0,106872 | 0,043895 | 0,691590 | 0,528261 | 0,001965 |
| 03+04+05+06 | 0,109029 | 0,036242 | 0,595890 | 0,372334 | 0,001714 |
| 07+08 | 0,106818 | 0,030037 | 0,408090 | 0,322430 | 0,004402 |
| 09+10 | 0,085990 | 0,017954 | 0,577260 | 0,244220 | 0,005202 |
| 11+12 | 0,096371 | 0,033663 | 0,648880 | 0,369480 | 0,004510 |
| 13+14 | 0,057703 | 0,013050 | 0,891730 | 0,305813 | 0,008171 |

Tabela 5.10

Comportamento de θ_1 e K com a altura do Leito de acordo com equação 5.6

| Altura(cm) | θ_1 | $K_{(\text{min}^{-1})}$ |
|------------|------------|-------------------------|
| 1 | 0,08845 | 0,0377 |
| 3 | 0,11040 | 0,0365 |
| 5 | 0,11560 | 0,0330 |
| 10 | 0,10910 | 0,0244 |

rosidade elevada.

Utilizando três termos da equação 5.3, COURA & ALSINA (1985), calcularam por regressão não linear os coeficientes A_n e B_n , e levando em consideração que para que se cumpra a condição inicial, $U^+(0)=1$ fazendo $t \rightarrow 0$ na equação 5.3 os coeficientes A_n devem cumprir a condição:

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n = 1 \quad (5.4)$$

propuseram, para correlacionar seus dados a equação:

$$U^+ = A_1 \text{Exp}(-Kt) + (1-A_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{Exp}[-[(2n+1)^2+1]Kt] \quad (5.5)$$

Mudando os parâmetros A_1 por θ_1 , a equação fica,

$$U^+ = \theta_1 \text{Exp}(-Kt) + (1-\theta_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{Exp}[-[(2n+1)^2+1]Kt] \quad (5.6)$$

Para tempos grandes apenas o primeiro termo da equação é significativo. Admitindo que a série 5.6 descreve também o comportamento em camada espessa, determinou-se por regressão linear os parâmetros θ_1 e K , ver tabela 5.10, utilizando os pontos a tempos grandes.

Ao contrário dos resultados da tabela 5.9, θ_1 cresce com a elevação da altura, salvo para 10 cm. Porém, os parâmetros da tabela 5.9 foram obtidos com uma equação empírica a quatro parâmetros, por regressão não linear, levando em consideração também os pontos a tempos pequenos,

que são de altas umidades e influenciam acentuadamente no resto da curva, conseqüentemente nos parâmetros, haja visto que o método, apenas minimiza o desvio quadrático absoluto, enquanto que os dados da tabela 5.10, obtidos com os pontos que fazem a parte regular da curva, ou seja, a parte reta, nos dá resultados esperados: maior altura, maior relação de umidade.

A equação 5.6 correlaciona os dados experimentais de forma satisfatória, conforme figura 5.12, apresentando um ajuste melhor que a equação 5.2 para todos os pontos da curva. De acordo com a tabela 5.10 e o gráfico 5.13, verifica-se que a constante de secagem, onde está inserido o coeficiente de difusão, decresce linearmente com a altura.

Aos efeitos de estabelecermos uma equação que relacione a constante de secagem com a altura do leito, da forma:

$$K = a + bA \quad (5.7)$$

onde

K = constante de secagem (min^{-1})

A = Altura do leito (cm)

a = coeficiente linear (min^{-1})

b = coeficiente angular ($\text{min}^{-1}\text{cm}^{-1}$)

os coeficientes a e b , foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, encontrando-se valores de $0,0402 \text{ min}^{-1}$ para o coeficiente linear e $-1,539.10^{-3} \text{ min}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, para o coeficiente angular, com um coeficiente de cor

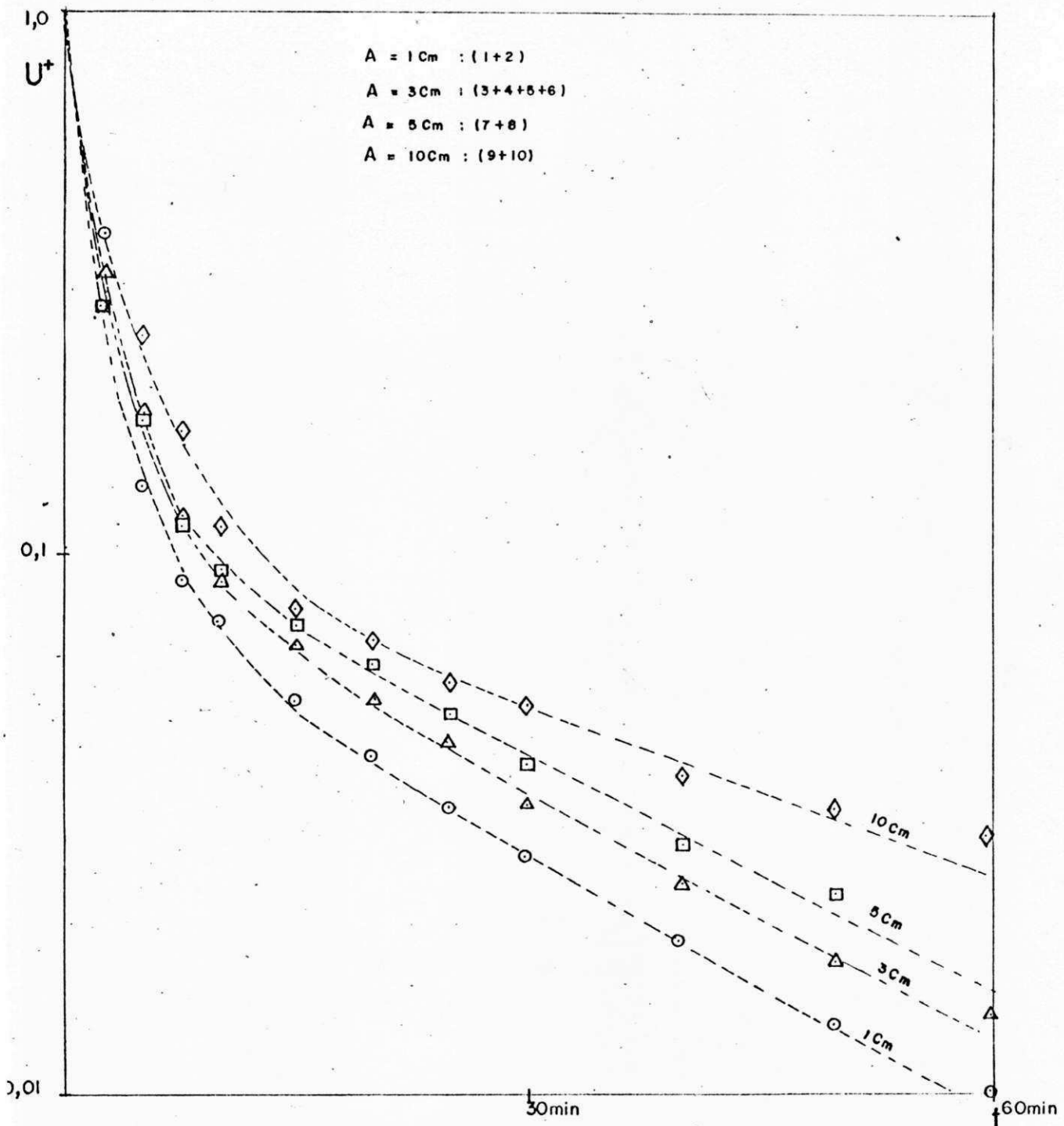


FIG. 5.12-CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA ALTURA (Eq. 5.6)

relação de 0,9899. Obtendo-se pois,

$$K(\text{min}^{-1}) = 0,0402 - 1,539 \cdot 10^{-3} \Lambda(\text{cm}) \quad (5.8)$$

A equação 5.6, juntamente com a equação 5.8, representam a cinética de secagem da casca de caroço de algodão na faixa operacional utilizada neste trabalho.

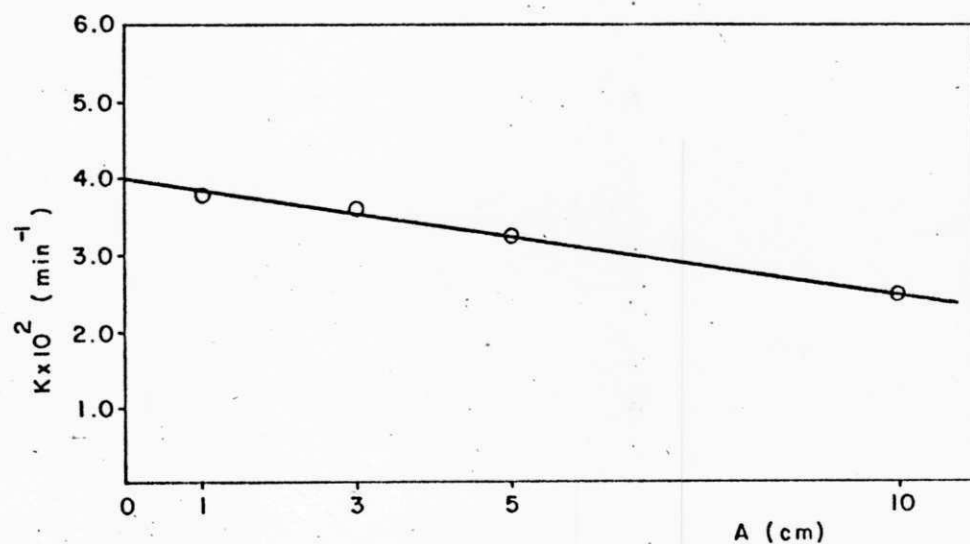


FIGURA 5.13 - DEPENDÊNCIA DA CONSTANTE DE SECAGEM COM A ALTURA DO LEITO.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados em diferentes condições de umidade inicial da amostra, temperatura e vazão do ar de secagem e alturas do leito, podemos concluir:

- 1 - A relação de umidade U^+ diminui com o aumento do tempo, segundo uma função exponencial.
- 2 - A umidade inicial não influencia a curva da secagem.
- 3 - A vazão do ar, nas três faixas utilizadas, não influencia a cinética de secagem da casca e, com isto, concluímos que o controle da transferência de massa é difusional interno.
- 4 - A temperatura influencia pouco a funcionalidade entre U^+ e o tempo de secagem, especialmente nas últimas etapas do processo. A influência da temperatura é mais notória nos instantes iniciais da secagem, podendo ser atribuída ao período de esquentamento da amostra.
- 5 - A funcionalidade entre U^+ e o tempo de secagem t , é influenciada pela espessura do leito. Para se obter um determinado grau de umidade, o tempo de secagem será maior quanto maior for a espessura do leito.
- 6 - A evolução da relação de umidade com o tempo, é bem representada pela equação 5.2. Apresentando como

desvantagens o número de parâmetros, nos quais por sua vez, não foi possível estabelecer uma relação definida com nenhuma das variáveis estudadas.

- 7 - A equação 5.6 descreve a evolução de U^+ com o tempo com um ajuste satisfatório. Apresenta como principal vantagem sobre a equação 5.2 um menor número de parâmetros empíricos e cumpre com a condição inicial. Além disso, no presente trabalho, foi possível estabelecer a funcionalidade dos parâmetros da equação 5.6 com as variáveis estudadas: a constante de secagem diminui com o aumento da altura do leito segundo uma relação linear, dada pela equação 5.8, enquanto se verificou que o parâmetro θ_1 é praticamente constante nas condições de operação estudadas.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para que se tenha mais conhecimentos sobre a cinética de secagem de casca de caroço de algodão, podemos sugerir:

- 1 - Uma equação para o teor de umidade de equilíbrio confiável, numa faixa maior de temperatura.
- 2 - Estudar os efeitos da porosidade durante o processo de secagem: Influência de transferência de massa versus porosidade.
- 3 - Estudar os efeitos da não isotermicidade da amostra, durante os primeiros minutos de secagem, levando em conta os parâmetros térmicos.
- 4 - Verificar o comportamento da casca submetida a secagem em alturas do leito superiores a 10 cm.
- 5 - Fazer a modelação matemática, de forma a poder simular o processo de secagem e ter, com um alto grau de representatividade, o comportamento da casca durante a secagem em um secador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS †

- 01 - ALSINA, O.L.S. "Estudo do Produto: Furfural". Relatório da Secretaria da Indústria e do Comércio da Paraíba. SIC/Pb, 1981.
- 02 - ALSINA, O.L.S. & QUIRINO, M.H. "Secagem de Resíduos Agrícolas em bandeja". Anais do XI Encontro sobre escoamento em meios porosos, Rio de Janeiro, 1: 229-237, 1983.
- 03 - ALSINA, O.L.S. & QUIRINO, M. H. "Estudo dos períodos de Secagem de sabugo de milho por convecção natural". Anais do XI Encontro sobre escoamento em meios porosos, Rio de Janeiro, 1: 216-228, 1983.
- 04 - ALSINA, O.L.S. ; COURA, T. L. B. & MARIZ, T. F. "Comparação de métodos de análise das isotermas de equilíbrio de produtos agrícolas". Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Química, Fortaleza, 1985.
- 05 - ALMEIDA, B. V. ; J. B. P. ; HARA, T. & FORTES, M. "Determinação de porosidade para cacau em amêndoas". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, 2: 606-612, 1979.
- 06 - ALVARENGA, L. C. ; FORTES, M. ; FILHO, J. B. P. & HARA, T. "Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem". Rev. bras.de

armaz., Viçosa, 5(1): 5-18, 1980.

- 07 - BABBIT, J.D. "Observations on the differential equations of diffusion". Canadian Journal of Research, A, 18: 419-474, 1950. apud ALVARENGA, L. C. ; FORTES, M. ; FILHO, J. B. P. & HARA, T. "Transporte...", op. cit., p. 7.
- 08 - BAVER, D. et alii. "Soil Physics". Quarta edição, John Willey and Sons, New York, 1972, apud ALVARENGA, L. C. ; FORTES, M. ; FILHO, J. B. P. & HARA, T. "Transporte ...", op. cit., p. 7.
- 09 - BERGER, D. & PEY, D. C. T. "Drying of higroscopic capillary porous solids. A theoretical approach Int.". Journal Heat Mass Transfer, 16: 293-302, 1973, apud ALVARENGA, L. C. ; FORTES, M. ; FILHO, J. B. P. & HARA, T. "Transporte...", op. cit., p. 7.
- 10 - BROOKER, D. B. ; BAKKER-ARKENA, F. W. & HALL, C. W. "Drying Cereal Grains". AVI Publishing Co., Westport, Connecticut, 1974. p. 185.
- 11 - BRUNAUER, S. ; EMMETT, P. H. & TELLER, E. "Adsorption of gases in multimolecular layers". J. Amer. Chem. Soc., 60: 309-319, 1938.
- 12 - BRUNELLO, G. ; PECK, R. E. & DELLA, N. G. "The drying of barley malt in the spouted bed dryer". The Canadian Journal Chemical Eng., 52: 201-205, 1974, apud COURA, T. L. B. & ALSINA, O. L. S., op. cit., p. 3.
- 13 - BRUNELLO, G. ; GUNTHER, P. A. S. ; BIANCHINI, E.C. & PAIVA, J. L. "Secagem de pasta celulósica em leito

- fixo". Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Campinas, 2: 318-329, 1984.
- 14 - CASSIE, A. B. D. J., apud CRANCK, J. "The Mathematics of Diffusion". Segunda edição, University Press, Oxford, 1975. 405 p.
- 15 - CEAGLSKE, N. H. & HOUGEN, O. A. "Drying granular solids". Ind. Eng. Chem., 29: 805-813, 1937.
- 16 - CHEN, C. S. & JOHNSON, W. H. "Kinetics of moisture movement in higroscopic materials". Transactions of the ASAE, 12(1): 109-113, 1969.
- 17 - CHUNG, D. S. & CONVERSE, H. H. "Effect of moisture content on some physical properties of grains". Transactions of ASAE, 14(4): 612-614 e 620, 1971, apud ALMEIDA, B. V. ; FILHO, J. B. P. ; HARA, T. & FORTES, M. "Determinação ...", op. cit., p. 607.
- 18 - COMINGS, E. W. & SHERWOOD, T. K. "The drying of solids - VII : Moisture movement by capillarity in drying granular materials". Ind. Eng. Chem., 26: p. 1096, 1934.
- 19 - COULSON, J. M. & RICHARDSON, J. F. "Tecnologia Química - Operações Unitárias v. II". Segunda edição, Fundação Caloust Gulbenkian, Lisboa, 1974. p. 657.
- 20 - COURA, T. L. B. & ALSINA, O. L. S. "Secagem de casca de caroço de algodão: estudo cinético em camada fina". Anais do V Encontro Nacional de Secagem, Lavras, 1985.
- 21 - CRANK, J. "The Mathematics of Diffusion". Segunda Edi

- ção, University Press, Oxford, 1975. 405 p.
- 22 - DAY, C. L. "A device for measuring voids in porous material". Agricultural - Engineering. Missouri, Columbia, 45(1): 36-37, 1964.
- 23 - DUNNING, J. W. "Cottonseed Hulls". Cottonseed and Cottonseeds Products. Edited by Alton E. Bailey, Interscience Publishers, Inc., New York, 1948. p. 873.
- 24 - DUNNING, J. W. & LATHROP, E. C., apud DUNNING, J. W., op. cit., p. 875.
- 25 - FARINATTI, L. E. & SUAREZ, C. "A note on the drying behaviour of cottonseed". PROIPA, FCEYN/ Universidade de Buenos Aires, Argentina. Technical Note, 1983.
- 26 - FORTES, M. & OKOS, M. R. "A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media". Proceeding of the First International Symposium on Drying, Science Press, Princeton, 1978, apud ALVARENGA, L. C. ; FORTES, M. ; FILHO, J. B. P. & HARA, T. "Transporte...", op. cit., p. 8.
- 27 - GUNTHER, P. A. S. ; BRUNELLO, G. & TEIXEIRA, M. H. "Secagem de grãos de arroz com casca em monocamada: estudo do modelo cinético". Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Rio de Janeiro, 1: 202-215, 1983.
- 28 - GUSTAFSON, R. J. & HALL, G. E. "Density and porosity changes of shelled corn during drying". Transactions of ASAE, St. Joseph, Mich., 523-525, 1972, apud PRA

- DO, E. P. ; HARA, T. ; FILHO, J. B. P. & THIEBAUT, J. T. L. "Porosidade...", op. cit., p. 478.
- 29 - HAINES, W. B. "Studies in the physical properties of soil IV : A further contribution to the theory capillary phenomena in soil". J. Agric. Sci., 17: 264 - 290, 1927.
- 30 - HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS. 63rd, Edited by Robert C. Weast and Melvin J. Astle, CRC Press, Inc., Flórida, 1982. p. E-106.
- 31 - HENRY, P. S. H. "Diffusion in absorbing media". Proc. Royal Society, A. 171: 215-241, 1939.
- 32 - HIMMELBLAU, D. M. "Engenharia Química: Princípios e Cálculos". Quarta edição, Prentice/Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1984. p. 386.
- 33 - HOUGEN, O. S. et alii. "Limitations of diffusion equations in drying". Trans. Am. Chem. Eng., 36(2): 183-206, 1940.
- 34 - HOUGEN, O. A. ; WATSON, K. M. & RAGATZ, R. A. Princípios de Processos Químicos - V. I". Editora Lopes da Silva, Porto, Portugal, 1972. p. 415.
- 35 - HUSAIN et alii, apud BROOKER, D. B. ; BAKKER-ARKEMA, F. W. & HALL, C. W., op. cit., 188.
- 36 - JORDÃO, B. A. "Generalidade sobre Armazenamento de Grãos como Matéria-prima". Curso de Tecnologia Moderna da Ind. de Óleos Vegetais, São Paulo, 1971. p. 19.
- 37 - KITIC, D. "Estudio sobre Transferencia de calor y materia en el secador de lecho fluidizado". Universidade

- de Buenos Aires, 1982. 162 p. (Tese de Doutorado).
- 38 - LUIKOV, A. V. "Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies". Pergamon Press, Londres, 1966. 523 p.
- 39 - LUIZ, A. M. & SAMPAIO, F. R. "Influência da capilaridade na secagem de meios porosos". Anais do III Encontro Nacional de Secagem, Viçosa, 1981.
- 40 - LUIZ, A. M. & SAMPAIO, F. R. "Escoamento sobre Meios Porosos, Salvador, 2: 135-144, 1981.
- 41 - MARANHÃO, L. E. C. "Secagem de Bagaço". I Seminário sobre a Racionalização da Produção e Consumo de Energia na Agro-Indústria Canavieira do Nordeste, Macaíó, 1979.
- 42 - MARTINS, J. H. "Simulação de Secagem de Milho em Cama da Estacionária". Universidade Federal de Viçosa, 1982. 97 p. (Tese de Mestrado).
- 43 - MARTINS, J. H. & MATA, M. E. R. M. C. "Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos". Núcleo de Tecnologia em Armazenamento, UFPb, Campina Grande, 1984. 104 p.
- 44 - MEDEIROS, J. L. & MASSARANI, G. "Secagem de Bagaço de Cana-III". Anais do X Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos, 1: 222-241, 1982.
- 45 - MEDEIROS, J. L. & MASSARANI, G. "Secagem de Bagaço de Cana-IV". Anais do IV Encontro Nacional de Secagem, Viçosa, 1983.
- 46 - MILLER, E. E. & MILLER, R. D. "Theory of capillary: I, practical implications". Proc. Soil Science Society

American, 19: 267-271. 1975.

- 47 - PEARSE, J. F. ; OLIVER, T. R. & NEWIT, D. M. "The mechanism of the drying of solids- part I: The forces giving rise to movement of water in granular materials during drying". Trans. Inst. Chem. Eng. Engrs., 27: 1-8, 1949.
- 48 - PEREIRA, N. C. Comunicação pessoal. 1985.
- 49 - PERRY & CHILTON. "Manual de Engenharia Química". Quinta edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. p. 3-50.
- 50 - PHILIP, J. R. & DE VRIES, D. A. "Moisture movement in porous materials under temperature gradient". Trans. Am. Geophys, Union, 38(2): 222-232, 1957.
- 51 - PRADO, E. P. ; HARA, T. : FILHO, J. B. P. & THIEBAUT, J.T.L. "Porosidade de semente de cacau durante o processo de secagem em camadas finas". Anais do IX Congresso Brasileiro de Eng. Agrícola, 2: 475-481, 1979.
- 52 - RAJAGOPAL, K. "Processos alternativos para secagem de bagaço". Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Rio de Janeiro, 1: 166-176, 1983.
- 53 - SAKOSHCHIKOV, A. P. ; IVANOVA, V. T. ; KORZHENIOVSKI , G. A. & KUNRENOVA, A. M. "Trest Khlopkochistitel prom. (Cotton Ind. Trust.), 1: 102-115, 1953, apud DUNNING, J. W. "Cottonseed Hulls", op. cit., 873.
- 54 - SHARMA, A. B. ; KUNZE, O. R. & TOLLEY, H. D. "Rough rice drying as a two compartment model". Trans.ASAE, 25: 221-224, 1982.

- 55 - SHERWOOD, T. K. "The drying of solids - I". Ind. Eng. Chem., 21: p. 12, 1929.
- 56 - SHERWOOD, T. K. "Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids". Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 27: 310-333, 1931.
- 57 - SHERWOOD, T. K. "The drying of solids - II". Ind. Eng. Chem., 21: p. 976, 1929.
- 58 - SHERWOOD, T. K. "The drying of solids - III". Ind. Eng. Chem., 22: p. 132, 1930.
- 59 - SHERWOOD, T. K. "The drying of solids - IV". Ind. Eng. Chem., 24: p. 307, 1932.
- 60 - TSAO, G. T. & WEELLOCK, T. D. "Drying theory and calculations". Chemical Engineering, 201-219, 1967.
- 61 - THOMPSON, T. L. ; PEART, R. M. & FOSTER, F. H. "Mathematical simulation of corn drying - The new model". Transactions of the ASAE, 11(4): 582-256, 1968.
- 62 - VALENÇA, G. C. & MASSARANI, G. "Secagem de Bagaço de cana". Anais do III Encontro Nacional de Secagem, Viçosa, p. 355, 1981.
- 63 - VALENÇA, G. C. & MASSARANI, G. "Secagem de Bagaço de cana - II". Anais do I Congresso Latino Americano de Transferência de Calor e Massa, La Plata, 2: 798-811, 1982.
- 64 - VAN ARSDEL, W. B. "Aproximate diffusion calculations for falling-rate phase of drying". Transactions of the AIChE, 47: 13-15, 1947.

- 65 - VILELA, E. R. "Secagem de Café em terreiros e silos com energia solar. Universidade Estadual de Campinas, 1977. 106 p. (Tese de Mestrado).
- 66 - VILLA, L. G. ; BRAUNBECK, O. & ROA, G. "Secagem de raspas de mandioca com ar forçado e auxílio de coletores solares". Anais do IX Congresso Brasileiro de Eng. Agrícola, 2: 527-535, 1979.
- 67 - WHITAKER, S. "Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in porous media: A theory drying". IN Advances in Heat Transfer. Edited by J.P Hartnett and T.F. Irving Jr.. Academic Press, 13: 119-203, 1977.
- 68 - WRATTEN, R.A. ; POOLE, W.D. ; CHESNESS, J.L. ; BAL, S. , & RAMARAO, V. "Physical and thermal properties of rough rice". Transactions of the ASAE, St. Joseph , Mich, 12 (6): 801-803, 1969.

A P Ê N D I C E - A

(Tabelas de dados obtidos na câmara de secagem)

TABELA A 1 ENSAIO Nº 01

TEMPERATURA AMBIENTE = 25,5 °C (Inicial) 26,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 120,78 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 1,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 19,86 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 0,74 | 0,13 | 0,64 | 0,12 | 19,86 |
| 2,5 | 0,76 | 0,13 | 0,62 | 0,13 | 17,39 |
| 5,0 | 0,77 | 0,14 | 0,67 | 0,13 | 16,71 |
| 7,5 | 0,79 | 0,14 | 0,68 | 0,13 | 16,43 |
| 10,0 | 0,79 | 0,14 | 0,70 | 0,13 | 16,37 |
| 15,0 | 0,80 | 0,13 | 0,71 | 0,11 | 16,29 |
| 20,0 | 0,79 | 0,11 | 0,71 | 0,10 | 16,24 |
| 25,0 | 0,80 | 0,12 | 0,71 | 0,11 | 16,20 |
| 30,0 | 0,79 | 0,10 | 0,71 | 0,10 | 16,18 |
| 40,0 | 0,78 | 0,09 | 0,70 | 0,08 | 16,14 |
| 50,0 | 0,75 | 0,07 | 0,67 | 0,07 | 16,12 |
| 60,0 | 0,75 | 0,06 | 0,67 | 0,06 | 16,10 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 2 ENSAIO Nº 02

TEMPERATURA AMBIENTE = 28,0 °C (Inicial) 29,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 120,73 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 1,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 20,08 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,65 | 0,32 | 2,60 | 0,27 | 20,08 |
| 2,5 | 2,66 | 0,33 | 2,60 | 0,28 | 16,45 |
| 5,0 | 2,69 | 9,34 | 2,65 | 0,29 | 15,94 |
| 7,5 | 2,71 | 0,34 | 2,65 | 0,29 | 15,86 |
| 10,0 | 2,68 | 0,33 | 2,60 | 0,31 | 15,80 |
| 15,0 | 2,68 | 0,33 | 2,60 | 0,31 | 15,70 |
| 20,0 | 2,68 | 0,34 | 2,60 | 0,32 | 15,65 |
| 25,0 | 2,67 | 0,35 | 2,57 | 0,31 | 15,62 |
| 30,0 | 2,67 | 0,36 | 2,57 | 0,29 | 15,59 |
| 40,0 | 2,67 | 0,40 | 2,55 | 0,29 | 15,56 |
| 50,0 | 2,67 | 0,44 | 2,55 | 0,31 | 15,53 |
| 60,0 | 2,67 | 0,44 | 2,55 | 0,29 | 15,52 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 3 ENSAIO Nº 03

TEMPERATURA AMBIENTE = 25,5 °C (Inicial) 26,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,74 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 60,48 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 0,77 | 0,13 | 0,69 | 0,11 | 60,48 |
| 2,5 | 0,78 | 0,12 | 0,51 | 0,09 | 53,22 |
| 5,0 | 0,79 | 0,12 | 0,56 | 0,10 | 54,47 |
| 7,5 | 0,79 | 0,11 | 0,60 | 0,09 | 50,53 |
| 10,0 | 0,80 | 0,11 | 0,68 | 0,09 | 49,92 |
| 15,0 | 0,82 | 0,11 | 0,70 | 0,11 | 49,71 |
| 20,0 | 0,80 | 0,10 | 0,66 | 0,08 | 49,52 |
| 25,0 | 0,78 | 0,09 | 0,70 | 0,09 | 49,35 |
| 30,0 | 0,77 | 0,08 | 0,67 | 0,07 | 49,24 |
| 40,0 | 0,76 | 0,06 | 0,65 | 0,06 | 49,09 |
| 50,0 | 0,75 | 0,05 | 0,69 | 0,05 | 49,01 |
| 60,0 | 0,74 | 0,04 | 0,66 | 0,04 | 48,97 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 4 ENSAIO Nº 04

TEMPERATURA AMBIENTE = 26,0 °C (Inicial) 26,5 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,75 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 62,69 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 1,22 | 0,15 | 1,20 | 0,14 | 62,69 |
| 2,5 | 1,23 | 0,16 | 1,02 | 0,13 | 58,02 |
| 5,0 | 1,22 | 0,15 | 1,10 | 0,13 | 56,47 |
| 7,5 | 1,21 | 0,15 | 1,12 | 0,15 | 55,93 |
| 10,0 | 1,22 | 0,15 | 1,14 | 0,14 | 55,64 |
| 15,0 | 1,22 | 0,15 | 1,16 | 0,14 | 55,48 |
| 20,0 | 1,22 | 0,15 | 1,14 | 0,15 | 55,36 |
| 25,0 | 1,21 | 0,16 | 1,16 | 0,13 | 55,27 |
| 30,0 | 1,22 | 0,14 | 1,19 | 0,13 | 55,18 |
| 40,0 | 1,21 | 0,14 | 1,16 | 0,13 | 55,13 |
| 50,0 | 1,20 | 0,12 | 1,12 | 0,12 | 55,05 |
| 60,0 | 1,20 | 0,13 | 1,16 | 0,13 | 55,04 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 5 ENSAIO Nº 05

TEMPERATURA AMBIENTE = 26,0 °C (Inicial) 28,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,77 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 64,81 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 1,69 | 0,19 | 1,53 | 0,17 | 64,81 |
| 2,5 | 1,69 | 0,19 | 1,25 | 0,16 | 57,10 |
| 5,0 | 1,68 | 0,19 | 1,35 | 0,16 | 55,54 |
| 7,5 | 1,68 | 0,19 | 1,48 | 0,17 | - |
| 10,0 | 1,68 | 0,19 | 1,48 | 0,17 | 54,60 |
| 15,0 | 1,67 | 0,17 | 1,50 | 0,16 | 54,36 |
| 20,0 | 1,66 | 0,17 | 1,48 | 0,15 | 54,15 |
| 25,0 | 1,65 | 0,16 | 1,47 | 0,15 | 54,15 |
| 30,0 | 1,65 | 0,15 | 1,49 | 0,16 | 54,06 |
| 40,0 | 1,65 | 0,14 | 1,45 | 0,13 | 53,91 |
| 50,0 | 1,65 | 0,14 | 1,45 | 0,14 | 53,86 |
| 60,0 | 1,65 | 0,14 | 1,45 | 0,12 | 53,81 |

Obs: Todas as temperaturas estão em millivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 6 ENSAIO Nº 06

TEMPERATURA AMBIENTE = 29,0 °C (Inicial) 29,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,74 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 60,36 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,67 | 0,35 | 2,57 | 0,28 | 60,36 |
| 2,5 | 2,66 | 0,35 | 2,10 | 0,24 | 49,98 |
| 5,0 | 2,68 | 0,35 | 2,45 | 0,27 | 48,45 |
| 7,5 | 2,67 | 0,35 | 2,50 | 0,27 | 47,76 |
| 10,0 | 2,66 | 0,35 | 2,50 | 0,28 | 47,59 |
| 15,0 | 2,66 | 0,35 | 2,40 | 0,28 | 47,29 |
| 20,0 | 2,65 | 0,34 | 2,48 | 0,29 | 47,14 |
| 25,0 | 2,65 | 0,33 | 2,42 | 0,28 | 47,07 |
| 30,0 | 2,65 | 0,33 | 2,42 | 0,27 | 46,91 |
| 40,0 | 2,64 | 0,32 | 2,45 | 0,27 | 46,79 |
| 50,0 | 2,63 | 0,35 | 2,42 | 0,26 | 46,72 |
| 60,0 | 2,64 | 0,39 | 2,38 | 0,26 | 46,67 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A Z ENSAIO Nº 07

TEMPERATURA AMBIENTE = 26,0 °C (Inicial) 27,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 292,56 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 5,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 101,20 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 0,74 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | 101,20 |
| 2,5 | 0,75 | 0,00 | 0,50 | - 0,03 | 93,05 |
| 5,0 | 0,75 | - 0,01 | 0,51 | - 0,04 | 91,48 |
| 7,5 | 0,75 | 0,00 | 0,61 | - 0,03 | 90,63 |
| 10,0 | 0,74 | - 0,01 | 0,62 | - 0,03 | 90,24 |
| 15,0 | 0,76 | 0,00 | 0,63 | - 0,02 | 90,06 |
| 20,0 | 0,77 | 0,00 | 0,66 | - 0,02 | 89,90 |
| 25,0 | 0,77 | - 0,00 | 0,67 | - 0,02 | 89,73 |
| 30,0 | 0,77 | - 0,01 | 0,69 | - 0,03 | 89,58 |
| 40,0 | 0,76 | - 0,03 | 0,68 | - 0,06 | 89,44 |
| 50,0 | 0,76 | - 0,04 | 0,67 | - 0,07 | 89,35 |
| 60,0 | 0,74 | - 0,07 | 0,67 | - 0,12 | 89,31 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 8 ENSAIO Nº 08

TEMPERATURA AMBIENTE = 27,0 °C (Inicial) 27,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 292,56 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 5,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 105,36 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,78 | 0,43 | 2,55 | 0,74 | 105,36 |
| 2,5 | 2,76 | 0,44 | 2,20 | 0,63 | 93,79 |
| 5,0 | 2,72 | 0,43 | 2,30 | 0,20 | 92,73 |
| 7,5 | 2,77 | 0,44 | 2,30 | 0,25 | 91,84 |
| 10,0 | 2,80 | 0,45 | 2,40 | 0,28 | 91,67 |
| 15,0 | 2,81 | 0,45 | 2,43 | 0,36 | 91,33 |
| 20,0 | 2,75 | 0,43 | 2,25 | 0,27 | 91,18 |
| 25,0 | 2,83 | 0,44 | 2,37 | 0,35 | 91,01 |
| 30,0 | 2,83 | 0,42 | 2,45 | 0,34 | 90,91 |
| 40,0 | 2,80 | 0,42 | 2,37 | 0,31 | 90,73 |
| 50,0 | 2,80 | 0,42 | 2,37 | 0,32 | 90,67 |
| 60,0 | 2,80 | 0,42 | 2,37 | 0,32 | 90,62 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 9 ENSAIO Nº 09

TEMPERATURA AMBIENTE = 26,5 °C (Inicial) 27,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 292,90 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 10,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 204,20 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B. U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 0,73 | - 0,01 | 0,63 | - 0,03 | 204,20 |
| 2,5 | 0,73 | - 0,01 | 0,31 | - 0,06 | 191,80 |
| 5,0 | 0,74 | - 0,01 | 0,36 | - 0,07 | 187,80 |
| 7,5 | - | - | - | - | - |
| 10,0 | 0,74 | - 0,01 | 0,42 | - 0,05 | 183,50 |
| 15,0 | 0,75 | - 0,01 | 0,48 | - 0,07 | 182,50 |
| 20,0 | 0,76 | - 0,01 | 0,45 | - 0,08 | 182,20 |
| 25,0 | 0,75 | - 0,02 | 0,55 | - 0,08 | 181,90 |
| 30,0 | 0,76 | - 0,03 | 0,55 | - 0,09 | 181,80 |
| 40,0 | 0,76 | - 0,02 | 0,62 | - 0,05 | 181,40 |
| 50,0 | 0,76 | - 0,03 | 0,64 | - 0,06 | 181,30 |
| 60,0 | 0,76 | - 0,04 | 0,59 | - 0,08 | 181,20 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 10 ENSAIO Nº 10

TEMPERATURA AMBIENTE = 27,0 °C (Inicial) 27,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 288,40 g

VAZÃO DO AR = 240 m³/h; ALTURA DO LEITO = 70,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 209,40 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,78 | 0,43 | 2,65 | 0,74 | 209,40 |
| 2,5 | 2,78 | 0,44 | 2,20 | 0,63 | 189,20 |
| 5,0 | 2,76 | 0,44 | 2,35 | 0,20 | 186,00 |
| 7,5 | 2,76 | 0,44 | 2,30 | 0,35 | 184,30 |
| 10,0 | 2,72 | 0,43 | 2,35 | 0,35 | 183,00 |
| 15,0 | 2,80 | 0,42 | 2,43 | 0,36 | 182,30 |
| 20,0 | 2,83 | 0,42 | 2,35 | 0,27 | 182,10 |
| 25,0 | 2,81 | 0,44 | 2,37 | 0,31 | 181,80 |
| 30,0 | 2,75 | 0,43 | 2,45 | 0,34 | 181,60 |
| 40,0 | 2,80 | 0,42 | 2,37 | 0,32 | 181,30 |
| 50,0 | 2,80 | 0,42 | 2,37 | 0,32 | 181,10 |
| 60,0 | 2,83 | 0,42 | 2,37 | 0,32 | 181,00 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 11 ENSAIO Nº 11

TEMPERATURA AMBIENTE = 25,5 °C (Inicial) 26,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,75 g

VAZÃO DO AR = 180 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 60,57 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 1,26 | 0,09 | 1,10 | 0,08 | 60,57 |
| 2,5 | 1,22 | 0,08 | 0,76 | 0,06 | 54,56 |
| 5,0 | 1,21 | 0,07 | 0,96 | 0,05 | 53,01 |
| 7,5 | 1,22 | 0,08 | 1,00 | 0,09 | 52,13 |
| 10,0 | 1,22 | 0,08 | 0,96 | 0,05 | 51,78 |
| 15,0 | 1,23 | 0,08 | 1,02 | 0,09 | 51,56 |
| 20,0 | 1,21 | 0,07 | 1,00 | 0,06 | 51,44 |
| 25,0 | 1,24 | 0,07 | 1,04 | 0,06 | 51,34 |
| 30,0 | 1,21 | 0,07 | 1,04 | 0,07 | 51,22 |
| 40,0 | 1,20 | 0,05 | 1,03 | 0,08 | 51,14 |
| 50,0 | 1,21 | 0,06 | 1,01 | 0,05 | 51,06 |
| 60,0 | 1,22 | 0,07 | 1,03 | 0,08 | 51,02 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 12 ENSAIO Nº12

TEMPERATURA AMBIENTE = 27,5 °C (Inicial) 28,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,75 g

VAZÃO DO AR = 180 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 60,23 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,72 | 0,32 | 2,65 | 0,30 | 60,23 |
| 2,5 | 2,73 | 0,34 | 2,15 | 0,25 | 52,12 |
| 5,0 | 2,74 | 0,34 | 2,40 | 0,27 | 50,35 |
| 7,5 | 2,74 | 0,33 | 2,50 | 0,28 | 49,50 |
| 10,0 | 2,74 | 0,33 | 2,47 | 0,29 | 49,33 |
| 15,0 | 2,74 | 0,33 | 2,52 | 0,32 | 49,18 |
| 20,0 | 2,71 | 0,34 | 2,40 | 0,29 | 49,00 |
| 25,0 | 2,71 | 0,34 | 2,50 | 0,31 | 48,94 |
| 30,0 | 2,72 | 0,34 | 2,42 | 0,29 | 48,80 |
| 40,0 | 2,69 | 0,35 | 2,50 | 0,34 | 48,72 |
| 50,0 | 2,69 | 0,35 | 2,35 | 0,32 | 48,66 |
| 60,0 | 2,69 | 0,36 | 2,45 | 0,33 | 48,61 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A ¹³ ENSAIO Nº 13

TEMPERATURA AMBIENTE = 25,0 °C (Inicial) 25,5 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,75 g

VAZÃO DO AR = 120 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 60,13 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 1,28 | 0,17 | 1,14 | 0,16 | 60,13 |
| 2,5 | 1,30 | 0,17 | 0,74 | 0,14 | 55,59 |
| 5,0 | 1,31 | 0,17 | 0,94 | 0,14 | 53,46 |
| 7,5 | 1,29 | 0,16 | 1,02 | 0,14 | 52,20 |
| 10,0 | 1,28 | 0,16 | 1,04 | 0,14 | 51,37 |
| 15,0 | 1,25 | 0,15 | 1,04 | 0,14 | 51,17 |
| 20,0 | 1,28 | 0,14 | 1,08 | 0,13 | 50,99 |
| 25,0 | 1,29 | 0,13 | 1,08 | 0,12 | 50,90 |
| 30,0 | 1,29 | 0,13 | 1,10 | 0,12 | 50,84 |
| 40,0 | 1,28 | 0,12 | 8,10 | 0,12 | 50,70 |
| 50,0 | 1,22 | 0,10 | 1,06 | 0,10 | 50,63 |
| 60,0 | 1,25 | 0,12 | 1,10 | 0,11 | 50,61 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

TABELA A 14 ENSAIO Nº14

TEMPERATURA AMBIENTE = 26,0 °C (Inicial) 27,0 °C (Final); PESO DO SUPORTE = 144,75 g

VAZÃO DO AR = 120 m³/h; ALTURA DO LEITO = 3,0 cm; PESO INICIAL DA AMOSTRA (Pi) = 66,28 g

| TEMPO (min) | TEMPERATURA DE B.S. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.U. DE ENTRADA | TEMPERATURA DE B.S. DE SAÍDA | TEMPERATURA DE B.U. DE SAÍDA | PESO DA AMOSTRA (gramas) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,0 | 2,85 | 0,52 | 2,51 | 0,48 | 66,28 |
| 2,5 | 2,85 | 0,53 | 1,90 | 0,43 | 60,54 |
| 5,0 | 2,81 | 0,51 | 2,20 | 0,44 | 58,50 |
| 7,5 | 2,80 | 0,51 | 2,20 | 0,44 | 57,48 |
| 10,0 | 2,80 | 0,50 | 2,25 | 0,43 | 57,32 |
| 15,0 | 2,81 | 0,50 | 2,27 | 0,45 | 57,16 |
| 20,0 | 2,78 | 0,49 | 2,27 | 0,43 | 57,02 |
| 25,0 | 2,78 | 0,48 | 2,27 | 0,44 | 56,93 |
| 30,0 | 2,80 | 0,47 | 2,30 | 0,44 | 56,85 |
| 40,0 | 2,77 | 0,47 | 2,28 | 0,45 | 56,76 |
| 50,0 | 2,77 | 0,45 | 2,25 | 0,42 | 56,74 |
| 60,0 | 2,77 | 0,43 | 2,22 | 0,40 | 56,69 |

Obs: Todas as temperaturas estão em milivolts de termopares Fe-Constantan (Referência T ambiente).

A P Ê N D I C E - B

(Programa de Computação com subroutine DPENLN disponível
no NPD da UFPb-CCT-CAMPUS-II)

```

$JOB      THOMPSON FERNANDES MARIZ, TIME=10,PAGES=10
C         PARÂMETROS PARA CURVA DE SECAGEM DA CASCA DE CAROÇO DE
C         ALGODÃO, OBTIDA NUMA FÁBRICA DE CAMPINA GRANDE -PARAIBA
1         CALL DPENLN
2         STOP
3         END
C
4         SUBROUTINESUBZ(Y,DATA,THETA,PRNT, NPRNT,N)
5         DIMENSIONY (500),DATA(500,10),THETA(50), PRNT(5)
6         NPRNT=2
7         READ(5,2)NC,T,VZ,H
8         WRITE(6,3)NC,T,VZ,H
9         2   FORMAT(I3,3F10.0)
10        3   FORMAT('1',4X,'CORRIDA',I3,'TEMPERATURA=',F10.0,'
*         C   VAZÃO=',F10.0,'M3/H ALTURA=',F10.0,'CM')
11        RETURN
12        END
13        SUBROUTINEFCODE(Y1,DATA,THETA,PRNT,Y,ITH)
14        DIMENSIONY1(500),DATA(500,10),THETA(50),PRNT(5)
15        C   Y É A RELAÇÃO DE UMIDADE DECIMAL E DATA É O TEMPO
16        XI=EXP(-THETA(2)*DATA(ITH,1))
17        X2=EXP(-THETA(4)*DATA(ITH,1))
18        Y=THETA(1)*X1+THETA(3)*X2
19        PRNT(1)=DATA(ITH,1)
20        PRNT(2) = (Y1(ITH)-Y)-Y1(ITH)*100
21        RETURN
22        END
23        SUBROUTINEPCODE(DERIV,DATA,THETA,PRNT,Y,ITH)

```

```
24      DIMENSION DERIV(50) ,DATA(500,10) ,THETA(50) ,PRNT(5)
25      X1=EXP(-THETA(2)*DATA(ITH,1))
26      X2=EXP(-THETA(4)*DATA(ITH,1))
27      Y=THETA(1)*X1+THETA(3)*X2
28      DERIV(1)=X1
29      DERIV(2)=-THETA(1)*X1*DATA(ITH,1)
30      DERIV(3)=X2
31      DERIV(4)=-THETA(3)*X2*DATA(ITH,1)
32      RETURN
33      END
```

```
$ENTRY
```

A P Ê N D I C E - C

(Tabelas obtidas no computador utilizando a equação 5.2 proposta)

TABELA C 1 - ENSAIO Nº 01

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,3205 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,1562 | 0,3490 | 0,3494 |
| 5,0 | 0,1104 | 0,1680 | 0,1652 |
| 7,5 | 0,0924 | 0,0960 | 0,1022 |
| 10,0 | 0,0884 | 0,0810 | 0,0777 |
| 15,0 | 0,0831 | 0,0600 | 0,0579 |
| 20,0 | 0,0798 | 0,0470 | 0,0468 |
| 25,0 | 0,0771 | 0,0360 | 0,0382 |
| 30,0 | 0,0758 | 0,0310 | 0,0312 |
| 40,0 | 0,0731 | 0,0200 | 0,0208 |
| 50,0 | 0,0718 | 0,0150 | 0,0139 |
| 60,0 | 0,0705 | 0,0100 | 0,0093 |

TABELA C 2 - ENSAIO Nº 02

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,3093 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0726 | 0,2120 | 0,2119 |
| 5,0 | 0,0394 | 0,1010 | 0,1022 |
| 7,5 | 0,0342 | 0,0840 | 0,0794 |
| 10,0 | 0,0302 | 0,0700 | 0,0688 |
| 15,0 | 0,0237 | 0,0490 | 0,0535 |
| 20,0 | 0,0205 | 0,0380 | 0,0418 |
| 25,0 | 0,0185 | 0,0320 | 0,0326 |
| 30,0 | 0,0166 | 0,0250 | 0,0255 |
| 40,0 | 0,0146 | 0,0190 | 0,0155 |
| 50,0 | 0,0126 | 0,0120 | 0,0095 |
| 60,0 | 0,0120 | 0,0100 | 0,0058 |

| TEMPO (min) | U(t) | U+(Obs) | U+(Pred) |
|-------------|--------|---------|----------|
| 60,0 | 0,0603 | 0,0150 | 0,0115 |
| 50,0 | 0,0605 | 0,0170 | 0,0170 |
| 40,0 | 0,0620 | 0,0270 | 0,0253 |
| 30,0 | 0,0630 | 0,0330 | 0,0376 |
| 25,0 | 0,0647 | 0,0450 | 0,0458 |
| 20,0 | 0,0664 | 0,0560 | 0,0560 |
| 15,0 | 0,0688 | 0,0720 | 0,0695 |
| 10,0 | 0,0718 | 0,920 | 0,0950 |
| 7,5 | 0,0774 | 0,1300 | 0,1262 |
| 5,0 | 0,0878 | 0,1990 | 0,2008 |
| 2,5 | 0,1177 | 0,3990 | 0,3987 |
| 0,0 | 0,2076 | 1,0000 | 1,0000 |

TABELA C 4 - ENSAIO Nº 04

| TEMPO (min) | U(t) | U+(Obs) | U+(Pred) |
|-------------|--------|---------|----------|
| 60,0 | 0,0692 | 0,0160 | 0,0150 |
| 50,0 | 0,0701 | 0,0200 | 0,0209 |
| 40,0 | 0,0718 | 0,0270 | 0,0293 |
| 30,0 | 0,0751 | 0,0400 | 0,0411 |
| 25,0 | 0,0775 | 0,0490 | 0,0489 |
| 20,0 | 0,0812 | 0,0630 | 0,0589 |
| 15,0 | 0,0854 | 0,0800 | 0,0744 |
| 10,0 | 0,0900 | 0,0980 | 0,1093 |
| 7,5 | 0,1033 | 0,1500 | 0,1487 |
| 5,0 | 0,1238 | 0,2300 | 0,2254 |
| 2,5 | 0,1620 | 0,3790 | 0,3804 |
| 0,0 | 0,3206 | 1,0000 | 1,0000 |

TABELA C 3 - ENSAIO Nº 03

TABELA C 5 - ENSAIO Nº 05

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,2516 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,1027 | 0,3090 | 0,3089 |
| 5,0 | 0,0726 | 0,1700 | 0,1703 |
| 7,5 | 0,0586 | 0,1050 | 0,1277 |
| 10,0 | 0,0545 | 0,0860 | 0,0855 |
| 15,0 | 0,0498 | 0,0640 | 0,0632 |
| 20,0 | 0,0467 | 0,0500 | 0,0520 |
| 25,0 | 0,0458 | 0,0450 | 0,0437 |
| 30,0 | 0,0440 | 0,0370 | 0,0368 |
| 40,0 | 0,0411 | 0,0240 | 0,0262 |
| 50,0 | 0,0402 | 0,0190 | 0,0186 |
| 60,0 | 0,0392 | 0,0150 | 0,0133 |

TABELA C 6 - ENSAIO Nº 06

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,3093 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0842 | 0,2500 | 0,2502 |
| 5,0 | 0,0510 | 0,1400 | 0,1383 |
| 7,5 | 0,0360 | 0,0900 | 0,0942 |
| 10,0 | 0,0323 | 0,0780 | 0,0744 |
| 15,0 | 0,0258 | 0,0560 | 0,0564 |
| 20,0 | 0,0225 | 0,0450 | 0,0459 |
| 25,0 | 0,0210 | 0,0400 | 0,0377 |
| 30,0 | 0,0176 | 0,0290 | 0,0311 |
| 40,0 | 0,0150 | 0,0200 | 0,0211 |
| 50,0 | 0,0134 | 0,0150 | 0,0143 |
| 60,0 | 0,0124 | 0,0110 | 0,0097 |

TABELA C 7 - ENSAIO Nº 07

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,1899 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0941 | 0,3300 | 0,3312 |
| 5,0 | 0,0756 | 0,2000 | 0,1948 |
| 7,5 | 0,0656 | 0,1300 | 0,1335 |
| 10,0 | 0,0610 | 0,0980 | 0,1040 |
| 15,0 | 0,0589 | 0,0830 | 0,0782 |
| 20,0 | 0,0570 | 0,0700 | 0,0651 |
| 25,0 | 0,0550 | 0,0560 | 0,0555 |
| 30,0 | 0,0533 | 0,0440 | 0,0476 |
| 40,0 | 0,0516 | 0,0320 | 0,0350 |
| 50,0 | 0,0505 | 0,0250 | 0,0258 |
| 60,0 | 0,0501 | 0,0220 | 0,0190 |

TABELA C 8 - ENSAIO Nº 08

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,1768 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0476 | 0,2300 | 0,2316 |
| 5,0 | 0,0357 | 0,1590 | 0,1517 |
| 7,5 | 0,0258 | 0,1000 | 0,1099 |
| 10,0 | 0,0239 | 0,0890 | 0,0868 |
| 15,0 | 0,0201 | 0,0660 | 0,0644 |
| 20,0 | 0,0184 | 0,0560 | 0,0532 |
| 25,0 | 0,0165 | 0,0450 | 0,0454 |
| 30,0 | 0,0154 | 0,0380 | 0,0391 |
| 40,0 | 0,0134 | 0,0260 | 0,0293 |
| 50,0 | 0,1227 | 0,0220 | 0,0219 |
| 60,0 | 0,0122 | 0,0190 | 0,0164 |

TABELA C 9 - ENSAIO Nº 09

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,1962 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,1235 | 0,4770 | 0,4807 |
| 5,0 | 0,1001 | 0,3100 | 0,2995 |
| 7,5 | - | - | - |
| 10,0 | 0,0749 | 0,1280 | 0,1405 |
| 15,0 | 0,0691 | 0,0870 | 0,0879 |
| 20,0 | 0,0673 | 0,0740 | 0,0682 |
| 25,0 | 0,0655 | 0,0610 | 0,0589 |
| 30,0 | 0,0650 | 0,0570 | 0,0530 |
| 40,0 | 0,0626 | 0,0400 | 0,0443 |
| 50,0 | 0,0620 | 0,0360 | 0,0375 |
| 60,0 | 0,0614 | 0,0320 | 0,0317 |

TABELA C 10 - ENSAIO Nº 10

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,1726 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0595 | 0,3100 | 0,3109 |
| 5,0 | 0,0415 | 0,1990 | 0,1973 |
| 7,5 | 0,0320 | 0,1400 | 0,1364 |
| 10,0 | 0,0247 | 0,0960 | 0,1031 |
| 15,0 | 0,0208 | 0,0720 | 0,0730 |
| 20,0 | 0,0197 | 0,0650 | 0,0607 |
| 25,0 | 0,0180 | 0,0550 | 0,0535 |
| 30,0 | 0,0169 | 0,0480 | 0,0482 |
| 40,0 | 0,0152 | 0,0380 | 0,0396 |
| 50,0 | 0,0141 | 0,0310 | 0,0326 |
| 60,0 | 0,0135 | 0,0280 | 0,0268 |

TABELA C 11 - ENSAIO Nº 11

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,2571 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,1323 | 0,3800 | 0,3810 |
| 5,0 | 0,1002 | 0,2200 | 0,2164 |
| 7,5 | - | - | - |
| 10,0 | 0,0747 | 0,0930 | 0,1001 |
| 15,0 | 0,0701 | 0,0701 | 0,0679 |
| 20,0 | 0,0677 | 0,0582 | 0,0542 |
| 25,0 | 0,0656 | 0,0477 | 0,0453 |
| 30,0 | 0,0631 | 0,0353 | 0,0383 |
| 40,0 | 0,0614 | 0,0268 | 0,0276 |
| 50,0 | 0,0598 | 0,0190 | 0,0199 |
| 60,0 | 0,0589 | 0,0144 | 0,0143 |

TABELA C 12 - ENSAIO Nº 12

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,2537 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0849 | 0,3100 | 0,3101 |
| 5,0 | 0,0481 | 0,1600 | 0,1542 |
| 7,5 | 0,0304 | 0,0870 | 0,0962 |
| 10,0 | 0,0268 | 0,0730 | 0,0726 |
| 15,0 | 0,0237 | 0,0600 | 0,0543 |
| 20,0 | 0,200 | 0,0450 | 0,0449 |
| 25,0 | 0,0187 | 0,0400 | 0,0377 |
| 30,0 | 0,0158 | 0,0280 | 0,0317 |
| 40,0 | 0,0141 | 0,0210 | 0,0224 |
| 50,0 | 0,0129 | 0,0160 | 0,0159 |
| 60,0 | 0,0119 | 0,0120 | 0,0112 |

TABELA C 13 - ENSAIO Nº 13

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,2582 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,1632 | 0,5299 | 0,5339 |
| 5,0 | 0,1186 | 0,3094 | 0,2973 |
| 7,5 | 0,0923 | 0,1794 | 0,1775 |
| 10,0 | 0,0749 | 0,0934 | 0,1160 |
| 15,0 | 0,0707 | 0,0727 | 0,0659 |
| 20,0 | 0,0669 | 0,0539 | 0,0489 |
| 25,0 | 0,0651 | 0,0450 | 0,0407 |
| 30,0 | 0,0638 | 0,0385 | 0,0352 |
| 40,0 | 0,0609 | 0,0242 | 0,0270 |
| 50,0 | 0,0594 | 0,0168 | 0,0208 |
| 60,0 | 0,0590 | 0,0148 | 0,0160 |

TABELA C 14 - ENSAIO Nº 14

| TEMPO (min) | U(t) | U ⁺ (Obs) | U ⁺ (Pred) |
|----------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,1824 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,0800 | 0,4090 | 0,4105 |
| 5,0 | 0,0436 | 0,1990 | 0,1899 |
| 7,5 | 0,0254 | 0,0940 | 0,1085 |
| 10,0 | 0,0225 | 0,0780 | 0,0765 |
| 15,0 | 0,0197 | 0,0620 | 0,0545 |
| 20,0 | 0,0172 | 0,0470 | 0,0451 |
| 25,0 | 0,0156 | 0,0380 | 0,0383 |
| 30,0 | 0,142 | 0,0300 | 0,0326 |
| 40,0 | 0,0126 | 0,0210 | 0,0236 |
| 50,0 | 0,0122 | 0,0180 | 0,0172 |
| 60,0 | 0,0113 | 0,0130 | 0,0124 |

TABELA C 15 - MÉDIA DOS ENSAIOS 04, 11 e 13

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,4363 | 0,4375 |
| 5,0 | 0,2428 | 0,2383 |
| 7,5 | 0,1461 | 0,1462 |
| 10,0 | 0,0928 | 0,1020 |
| 15,0 | 0,0716 | 0,0668 |
| 20,0 | 0,0560 | 0,0528 |
| 25,0 | 0,0459 | 0,0441 |
| 30,0 | 0,0356 | 0,0374 |
| 40,0 | 0,0260 | 0,0270 |
| 50,0 | 0,0176 | 0,0195 |
| 60,0 | 0,0147 | 0,0141 |

TABELA C 16 - MÉDIA DOS ENSAIOS 06, 12 e 14

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,3230 | 0,3239 |
| 5,0 | 0,1663 | 0,1608 |
| 7,5 | 0,0933 | 0,0996 |
| 10,0 | 0,0763 | 0,0745 |
| 15,0 | 0,0593 | 0,0551 |
| 20,0 | 0,0457 | 0,0453 |
| 25,0 | 0,0393 | 0,0379 |
| 30,0 | 0,0290 | 0,0318 |
| 40,0 | 0,0207 | 0,0224 |
| 50,0 | 0,0163 | 0,0158 |
| 60,0 | 0,0120 | 0,0111 |

TABELA C 17 - MÉDIA DOS ENSAIOS 01 e 02

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,2805 | 0,2804 |
| 5,0 | 0,1345 | 0,1351 |
| 7,5 | 0,0900 | 0,0905 |
| 10,0 | 0,0755 | 0,0724 |
| 15,0 | 0,0545 | 0,0556 |
| 20,0 | 0,0425 | 0,0444 |
| 25,0 | 0,0340 | 0,0357 |
| 30,0 | 0,0280 | 0,0286 |
| 40,0 | 0,0195 | 0,0185 |
| 50,0 | 0,0135 | 0,0119 |
| 60,0 | 0,0100 | 0,0077 |

TABELA C 18 - MÉDIA DOS ENSAIOS 03, 04 05 e 06

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,3342 | 0,3345 |
| 5,0 | 0,1847 | 0,1836 |
| 7,5 | 0,1187 | 0,1196 |
| 10,0 | 0,0885 | 0,0903 |
| 15,0 | 0,0680 | 0,0655 |
| 20,0 | 0,0535 | 0,0532 |
| 25,0 | 0,0447 | 0,0441 |
| 30,0 | 0,0347 | 0,0368 |
| 40,0 | 0,0245 | 0,0256 |
| 50,0 | 0,0177 | 0,0178 |
| 60,0 | 0,0142 | 0,0124 |

TABELA C 19 - MÉDIA DOS ENSAIOS 07 e 08

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,2800 | 0,2813 |
| 5,0 | 0,1795 | 0,1733 |
| 7,5 | 0,1150 | 0,1216 |
| 10,0 | 0,0935 | 0,0953 |
| 15,0 | 0,0745 | 0,0713 |
| 20,0 | 0,0630 | 0,0592 |
| 25,0 | 0,0505 | 0,0505 |
| 30,0 | 0,0410 | 0,0434 |
| 40,0 | 0,0290 | 0,0321 |
| 50,0 | 0,0235 | 0,0238 |
| 60,0 | 0,0205 | 0,0176 |

TABELA C 20 - MÉDIA DOS ENSAIOS 09 e 10

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,3935 | 0,3957 |
| 5,0 | 0,2545 | 0,2488 |
| 7,5 | 0,1700 | 0,1676 |
| 10,0 | 0,1120 | 0,1221 |
| 15,0 | 0,0795 | 0,0805 |
| 20,0 | 0,0695 | 0,0644 |
| 25,0 | 0,0580 | 0,0562 |
| 30,0 | 0,0525 | 0,0506 |
| 40,0 | 0,0390 | 0,0420 |
| 50,0 | 0,0335 | 0,0350 |
| 60,0 | 0,0300 | 0,0293 |

TABELA C 21 - MÉDIA DOS ENSAIOS 11 e 12

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,3450 | 0,3462 |
| 5,0 | 0,1900 | 0,1837 |
| 7,5 | 0,1080 | 0,1155 |
| 10,0 | 0,0830 | 0,0849 |
| 15,0 | 0,0650 | 0,0607 |
| 20,0 | 0,0516 | 0,0495 |
| 25,0 | 0,0438 | 0,0416 |
| 30,0 | 0,0316 | 0,0351 |
| 40,0 | 0,0239 | 0,0251 |
| 50,0 | 0,0175 | 0,0179 |
| 60,0 | 0,0132 | 0,0128 |

TABELA C 22 - MÉDIA DOS ENSAIOS 13 e 14

| TEMPO (min) | U^+ (Obs) | U^+ (Pred) |
|----------------|-------------|--------------|
| 0,0 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2,5 | 0,4694 | 0,4710 |
| 5,0 | 0,2542 | 0,2473 |
| 7,5 | 0,1367 | 0,1423 |
| 10,0 | 0,0857 | 0,0925 |
| 15,0 | 0,0673 | 0,0565 |
| 20,0 | 0,0504 | 0,0464 |
| 25,0 | 0,0415 | 0,0421 |
| 30,0 | 0,0342 | 0,0391 |
| 40,0 | 0,0226 | 0,0342 |
| 50,0 | 0,0348 | 0,0300 |
| 60,0 | 0,0313 | 0,0264 |

A P Ê N D I C E - D

(Isotermas de adsorção da Casca de Carozo de Algodão)

Quando uma superfície sólida se encontra em contato com uma fase gasosa ou vapor, ocorre acúmulo de moléculas gasosas na interfase sólido-gás. Este fenômeno é chamado de adsorção, onde o sólido é, geralmente, chamado de adsorvente e o gás, ou vapor, de adsorvato.

A descrição fenomenológica da adsorção na interfase sólido-gás é feita em termos de equações empíricas do tipo $v = f(P, T)$, onde v é a quantidade adsorvida. Para a obtenção das isotermas de adsorção, realiza-se ensaios a temperaturas constantes.

ALSINA et alii (1985) escolheram três modelos de isotermas de equilíbrio higroscópico para ajustar os dados experimentais da casca de caroço de algodão: Modelo de Henderson, modelo de Luikov e modelo BET.

Equação de Henderson:

$$U_e = - a_1 (\ln (1 - H_r))^{b_1} \quad \text{D.01}$$

onde,

U_e = Umidade de equilíbrio, base seca

H_r = Umidade relativa, decimal

a_1 e b_1 = Constantes da equação de Henderson

Equação de Luikov:

$$U_e = C_{m1} \phi ; 0 \leq \phi \leq \phi(t) \quad \text{D.02}$$

$$U_e = C_{m2} (\phi - \phi(t)) + C_{m1} \phi(t) ; \phi > \phi(t) \quad \text{D.03}$$

onde,

ϕ = Potencial de umidade, °M, modelo Luikov

$\phi(t)$ = Potencial de umidade de transição entre as regiões I e II do modelo Luikov

Cm_1 e Cm_2 = Capacidade específica isotérmica de massa nas regiões I e II, modelo Luikov.

Equação BET:

$$U_e = \frac{(U_m \ C \ Hr)}{(1 - Hr)} \times \frac{(1 - (n+1)Hr^n + n \ r^{n+1})}{(1 + (C-1)Hr - CUr^{n+1})} \quad D.04$$

onde,

U_m = Umidade de monocamada, modelo BET

C = Constante do modelo BET

n = Número de camadas adsorvidas, modelo BET


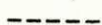
Na tabela D1 estão indicados os valores dos parâmetros das equações D.01 a D.04 para diferentes temperaturas.

Nas figuras D1 e D2 estão representados os valores experimentais e as isotermas preditas pelas equações acima.

Tabela D1

Parâmetros das isotermas de adsorção de Casca de Carço de Algodão

| T(°C) | Henderson | | Luikov | | | BET | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|-----------|--------|-------|---|
| | a | b | CM1 | CM2 | $\phi(t)$ | Um | C | n |
| 34 | 0,1273 | 0,5727 | 0,3460 | 0,4472 | 37,90 | 0,0507 | 31,77 | 8 |
| 38 | 0,1123 | 0,6614 | 0,2760 | 0,3562 | 14,14 | 0,0479 | 9,67 | 8 |
| 50 | 0,1034 | 0,6381 | 0,2387 | 0,3613 | 20,55 | 0,0431 | 10,04 | 8 |

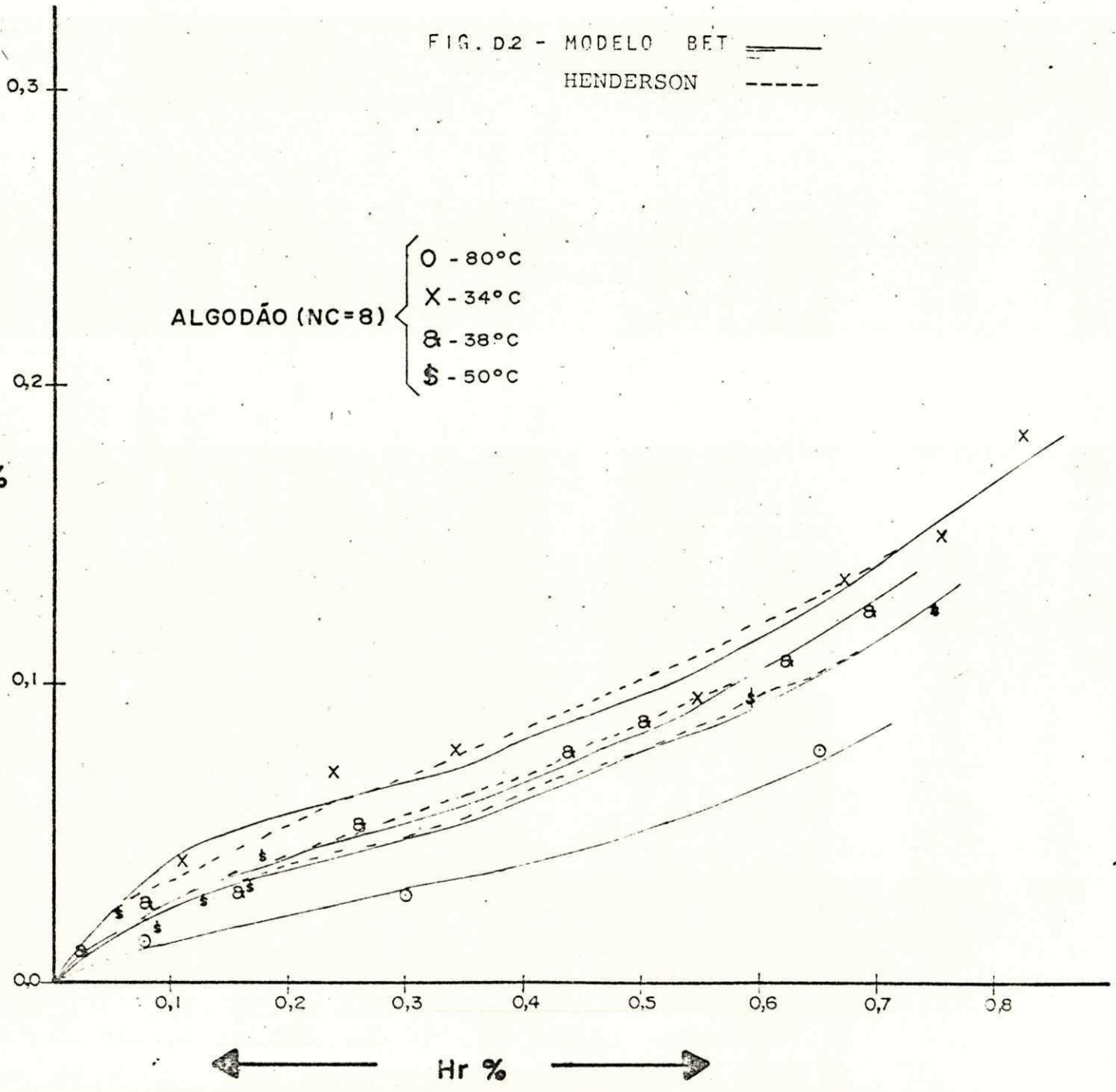
FIG. D.2 - MODELO BET 
 HENDERSON 



$U_e\%$



ALGODÃO (NC=8) {
 O - 80°C
 X - 34°C
 a - 38°C
 \$ - 50°C



Hr %

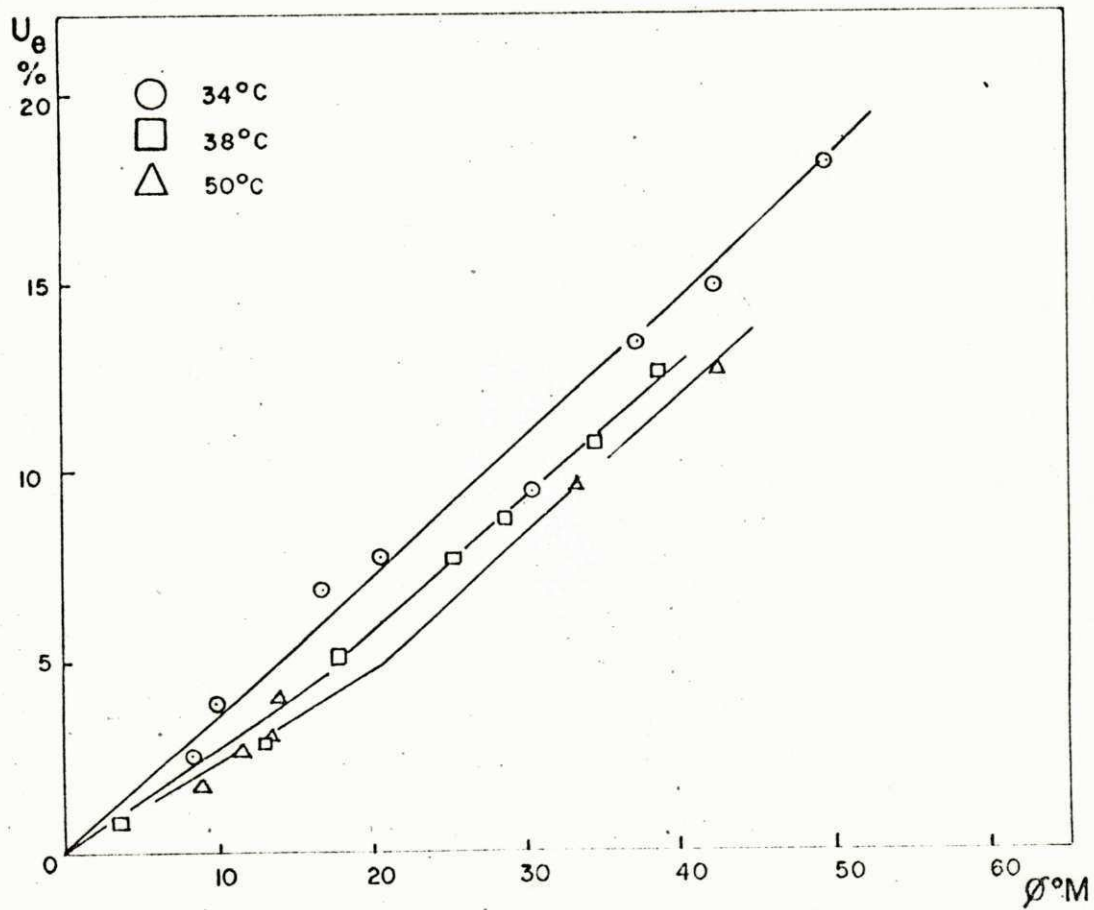


FIG. D1 - ISOTERMAS DE CASCA DE CAROÇO DE ALGODÃO.
MODELO DE LUIKOV