

LINDAUREA DANTAS DA COSTA

SECAGEM DE BAGAÇO DE CANA 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 L. Sánchez de  
Alsina**

CAMPINA GRANDE

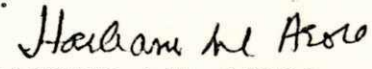
1988

SECAGEM DE BAGAÇO DE CANA EM LEITO FIXO

LINDAUREA DANTAS DA COSTA

Dissertação Aprovada em 29.07.88

  
ODELSIA L. SÁNCHEZ DE ALSINA  
**Orientador**

  
HARBANS LAL ARORA  
**Componente da Banca**

  
KEPLER BORGES FRANÇA  
**Componente da Banca**

CAMPINA GRANDE  
JULHO/1988



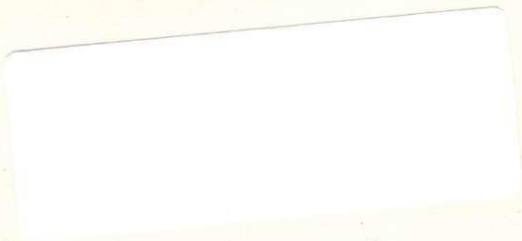
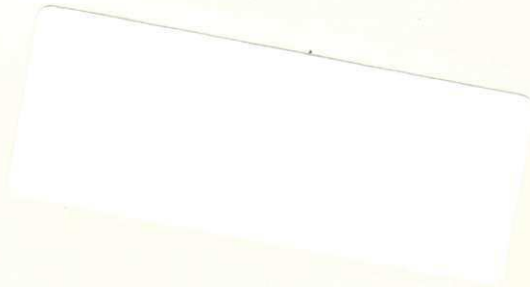
C837s Costa, Lindaurea Dantas da  
Secagem de bagaco de cana em leito fixo / Lindaurea  
Dantas da Costa. - Campina Grande, 1988.  
132 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) -  
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e  
Tecnologia.

1. Fonte Renovavel - Bagaco de Cana 2. Bagaco de Cana -  
Reaproveitamento 3. Engenharia Quimica 4. Dissertacao I.  
Alsina, Odelsia L. Sanchez de, Dr. (orientador) II.  
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III.  
Título

CDU 664.113(043)

**DEDICATÓRIA**



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

## AGRADECIMENTOS

À Professora Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, pela orientação, pelo apoio e incentivo, bem como, pela análise e revisão do texto, o que contribuiu decisivamente para a conclusão desta dissertação.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, na pessoa dos Professores Kepler Borges França e Michel François Fossy, pelo apoio e auxílio para a realização desta dissertação.

Ao Professor Thompson Fernandes Mariz e Joaquim Ernesto Rosa Romero, pelo apoio na concessão de material bibliográfico.

Ao Laboratório de Engenharia Química, na pessoa dos funcionários José Marques da Cunha e Luis Gonzaga Sales Vasconcelos, pela ajuda prestada no laboratório.

À Secretária do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química - Maria José Bezerra Cavalcanti, pela amizade e dactilografia do original.

Ao desenhista Joselito de Araújo Souto, pela execução das figuras que ilustram o texto.

Ao Dr. Luiz Magno, Diretor Proprietário do Engenho Macaíba, que forneceu o bagaço necessário para a realização das experiências.

À CAPES, pela oportunidade da bolsa concedida, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

UFCEG

Aos familiares e amigos que, de uma maneira ou de ou  
tra, mantiveram fê em meu sucesso, consagro um percentual des  
se êxito.

Enfim aos professores, colegas e funcionários, pela  
oportunidade de convivência e colaboração.

## RESUMO

Atualmente, em face da necessidade de se reduzir a importação de petróleo no país, torna-se ainda mais premente a utilização de fontes de energia renováveis, da qual o bagaço de cana representa uma alternativa que deve ser cada vez mais racionalmente utilizada. Uma maneira de racionalização de seu uso, consiste em submetê-lo ao processo de secagem antes de usá-lo como combustível. Bagaço mais seco, permite uma maior produção de vapor por quilograma de bagaço nas usinas e, conseqüentemente um aumento nos excedentes, os quais podem ser usados tanto para fins energéticos como industriais. Este último como matéria-prima na produção de papel e celulose, furfural, carvão siderúrgico, ração animal, etc. Nosso objetivo, face ao exposto acima, foi estudar a secagem de bagaço de cana em camada delgada, num leito fixo com corrente ascendente de ar aquecido. As experiências foram realizadas em condições distintas de temperatura e vazão do ar de secagem, altura do leito e umidade inicial da amostra. Foi analisada a partir das curvas de secagem, a influência destas variáveis. Com base nos resultados obtidos, foram propostos dois modelos: Da Potência e de Coura e Alsina modificado. Verificou-se que ambos modelos permitem predizer o comportamento cinético do bagaço de cana para tempos grandes de secagem. Porém o modelo da potência resultou falho na predição dos instantes iniciais de secagem, dificuldade esta superada através da utilização do segundo modelo proposto. Conclui-se

que o modelo de Coura e Alsina modificado descreve satisfatōriamente o comportamento de secagem de bagaço de cana em leito fixo na faixa operacional estudada.



viour of drying for sugar cane bagasse in fixed bed on the  
studied operational range.

## SIMBOLOGIA

A	Altura do leito
A'	Constante da equação 2.11
B <sub>n</sub>	Coefficiente da equação 5.3
b.s	base seca
C'	Constante da equação 5.1
C <sub>h</sub>	Condutividade hidráulica ( $S^{-1}$ ), equação 2.7
C <sub>i</sub>	Parâmetros da equação 5.2
c <sub>g</sub>	Calor específico do gás de secagem (cal/g.°C)
D	Coefficiente de difusão líquida ( $m^2/s$ )
d	Diâmetro da amostra (cm), equação 2.11
G	Velocidade mássica do gás de secagem ( $g/cm^2.min$ )
H	Umidade absoluta do ar
HR	Umidade relativa do ar
h	Coefficiente volumétrico de transmissão de calor (cal/min $cm^3.°C$ ), equação 2.9
J	Fluxo capilar líquido, equação 2.7
K	Constante de secagem ( $min^{-1}$ )
k	Constante de secagem (cm/min), equação 2.11
L	Espessura da placa (m), equação 2.2
n	Número de termos de uma série a que pertence
n	Expoente da equação 5.1
q	Constante da equação 2.1
r	Coordenada espacial (raio, m), equação 2.1
T <sub>bs</sub>	Temperatura de Bulbo seco (°C)

$T_{bu}$	Temperatura de bulbo Úmido ( $^{\circ}C$ )
$t$	Tempo de secagem (min ou segundo)
$U$	Teor de umidade (b.s).Adimensional
$\bar{U}$	Teor de umidade da amostra em função do tempo (b.s).Adimensional
$U^*$	Relação de umidade (b.s). Adimensional
$U_e$	Teor de umidade de equilíbrio (b.s). Adimensional
$U_i$	Teor de umidade inicial da amostra (b.s).Adimensional
$VZ$	Vazão do ar de secagem ( $m^3/h$ )
$\bar{W}$	Peso da amostra em função do tempo (g)
$W_f$	Peso final da amostra (g)
$W_i$	Peso inicial da amostra (g)
$W_s$	Peso seco da amostra (g)
$X_i$	Constantes da equação 5.6
$Z_i$	Constantes da equação 5.7
$\alpha_n$	Raízes da função de Bessel de ordem zero, equação 2.5
$\epsilon$	Porosidade
$\theta$	Parâmetro da equação a que pertence
$\lambda$	Calor latente de vaporização da água (cal/g), equação 2.8
$\rho$	Massa específica do sólido seco ( $g/cm^3$ )
$\rho_a$	Densidade aparente da amostra ( $g/cm^3$ )
$\rho_s$	Densidade aparente do leito de bagaço seco ( $g/cm^3$ ), equação 2.9
$\Delta T$	Temperatura média logarítmica entre o gás e o sólido ( $^{\circ}C$ )

Nos Apêndices A, C e E devido as limitações do computador foi utilizada a seguinte equivalência de símbolos:

$$\begin{array}{l}
 NT = n \quad ; \quad TBU = T_{bu} \quad ; \quad U(T) = \bar{U} \\
 TETA = \theta \quad ; \quad TBS = T_{bs}
 \end{array}$$

## INDICE

CAPÍTULO	I - Introdução.....	01
CAPÍTULO	II - Revisão Bibliográfica.....	05
	2.1 - A Importância da Secagem do Bagaço de Cana.....	05
	2.2 - O Processo de Secagem.....	06
	2.2.1-Períodos de Secagem .....	07
	2.2.1.1. Período a Velocidade constante.....	07
	2.2.1.2. Período a Velocidade Decrescente...	09
	2.3 - Teorias de Secagem.....	10
	2.3.1 - Teoria da Difusão Líquida.....	11
	2.3.2 - Teoria capilar.....	15
	2.3.3 - Outras Teorias.....	16
	2.4 - Equações de Secagem.....	17
CAPÍTULO	III - Equipamentos Utilizados.....	20
	3.1 - Aparelhagem.....	20
	3.2 - Câmara de Secagem.....	20
	3.3 - Descrição dos Equipamentos.....	23
	3.3.1-Equipamentos Básicos.....	23
	3.3.2-Equipamentos Auxiliares.....	24
CAPÍTULO	IV - Material e Métodos .....	26
	4.1 - Material Utilizado.....	26
	4.2 - Caracterização do Bagaço de Cana:Deter minação da Porosidade e da Densidade <u>A</u> parente.....	27

	4.3 - Determinação da Umidade Inicial.....	33
	4.3.1-Método da Estufa.....	34
	4.3.2-Método do Dessecador Infra-vermelho LP 15.....	34
	4.3.3-Comparação dos Métodos.....	35
	4.4 - Determinação da Umidade Absoluta e Umidade Relativa do Ar.....	37
	4.5 - Método de Obtenção dos Dados Experi mentais.....	37
	4.6 - Tratamento dos Dados Experimentais...	39
CAPÍTULO	V - Resultados e Discussão.....	41
	5.1 - Resultados Experimentais.....	41
	5.2 - Curvas de Secagem.....	44
	5.2.1-Efeito da Umidade Inicial da Amostra	45
	5.2.2-Efeito da Altura do Leito.....	45
	5.2.3-Efeito da Temperatura do Ar de Seca gem.....	49
	5.2.4-Efeito da Vazão do Ar de Secagem.....	53
	5.3 - Análise dos Resultados.....	58
	5.3.1-Modelo da Potência.....	58
	5.3.2-Modelo de COURA e ALSINA Modificado..	60
	5.3.2.1-Efeito das Variáveis de Operação so bre os Parâmetros K e $\theta$ .....	66
CAPÍTULO	VI - Conclusões.....	69
CAPÍTULO	VII- Sugestões para Pesquisas Futuras.....	71
REFERÊNCIAS	BIBLIOGRÁFICAS.....	72

APÊNDICE A - Tabelas de Dados Obtidos na Câmara de Secagem.....	77
APÊNDICE B - Programa de Computação com subrotina para o Cálculo das Propriedades Psicrométricas do Ar .....	92
APÊNDICE C - Tabelas com as condições do Ar e as condições do Bagaço durante o Processo de Secagem....	98
APÊNDICE D - Programas de Computação: Cálculo dos Parâmetros e Ajuste da Equação 5.5.....	113
APÊNDICE E - Tabelas Obtidas no Computador Utilizando a Equação 5.5 .....	118

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Atualmente, faz-se necessário a concentração de grandes esforços na procura de outros caminhos que permitam aproveitar, de forma econômica, fontes de energia complementares ao petróleo, desenvolvidas a partir de recursos naturais.

Apesar da queda dos preços internacionais após o último choque do petróleo, torna-se óbvio que a dependência de fontes não renováveis deverá ser paulatinamente eliminada, já que a médio ou longo prazo estarão esgotadas.

No caso da região Nordeste do Brasil a situação energética é peculiar: Por um lado sofremos recentemente as consequências de um racionamento de energia enquanto que por outro lado ficam desaproveitadas grandes quantidades de biomassa, em especial bagaço de cana, que poderiam ser aproveitadas na geração de eletricidade em usinas térmicas.

No campo das biomassas residuais, economicamente utilizáveis como fontes energéticas, o bagaço de cana de açúcar pelas condições que se apresenta, é aquela que reúne os melhores atributos econômicos para ser industrializada e competir comercialmente com o óleo combustível, contendo um potencial termo-energético de cerca de 74% do contido no álcool, segundo GUILHON (1982).

O bagaço de cana é o combustível mais viável para subs

tituir o óleo combustível nas caldeiras. É o único que anualmente se apresenta com a mesma disponibilidade nas regiões de cana de açúcar do mundo inteiro. No entanto todo esse bagaço está sendo mal utilizado, pois é queimado com umidades que variam entre 48% e 54%, obtendo baixas eficiências na maioria das caldeiras, segundo MARANHÃO & COSTA (1981).

É evidente, portanto, que o rendimento das caldeiras que utilizam bagaço pode ser melhorado desde que se utilize bagaço com teor de umidade mais baixo, e nesse caso para um mesmo consumo de bagaço a taxa de produção de vapor por kg de bagaço aumenta. Mantendo-se a mesma produção de vapor pode-se, portanto, conseguir uma maior sobra de bagaço, que pode ser utilizada como matéria-prima para fins industriais.

Dentre as várias possibilidades de utilização do bagaço de cana para fins industriais, destacam-se entre outras: Produção de papel e celulose, furfural, carvão siderúrgico, adubo e ração animal. Além dessas utilidades deve-se levar em conta o valor que representa como combustível na indústria canavieira, dado a sua qualidade de substituto ideal, no caso, dos derivados de petróleo, proporcionando às empresas açucareiras e alcooleiras o privilégio de auto-suficiência de energias térmicas e termoelétricas.

Segundo RAJAGOPAL (1983), a utilização de bagaço de cana como combustível na produção de álcool a partir da cana de açúcar viabiliza o uso de álcool como combustível líquido. Como também, o uso racional deste bagaço resultará num aumento de produção de energia elétrica nas destilarias



com co-geração. Esta racionalização consiste em submeter este bagaço a um processo de secagem antes de usá-lo como combustível. Deste modo, o poder calorífico inferior aumenta e a queima torna-se mais eficiente pelo aumento de temperatura de combustão, reduzindo a quantidade de sólidos não queimados e o excesso de ar necessário.

Segundo MARANHÃO (1983), a atual crise de energia está cada vez mais influenciando o custo de produção das empresas, o que torna inadmissível que se continue a lançar pelas chaminés das indústrias, perdas de calor que vão desde 34% até 21% do poder calorífico inferior disponível no bagaço, quando estas perdas podem ser facilmente reduzidas até 10% com a secagem do bagaço.

É evidente, portanto, que a utilização racional do bagaço de cana nas unidades que o produzem se impõe, não apenas como medida de economia energética no setor, mas devido a uma demanda potencial crescente de outros setores no consumo de bagaço em substituição ao óleo combustível e a lenha, ou mesmo como matéria-prima para outros possíveis usos industriais.

As boas perspectivas de utilização do bagaço de cana como combustível, principalmente após submetê-lo ao processo de secagem, tem contribuído para que se façam estudos sobre este tema.

Em razão ao exposto acima, o objetivo do presente trabalho, foi estudar a secagem de bagaço de cana em camada delgada, num leito fixo, numa determinada faixa operacional, verificando a partir do levantamento das curvas de secagem,

a influência da umidade inicial da amostra, temperatura e vazão do ar de secagem e altura do leito, bem como propor uma equação que apresente uma boa concordância com o comportamento observado, de modo que forneça parâmetros básicos necessários para posterior simulação e projeto de secadores industriais. Objetiva, ainda, dar uma contribuição ao conhecimento acerca da secagem de materiais particulados, tendo em vista a sua importância em vários setores industriais.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - A Importância da Secagem do Bagaço de Cana

Muitos pesquisadores vêm divulgando uma série de trabalhos sobre o aproveitamento do bagaço de cana como fonte energética, onde mostram as vantagens de submetê-lo ao processo de secagem antes de usá-lo como combustível e, posteriormente como matéria-prima para fins industriais, tendo em vista, o excedente que se terá com a secagem deste material.

A secagem do bagaço-de-cana permite melhorar as suas características para uso combustível pois, seu emprego no teor de água com que deixa as moendas, cerca de 55% em base úmida, constitui um constante obstáculo ao equilíbrio na geração de vapor da usina. Bagaço mais seco, com umidade inferior a 40%, permitiria um melhor controle e maior eficiência na operação das caldeiras, acarretando certamente uma economia de combustível, segundo MASSARANI & VALENÇA (1981).

De acordo com COSTA (1983), a elevada umidade do bagaço de cana ao deixar as moendas, afeta fortemente o seu poder calorífico inferior (PCI), o qual é motivo suficiente, entre outros, para que se efetue a sua secagem, reduzindo seu teor de umidade de 50% para 35% (base úmida), melhorando assim a sua eficiência como combustível, já que aumenta em

40% o valor do PCI.

Segundo MARANHÃO (1983), existe uma série de vantagens que se pode obter com a secagem do bagaço de cana: O aumento acentuado do poder calorífico inferior e superior; a diminuição do excesso de ar necessário à combustão, já que diminui de 60% (bagaço úmido) para 20% com bagaço seco; o aumento da velocidade de combustão e da absorção de calor pelas paredes dos tubos das caldeiras, aumentando assim a quantidade de calor transferida para gerar vapor; melhoria substancial na combustão, já que o bagaço seco queima sem deixar resíduos; diminuição da poluição devido ao menor volume de gases e menor quantidade de fuligens.

Segundo RAJAGOPAL (1983), é importante secar o bagaço de cana antes de usá-lo como combustível pois, seu poder calorífico líquido aumenta e a combustão torna-se mais eficiente, podendo então resultar um excedente de bagaço, que poderá ser usado posteriormente como matéria-prima na produção de papel e celulose, furfural, carvão siderúrgico, ração animal, etc.

## 2.2 - O Processo de Secagem

A secagem de um sólido refere-se, em geral, à remoção por evaporação do líquido contido neste sólido. Dois processos fundamentais e simultâneos ocorrem: (1) transferência de calor para evaporar o líquido; (2) transferência de massa na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido e na de vapor a partir da superfície. A investigação de como ocorrem estes

processos pode basear-se no mecanismo interno do escoamento do líquido ou na influência das condições externas, tais como, temperatura, umidade, escoamento de ar, estado de subdivisão do sólido, etc. (PERRY & CHILTON, 1980).

### 2.2.1 - Períodos de Secagem

Na secagem experimental de um sólido, os dados obtidos relacionam usualmente o teor de umidade ao tempo. Estes dados são então plotados com o teor de umidade (em base seca)  $U$  contra o tempo  $t$ , conforme mostra a fig. 2.1a. Esta curva representa o caso geral do processo de secagem de um sólido.

Uma melhor descrição deste processo, isto é, da variação da velocidade com o tempo e com o teor de umidade é ilustrada pela derivação, gráfica ou numérica, da curva da fig. 2.1a. Obtêm-se então, o gráfico de  $dU/dt$  contra  $U$  (Fig.2.1b) ou de  $dU/dt$  contra  $t$  (Fig.2.1c). Estas curvas de velocidades mostram que o processo de secagem não é um processo uniforme e contínuo. Uma melhor análise destes gráficos será feita nos próximos itens.

#### 2.2.1.1. - Período a Velocidade Constante

O período a velocidade constante está representado pelo segmento AB das curvas das fig. 2.1a, 2.1b e 2.1c. Neste

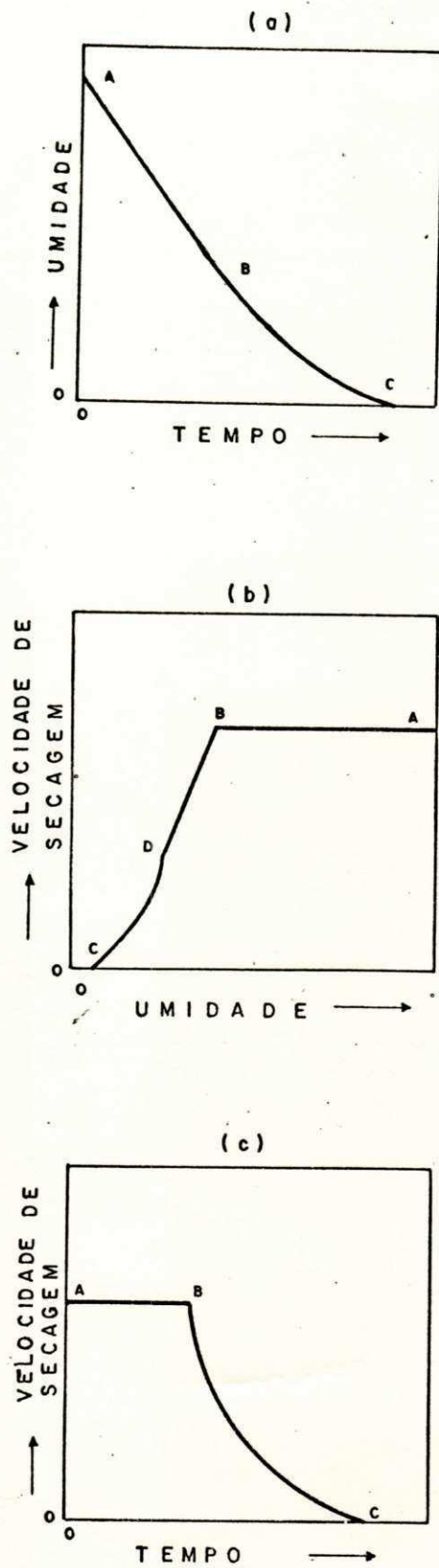


FIGURA 2.1 - CURVAS DE SECAGEM

período, a remoção de umidade ocorre pela difusão do vapor a partir da superfície do sólido e através de uma película de ar estagnado para o ambiente. O movimento da umidade dentro do sólido é suficientemente rápido para manter a condição de saturação na superfície, e a velocidade da secagem é controlada pela velocidade da transferência de calor para a superfície evaporante. A velocidade da transferência de massa equilibra a velocidade de transferência de calor, e a temperatura da superfície saturada permanece constante. Esta superfície tende a adquirir a temperatura de bulbo úmido, isto quando o calor é transferido apenas por convecção e na ausência de outros efeitos térmicos.

VALENÇA & MASSARANI (1982) e ROMERO (1988) verificaram, a partir de resultados experimentais, que na operação de secagem do bagaço de cana em secadores de fluxo cruzado prevalecia o período a velocidade constante.

#### 2.2.1.2 - Período a Velocidade Decrescente

O período a velocidade decrescente está representado pelo segmento BC das curvas das Fig. 2.1a, 2.1b e 2.1c. Este período começa quando o período a velocidade constante termina, uma vez atingido o teor de umidade crítico (ponto B).

Este período está, usualmente, dividido em duas zonas: (1) a zona de secagem da superfície insaturada (segmento BD); (2) a zona em que o movimento interno da umidade é controlante (segmento DC), conforme mostra a fig. 2.1b.

Na primeira zona, conhecida como primeiro período a velocidade decrescente, a superfície evaporante não pode ser mantida inteiramente saturada pelo teor de umidade dentro do sólido. Isto porque a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície.

Na segunda zona, conhecida como segundo período a velocidade decrescente, a superfície evaporante está insaturada e o plano de evaporação se desloca para o interior do sólido. A velocidade de secagem é então governada pela velocidade do movimento da umidade interna, diminuindo assim a influência das variáveis externas.

O período a velocidade decrescente, conforme veremos no Capítulo V, predominou em todas as curvas obtidas no presente trabalho com a secagem experimental do bagaço de cana. O mesmo comportamento foi observado por MASSARANI & VALENÇA (1981) na secagem em leito fixo de camada fina.

### 2.3 - Teorias de Secagem

Segundo COULSON & RICHARDSON (1968), é importante compreender como se move a umidade para a superfície de secagem durante o período a velocidade decrescente. Duas teorias foram postuladas para explicar este processo: a teoria da difusão e a teoria capilar. 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 segunda se supõe que as forças que controlam o movimento da água tem origem na capilaridade e resultam da existência de poros diminutos entre as diversas partículas.

Segundo WHITAKER (1977), 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.

Vasta bibliografia tem sido publicada sobre as duas teorias citadas acima. Pode-se citar como representativos os trabalhos de SHERWOOD (1931) HENRY (1939), CASSIE (1940) com enfoque difusional, os de HAINES (1927), CEAGLSKE & HOUGEN (1937), PEARSE et alii (1949) utilizando a teoria capilar.

### 2.3.1 - Teoria da Difusão Líquida

Segundo WHITAKER (1977), a primeira análise da secagem de sólidos na engenharia, foi evidenciada por LEWIS (1921), o qual sugeriu que o processo de secagem nos sólidos era difusional. Partindo desta sugestão, SHERWOOD (1929a, 1929b, 1930, 1931), desenvolveu uma série de trabalhos sobre a secagem de sólidos, nos quais propõe que o movimento da umidade num sólido pode ocorrer por um mecanismo de difusão líquida, e que a lei de Fick pode ser aplicada para descrever a velocidade do movimento da umidade, expressada como:

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

onde:

$U$  = Teor de umidade (b.s)

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

$t$  = tempo

$r$  = coordenada espacial

$q = 0$ , para placa plana

$q = 1$ , para cilindro

$q = 2$ , para esfera

Várias soluções da equação (2.1) para as diferentes formas sólidas tem sido usadas na secagem de diversos materiais, assumindo, geralmente, as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$U(r,0) = U_i \quad (2.1.a)$$

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{0,t=0} = 0 \quad (2.1.b)$$

$$U(R,t) = U_e \quad (2.1.c)$$

A última condição corresponde ao caso em que a resistência externa é desprezível e o processo é controlado pela difusão interna.

CRANK (1975) apresenta, para as três formas geométricas, as seguintes soluções analíticas:

#### 1 - Placa Plana

$$U^* = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp} \left[ -\frac{(2n+1)^2 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t}{4L^2} \right] \quad (2.2)$$

em que

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

$\bar{U}$  = teor de umidade da amostra em função do tempo

$U_i$  = umidade inicial da amostra

$U_e$  = umidade de equilíbrio

$t$  = tempo (s)

$L$  = semi-espessura (m)

A equação (2.2) foi deduzida para a evaporação nas duas faces da placa; quando a evaporação ocorrer apenas numa face,  $L$  será a espessura total. No caso de um tempo longo de secagem, esta equação é simplificada para a forma limite da equação de difusão ( $n = 0$ ):

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

que pode ser derivada para obter-se a velocidade de secagem:

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

## 2 - Cilindro Infinito

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

em que

$R$  = raio equivalente (m)

$\alpha_n$  = raízes da função de Bessel de ordem zero

## 3 - Esfera

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

Em geral, o coeficiente de difusão líquida é considerado constante. No entanto, segundo PERRY & CHILTON (1980), raramente este parâmetro é constante, pois varia com o teor de umidade e com a temperatura.

Segundo CHEN & JOHNSON (1969), a não constância do coeficiente de difusão pode ser evidenciada no período a velocidade decrescente, já que na fase final deste período foram observadas discrepâncias entre os valores teóricos e experimentais.

WHITAKER (1977), citado por MARIZ (1986), 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.

Segundo MARIZ (1986), o modelo difusional sofreu severas críticas, devido as discrepâncias observadas entre os valores experimentais e teóricos. As principais falhas podem ser atribuídas à consideração do coeficiente de difusão constante (independente da temperatura e do teor de umidade) e alteração da forma e tamanho do sólido durante a secagem.

### 2.3.2 - Teoria Capilar

Quando a dimensão dos poros do material granular é conveniente, a umidade pode mover-se de uma região de concentração alta para uma outra de concentração baixa pelo efeito de ações capilares e não de difusão, segundo PERRY & CHILTON (1980).

Segundo MARIZ (1986), um material poroso possui uma estrutura interior muito complexa, formada por poros de diferentes tamanhos intercomunicados, cuja secção transversal varia grandemente. À 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 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. A equação do fluxo capilar líquido é dada, segundo PHILIP & DE VRIES (1957), por:

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

onde

$C_h$  = condutividade hidráulica ( $S^{-1}$ )

$\rho$  = massa específica do sólido seco ( $g/cm^3$ )

Segundo ALVARENGA et alii (1980), a tensão capilar é

proporcional ao teor de umidade somente para materiais homogêneos e isotrópicos, valendo assim a equação (2.7).

Segundo WHITAKER (1977) e ALVARENGA et alii (1980), o transporte capilar, como único mecanismo de movimento de umidade, não tem sido aplicado a materiais biológicos.

### 2.3.3 - Outras Teorias

Várias teorias mais complexas de secagem são disponíveis na literatura. Dentre elas, podemos citar as de LUIKOV, PHILIP & DE VRIES, BERGER & PEI e FORTES & OKOS.

Do ponto de vista da termodinâmica dos processos irreversíveis, a teoria de LUIKOV (1966), citado por ALVARENGA et alii (1980), 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 LUIKOV por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura.

Segundo ALVARENGA et alii (1980), a teoria de LUIKOV tenta levar em consideração os seguintes mecanismos de transporte de água: difusão, efusão e convecção de vapor e difusão e convecção de água no interior do meio poroso.

Em linhas gerais, as teorias de PHILIP & DE VRIES (1957) e de BERGER & PEI (1973), segundo ALVARENGA et alii (1980), consideram que a água se move em meios porosos basicamente por meio dos mecanismos de difusão líquida e capila

ridade.

FORTES & OKOS (1978), citado por ALVARENGA et alii (1980), 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 do que o conceito proposto por LUIKOV.

#### 2.4 - Equações de Secagem

Várias equações empíricas e semi-empíricas, baseadas nos modelos clássicos propostos, tem sido apresentadas por muitos pesquisadores que tratam da operação unitária de secagem.

MASSARANI & VALENÇA (1981), verificaram que os resultados experimentais da secagem de bagaço de cana, em camada delgada, podem ser expressos pela equação de TSAO e WHEELLOCK (1967):

$$U^* = \text{Exp} \left( (-G^n \Delta T / C A^m \lambda) t \right) \quad (2.8)$$

onde

$$C = 0,95 \text{ (g)}^{2,3} \text{ (}^\circ\text{C)} / \text{(cm)}^{3,5} \text{(min)}^{0,5} \text{ cal}$$

$$m = 0,90$$

$$n = 1,3$$

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 velocidades mássicas do ar entre 0,26 e 0,90 g/cm<sup>2</sup>.min.

ROMERO (1988), utilizando um modelo proposto por THYGESSON & GROSSMANN (1970) para escoamento em fluxo cruzado, verificou que os resultados experimentais da secagem de bagaço de cana, em secador de esteira, apresentavam um bom ajuste com o modelo proposto, para o período de taxa constante de secagem.

$$\bar{U} - U_i = \frac{-G \cdot c_g (T_{bs} - T_{bu})t}{\rho_s \cdot \lambda \cdot A} \left[ 1 - \text{Exp} \left( \frac{-h \cdot A}{G \cdot c_g} \right) \right] \quad (2.9)$$

Esta equação foi testada para camadas entre 2,0 e 10,0 cm de altura, velocidades mássicas do ar entre 0,18 e 1,20 g/cm<sup>2</sup>.min e temperaturas variando de 100 a 150 °C.

MARIZ (1986), no estudo da secagem de casca de caroço de algodão em leito fixo, em camada delgada, verificou que os resultados experimentais obtidos apresentavam um ajuste satisfatório com a equação desenvolvida por COURA & ALSINA (1985) para o período de taxa decrescente:

$$U^* = \theta \text{ Exp} (-Kt) + (1-\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{ Exp} [ -((2n+1)^2 + 1)Kt ] \quad (2.10)$$

Esta equação foi testada para camadas entre 1,0 e 10,0 cm de altura, vazões do ar entre 120 e 240 m<sup>3</sup>/h e temperaturas variando de 38 a 82 °C.

QUIRINO & ALSINA (1986), no estudo da cinética de se



cagem de sabugo de milho por convecção forçada, e com base nos resultados observados, propuseram a seguinte equação:

$$U^* = A' \text{ Exp } \left( -\frac{kt}{d} \right) \quad (2.11)$$

Esta equação ajustou satisfatoriamente os dados experimentais na seguinte faixa operacional utilizada: temperaturas do gás de secagem entre 40°C e 120°C e vazões do ar entre 100 e 240 m<sup>3</sup>/h.

MENEGALLI & SOBRAL (1986) estudaram a secagem de sangue bovino incorporado a proteína texturizada de soja, em leito fixo. Os experimentos de secagem foram conduzidos num secador de bandejas, com fluxo cruzado, nas seguintes condições de operação: temperaturas do gás de secagem de 60,70 e 80°C, e velocidade do ar de secagem por volta de 2,0 m/s.

Mediante a resolução numérica da equação 2.1 e seu ajuste aos dados experimentais, os autores concluíram, que a cinética de secagem desta mistura pode ser explicada através de um modelo de controle difusional com contração simultânea de volume.

## CAPÍTULO III

### EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

#### 3.1 - Aparelhagem

Para obtenção dos dados, foi utilizado um conjunto de equipamentos (Fig. 3.1) que consiste basicamente de: um compressor radial (A) para impulsionar o ar; um rotâmetro (B) para medir a vazão do gás de secagem; um aquecedor elétrico de ar com nove resistências (C); uma câmara de secagem (D); um conjunto de chaves (E) que seleciona as temperaturas lidas num milivoltímetro (F), um controlador de temperatura (G) para manter constante a temperatura de operação; um registradorador de temperatura (H).

#### 3.2 - Câmara de Secagem

A câmara de secagem de leito fixo (Fig. 3.2) consiste de uma coluna cilíndrica de 17,8 cm de diâmetro e 80 cm de altura com um distribuidor tronco-cônico do ar de secagem contendo esferas de vidro de tamanho uniforme, empilhadas aleatoriamente sobre uma tela de arame colocada na entrada deste distribuidor.

A câmara, isolada com uma camada de amianto de espesura 1,5 cm, e sobre esta, uma camada de poliuretano de 1,0cm

- A - Compressor Radial
- B - Rotômetro
- C - Aquecedor de Ar
- D - Câmara de Secagem
- E - Chave Seletora
- F - Milivoltímetro Digital
- G - Controlador de Temperatura
- H - Registrador

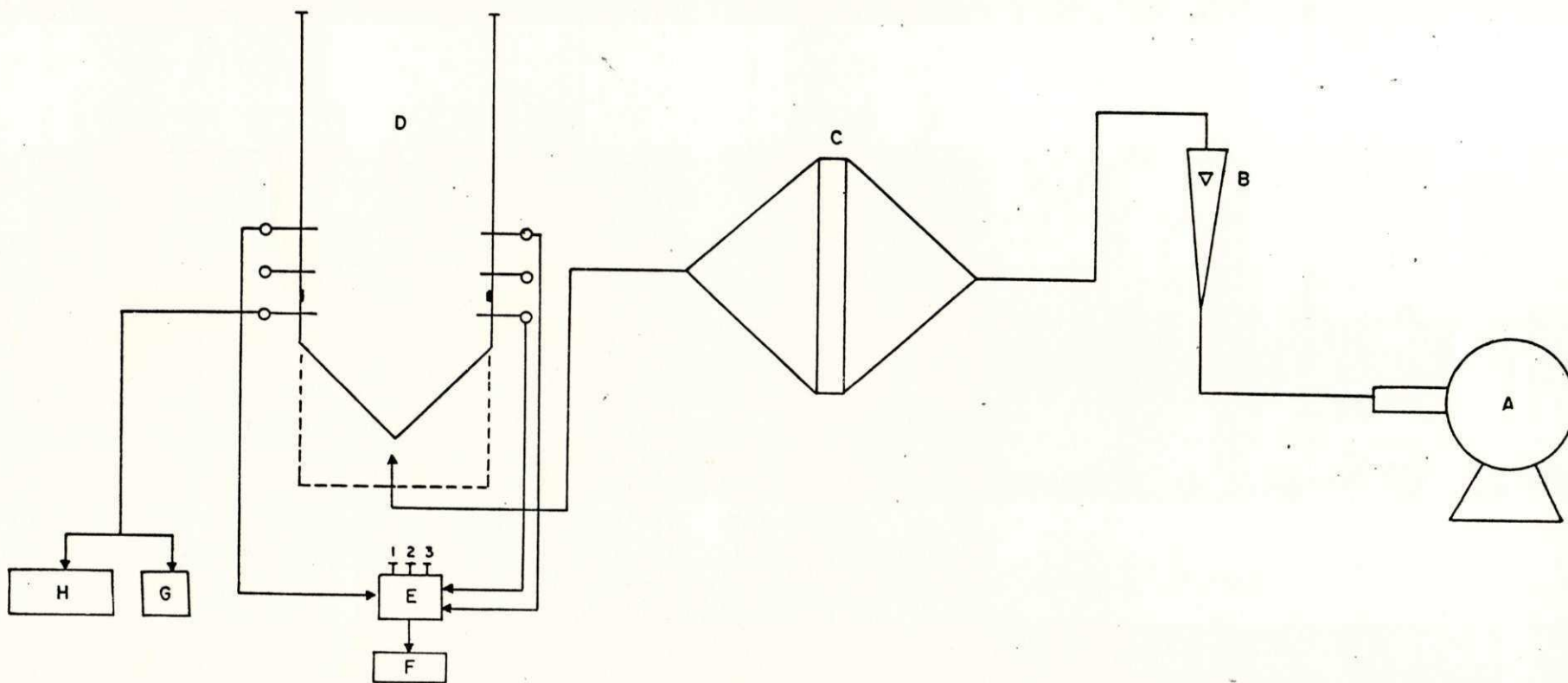


FIGURA 3.1 - ESQUEMA DA APARELHAGEM

LEGENDA :

- a - Coluna de Aço Galvanizada
- b - Camada de Amianto (1,5 cm)
- c - Espuma de Poliuretano (1,0 cm)
- d - Distribuidor Tronco - Cônico
- e - Suporte de Alumínio Contendo a Amostra
- f - Tubulação Galvanizada de 2"
- E - Chave Seletora
- F - Milivoltímetro Digital
- G - Controlador de Temperatura
- H - Registrador

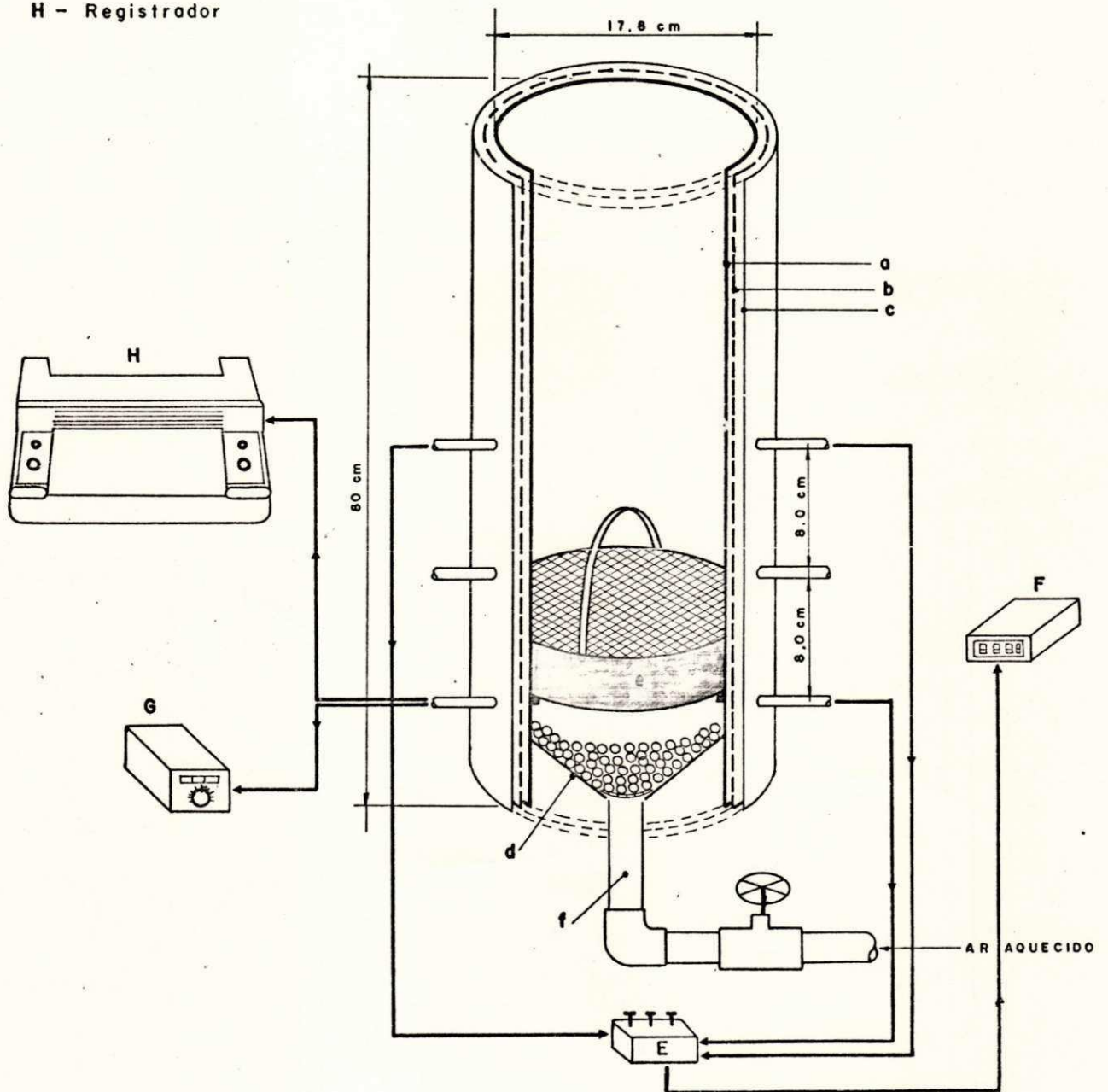


FIGURA 3.2 - CÂMARA DE SECAGEM

de espessura, possui seis furos, três em cada lado, distan-  
ciados por oito centímetros. No seu interior, dois centíme-  
tros acima dos dois primeiros furos, existe uma saliência  
com vedação de asbesto para fixar o suporte contendo a amos-  
tra. Nos dois primeiros furos estão os seguintes termopares:  
o que controla a temperatura do ar de secagem, o que mede a  
temperatura de bulbo úmido do ar de entrada (lida num mili-  
voltímetro) e o que mede a temperatura de bulbo seco do ar  
de entrada (lida num registrador). Conforme a altura do lei-  
to com que se estiver trabalhando, coloca-se nos dois furos  
superiores os seguintes termopares: o que mede a temperatura  
de bulbo úmido do ar de saída e o que mede a temperatura de  
bulbo seco do ar de saída, lidas num milivoltímetro. As tem-  
peraturas (referência temperatura ambiente) lidas no milivol-  
tímetro são distinguidas por meio de uma chave seletora.

### 3.3 - Descrição dos Equipamentos

Os equipamentos utilizados para o funcionamento da câ-  
mara de secagem e para obtenção dos dados requeridos na mes-  
ma e fora dela, serão descritos nos itens abaixo.

#### 3.3.1 - Equipamentos Básicos

01 - Compressor radial, tipo exportação fabricado pela  
Lavagem Americana Garantia, dotado de motor assín-

crono trifásico, tipo S100 L2, com 4 CV e 2920 RPM, fabricado pela metalúrgica Abramo Eberle S/A - Caxias do Sul - Ind. Brasileira.

02 - Rotâmetro, tipo R2-V.C HASTE, capacidade de 400 m<sup>3</sup>/h, fabricado pela OMEL/SA - Ind. Brasileira .

03 - Manômetro DOX, capacidade de 2,0 kg/cm<sup>2</sup>, fabricado pela IMC - 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<sup>0</sup>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 EQUIPAMENTO CIENTÍFICO DO BRASIL - Ind. Brasileira .

08 - Auto-Transformador variável, tipo 2/6 B, com INV 240 e OUT de 0-280, fabricado por THE SUPERIOR ELETRIC Co. BRISTOL CONN-USA.

### 3.3.2 - Equipamentos Auxiliares

01 - Balança Mettler PC 440, capacidade de 440 g, com precisão de leitura 0.001g, fabricado pela METTLER INSTRUMENT AG - Suíça.

- 02 - Balança Sartorius, capacidade de 2.200g, com precisão de leitura 0.01g, fabricado pela SARTORIUS Alemanha Federal.
- 03 - Dessecador Infra-Vermelho LP - 15, fabricado pela METTLER INSTRUMENT AG-Suíça.
- 04 - Estufa de secagem, Modelo 315SE, fabricado pela FANEN - São Paulo - Ind. Brasileira.
- 05 - Termopares, tipo Ferro-Constantan.
- 06 - Picnômetro de comparação a Ar, fabricado pelo Núcleo de Armazenamento do DEAg da UFPb, com capacidade em cada cilindro de 1890 ml.
- 07 - Cronômetro marca GALLENKAMP-referência TKM-340Y.
- 08 - Termômetro químico ARBA, faixa (-10 a + 100°C) -  
- div. 1/1°C - enchimento mercúrio, fabricado pela ARBA-Termômetros Brasil Ltda.
- 09 - Anemômetro de Molinete, leitura em m/min, número 6/114650, fabricado pela VEB ANEMOMETERBAU DRESEN DEN - DDR.
- 10 - Higrômetro, fabricado pela HAENNI - Suíça, RENÉ GRAF - São Paulo.

## CAPÍTULO IV

### MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.1 - Material utilizado

O material utilizado foi o bagaço de cana, subproduto ou resíduo da moagem de cana de açúcar. Trata-se da matéria fibrosa da cana, na qual permanecem o caldo residual e a água provenientes do processo de extração.

Encontram-se no bagaço, dissolvidos na água, os açúcares que não foram extraídos na moagem e impurezas várias, tais como os sais inorgânicos que são os constituintes, das cinzas. Encontram-se também, em maiores proporções, celulose, pentosanas e lignina, e em menores, corpos nitrogenados, cera e lipídios. As cinzas variam conforme a colheita da cana seja manual ou mecânica, tipo de solo mais ou menos aderente aos colmos ou ainda se existe ou não lavagem da cana.

OLIVEIRA (1980), apresenta valores médios, tomados de vários autores, de como seria a composição física do bagaço de cana:

Umidade -----	44,0 a 52,0%	(base úmida)
Sólidos Solúveis-----	2,0 a 6,0%	
Cinzas -----	4,0%	
Fibras -----	43,0 a 52%	



Conforme ZEGARA (1975) a composição da fibra é: Celulose 50 a 55%, Lignina 18,1 a 21,1% e Pentosana 27,7 a 29,6%.

A composição elementar do bagaço seco varia conforme autores. De acordo com HUGOT (1972), a composição média é a seguinte:

Carbono (C) -----	47,0%
Hidrogênio (H) -----	6,5%
Oxigênio (O) -----	44,0%
Cinzas -----	2,5%

O bagaço de cana utilizado nos ensaios provinha da usina Santa Maria, situada na cidade de Areia-PB e do Engenho Macaíba, situado na cidade de Alagoa Nova-PB. Este material, ao sair das moendas, passa por picadores onde toma formas indefinidas, o que torna muito difícil caracterizar a forma e o tamanho de suas partículas.

Neste trabalho, não foi possível caracterizar o bagaço de cana através da forma e tamanho de suas partículas. Porém, sua caracterização foi feita através da porosidade e densidade aparente do leito de bagaço. Entretanto, é de conhecimento um trabalho realizado por BARBOSA & MENEGALLI (1986) sobre a caracterização deste material através da forma e tamanho de suas partículas.

#### 4.2 - Caracterização do Bagaço de Cana: Determinação da Porosidade e da Densidade Aparente

A porosidade é definida pela razão do volume de espa

ços vazios ao volume do leito. Foi determinada mediante um picnômetro de comparação a ar (RAMESH & MOHSENIN, 1980), conforme figura 4.1.

A densidade aparente  $\bar{\epsilon}$  é definida como a massa de sólido dividida pelo volume do leito. Foi determinada mediante um cilindro de volume 1000 ml. Conhecidas a porosidade e a densidade aparente, a densidade real do sólido se calcula a partir da equação:

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

em que

$\epsilon$  = porosidade (decimal)

$\rho_a$  = densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho$  = densidade real ( $\text{g/cm}^3$ )

Foram realizados oito ensaios com amostras com teores de umidades (base seca) diferentes. Para cada ensaio o valor da porosidade foi obtido a partir da média de cinco medições e o valor da densidade aparente a partir da média de dez medições. Os resultados, já apresentados em trabalho anterior (ROMERO, 1988), foram obtidos com o bagaço de cana que provinha do Engenho Macaíba.

A porosidade e a densidade aparente do bagaço de cana que provinha da Usina Santa Maria, foram determinadas em trabalho anterior (ROMERO & ALSINA, 1986). Os resultados destas determinações são compatíveis com os resultados citados acima.

De acordo com as figuras 4.2 e 4.3 respectivamente, observa-se que a porosidade tende a diminuir, tanto com o aumento de umidade, quanto com o aumento da densidade aparen

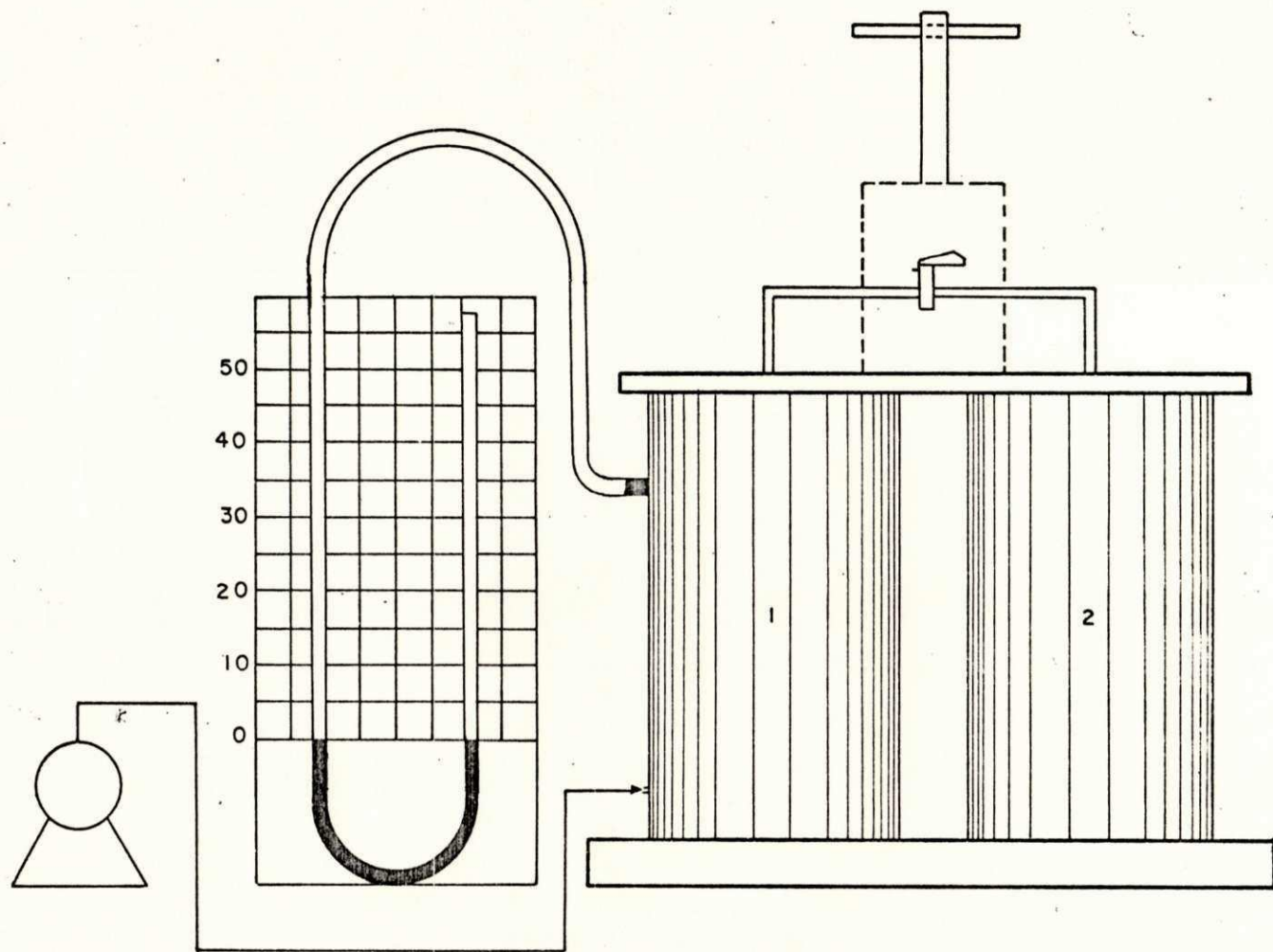


FIGURA 4.1 — PICNÔMETRO DE COMPARAÇÃO A AR.

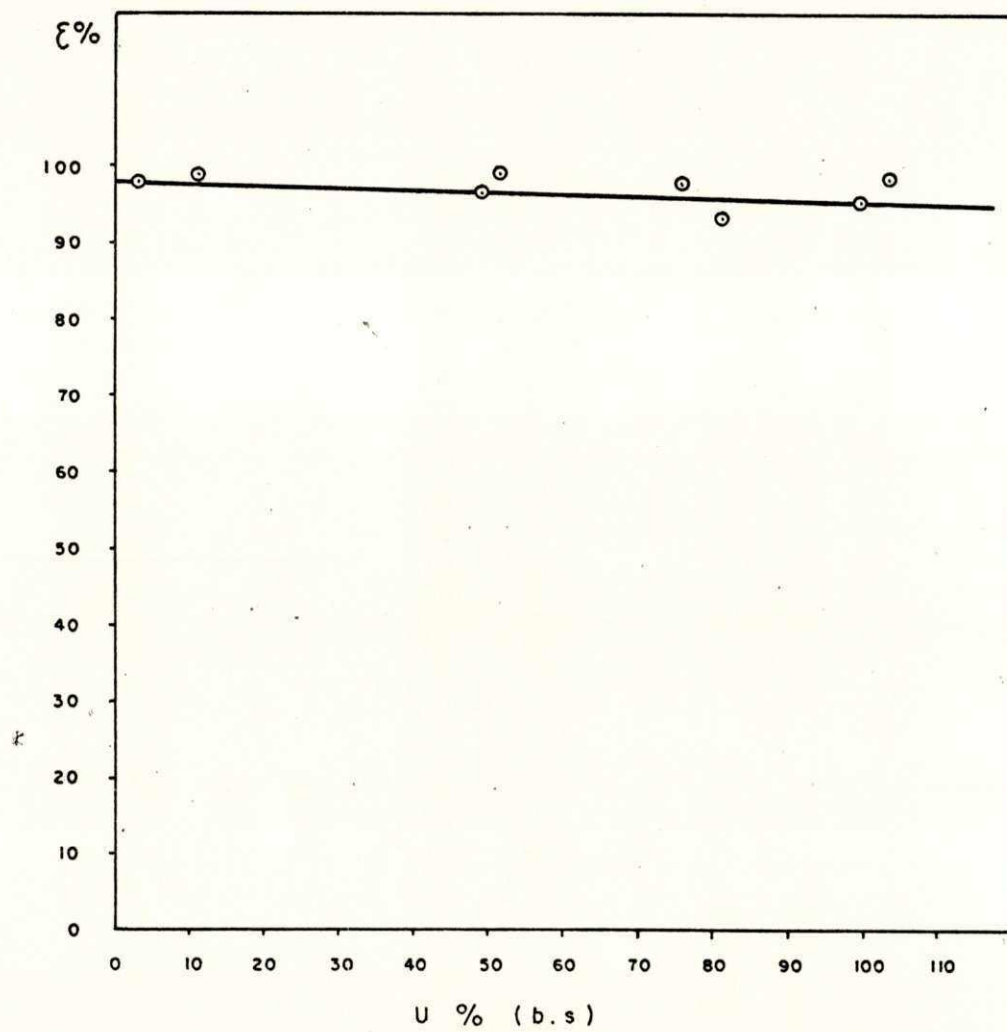


FIGURA 4.2 - VARIAÇÃO DA PROSIDADE COM A UMIDADE

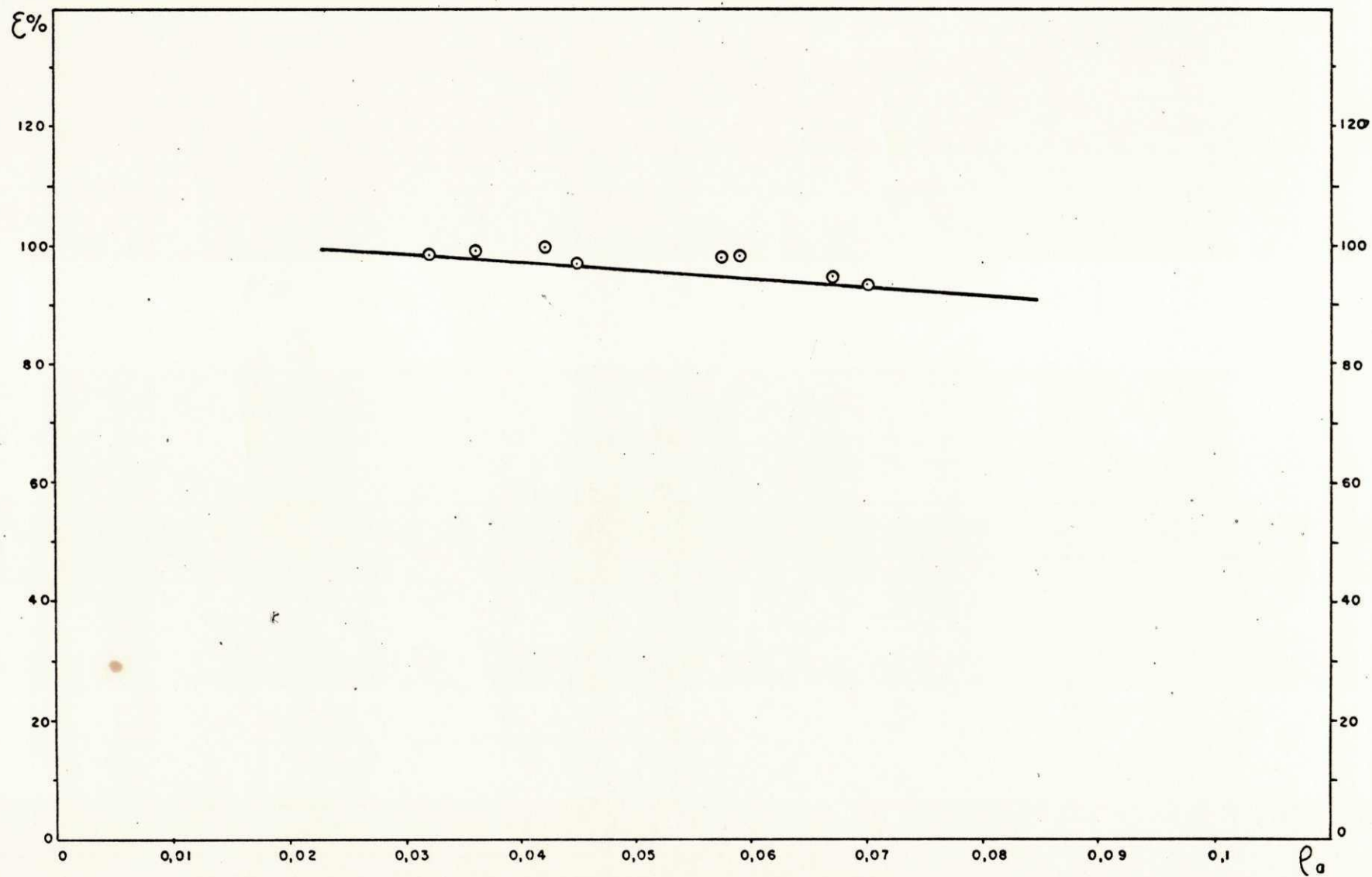


FIGURA 4.3 - VARIAÇÃO DA PROSIDADE COM A DENSIDADE APARENTE

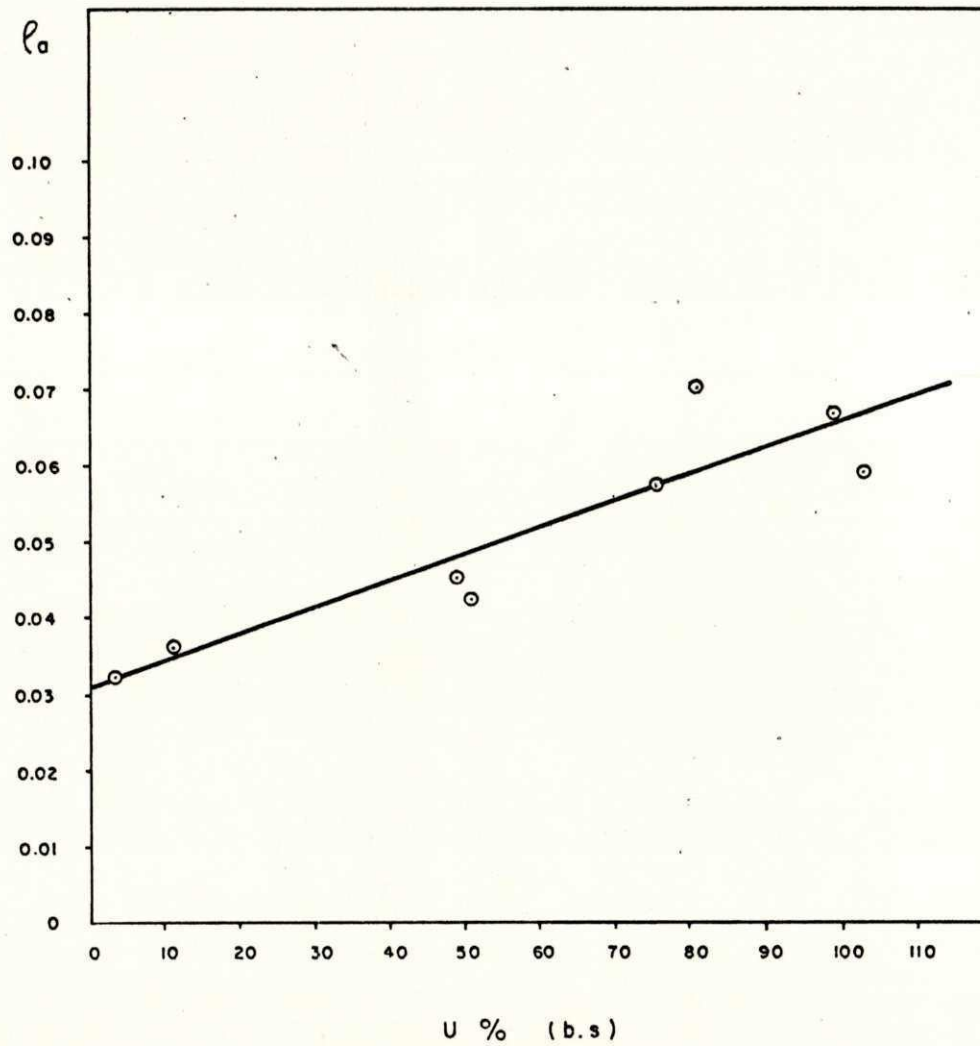


FIGURA 4.4 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE COM A UMIDADE

te. Na figura 4.4 é mostrado o efeito do teor de umidade na densidade aparente. Observa-se que a densidade aparente tende a aumentar com o aumento do teor de umidade.

Estes resultados são compatíveis com os resultados encontrados na literatura para diferentes tipos de materiais.

MARIZ (1986), no estudo da secagem de casca de caroço de algodão, verificou que a porosidade decresce com o amento do teor de umidade.

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 densidade aparente.

CHUNG & CONVERSE (1971), citados por ALMEIDA et alii (1979), verificaram que a porosidade de milho e de trigo decresce, linearmente, com o aumento do teor de umidade.

#### 4.3 - Determinação da Umidade Inicial

A determinação da umidade inicial era feita antes de submeter o bagaço de cana ao processo de secagem.

Para que esta determinação fosse a mais representativa possível, retirava-se quatro alíquotas de várias partes da amostragem. Estas alíquotas eram então submetidas a dois mētodos distintos de determinação de umidade inicial, sendo duas alíquotas para cada mētodo.

#### 4.3.1 - Método da Estufa

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

A determinação da umidade inicial por este método, foi feita colocando na estufa, regulada a uma temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , as amostras, por um espaço de tempo de 24 horas. Depois deste tempo, as amostras eram pesadas numa balança Mettler eletrônica PC-440, com precisão de leitura de 0,001 g.

#### 4.3.2 - Método do Dessecador Infra-vermelho LP 15

Este método baseia-se no seguinte princípio: ao incidir sobre um corpo raios infra-vermelhos, estes cedem ao mesmo uma parte da energia contida; o corpo irradiado então se aquece e as substâncias voláteis se evaporam.

O tempo de secagem deste método, depende do grau de aquecimento ajustado, do peso da amostra, da distribuição e da cor do produto. É mais rápido que o da estufa, onde o calor é transmitido por convecção.

O dessecador aqui utilizado foi adaptado sobre uma balança Mettler eletrônica PC-440.

A amostra é pesada e colocada no dessecador a uma temperatura de aproximadamente  $110^{\circ}\text{C}$ , até atingir peso constante. Este peso é lido de forma digital na balança mencionada acima.



### 4.3.3 - Comparação dos Métodos

A umidade inicial pode ser calculada em base seca ou base úmida mediante as equações abaixo:

$$U_i = \frac{W_i - W_f}{W_i} \quad (\text{base úmida}) \quad (4.2)$$

$$U_i = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (\text{base seca}) \quad (4.3)$$

onde:

$U_i$  = umidade inicial da amostra  $\left( \frac{\text{gr. de água}}{\text{gr. de sólido úmido ou seco}} \right)$

$W_i$  = peso inicial da amostra (g)

$W_f$  = peso final da amostra (g)

A umidade inicial em base seca é obtida para que se possa calcular a umidade da amostra em função do tempo de secagem. Isto será visto mais adiante, no item 4.6.

Com a determinação da umidade inicial pelos dois métodos, conforme tab. 4.1, verifica-se que as umidades iniciais obtidas pelo método LP 15 são sempre superiores as obtidas pelo método da estufa.

Para uma melhor comparação deste dois métodos, foi aplicado um terceiro método, que consistia em determinar pelo método LP 15, as umidades iniciais das amostras que foram determinadas, anteriormente, pelo método da estufa. Após este procedimento verifica-se, conforme tabela 4.1, que os valores das umidades iniciais tornam-se próximos aos obtidos pelo método LP 15.

A partir destes resultados, observa-se que a estufa não

retira totalmente a água das amostras, o que torna o método inadequado, já que requer um controle na variação de temperatura da estufa e um tempo superior a 24 horas.

As umidades iniciais utilizadas nos cálculos deste trabalho foram as obtidas pelo método do dessecador infravermelho LP 15. Cada uma destas umidades tinha como valor, a média das quatro determinações: duas pelo método LP 15 e duas pelo método estufa-LP 15.

Tabela 4.1 - Umidade inicial em base seca (%)

MÉTODO LP 15	MÉTODO DA ESTUFA	MÉTODO ESTUFA-LP 15
96,5	86,0	95,0
102,5	96,5	104,5
102,5	98,0	105,0
109,5	94,0	102,5
115,0	105,0	110,0
132,0	130,0	139,5
144,8	133,0	136,5
149,5	137,0	141,5
150,0	150,0	151,0
194,0	184,0	186,0

#### 4.4 - Determinação da Umidade Absoluta e Umidade Relativa do Ar

A umidade absoluta e umidade relativa do ar de secagem foram determinadas através de um programa de computador, usando como valores de entrada, as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de entrada e, seguidamente as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de saída. Estas temperaturas foram medidas com termopares de Ferro-constantan, conforme mostra a figura 3.2. O programa de computador se encontra no apêndice B e as tabelas com os valores obtidos no apêndice C. Nestas tabelas são mostradas as condições do ar e as condições do bagaço, durante o processo de secagem, nos ensaios realizados.

A umidade relativa ambiente foi determinada mediante leitura em um Higrômetro.

#### 4.5 - Método de Obtenção dos Dados Experimentais

Para estudar a cinética de secagem do bagaço de cana, planejou-se uma série de experiências, que consistiu no levantamento das curvas de secagem. Uma curva de secagem pode ser definida, como sendo a evolução do teor de umidade da amostra com o tempo, quando esta amostra, é submetida ao processo de secagem. A determinação experimental foi realizada no sistema mostrado na Figura 3.1, conforme o seguinte procedimento:

- 01 - Com uma certa amostragem de bagaço, determina-se a umidade inicial, conforme procedimento descrito no ítem 4.3.
- 02 - Fixa-se a vazão do ar mediante a válvula reguladora, e a temperatura de operação mediante o uso do controlador.
- 03 - Liga-se o compressor e o aquecedor de ar. Este último para obter a temperatura desejada.
- 04 - Alcançada a temperatura desejada, coloca-se na câmara de secagem um suporte cilíndrico, provido de malha metálica nas bases, contendo uma certa massa de bagaço pesada anteriormente. Este suporte varia de acordo com a altura do leito de bagaço que se deseja submeter ao processo de secagem.
- 05 - Em intervalos regulares durante quarenta\* minutos, retira-se o suporte da câmara para determinar o peso. Registra-se o peso e as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar de entrada e saída da câmara.
- 06 - Nos intervalos de tempo, registra-se a velocidade do ar de secagem mediante um anemômetro colocado na parte superior da câmara de secagem.

---

\* Este tempo era usado sō para alturas superiores a 1,0 cm, exceto na vazão do ar de 60 m<sup>3</sup>/h.

As determinações do peso do suporte contendo a amostra, foram feitas em balança Mettler PC 440, com precisão de leitura de 0,001g e em balança SARTORIUS-2200g, com precisão de leitura de 0.01g. As pesagens eram feitas nos seguintes intervalos de tempo: nos primeiros quinze minutos, pesava-se para 1,0 minuto, depois para cada 2,5 minutos; dos quinze aos quarenta minutos, pesava-se para cada 5,0 minutos. A retirada e pesagem do suporte era feita num tempo médio de 10 segundos.

As temperaturas registradas antes de cada pesagem, eram medidas com termopares ferro-constantan e lidas num milivoltímetro, exceto a temperatura de bulbo seco do ar de entrada, lida num registrador, conforme esquema mostrado no capítulo anterior.

A densidade aparente da amostra foi mantida praticamente constante, tendo em vista que não era objetivo deste trabalho estudar o efeito do empacotamento. Os valores estão na faixa de 0,09 a 0,11 g/cm<sup>3</sup>.

A faixa operacional utilizada foi a seguinte: A temperatura do ar de secagem variando em 88, 110 e 130°C, a vazão em 60, 100, 200 e 240 m<sup>3</sup>/h e a altura do leito em 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 e 10,0 cm.

#### 4.6 - Tratamento dos Dados Experimentais

Para traçar as curvas de secagem, fez-se antes um tratamento com os dados experimentais:

- Com a umidade inicial da amostra, determinada pelo

método descrito no item 4.3, foi calculada o peso seco da amostra, para cada ensaio, pela equação:

$$W_s = \frac{W_i}{1+U_i} \quad (4.4)$$

- A evolução do teor de umidade com o tempo foi calculada pela equação:

$$\bar{U} = \frac{\bar{W} - W_s}{W_s} \quad (4.5)$$

e a relação de umidade por:

$$U^* = \frac{\bar{U}}{U_i} \quad (4.6)$$

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

Geralmente na bibliografia sobre secagem, a umidade de equilíbrio ( $U_e$ ) é considerada no cálculo da relação de umidade ( $U^*$ ). Entretanto, devido as condições de temperaturas (elevadas) que se trabalhou e a elevada umidade do material em estudo, a umidade de equilíbrio não foi considerada nos cálculos deste trabalho, conforme indica a equação 4.6. Outro motivo foi o fato de que em quase todas as experiências realizadas foi verificado um peso final da amostra bem próximo ao seu peso seco, o que indicaria uma umidade de equilíbrio praticamente desprezível dentro do erro experimental.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho restringiu-se a estudar a secagem do bagaço de cana, em camada delgada, num leito fixo e numa determinada faixa operacional.

A partir dos resultados experimentais e posteriormente o levantamento das curvas de secagem foi verificado a influência das variáveis: Umidade inicial da amostra, altura do leito e temperatura e vazão do ar de secagem.

Com base nas curvas de secagem obtidas, foi proposta uma equação que descrevesse, com boa margem de segurança, o comportamento cinético do material em estudo submetido à operação de secagem.

#### 5.1 - Resultados Experimentais

Com os objetivos expostos acima foram realizados um total de 18 ensaios, mediante método apresentado no item 4.5 e nas condições de operação das tabelas 5.1 e 5.2. No apêndice A podem ser consultados os resultados das medições, onde se verifica que as velocidades do ar de secagem, lidas no anemômetro, apresentam um desvio entre 1,5 e 10%. A velocidade média de cada ensaio foi utilizada no cálculo da velo

Tabela 5.1

## Condições Operativas dos Ensaios

Ensaio	Altura do Leito (cm)	Vazão do Ar (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Inicial (b.s) (%)
01	1,0	240	88	194,0
02	1,0	240	110	96,0
03	1,0	240	130	115,0
04	2,0	240	88	149,0
05	3,0	240	88	141,0
06	5,0	240	88	142,5
07	10,0	240	88	164,5
08	10,0	240	110	106,0
09	10,0	240	130	93,0
10	1,0	200	88	103,5
11	1,0	100	88	120,0
12	10,0	100	88	115,0
13	10,0	100	130	112,5
14	1,0	60	88	90,0



Tabela 5.2

## Verificação do Efeito da Umidade Inicial

Ensaio	Altura do Leito (cm)	Vazão do Ar (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Inicial (b.s) (%)
A	5,0	100	88	166,0
B	5,0	100	88	68,0
C	1,0	100	110	166,0
D	1,0	100	110	68,0

cidade mássica.

A partir destas medições, foram calculadas as condições do Ar (temperatura, umidade absoluta e relativa) e as condições do bagaço (umidade em função do tempo) mediante métodos descritos nos itens 4.4 e 4.6. Os resultados se encontram no apêndice C.

## 5.2 - Curvas de Secagem

De acordo com o item 4.6, a interpretação dos dados de cada ensaio foi realizada mediante a análise das curvas de secagem sob a forma  $\ln U^*$  vs  $t$ , representadas nas figuras 5.1 a 5.9.

Observando as figuras citadas acima, verifica-se, sem exceção, a predominância do período a velocidade decrescente. Tal predominância, pode estar ligada ao fato de que os ensaios foram realizados em condições relativamente drásticas de secagem, o que possivelmente impede a existência do período a velocidade constante, encontrado por outros autores em secadores de fluxo cruzado, como foi assinalado no capítulo II.

### 5.2.1 - Efeito da Umidade Inicial da Amostra

O efeito da umidade inicial da amostra nas curvas de secagem do bagaço de cana foi verificado com a realização de quatro ensaios, conforme mostra a tabela 5.2. De acordo com esta tabela, manteve-se a vazão do ar de secagem constante e variou-se a temperatura de secagem e a altura do leito, considerando dois níveis de umidade inicial.

Nas figuras 5.1 e 5.2 estão representados os resultados dos quatro ensaios. Segundo estas figuras, os pontos correspondentes aos ensaios A e B, bem como os pontos dos ensaios C e D, coincidem praticamente numa única curva. Tal fato nos permite afirmar, que a evolução da relação de umidade com o tempo independe do teor de umidade inicial na faixa operacional estudada.

### 5.2.2 - Efeito da Altura do Leito

Como forma de verificar o efeito da altura do leito na secagem do bagaço de cana, foram comparados os ensaios 01, 04, 05, 06 e 07, realizados numa vazão de  $240 \text{ m}^3/\text{h}$  e temperatura de secagem de  $88^\circ\text{C}$ . Estes ensaios estão representados na figura 5.3.

Mediante observações da figura 5.3 verifica-se, que para todo o período de secagem, quanto maior a altura do leito, maior o intercepto da reta extrapolada, conseqüentemente a relação de umidade é maior. Tal fato indica que a velocidade de secagem diminui com a altura do leito.

O efeito da altura do leito no comportamento cinético da secagem do bagaço de cana também foi verificado por

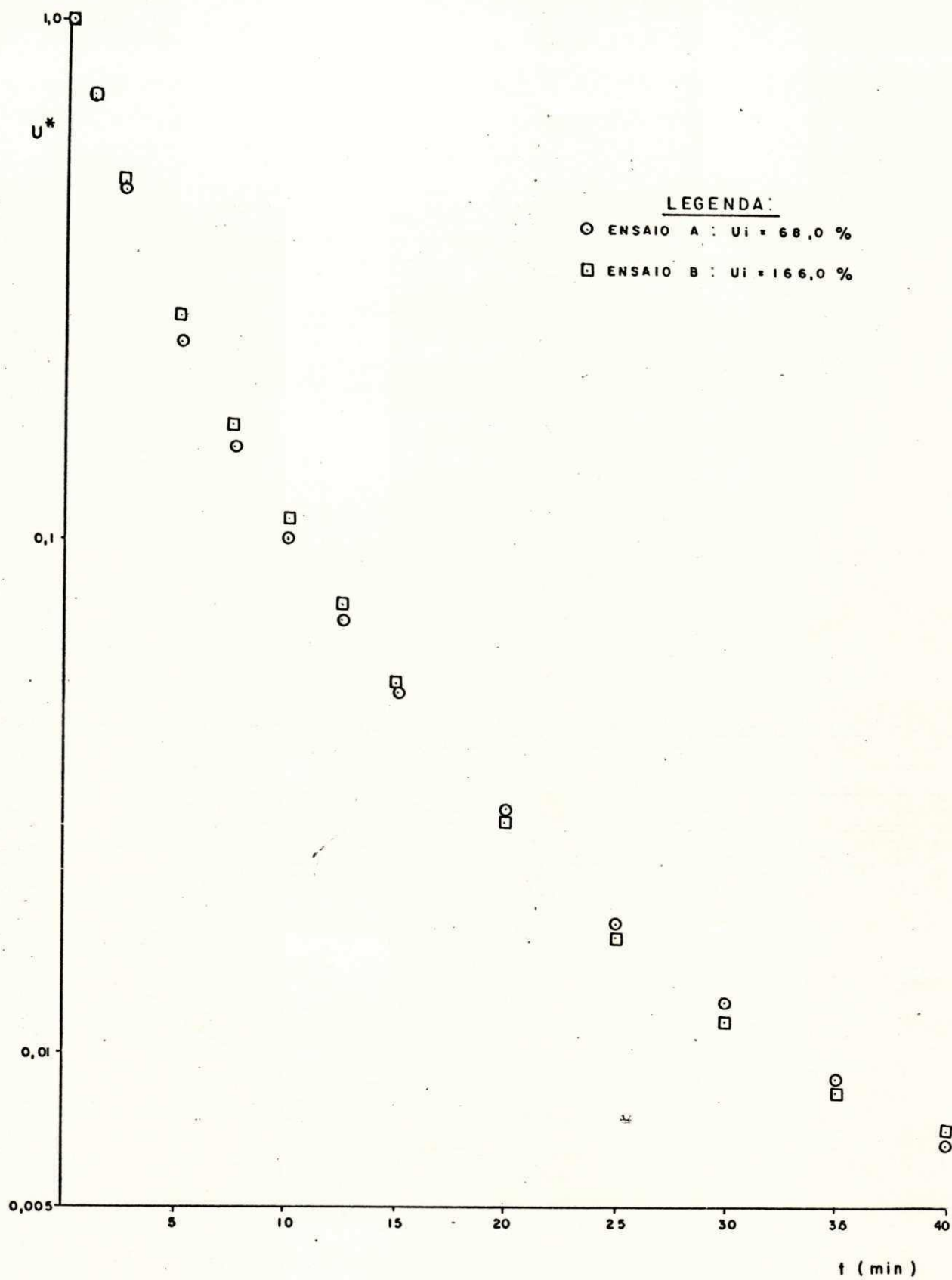


FIGURA 5.1 — CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA UMIDADE INICIAL DA AMOSTRA

VZ =  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ; A =  $5,0 \text{ cm}$ ; T =  $88^\circ \text{C}$

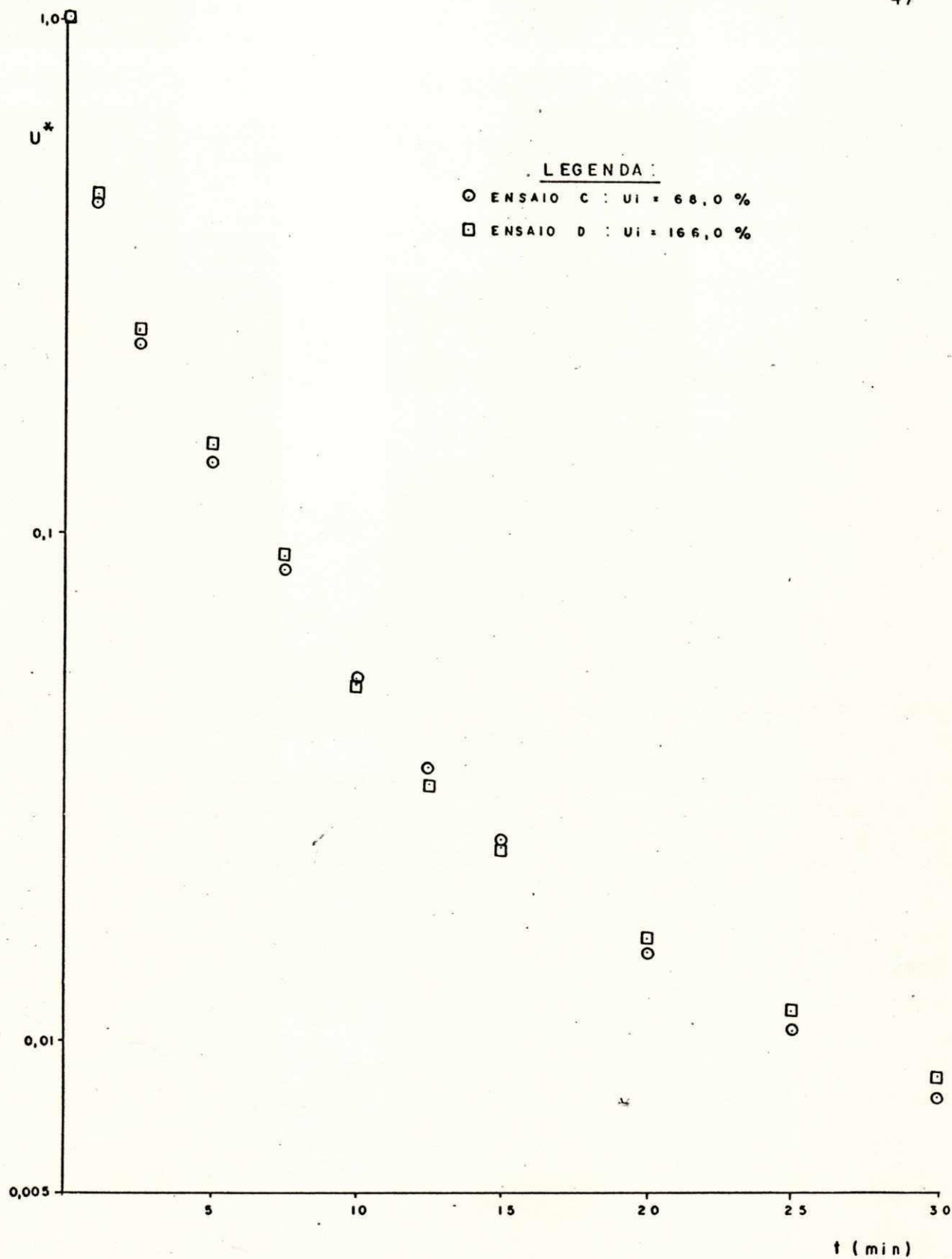


FIGURA 5.2 — CURVA DE SECAGEM : INFLUÊNCIA DA UMIDADE INICIAL DA AMOSTRA

VZ =  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  ; A =  $1,0 \text{ cm}$  ; T =  $110 \text{ }^\circ\text{C}$

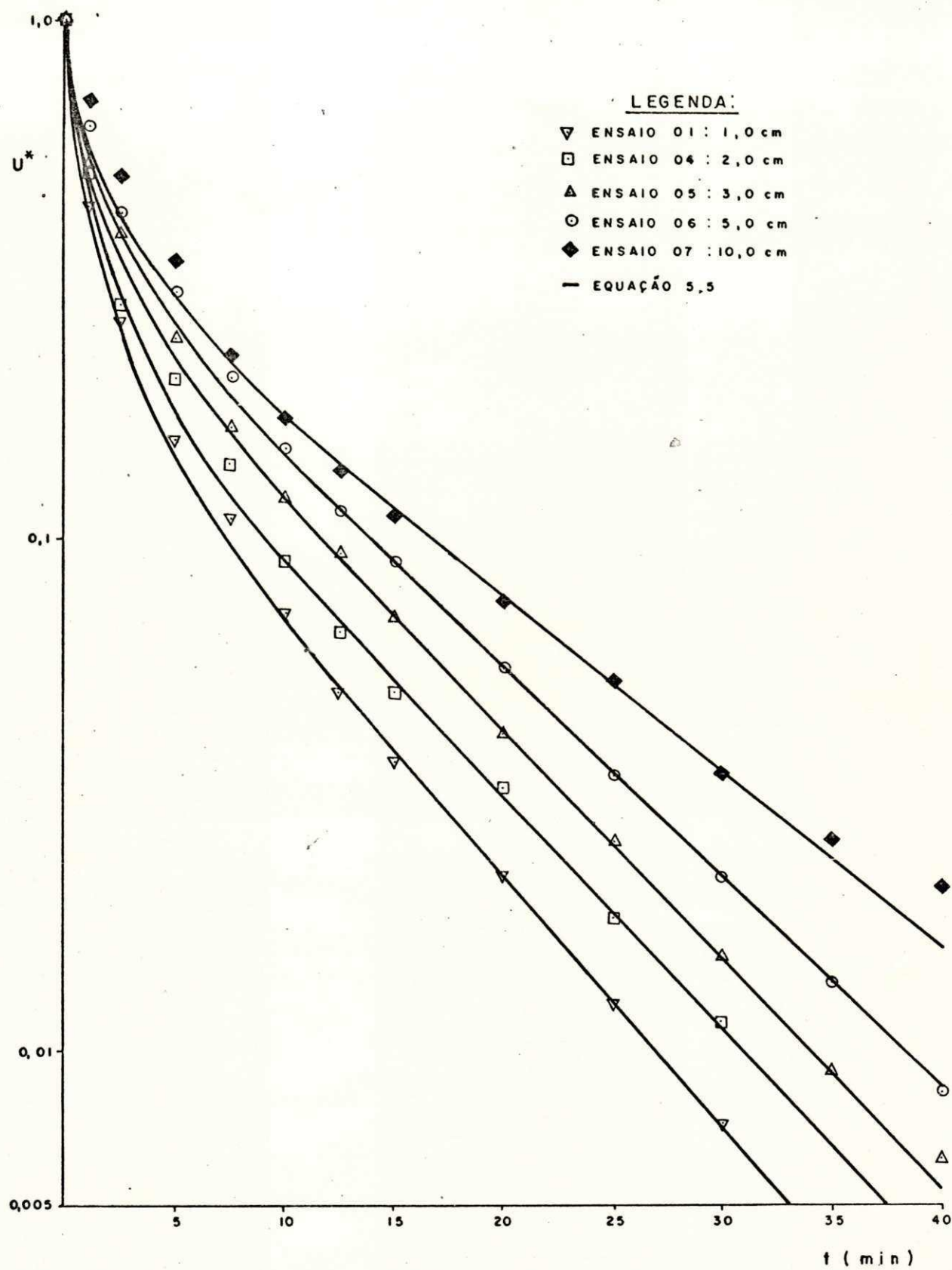


FIGURA 5.3 — CURVA DE SECAGEM : INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO  
 $VZ = 240 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $T = 88^\circ\text{C}$ .

MASSARANI & VALENÇA (1981) num trabalho realizado, em cama da fina, com o citado material.

### 5.2.3 - Efeito da Temperatura do Ar de Secagem

Para análise do efeito da temperatura sobre a secagem do bagaço de cana, manteve-se a altura do leito e a vazão do ar de secagem constantes e variou-se a temperatura, conforme tabela 5.1.

Na figura 5.4 estão representados os ensaios 01, 02 e 03, realizados com uma altura do leito de 1,0 cm e uma vazão do ar de  $240 \text{ m}^3/\text{h}$  em três níveis de temperaturas de secagem: 88; 110 e  $130^\circ\text{C}$ . Analogamente, na figura 5.5 estão representados os ensaios 07, 08 e 09, realizados sob iguais condições de vazão e temperaturas, mas com uma altura do leito de 10,0 cm. Na figura 5.6 estão representados os ensaios 12 e 13 realizados com uma altura do leito de 10,0 cm e vazão do ar de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  em dois níveis de temperatura: 88 e  $130^\circ\text{C}$ .

Mediante observação das figuras citadas acima, verifica-se que a temperatura exerce pouca influência nos primeiros minutos de secagem, no caso de  $88^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$  especialmente; porém em tempos superiores a 5 minutos a influência desta variável é considerável sendo mais acentuada em temperaturas elevadas, neste caso,  $130^\circ\text{C}$ .

Quando observadas as figuras 5.4 e 5.5, verifica-se que existe uma certa diferença quanto ao efeito da temperatura

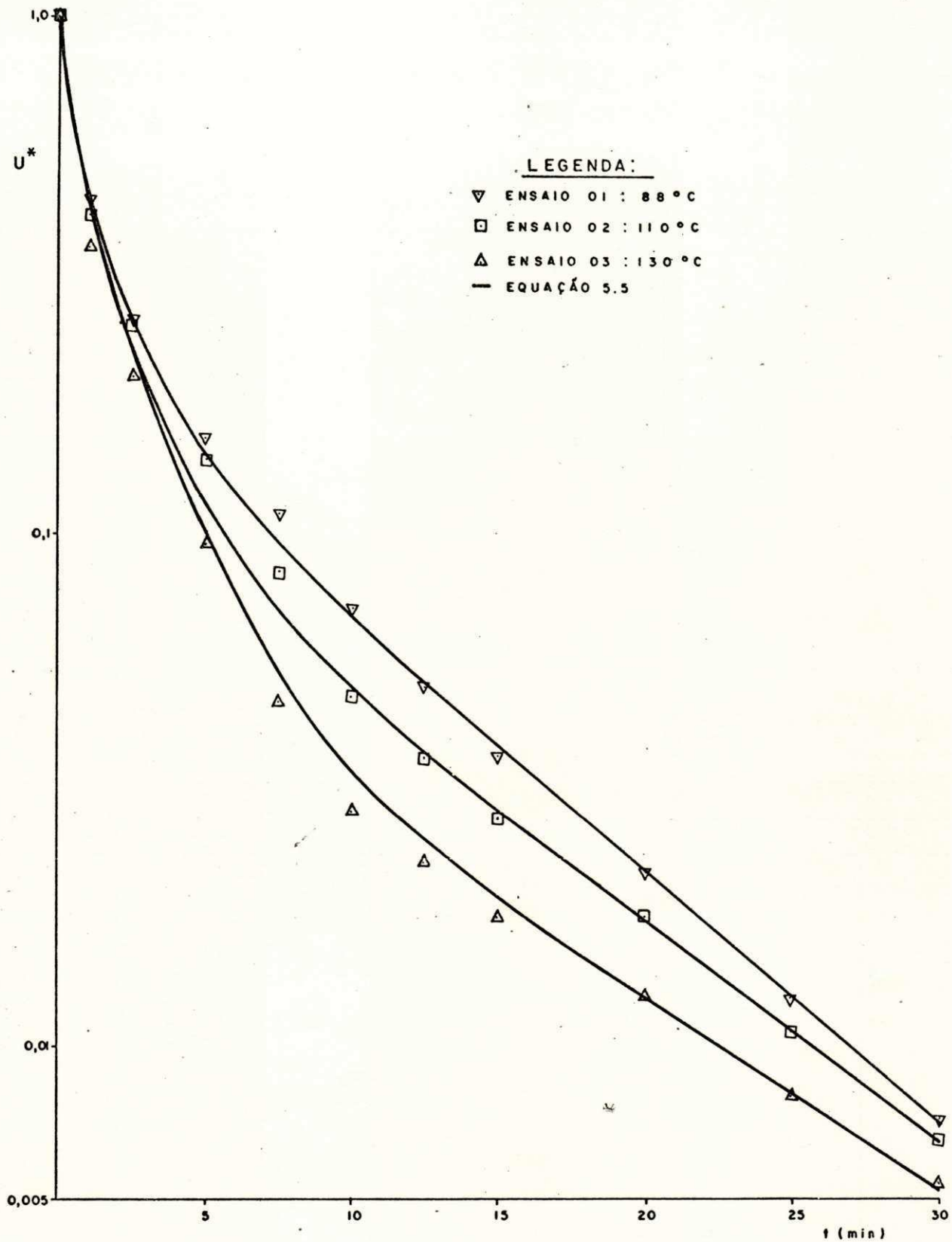


FIGURA 5.4 - CURVA DE SECAGEM : INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM.  
 VZ = 240 m<sup>3</sup>/h ; A = 1,0 cm



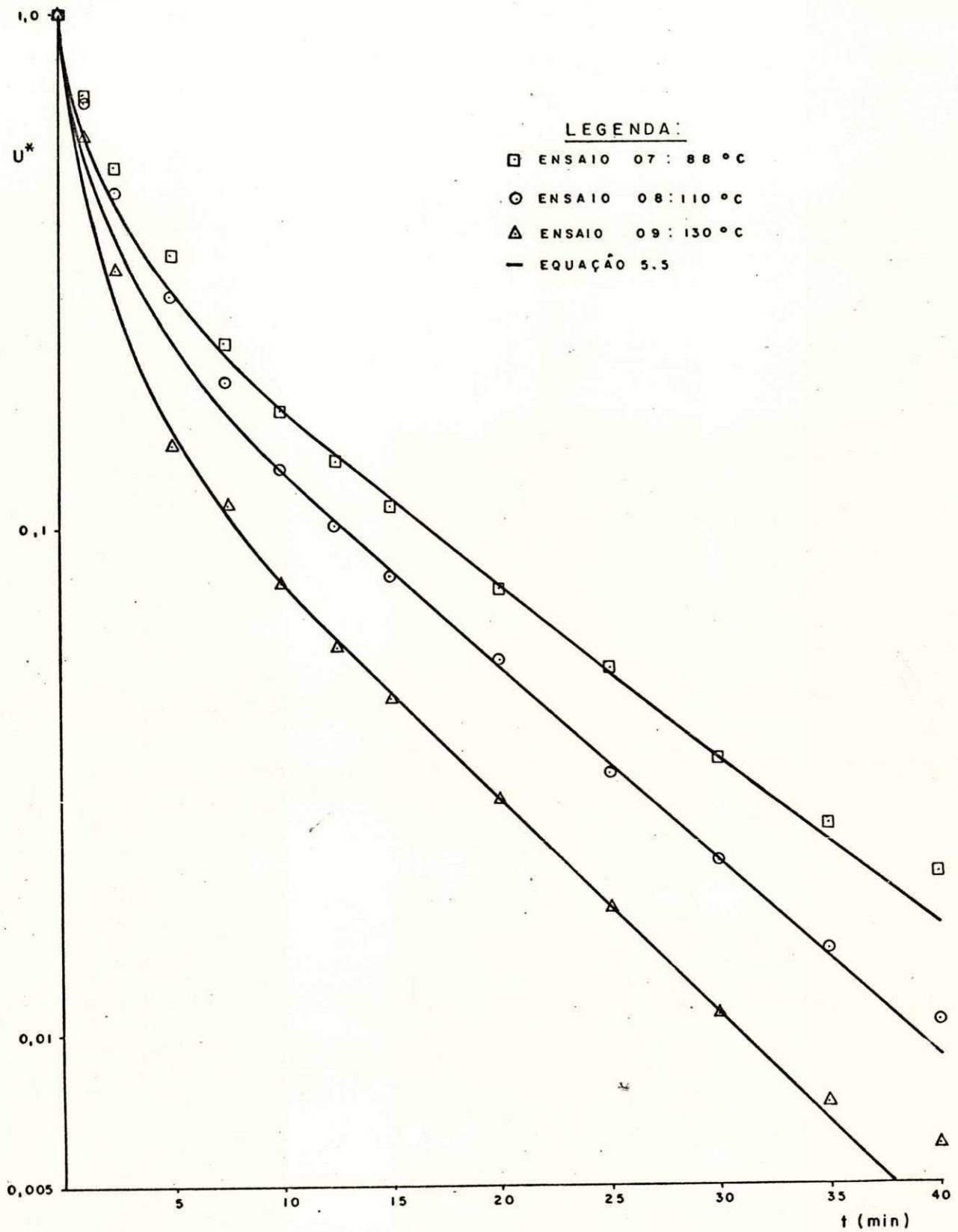


FIGURA 5.5 - CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM:

VZ = 240 m<sup>3</sup>/h ; A = 10,0 cm

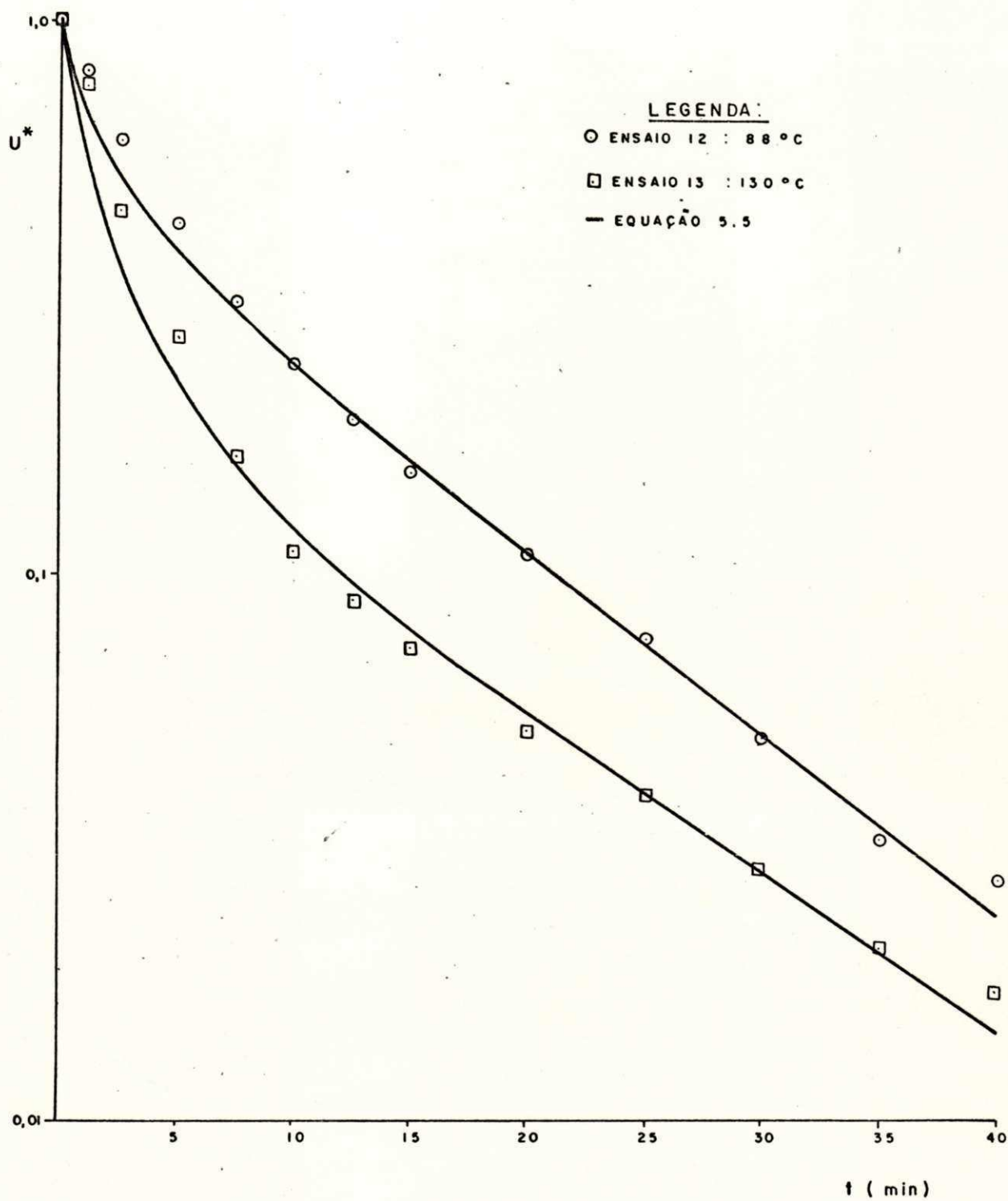


FIGURA 5.6 — CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM.  
 VZ = 100 m<sup>3</sup>/h ; A = 10,0 cm

nas curvas de secagem. Na figura 5.4 observa-se que tal efeito é menor quando comparado com o observado na figura 5.5, onde é mais acentuado. Esta diferença é inesperada, tendo em vista que os ensaios, representados em ambas figuras, foram realizados em iguais condições de vazão e temperaturas, portanto é de se esperar que o efeito da temperatura seja o mesmo nas duas figuras. Entretanto, se aceitarmos a hipótese, de que a uniformização da temperatura na amostra depende da profundidade do leito, sendo mais rápida para uma menor altura de bagaço a diferença acima mencionada terá como explicação, o fato de que os ensaios representados na figura 5.4 foram realizados com uma altura do leito de 1,0 cm, enquanto que os ensaios representados na figura 5.5 foram realizados com uma altura do leito de 10,0 cm.

#### 5.2.4 - Efeito da Vazão do Ar de Secagem

O efeito da vazão do ar no comportamento cinético da secagem do bagaço de cana, foi verificado a partir dos resultados dos ensaios representados nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

Na figura 5.7 estão representados os ensaios 01, 10, 11 e 14, nos quais manteve-se a temperatura de secagem (88°C) e a altura do leito (1,0 cm) constantes e variou-se a vazão do ar (240 a 60 m<sup>3</sup>/h). Analogamente, na figura 5.8 estão representados os ensaios 07 e 12, realizados sob iguais condições de temperatura, mas com uma altura do leito de 10,0 cm e vazões de 240 e 100 m<sup>3</sup>/h. Na figura 5.9 estão representados os ensaios 09 e 13, realizados sob iguais condições, anteriormen

te citadas, de vazão a altura do leito numa temperatura de 130°C.

Observando as figuras citadas acima, verifica-se que a vazão do ar exerce uma considerável influência nas curvas de secagem. Entretanto, se compararmos as figuras 5.7 e 5.8, onde estão representados os ensaios realizados sob iguais condições de temperatura, e consideramos condições de escoamento iguais, no caso, 240 e 100 m<sup>3</sup>/h, observa-se que a influência da vazão é bem maior na figura 5.7 do que na figura 5.8.

A considerável influência da vazão do ar na taxa de secagem, observada na figura 5.7, pode indicar que a resistência externa controla o processo. Contudo, foi observado que dita variável exerce pouca influência em algumas curvas de secagem, conforme figura 5.8. Tais observações nos permitem supor que exista mais de um mecanismo envolvido no processo. Portanto, para o sistema em estudo e na faixa operacional utilizada, é possível que o controle de transferência seja misto.

MASSARANI & VALENÇA (1981), num trabalho realizado sobre a secagem do bagaço de cana, em camada fina, verificaram que as condições de escoamento influenciavam a cinética de secagem do citado material, confirmando assim as nossas observações.

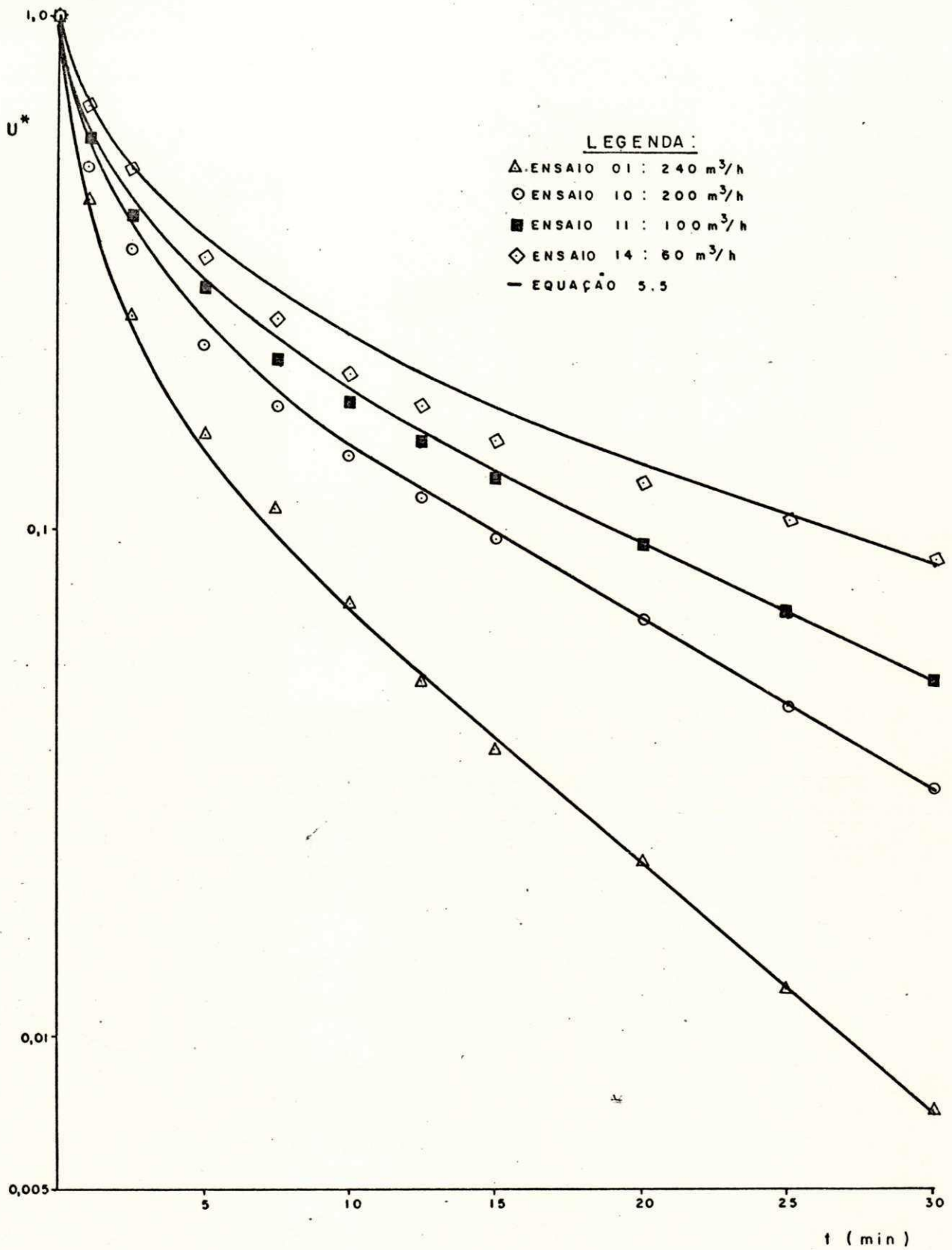


FIGURA 5.7— CURVA DE SECAGEM : INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM.

T = 88°C i A = 1,0 cm

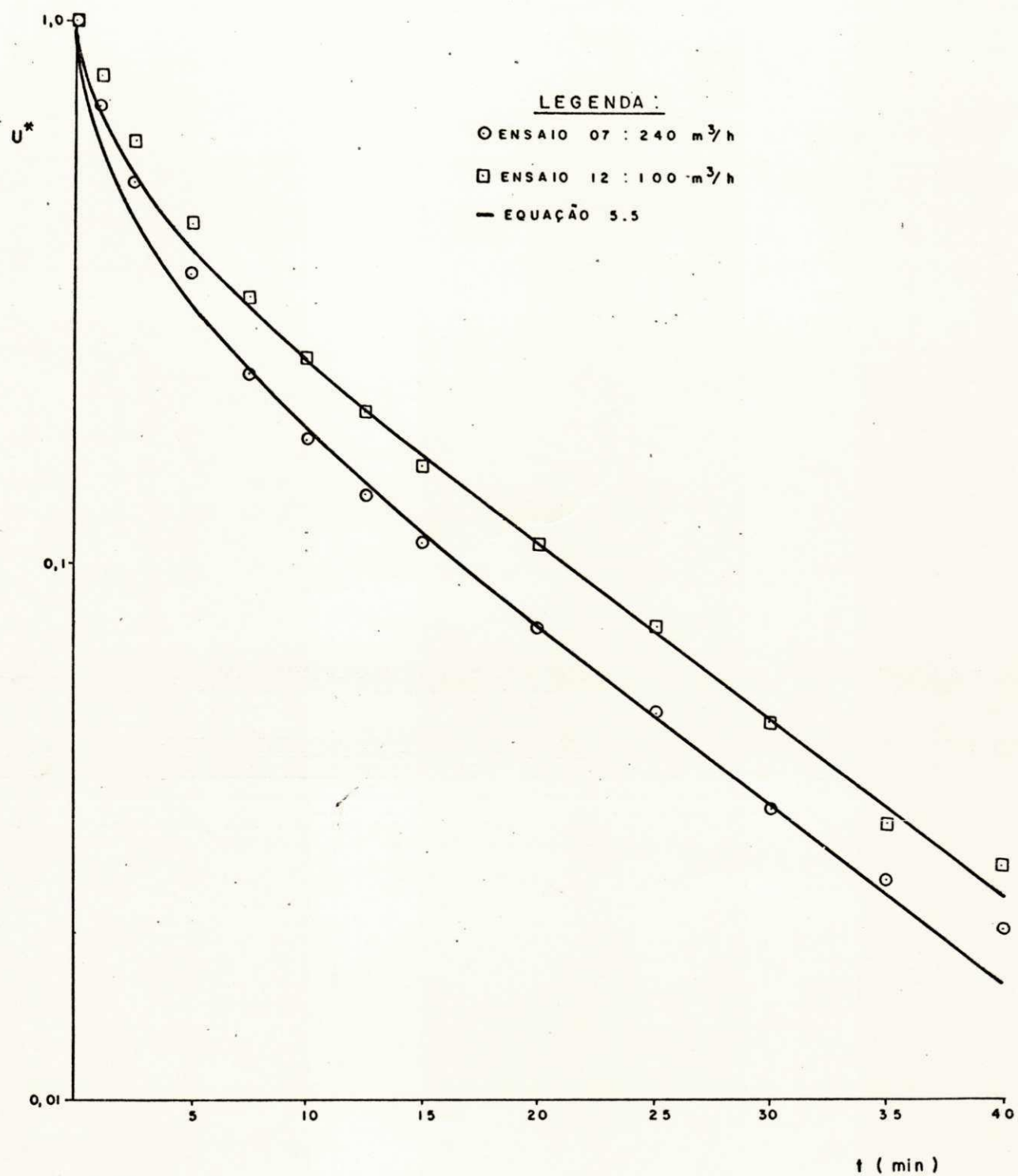


FIGURA 5.8 — CURVA DE SECAGEM: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM.

$T = 88^{\circ}\text{C}$  ;  $A = 10,0\text{ cm}$

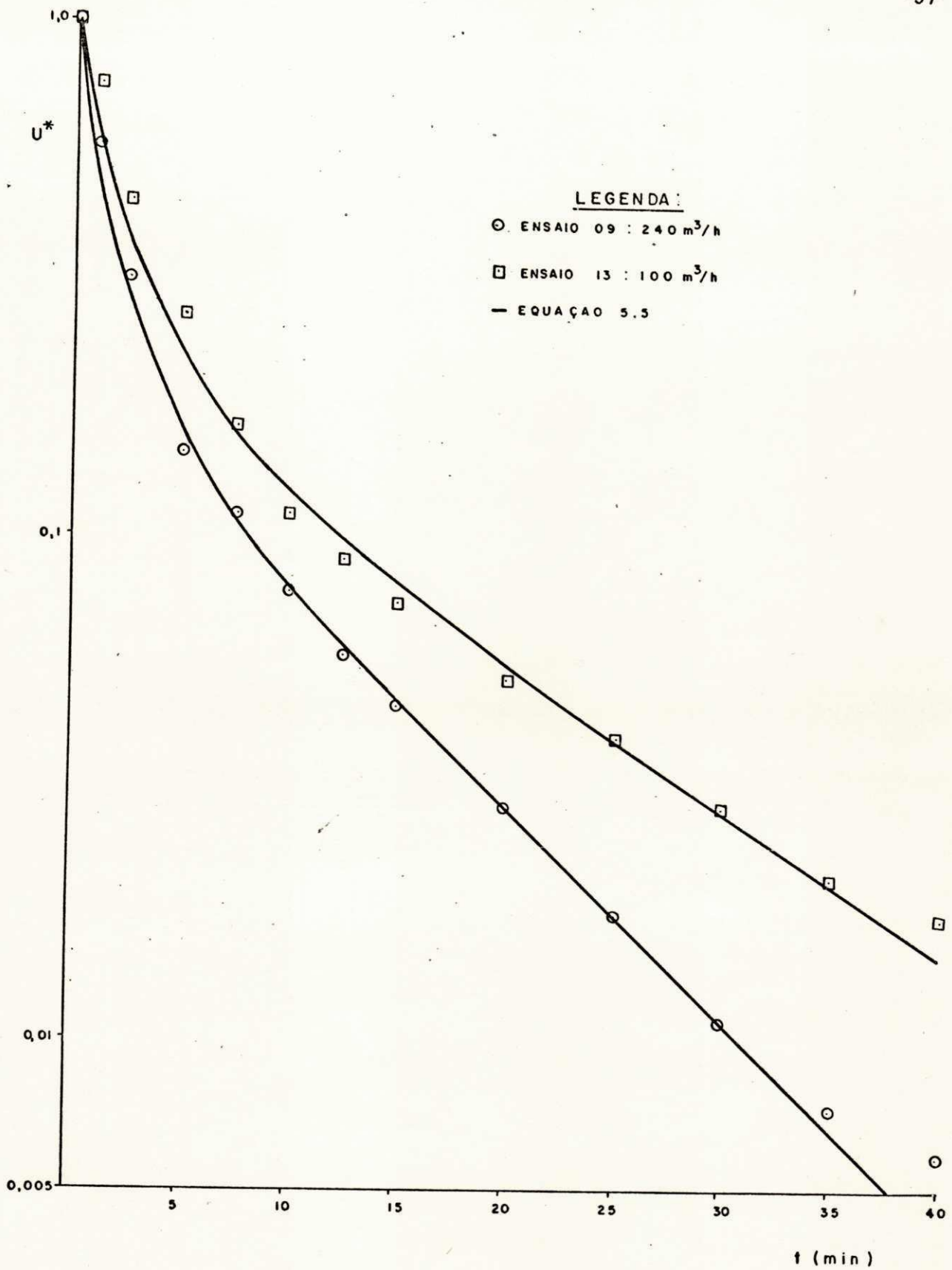


FIGURA 5.9 — CURVA DE SECAGEM : INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM.

T = 130 °C ; A = 10,0 cm

### 5.3 - Análise dos Resultados

Com base nos resultados observados, foram propostos dois modelos semi-empíricos com o objetivo de encontrar o que melhor ajustasse os dados experimentais e assim, descrevesse o comportamento cinético da secagem do material em estudo, na faixa operacional utilizada.

#### 5.3.1 - Modelo da Potência

Para levar em conta os diversos mecanismos envolvidos, no modelo da potência postula-se que no período decrescente a taxa de secagem corresponde a um processo de ordem  $n$  no teor de umidade, conforme a seguinte equação:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = - C' \bar{U}^n \quad (5.1)$$

Com a condição inicial  $\bar{U}(0) = U_i$ , a relação de umidade pode ser obtida mediante integração da equação 5.1, resultando:

$$U^* = [C_1 t + C_2]^{1/POT} \quad (5.2)$$

onde

$$POT = (-n+1)$$

$$C_1 = C'(n-1)/U_i^{(-n+1)}$$

$$C_2 = 1$$

$$t = \text{tempo de secagem}$$



Para correlacionar os dados experimentais dos ensaios, procedeu-se a um ajuste por mínimos quadrados da equação 5.2 na forma:

$$U^* \text{ POT} = C_1 t + C_2 \quad (5.2.a)$$

Como o ajuste foi realizado por regressão linear, utilizou-se um método de tentativas no valor do parâmetro POT com o objetivo de encontrar aquele que correspondesse a um menor desvio padrão da estimativa.

Considerando que para  $n = 0$  (POT=1) o processo representaria secagem a taxa constante e que para  $n = 1$  (POT=0) a relação de umidade teria uma evolução exponencial com o tempo, no procedimento por tentativas eliminou-se, a priori, estas duas condições, haja visto que nenhuma destas correspondem às curvas experimentais obtidas.

Os resultados do ajuste apresentaram duas dificuldades básicas:

- a) Nenhuma das potências propostas satisfaziam a condição inicial  $C_2 = 1$ , em geral, para todos os ensaios.
- b) Não existia um único valor da potência que ajustasse uniformemente todos os ensaios.

A objeção mais séria é com relação à primeira dificuldade, já que a segunda poderia ser melhorada considerando que a ordem do processo seria função das condições de operação (vazão, temperatura, espessura). Apesar destas objeções, colocaremos os resultados para fins de posterior comparação.

O valor de POT que correspondeu a um menor desvio pa

drão, levando em conta os catorze ensaios, foi de (-0.4) ou  $n = 1,4$ . Os resultados do ajuste com este valor de POT encontram-se na tabela 5.3.

### 5.3.2 - Modelo de COURA e ALSINA Modificado

Tendo em vista que o modelo da potência não apresentou um ajuste satisfatório, especialmente em relação à condição inicial, foi necessário ensaiar um outro modelo.

COURA & ALSINA (1985) propuseram que a segunda lei de Fick descreve o comportamento da secagem da casca de caroço de algodão em camada fina. As soluções da lei de Fick, já assinaladas no capítulo II, são da forma, segundo LUIKOV (1966):

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

onde

$K$  = constante de secagem. Depende do coeficiente de difusão e da geometria do material

$\theta_n$  e  $B_n$  = coeficientes que dependem do número de Biot e da geometria do material.

Para o caso de materiais fibrosos e de geometria irregular, COURA & ALSINA (1985) com base na equação 5.3, desenvolveram uma equação (já referida no capítulo II) que satisfaz a condição inicial  $U^*(0) = 1$ , conforme se verifica abaixo:

$$U^* = \theta \text{Exp} (-Kt) + (1-\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{Exp} [ - [(2n+1)^2 + 1] Kt ] \quad (2.10)$$

Tabela 5.3

## Resultados do Ajuste pelo Modelo da Potência

Ensaio	$C_1$	$C_2$	Desvio Padrão	Coefficiente de Correlação	$U^*(t=0)$
1	0,1915	1,0373	0,0674	0,9945	0,9125
2	0,2036	1,1530	0,1015	0,9980	0,7005
3	0,2262	1,1248	0,1976	0,9935	0,4127
4	0,1556	1,0677	0,0686	0,9959	0,8488
5	0,1555	0,8489	0,2137	0,9898	1,5062
6	0,1320	0,8664	0,1837	0,9883	1,4312
7	0,0904	1,0683	0,0473	0,9991	0,8478
8	0,1241	0,9722	0,0478	0,9968	1,0729
9	0,1665	1,0773	0,0553	0,9974	0,8302
10	0,0914	1,2164	0,1311	0,9943	0,6127
11	0,0700	1,2080	0,1279	0,9921	0,6235
12	0,0790	0,9727	0,0390	0,9968	1,0717
13	0,0992	1,2018	0,1355	0,9947	0,6316
14	0,0486	1,2536	0,1421	0,9812	0,5683

Para tempos grandes, apenas o primeiro termo da equação 2.10 é significativo, correspondendo à porção reta da curva de secagem, chamada de período de regime regular por LUIKOV (1966).

Analisando as figuras 5.1 a 5.9, observa-se que a porção correspondente ao regime regular depende das condições de operação, iniciando-se em geral a partir dos 10 minutos de secagem. Em consequência, utilizou-se o primeiro termo da equação 2.10 na forma:

$$\ln U^* = \ln \theta - K t \quad (5.4)$$

determinando por regressão linear, mediante ajuste dos pontos obtidos em tempos grandes, os valores dos parâmetros  $\theta$  e  $K$ ; ver tabela 5.4. No apêndice D pode ser consultado o programa utilizado para o cálculo destes parâmetros.

Com os parâmetros assim obtidos foi verificado o ajuste das curvas completas mediante a equação 2.10. Observou-se que dita equação era insatisfatória na predição do comportamento das curvas nos instantes iniciais, dando valores de umidades inferiores aos obtidos experimentalmente. Isto significa que os termos superiores da série devem ter maior peso no caso do bagaço de cana. Portanto, sugeriu-se uma modificação na equação de COURA & ALSINA, com coeficientes  $B_n$  menores, de modo a obter-se um melhor ajuste.

Neste sentido, foram ensaiadas diversas formas do coeficiente  $B_n$ , até encontrar aquela que conduzisse ao menor desvio padrão para todos os ensaios; obtendo-se a seguinte equação cinética:

$$U^* = \theta \text{ Exp } (-Kt) + (1-\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \text{ Exp } [-(n^3+3n+1) Kt] \quad (5.5)$$

No apêndice D se encontra o programa utilizado para o cálculo do grau de ajuste da equação 5.5 com os pontos experimentais. O programa permite calcular a relação de umidade utilizando o número de termos da série necessários, conforme a tolerância especificada ( $10^{-5}$ ).

Os critérios estatísticos utilizados foram: desvio padrão e erros relativos dos valores de  $U^*$  estimados comparados com os valores experimentais. Os resultados encontram-se na tabela 5.4, onde se verifica que o maior desvio padrão é de 0,0688 e o erro médio é inferior a 9,53%; sendo que 88% dos pontos experimentais apresentam desvio relativo menor que 15%. Estes valores são satisfatórios, já que estão dentro do esperado para o tipo de material em estudo. Detalhes dos resultados podem ser consultados no apêndice E.

O ajuste pode ser melhor visualizado nas figuras 5.3 a 5.9, onde se observa que as curvas teóricas coincidem, dentro de uma margem razoável, com as curvas experimentais.

Uma comparação dos dois modelos pode ser feita através do desvio padrão de cada ensaio, indicado nas tabelas 5.3 e 5.4. Observa-se que, com exceção do ensaio 12, em todos os casos o desvio padrão do modelo da potência é maior do que o correspondente ao outro modelo, com valores até quinze vezes maiores em alguns casos. Portanto, o modelo de COURA & ALSINA modificado apresenta melhor ajuste com os dados experimentais.

Tabela 5.4

Resultados do ajuste dos dados experimentais pela eq. 5.5

(continua)

Ensaio	A (cm)	T (°C)	G (g/cm <sup>2</sup> .min)	K (min <sup>-1</sup> )	$\theta$	Desvio Padrão	Erro Relativo Médio (%)
01	1,0	88	14,4	0,1131	0,2128	0,0071	3,33
02	1,0	110	14,4	0,0988	0,1277	0,0144	5,55
03	1,0	130	12,6	0,0831	0,0647	0,0282	9,53
04	2,0	88	14,4	0,1026	0,2453	0,0152	5,14
05	3,0	88	14,4	0,1024	0,3313	0,0140	3,09
06	5,0	88	14,4	0,0943	0,3743	0,0227	3,52
07	10,0	88	14,0	0,0777	0,3635	0,0394	6,74
08	10,0	110	14,4	0,0885	0,3115	0,0491	7,73
09	10,0	130	12,6	0,0971	0,2004	0,0332	6,87
10	1,0	88	12,0	0,0757	0,3014	0,0277	5,11
11	1,0	88	6,0	0,0624	0,3306	0,0232	4,78

(conclusão)

Ensaio	A (cm)	T (°C)	G (g/cm <sup>2</sup> .min)	K (min <sup>-1</sup> )	θ	Desvio Padrão	Erro Relativo Médio (%)
12	10,0	88	6,0	0,0759	0,4994	0,0500	6,09
13	10,0	130	5,4	0,0662	0,2056	0,0688	9,25
14	1,0	88	3,6	0,0402	0,2857	0,0210	6,98

### 5.3.2.1 - Efeito das Variáveis de Operação sobre os parâmetros K e $\theta$

O efeito das variáveis de operação sobre K e  $\theta$  pode observar-se nas tabelas 5.5 e 5.6, onde se verifica o seguinte comportamento:

- O parâmetro K apresenta uma leve tendência decrescente com a altura do leito na velocidade mássica de 14,4 g/cm<sup>2</sup> min, porém este fato não é confirmado nos ensaios conduzidos a velocidades menores. Quanto a  $\theta$ , em geral, o efeito da altura é mais acentuado, tendendo a crescer com o aumento desta variável.

- Com relação à velocidade mássica, considerando as outras variáveis constantes, observa-se que K aumenta e  $\theta$  diminua com o aumento desta variável.

- Quanto à temperatura, como foram estudados apenas três níveis desta variável, as observações devem ser consideradas com precaução, requerendo-se maiores estudos para tirar conclusões definitivas. Analisando os poucos dados disponíveis, observa-se que não há efeito definido da temperatura sobre K, enquanto que  $\theta$  apresenta uma tendência decrescente com o aumento desta variável.

Com o objetivo de quantificar as observações acima, os parâmetros K e  $\theta$  foram correlacionados com as variáveis operacionais mediante a seguinte dependência funcional proposta:

$$K = X \cdot A^{X1} \cdot G^{X2} \quad (5.6)$$

$$\theta = Z \cdot A^{Z1} \cdot G^{Z2} \cdot T^{Z3} \quad (5.7)$$



Tabela 5.5

Comportamento do Parâmetro K

T (°C)	A (cm)	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0
	G(g/cm <sup>2</sup> .min)					
88 ± 1	14,4	0,1131	0,1026	0,1024	0,0943	0,0777
	12,0	0,0757	-	-	-	-
	6,0	0,0624	-	-	-	0,0759
	3,6	0,0402	-	-	-	-
110 ± 1	14,4	0,0988	-	-	-	0,0885
130 ± 1	12,6	0,0831	-	-	-	0,0971
	5,4	-	-	-	-	0,0662

Tabela 5.6

Comportamento do Parâmetro  $\theta$ 

T (°C)	A (cm)	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0
	G (g/cm <sup>2</sup> .min)					
88 ± 1	14,4	0,2128	0,2453	0,3312	0,3743	0,3635
	12,0	0,3014	-	-	-	-
	6,0	0,3306	-	-	-	0,4994
	3,6	0,2857	-	-	-	-
110 ± 1	14,4	0,1277	-	-	-	0,3117
130 ± 1	12,6	0,0647	-	-	-	0,2004
	5,4	-	-	-	-	0,2056

As constantes das equações (5.6) e (5.7) foram determinadas mediante análise de regressão linear múltipla. Os resultados encontrados foram os seguintes:

$$K = 0,0238 (A)^{0,0098} (G)^{0,513} \quad (5.8)$$

$$\text{Desvio Padrão} = 0,0119$$

$$\text{Erro Relativo Médio da Estimativa} = 10,3\%$$

$$\text{Coeficiente de Correlação Múltipla} = 0,856$$

$$\theta = 4521 \frac{(A)^{0,285}}{(T)^2 \cdot (G)^{0,362}} \quad (5.9)$$

$$\text{Desvio Padrão} = 0,0562$$

$$\text{Erro Relativo Médio da Estimativa} = 16,7\%$$

$$\text{Coeficiente de Correlação Múltipla} = 0,876$$

A análise de regressão confirma que K praticamente in depende da altura, já que o expoente encontrado para esta va riável é bem próximo de zero, conforme indica a equação 5.8.

A equação 5.5, juntamente com as equações 5.8 e 5.9 , permitem prever a cinética de secagem do bagaço de cana na faixa operacional utilizada neste trabalho.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir:

- 1 - A secagem do bagaço de cana ocorreu sempre, no período a velocidade decrescente.
- 2 - A umidade inicial não exerce influência nas curvas de secagem, na faixa operacional estudada.
- 3 - A evolução de  $U^*$  com o tempo, é influenciada pela altura do leito. A velocidade de secagem será mais lenta quanto maior for a altura do leito.
- 4 - A influência da temperatura nas curvas de secagem em tempos superiores a cinco minutos é significativa. Entretanto, se requer mais estudos para tirar conclusões definitivas quanto ao efeito desta variável.
- 5 - As condições de escoamento, consideradas neste trabalho, influenciam a cinética de secagem do bagaço de cana.
- 6 - O modelo da potência mostrou-se insuficiente para descrever a cinética de secagem do bagaço nas condições de operação estudadas. Apresentando a desvantagem de não se ter um único valor da potência que faça cumprir a condição inicial  $U^*(0)=1,0$  e ajuste uniformemente todos os ensaios.

- 7 - O modelo de COURA & ALSINA modificado descreve a cinética de secagem do bagaço de cana na faixa operacional utilizada. Apresenta um ajuste satisfatório para todos os ensaios e cumpre a condição inicial.
- 8 - O parâmetro  $K$  da equação 5.5 aumenta com o aumento da velocidade mássica, sendo praticamente independente da altura do leito e temperatura de operação.
- 9 - O parâmetro  $\theta$  da equação 5.5 cresce com o aumento da altura do leito e decresce com a velocidade mássica e a temperatura do ar.
- 10 - Os valores de  $K$  e  $\theta$  para diversas condições, dentro do intervalo estudado no presente trabalho, podem ser preditos com aproximação razoável mediante as equações 5.8 e 5.9.
- 11 - A equação 5.5, em conjunto com as equações 5.8 e 5.9, permitem avaliar a evolução de umidade na secagem do bagaço de cana em leito fixo, dentro dos limites operacionais estudados.

## CAPÍTULO VII

### SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Em vista dos resultados apresentados, e para que se tenha mais conhecimento sobre a secagem do bagaço de cana em leito fixo, sugere-se:

- 1 - Verificar o efeito do empacotamento durante o processo de secagem.
- 2 - Verificar o comportamento do bagaço submetido às mesmas condições de secagem, mas em alturas superiores a 10 cm.
- 3 - Ensaiar o modelo da potência, levando também em consideração, o efeito das variáveis de operação.
- 4 - Investigar melhor o efeito da temperatura, realizando ensaios complementares.
- 5 - Trabalhar com vazões mais baixas de modo a se aproximar das condições existentes num secador de fluxo cruzado.
- 6 - Simulação do processo, levando em conta o sistema de equações diferenciais para a transferência simultânea de calor e massa, e comparação dos resultados da simulação com os dados experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - ALMEIDA, B. V. et alii. "Determinação de Porosidade para cacau em amêndoas". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, 2:606-612, 1979.
- 02 - ALVARENGA, L.C. et alii. "Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem". Rev. Bras. de Armaz., Viçosa, 5(1): 5-18, 1980.
- 03 - BARBOSA, R.D. & MENEGALLI, F.C. "Estudo da Velocidade terminal e coeficiente de arraste para bagaço de cana". Anais do XIV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, UNICAMP, 291-301, 1986.
- 04 - BERGER, D & PEY, D.C.T. "Drying of higroscopic capillary Porous Solids. A theoretical approach In". Journal of Heat and Mass Transfer, 16: 293-302, 1973, apud ALVARENGA, L.C. et alii, "Transporte...", op.cit., p.7.
- 05 - CASSIE, A.B.D.J., apud CRANCK, J. "The Mathematics of Diffusion". Segunda edição, University Press, Oxford, 1975.
- 06 - CEAGLSKE, N.H. & HOUGEN, O.A. "Drying granular solids". Ind. Eng. Chem., 29: 805-813, 1937.
- 07 - CHEN, C.S. & JOHNSON, W.H. "Kinetics of moisture movement in higroscopic materials". Transactions of the ASAE, 12(1): 109-113, 1969
- 08 - CHUNG, D.S. & CONVERSE, H.H. "Effect of Moisture content on some physical properties of grains". Transac

- tions of ASAE, 14(4): 612-614 e 620, 1971, apud ALMEIDA, B.V. et alii, "Determinação...", op. cit., p.607.
- 09 - COSTA, G.M.M. "Melhoria do balanço térmico com o uso de secador de bagaço". VI Encontro Técnico Região Centro-Sul de Alagoas, Usina Triunfo, 1983.
- 10 - COULSON, J.M. & RICHARDSON, J.F. "Tecnologia Química O perações Unitárias, II". Segunda edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.698, 1968.
- 11 - COURA, T.L.B & ALSINA, O.L.S. "Secagem de casca de caro ço de algodão: estudo cinético em camada fina". Anais do V Encontro Nacional de Secagem, Lavras, 1985.
- 12 - CRANCK, J. "The Mathematics of Diffusion". Segunda edi ção, University Press, Oxford, 405 P., 1975.
- 13 - FORTES, M. & OKOS, M.R. "A non-equilibrium thermodyna - mics approach to transport Phenomena in Capillary- po rous media". Proceedings of the First International Symposium on Drying, Science Press, Princeton 1978, apud ALVARENGA, L.C. et alii, "Transporte...", op.cit., p.7.
- 14 - GUILHON, C.V. "Bagaço de cana-Substituto Potencial do ó leo combustível". Brasil Açucareiro-V.XCIX, p.17-21, janeiro 1982.
- 15 - HAINES, W.B. "Studies in the physical properties of soil IV: A further contribution to the theory capillary Ph enomena in soil". J. Agric.Sci., 17: 264-290, 1927.
- 16 - HENRY, P.S.H. "Diffusion in absorbing media". Proc.Royal Society, A. 171: 215- , 1939.

- 17 - HUGOT, E. "Handbook of cane sugar Engineering". Segunda edição, Amsterdam, Elsevier, 1972.
- 18 - LEWIS, W. K. "The rate of drying of solid materials" . Ind. Eng. Chem., 13: 427-432, 1971.
- 19 - LUIKOV, A.V. "Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies". In: Advances in heat transfer. New York, Academic Press, I , 1966, apud ALVARENGA, L.C. et alii. "Transporte....", op. cit., p.8.
- 20 - MARANHÃO, L.E.C. & COSTA, G.M.M. "A eficiência das caldeiras com o uso de secadores de bagaço". II Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros do Brasil, 1981.
- 21 - MARANHÃO, L.E.C. "Secagem de bagaço". Seminário de Avaliação do bagaço, São Paulo, 1983.
- 22 - MARIZ, T.F. "Secagem de Casca de Carvão de Algodão em Leito Fixo". Universidade Federal da Paraíba, Campus II, 1986 (Tese de Mestrado).
- 23 - MASSARANI, G. & VALENÇA, G.C. "Secagem de bagaço de cana". Anais do III Encontro Nacional de Secagem, p.355, Viçosa, 1981.
- 24 - MENEGALLI, F.C. & SOBRAL, P.J.A. "Secagem de sangue bovino, incorporado a Proteína texturizada de soja, em leite fixo". Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, UNICAMP, p.144-159, 1986.
- 25 - OLIVEIRA, H.P. "Aproveitamento do bagaço de cana como combustível nas usinas e destilarias". Brasil Açucareiro, P. 20-23, fevereiro, 1980.



- 26 - PEARSE, J.F.; OLIVER, T.R. e 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.
- 27 - PERRY & CHILTON. "Manual de Engenharia Química". Quinta edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980-cap. 20.3 20-62.
- 28 - PHILIP, J.R. & DE VRIES, D.A. "Moisture movement in Porous materials under temperature gradient. Trans. Am. Geophys. Union, 38(2): 222-232, 1957, apud ALVARENGA, L.C et alii. "Transporte....", op. cit., P.8.
- 29 - QUIRINO, M.H.G. & ALSINA, O.L.S. "Cinética da Secagem de Sabugo de milho". Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, UNICAMP, P. 127-143, 1986.
- 30 - RAJAGOPAL, K. "Processos alternativos para secagem de bagaço". Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, V.I: 160-171, 1983.
- 31 - RAMESH, P. MOHSENIN, N.M. "A Soil air Pycnometer for determination of Porosity and Particle density". Transactions of the ASAE, V. 23 nº 03, P. 735-741, 1980.
- 32 - ROMERO, J.E.R. "Projeto, Construção e Estudo do Desempenho de um Secador de Esteira de Fluxos Cruzados, para Bagaço de Cana". Universidade Federal da Paraíba, Campus II, 1988. (Tese de Mestrado).
- 33 - ROMERO, J.E.R. & ALSINA, O.L.S. "Secador de esteira para bagaço. Comunicação de resultados Preliminares". Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, UNICAMP,

- P. 160-171, 1986.
- 34 - SHERWOOD, T.K. "The drying of Solids-I". Ind. Eng. Chem. 21: P. 12-16, 1929.
- 35 - SHERWOOD, T.K. "The drying of Solids-II". Ind. Eng. Chem. 21: P. 976-980, 1929.
- 36 - SHERWOOD, T.K. "The drying of Solids-III". Ind. Eng. Chem. 22: P. 132-136, 1930.
- 37 - SHERWOOD, T.K. "Application of the Theoretical diffusion equations to the drying of Solids". Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 27: 310-333, 1931
- 38 - THYGESSON, R.J. e GROSSMANN, D.E. "Optimization of a Continuous Through-circulation dryer". Aiche Journal, 16:749-754, Nº 5, 1970.
- 39 - TSAO, G.T. e WHEELLOCK, T.D. "Drying theory and calculations". Chemical Engineering, 201-219, 1967.
- 40 - 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.
- 41 - WHITAKER, S. "Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous media: A theory of drying". In Advances in Heat Transfer. Edited by J.P Hartnett and T.F. Irving. Jr, Academic Press, 13: 119-203, 1977.
- 42 - ZEGARA, J.R. O Bagaço de Cana e sua crescente utilização na produção de celulose e papel. Revista O Papel. 49-55, 1975.

**A P E N D I C E - A**

(Tabelas de dados obtidos na câmara de secagem)

TABELA A 1 ENSAIO 1

TEMPERATURA AMBIENTE = 26.50 OC (INICIAL) 26.50 OC (FINAL) , UMIDADE AMBIENTE = 71 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H , ALTURA DO LEITO = 1.0 CM , PESO DO SUPORTE = 130.42 G.

TEMPO (MIN)	TBS DO AR DE ENTRADA (MV)	TBU DO AR DE ENTRADA (MV)	TBS DO AR DE SAIDA (MV)	TBU DO AR DE SAIDA (MV)	PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)	VELOC. DO AR (M/MIN)
0.0	3.25	0.44	3.02	0.44	27.95	-
1.0	3.25	0.44	2.83	0.43	17.63	-
2.5	3.25	0.44	2.94	0.43	14.37	-
5.0	3.25	0.44	3.01	0.41	12.38	142
7.5	3.25	0.44	3.02	0.44	11.53	160
10.0	3.26	0.45	3.02	0.42	10.84	154
12.5	3.26	0.45	3.04	0.44	10.43	149
15.0	3.28	0.45	3.03	0.44	10.20	152
20.0	3.30	0.46	3.04	0.42	9.92	148
25.0	3.30	0.47	3.06	0.42	9.74	145
30.0	3.32	0.47	3.06	0.43	9.64	-

TABELA A 2      ENSAIO 2

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.50 OC (INICIAL) 26.00 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 80 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 1.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 130.38 G.

TEMPO (MIN)	TBS DO AR DE ENTRADA (MV)	TBU DO AR DE ENTRADA (MV)	TBS DO AR DE SAIDA (MV)	TBU DO AR DE SAIDA (MV)	PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)	VELOC. DO AR (M/MIN)
0.0	4.46	0.54	3.77	0.53	28.69	-
1.0	4.45	0.53	3.55	0.52	20.50	-
2.5	4.45	0.54	3.76	0.54	18.29	-
5.0	4.45	0.54	3.84	0.55	16.60	145
7.5	4.44	0.54	3.84	0.56	15.83	154
10.0	4.45	0.54	3.84	0.56	15.32	155
12.5	4.46	0.54	3.84	0.57	15.16	165
15.0	4.46	0.55	3.84	0.56	15.03	162
20.0	4.45	0.55	3.82	0.55	14.89	146
25.0	4.46	0.56	3.81	0.56	14.79	-
30.0	4.45	0.56	3.82	0.56	14.73	-

TABELA A 3      ENSAIO 3

TEMPERATURA AMBIENTE = 29.50 OC (INICIAL) 29.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 61 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 1.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 130.41 G.

TEMPO (MIN)	TBS DO AR DE ENTRADA (MV)	TBU DO AR DE ENTRADA (MV)	TBS DO AR DE SAIDA (MV)	TBU DO AR DE SAIDA (MV)	PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)	VELOC. DO AR (M/MIN)
0.0	5.30	1.01	5.02	1.02	28.76	-
1.0	5.29	0.99	4.75	1.01	18.94	-
2.5	5.30	1.01	4.82	1.01	16.48	-
5.0	5.30	0.99	4.90	1.00	14.85	132
7.5	5.30	0.99	4.98	1.02	14.11	145
10.0	5.30	1.01	5.05	1.02	13.82	154
12.5	5.31	1.01	5.09	1.03	13.73	136
15.0	5.30	1.02	5.11	1.04	13.65	150
20.0	5.30	1.02	5.10	1.03	13.57	148
25.0	5.30	1.03	5.11	1.02	13.50	155
30.0	5.30	1.02	5.11	1.03	13.46	-

TABELA A 4 ENSAIO 4

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.50 OC (INICIAL) 26.00 OC (FINAL) , UMIDADE AMBIENTE = 70 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H , ALTURA DO LEITO = 2.0 CM , PESO DO SUPORTE = 157.63 G.

I TEMPO I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I PESO DA AMOSTRA I	I VELOC. DO AR I
I (MIN) I	I DE ENTRADA I	I DE ENTRADA I	I DE SAIDA I	I DE SAIDA I	I (GRAMAS) I	I (M/MIN) I
I I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I I	I I
I 0.0 I	I 3.28 I	I 0.53 I	I 3.15 I	I 0.52 I	I 45.71 I	I - I
I 1.0 I	I 3.27 I	I 0.52 I	I 3.10 I	I 0.51 I	I 32.42 I	I - I
I 2.5 I	I 3.28 I	I 0.52 I	I 3.11 I	I 0.52 I	I 26.15 I	I - I
I 5.0 I	I 3.28 I	I 0.52 I	I 3.10 I	I 0.52 I	I 23.98 I	I 135 I
I 7.5 I	I 3.28 I	I 0.52 I	I 3.09 I	I 0.51 I	I 22.25 I	I 150 I
I 10.0 I	I 3.29 I	I 0.52 I	I 3.08 I	I 0.52 I	I 20.86 I	I 143 I
I 12.5 I	I 3.29 I	I 0.53 I	I 3.09 I	I 0.53 I	I 20.17 I	I 145 I
I 15.0 I	I 3.28 I	I 0.52 I	I 3.08 I	I 0.52 I	I 19.73 I	I 163 I
I 20.0 I	I 3.29 I	I 0.52 I	I 3.08 I	I 0.51 I	I 19.26 I	I 148 I
I 25.0 I	I 3.29 I	I 0.53 I	I 3.09 I	I 0.52 I	I 18.86 I	I 138 I
I 30.0 I	I 3.29 I	I 0.53 I	I 3.09 I	I 0.53 I	I 18.67 I	I - I

TABELA A 5      ENSAIO 5

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.50 OC (INICIAL) 26.00 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 78 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 3.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 144.92 G.

I	TEMPO	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	PESO DA AMOSTRA	I	VELOC. DO AR	I
I	(MIN)	I	DE ENTRADA	I	DE ENTRADA	I	DE SAIDA	I	DE SAIDA	I	(GRAMAS)	I	(M/MIN)	I
I		I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I		I		I
I	0.0	I	3.33	I	0.44	I	3.08	I	0.44	I	68.83	I	-	I
I	1.0	I	3.32	I	0.43	I	2.90	I	0.43	I	50.12	I	-	I
I	2.5	I	3.32	I	0.43	I	2.94	I	0.42	I	44.42	I	-	I
I	5.0	I	3.31	I	0.43	I	3.02	I	0.43	I	38.46	I	157	I
I	7.5	I	3.30	I	0.42	I	3.04	I	0.44	I	35.27	I	156	I
I	10.0	I	3.30	I	0.43	I	3.04	I	0.44	I	33.35	I	143	I
I	12.5	I	3.31	I	0.44	I	3.05	I	0.45	I	32.33	I	136	I
I	15.0	I	3.30	I	0.43	I	3.07	I	0.46	I	31.40	I	155	I
I	20.0	I	3.31	I	0.43	I	3.08	I	0.47	I	30.26	I	120	I
I	25.0	I	3.32	I	0.43	I	3.09	I	0.46	I	29.60	I	146	I
I	30.0	I	3.31	I	0.43	I	3.10	I	0.46	I	29.18	I	-	I
I	35.0	I	3.31	I	0.43	I	3.10	I	0.46	I	28.93	I	-	I
I	40.0	I	3.31	I	0.43	I	3.11	I	0.45	I	28.81	I	-	I



TABELA A 6      ENSAIO 6

TEMPERATURA AMBIENTE = 26.00 OC (INICIAL) 26.00 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 76 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 5.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 181.65 G.

I	TEMPO	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	PESO DA AMOSTRA	I	VELOC. DO AR	I
I	(MIN)	I	DE ENTRADA	I	DE ENTRADA	I	DE SAIDA	I	DE SAIDA	I	(GRAMAS)	I	(M/MIN)	I
I		I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I		I		I
I	0.0	I	3.30	I	0.44	I	3.12	I	0.44	I	114.91	I	-	I
I	1.0	I	3.30	I	0.44	I	2.55	I	0.44	I	89.85	I	-	I
I	2.5	I	3.30	I	0.43	I	2.72	I	0.43	I	76.79	I	-	I
I	5.0	I	3.30	I	0.43	I	2.89	I	0.43	I	67.55	I	135	I
I	7.5	I	3.28	I	0.43	I	3.02	I	0.43	I	61.25	I	148	I
I	10.0	I	3.27	I	0.44	I	3.09	I	0.44	I	57.55	I	155	I
I	12.5	I	3.27	I	0.44	I	3.08	I	0.45	I	55.03	I	136	I
I	15.0	I	3.27	I	0.44	I	3.10	I	0.45	I	53.41	I	134	I
I	20.0	I	3.28	I	0.44	I	3.11	I	0.45	I	51.20	I	152	I
I	25.0	I	3.30	I	0.44	I	3.12	I	0.44	I	49.78	I	138	I
I	30.0	I	3.30	I	0.44	I	3.10	I	0.45	I	48.89	I	159	I
I	35.0	I	3.30	I	0.44	I	3.10	I	0.45	I	48.31	I	-	I
I	40.0	I	3.30	I	0.44	I	3.11	I	0.45	I	47.95	I	-	I

TABELA A 7 ENSAIO 7

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.00 OC (INICIAL) 26.00 OC (FINAL) , UMIDADE AMBIENTE = 73 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H , ALTURA DO LEITO = 10.0 CM , PESO DO SUPORTE = 314.14 G.

TEMPO (MIN)	TBS DO AR DE ENTRADA (MV)	TBU DO AR DE ENTRADA (MV)	TBS DO AR DE SAIDA (MV)	TBU DO AR DE SAIDA (MV)	PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)	VELOC. DO AR (M/MIN)
0.0	3.22	0.45	3.13	0.44	228.34	-
1.0	3.31	0.45	1.38	0.45	186.08	-
2.5	3.30	0.45	2.47	0.44	157.23	-
5.0	3.30	0.44	2.76	0.43	135.31	132
7.5	3.30	0.43	2.92	0.42	118.60	135
10.0	3.32	0.44	3.01	0.43	110.78	143
12.5	3.31	0.45	3.03	0.44	105.63	152
15.0	3.32	0.45	3.09	0.44	102.09	145
20.0	3.33	0.44	3.11	0.44	97.11	140
25.0	3.33	0.44	3.12	0.45	93.85	134
30.0	3.33	0.44	3.12	0.44	91.36	148
35.0	3.33	0.44	3.12	0.44	90.03	-
40.0	3.33	0.44	3.12	0.44	89.35	-

TABELA A 8      ENSAIO 8

TEMPERATURA AMBIENTE = 26.00 OC (INICIAL) 26.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 80 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 10.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 314.10 G.

I TEMPO I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I PESO DA AMOSTRA I	I VELOC. DO AR I
I (MIN) I	I DE ENTRADA I	I DE ENTRADA I	I DE SAIDA I	I DE SAIDA I	I (GRAMAS) I	I (M/MIN) I
I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (GRAMAS) I	I (M/MIN) I
I 0.0 I	I 4.46 I	I 0.57 I	I 3.77 I	I 0.57 I	I 228.69 I	I - I
I 1.0 I	I 4.45 I	I 0.57 I	I 0.98 I	I 0.56 I	I 191.45 I	I - I
I 2.5 I	I 4.44 I	I 0.56 I	I 1.22 I	I 0.57 I	I 164.73 I	I - I
I 5.0 I	I 4.44 I	I 0.56 I	I 2.55 I	I 0.57 I	I 144.48 I	I 154 I
I 7.5 I	I 4.43 I	I 0.55 I	I 3.11 I	I 0.56 I	I 133.59 I	I 160 I
I 10.0 I	I 4.44 I	I 0.56 I	I 3.35 I	I 0.55 I	I 126.47 I	I 150 I
I 12.5 I	I 4.45 I	I 0.55 I	I 3.40 I	I 0.57 I	I 122.85 I	I 131 I
I 15.0 I	I 4.44 I	I 0.56 I	I 3.64 I	I 0.58 I	I 120.54 I	I 176 I
I 20.0 I	I 4.44 I	I 0.55 I	I 3.65 I	I 0.60 I	I 117.55 I	I 145 I
I 25.0 I	I 4.44 I	I 0.55 I	I 3.73 I	I 0.59 I	I 114.86 I	I - I
I 30.0 I	I 4.44 I	I 0.55 I	I 3.75 I	I 0.58 I	I 113.62 I	I - I
I 35.0 I	I 4.44 I	I 0.55 I	I 3.76 I	I 0.57 I	I 112.75 I	I - I
I 40.0 I	I 4.44 I	I 0.55 I	I 3.75 I	I 0.58 I	I 112.25 I	I - I

TABELA A 9 ENSAIO 9

TEMPERATURA AMBIENTE = 29.50 OC (INICIAL) 29.50 OC (FINAL) , UMIDADE AMBIENTE = 63 %

VAZAO DO AR = 240 M3/H , ALTURA DO LEITO = 10.0 CM , PESO DO SUPORTE = 314.20 G.

I	TEMPO	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	PESO DA AMOSTRA	I	VELOC. DO AR	I
I	I	I	DE ENTRADA	I	DE ENTRADA	I	DE SAIDA	I	DE SAIDA	I	I	I	I	I
I	(MIN)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(GRAMAS)	I	(M/MIN)	I
I	0.0	I	5.30	I	0.99	I	5.09	I	0.92	I	228.13	I	-	I
I	1.0	I	5.30	I	0.99	I	1.86	I	0.92	I	181.72	I	-	I
I	2.5	I	5.30	I	0.98	I	2.76	I	0.93	I	153.86	I	-	I
I	5.0	I	5.29	I	0.97	I	3.56	I	0.94	I	134.20	I	150	I
I	7.5	I	5.30	I	0.96	I	4.22	I	0.93	I	130.34	I	133	I
I	10.0	I	5.30	I	0.97	I	4.80	I	0.95	I	126.75	I	146	I
I	12.5	I	5.29	I	0.98	I	5.04	I	0.96	I	124.59	I	151	I
I	15.0	I	5.30	I	0.98	I	5.13	I	0.97	I	123.28	I	145	I
I	20.0	I	5.31	I	0.99	I	5.22	I	0.96	I	121.40	I	155	I
I	25.0	I	5.30	I	0.98	I	5.22	I	0.97	I	120.15	I	145	I
I	30.0	I	5.31	I	0.99	I	5.25	I	0.97	I	119.40	I	-	I
I	35.0	I	5.30	I	0.99	I	5.28	I	0.98	I	119.00	I	-	I
I	40.0	I	5.30	I	0.99	I	5.28	I	0.98	I	118.85	I	-	I

TABELA A 10      ENSAIO 10

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.00 OC (INICIAL) 25.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 75 %

VAZAO DO AR = 200 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 1.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 130.37 G.

I	TEMPO	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	PESO DA AMOSTRA	I	VELOC. DO AR	I
I	(MIN)	I	DE ENTRADA	I	DE ENTRADA	I	DE SAIDA	I	DE SAIDA	I	(GRAMAS)	I	(M/MIN)	I
I		I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I		I		I
I	0.0	I	3.32	I	0.54	I	3.18	I	0.52	I	28.45	I	-	I
I	1.0	I	3.31	I	0.54	I	3.10	I	0.50	I	21.45	I	-	I
I	2.5	I	3.31	I	0.54	I	3.09	I	0.51	I	19.09	I	-	I
I	5.0	I	3.32	I	0.54	I	3.10	I	0.50	I	17.34	I	125	I
I	7.5	I	3.33	I	0.55	I	3.09	I	0.51	I	16.53	I	124	I
I	10.0	I	3.34	I	0.54	I	3.08	I	0.52	I	16.02	I	123	I
I	12.5	I	3.33	I	0.55	I	3.09	I	0.51	I	15.67	I	123	I
I	15.0	I	3.34	I	0.54	I	3.11	I	0.52	I	15.38	I	128	I
I	20.0	I	3.34	I	0.53	I	3.12	I	0.53	I	14.95	I	123	I
I	25.0	I	3.34	I	0.54	I	3.11	I	0.54	I	14.63	I	124	I
I	30.0	I	3.34	I	0.54	I	3.12	I	0.54	I	14.43	I	125	I

TABELA A 11      ENSAIO 11

TEMPERATURA AMBIENTE = 25.00 OC (INICIAL) 25.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 76 %

VAZAO DO AR = 100 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 1.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 130.41 G.

TEMPO (MIN)	TBS DO AR DE ENTRADA (MV)	TBU DO AR DE ENTRADA (MV)	TBS DO AR DE SAIDA (MV)	TBU DO AR DE SAIDA (MV)	PESO DA AMOSTRA (GRAMAS)	VELOC. DO AR (M/MIN)
0.0	3.34	0.55	3.21	0.54	28.30	-
1.0	3.33	0.54	3.09	0.53	21.86	-
2.5	3.32	0.53	3.07	0.52	19.24	-
5.0	3.33	0.54	3.09	0.52	17.46	62
7.5	3.34	0.53	3.10	0.53	16.19	62
10.0	3.33	0.54	3.09	0.53	15.65	67
12.5	3.33	0.55	3.09	0.54	15.18	64
15.0	3.34	0.54	3.10	0.55	14.85	64
20.0	3.34	0.53	3.11	0.56	14.31	64
25.0	3.34	0.54	3.12	0.55	13.95	63
30.0	3.34	0.54	3.13	0.56	13.65	-

TABELA A 12      ENSAIO 12

TEMPERATURA AMBIENTE = 24.50 OC (INICIAL) 25.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 75 %

VAZAO DO AR = 100 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 10.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 314.16 G.

I	TEMPO	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	TBS DO AR	I	TBU DO AR	I	PESO DA AMOSTRA	I	VELOC. DO AR	I
I	(MIN)	I	DE ENTRADA	I	DE ENTRADA	I	DE SAIDA	I	DE SAIDA	I	(GRAMAS)	I	(M/MIN)	I
I		I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I	(MV)	I		I		I
I	0.0	I	3.36	I	0.54	I	3.23	I	0.52	I	228.43	I	-	I
I	1.0	I	3.35	I	0.54	I	0.88	I	0.51	I	204.33	I	-	I
I	2.5	I	3.34	I	0.55	I	2.04	I	0.52	I	180.86	I	-	I
I	5.0	I	3.35	I	0.54	I	2.66	I	0.52	I	159.22	I	71	I
I	7.5	I	3.35	I	0.55	I	3.07	I	0.53	I	144.57	I	69	I
I	10.0	I	3.34	I	0.54	I	3.12	I	0.53	I	135.65	I	52	I
I	12.5	I	3.35	I	0.53	I	3.20	I	0.54	I	129.76	I	64	I
I	15.0	I	3.36	I	0.54	I	3.22	I	0.52	I	125.03	I	58	I
I	20.0	I	3.33	I	0.55	I	3.25	I	0.53	I	119.55	I	67	I
I	25.0	I	3.35	I	0.56	I	3.24	I	0.53	I	115.68	I	60	I
I	30.0	I	3.35	I	0.55	I	3.25	I	0.54	I	112.45	I	57	I
I	35.0	I	3.35	I	0.55	I	3.24	I	0.54	I	110.30	I	63	I
I	40.0	I	3.35	I	0.55	I	3.25	I	0.54	I	109.64	I	62	I

TABELA A 13      ENSAIO 13

TEMPERATURA AMBIENTE = 24.50 OC (INICIAL) 25.50 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 76 %

VAZAO DO AR = 100 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 10.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 314.13 G.

I	TEMPO I	TBS DO AR I	TBU DO AR I	TBS DO AR I	TBU DO AR I	PESO DA AMOSTRA I	VELOC. DO AR I	I
I	I	DE ENTRADA I	DE ENTRADA I	DE SAIDA I	DE SAIDA I	I	I	I
I	(MIN) I	(MV) I	(MV) I	(MV) I	(MV) I	(GRAMAS) I	(M/MIN) I	I
I	0.0 I	5.56 I	0.95 I	5.35 I	0.93 I	228.50 I	- I	I
I	1.0 I	5.55 I	0.96 I	1.10 I	0.93 I	200.05 I	- I	I
I	2.5 I	5.55 I	0.95 I	2.50 I	0.94 I	162.25 I	- I	I
I	5.0 I	5.54 I	0.94 I	3.80 I	0.93 I	140.60 I	64 I	I
I	7.5 I	5.56 I	0.95 I	4.79 I	0.94 I	127.37 I	53 I	I
I	10.0 I	5.55 I	0.96 I	5.20 I	0.95 I	120.92 I	66 I	I
I	12.5 I	5.55 I	0.97 I	5.25 I	0.96 I	118.35 I	61 I	I
I	15.0 I	5.56 I	0.96 I	5.32 I	0.96 I	116.54 I	72 I	I
I	20.0 I	5.55 I	0.98 I	5.33 I	0.95 I	113.85 I	61 I	I
I	25.0 I	5.55 I	0.96 I	5.35 I	0.96 I	112.36 I	65 I	I
I	30.0 I	5.55 I	0.97 I	5.35 I	0.97 I	111.01 I	69 I	I
I	35.0 I	5.55 I	0.97 I	5.36 I	0.96 I	110.10 I	- I	I
I	40.0 I	5.55 I	0.97 I	5.35 I	0.96 I	109.66 I	- I	I



TABELA A 14      ENSAIO 14

TEMPERATURA AMBIENTE = 26.50 OC (INICIAL) 27.00 OC (FINAL) ,      UMIDADE AMBIENTE = 70 %

VAZAO DO AR = 60 M3/H ,      ALTURA DO LEITO = 1.0 CM ,      PESO DO SUPORTE = 130.39 G.

I TEMPO I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I TBS DO AR I	I TBU DO AR I	I PESO DA AMOSTRA I	I VELJC. DO AR I
I (MIN) I	I DE ENTRADA I	I DE ENTRADA I	I DE SAIDA I	I DE SAIDA I	I (GRAMAS) I	I (M/MIN) I
I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (MV) I	I (GRAMAS) I	I (M/MIN) I
I 0.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.86 I	I 0.49 I	I 28.38 I	I - I
I 1.0 I	I 3.24 I	I 0.51 I	I 1.70 I	I 0.48 I	I 24.03 I	I - I
I 2.5 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.40 I	I 0.46 I	I 21.77 I	I - I
I 5.0 I	I 3.25 I	I 0.53 I	I 2.74 I	I 0.47 I	I 19.59 I	I 39 I
I 7.5 I	I 3.24 I	I 0.51 I	I 2.81 I	I 0.48 I	I 18.47 I	I 43 I
I 10.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.84 I	I 0.49 I	I 17.60 I	I 34 I
I 12.5 I	I 3.26 I	I 0.53 I	I 2.86 I	I 0.50 I	I 17.29 I	I 33 I
I 15.0 I	I 3.25 I	I 0.54 I	I 2.88 I	I 0.52 I	I 16.95 I	I 37 I
I 20.0 I	I 3.26 I	I 0.53 I	I 2.90 I	I 0.52 I	I 16.60 I	I 36 I
I 25.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.92 I	I 0.51 I	I 16.35 I	I 37 I
I 30.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.92 I	I 0.51 I	I 16.11 I	I - I
I 35.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.93 I	I 0.52 I	I 15.87 I	I - I
I 40.0 I	I 3.25 I	I 0.52 I	I 2.92 I	I 0.51 I	I 15.74 I	I - I

**A P Ê N D I C E - B**

(Programa de Computação com subrotina para  
o Cálculo das Propriedades Psicrométricas  
do Ar)

```

$JOB LINDAUREA,PAGES=40,TIME=3
C
C *****
C *
C * PROGRAMA QUE CALCULA A UMIDADE ABSOLUTA *
C * E A UMIDADE RELATIVA DO AR . *
C *
C *****
C
C DEFINICAO DAS VARIAVEIS
1 DOUBLE PRECISION R,A,B,C,D,E,F,G,
*BS1(200),BU1(200),BS2(200),BU2(200),TBS1(200),
*TBUI(200),TBS2(200),TBU2(200),TS1(200),TUI(200),
*TS2(200),TU2(200),URE(200),URS(200),WE(200),WS(200),
*PATM,T1,T2,TAMB(15),T(200),HSGBS(300),HSGBU(300),
*HFGBS(300),PVSBS(300),PVSBU(300),HFGBU(300),
*PVC(300),PVB(300),V(300),U(200)
2 EXTERNAL HFG1,HFG2,HFG3
3 INTEGER I,ENS(15),NT(15),N,CALC,K,L
C
C PROGRAMA PRINCIPAL
4 PATM = 14.696
5 L = 0
6 DO 150 K=1,14
7 L = L+1
8 READ(5,3) ENS(K),NT(K),TAMB(K)
9 3 FORMAT(I2,I3,F6.2)
C
C IMPRESSAO DO CABECALHO
10 WRITE(6,196)L,ENS(K)
11 196 FORMAT('I',5(/),3X,'TABELA C',I3,5X,'ENSAIO',I3)
12 WRITE(6,197)L,ENS(K)
13 197 FORMAT('+',2X,'TABELA C',I3,5X,'ENSAIO',I3)
14 WRITE(6,198)L,ENS(K)
15 198 FORMAT('+',2X,'TABELA C',I3,5X,'ENSAIO',I3)
16 WRITE(6,199)
17 199 FORMAT(/,3X,101('-'),/,3X,'I',7X,'I',2(39X,'I'),
+1X,'CONDICOES',1X,'I',/,3X,'I',7X,'I',6X,
+'CONDICOES DO AR NA ENTRADA',7X,'I',7X,
+'CONDICOES DO AR NA SAIDA',8X,'I',4X,'DO',5X,
+'I',/,3X,'I',1X,'TEMPO',1X,'I',2(39X,'I'),2X,
+'BAGACO',3X,'I',/,3X,'I',7X,'I',2(9('-'),'I',
+9('-'),'I',10('-'),'I',8('-'),'I'),11('-'),
+'I',/,3X,'I',1X,'(MIN)',1X,'I',2(3X,'TBS',3X,'I',
+3X,'TBU',3X,'I',4X,'H',5X,'I',3X,'HR',3X,'I'),
+11X,'I',/,3X,'I',7X,'I',2(9X,'I',9X,'I',1X,'(G.H20)/',
+1X,'I',8X,'I'),3X,'U (T)',3X,'I',/,3X,'I',7X,'I',
+2(3X,'(DC)',2X,'I',3X,'(DC)',2X,'I','(G. AR S.)',
+'I',3X,'(/)',2X,'I'),11X,'I',/,3X,'I',7('-'),'I',
+2(9('-'),'I',9('-'),'I',10('-'),'I',8('-'),'I'),
+11('-'),'I')
C
C LEITURA DAS TEMPERATURAS DE BULBO SECO E UMIDO
18 N = NT(K)
19 DO 222 I=1,N
20 READ(5,5)T(I),BS1(I),BU1(I),BS2(I),BU2(I),U(I)
21 5 FORMAT(F4.1,4(F5.2),F7.4)
22 222 CONTINUE

```

```

23      DO 100 I=1,N
      C   TRANSFORMACAO DOS DADOS DE MILIV. PARA GRAUS CENTIGRADO
24      TBS1(I) = (BS1(I)/0.0527)+TAMB(K)
25      TBU1(I) = (BU1(I)/0.0527)+TAMB(K)
26      TBS2(I) = (BS2(I)/0.0527)+TAMB(K)
27      TBU2(I) = (BU2(I)/0.0527)+TAMB(K)
      C
      C   TRANSFORMACAO PARA GRAUS FARENHIT
28      TS1(I) = 1.80*TBS1(I)+32
29      TU1(I) = 1.80*TBU1(I)+32
30      TS2(I) = 1.80*TBS2(I)+32
31      TU2(I) = 1.80*TBU2(I)+32
      C
      C   TRANSFORMACAO PARA GRAUS RANKINE
32      T1=TS1(I)+0.45969D03
33      T2=TU1(I)+0.45969D03
      C
34      CALC = 1
35      15. CONTINUE
      C   SUBROTINA 1 - CALCULO DA PRESSAO DE VAPOR SATURADO
36      CALL PRSAT(T1,T2,I,PVSBS,PVSBU)
      C
      C   SUBROTINA 2 - CALCULO DO CALOR LATENTE
37      CALL CALOR(T1,T2,I,HSGBS,HSGBU,HFGBS,HFGBU)
      C
      C   SUBROTINA 3 - CALCULO DA PRESSAO DE VAPOR DA TBU E TBS
38      CALL PV(T1,T2,I,PVSBS,HFGBS,HSGBS,PVSBU,HFGBU,
      1   HSGBU,PATM,PVC)
      C
      C   SUBROTINA 4 - CALCULO DA UNIDADE ABSOLUTA E RELATIVA DO AR
39      IF(CALC.EQ.1) THEN DO
40      CALL WUR1(T1,T2,I,PVC,PATM,PVSBS,URE,WE,V)
41      ELSE DO
42      CALL WUR2(T1,T2,I,PVC,PATM,PVSBS,URS,WS,V)
43      GO TO 20
44      END IF
      C
45      T1=TS2(I)+0.45969D03
46      T2=TU2(I)+0.45969D03
      C
47      CALC= 2
48      GO TO 15
      C
      C   SAIDA DAS INFORMACOES OBTIDAS
      C
49      20 WRITE(6,200)T(I),TBS1(I),TBU1(I),WE(I),URE(I),TBS2(I),
      +TBU2(I),WS(I),URS(I),U(I)
50      200 FORMAT(3X,'I',1X,F4.1,2X,'I',2(1X,F6.2,2X,'I',1X,F6.2,
      +2X,'I',2X,F6.4,2X,'I',1X,F5.2,2X,'I'),3X,F6.4,2X,'I',/,
      +3X,'I',7(' '),I',2(9(' '),I',9(' '),I',10(' '),
      +'I',8(' '),I'),11(' '),I')
51      100 CONTINUE
52      150 CONTINUE
53      WRITE(6,30)
54      30  FORMAT(1H1)
      C
55      STOP
56      END

```

```

C      *****
C      *          SUBROTINA - 1          *
C      *  CALCULO DA PRESSAO DE VAPOR SATURADO  *
C      *  PARA AMBAS TEMPERATURAS          *
C      *****
57     SUBROUTINE PRSAT(T1,T2,I,PVSBS,PVSBU)
58     DOUBLE PRECISION R,A,B,C,D,E,F,G,
      *PVSBS(300),PVSBU(300),T1,T2
59     INTEGER I
60     R = 0.3206182232D04
61     A =-0.2740552584D05
62     B = 0.5418960763D02
63     C =-0.4513703841D-01
64     D = 0.2153211916D-04
65     E =-0.4620266568D-08
66     F = 0.2416127209D01
67     G = 0.1215465167D-02
68     IF(T1.GE.0.45969D03.AND.T1.LE.0.49169D03) THEN DO
69     PVSBS(I)=DEXP(0.233924D02-(0.112866489D05/T1)-0.46057D0
1      *DLOG(T1))
70     ELSE DO
71     IF (T1.GE.0.49169D03.AND.T1.LE.0.95969D03) THEN DO
72     PVSBS(I)=R*DEXP((A+B*T1+(C*T1**0.2D01)+(D*T1**0.3D01)
1  +(E*T1**0.4D01))/(F*T1-G*T1**0.2D01))
73     END IF
74     END IF
75     IF (T2.GE.0.45969D03.AND.T2.LE.0.49169D03) THEN DO
76     PVSBU(I)=DEXP(0.233924D02-(0.112866489D05/T2)-0.46057D0
1      *DLOG(T2))
77     ELSE DO
78     IF (T2.GE.0.49169D03.AND.T2.LE.0.95969D03) THEN DO
79     PVSBU(I)=R*DEXP((A+B*T2+(C*T2**0.2D01)+(D*T2**0.3D01)
1  +(E*T2**0.4D01))/(F*T2-G*T2**0.2D01))
80     END IF
81     END IF
82     RETURN
83     END

C      *****
C      *          SUBROTINA - 2          *
C      *  CALCULO DO CALOR DE SUBLIMACAO E DO  *
C      *  LATENTE PARA AMBAS TEMPERATURAS    *
C      *****
84     SUBROUTINE CALOR(T1,T2,I,HSGBS,HSGBU,HFGBS,HFGBU)
85     DOUBLE PRECISION HSGBS(300),HSGBU(300),HFGBS(300),
      *HFGBU(300),HSG(300),HFG(300),T,T1,T2
86     INTEGER I,J
87     HSG(I)=0.D0
88     HFG(I)=0.D0
89     T=T1
90     J=1
      C
      C 10  CALCULO DO CALOR DE SUBLIMACAO
91     IF (T.GE.0.45969D03.AND.T.LE.0.49169D03) THEN DO
92     HSG(I)=0.1220844D04-0.5077D-01*(T-0.45969D03)
93     ELSE DO

```

```

C      CALCULO DO CALOR LATENTE
94      IF ((T.GE.0.49169D03).AND.(T.LE.0.60969D03)) THEN DO
95          HFG(I)=0.10758965D04-0.56983D0*(T-0.45969D03)
96      ELSE DO
97          IF ((T.GE.0.60969D03).AND.(T.LE.0.95969D03)) THEN DO
98              HFG(I)=(0.1354673214D07-0.9125275587D0*(T**0.2D1))
1          **0.5D0
99      END IF
100     END IF
101     END IF
102     IF (J.EQ.1) THEN DO
103         HSGBS(I)=HSG(I)
104         HFGBS(I)=HFG(I)
105         J=J+1
106         T=T2
107     ELSE DO
108         HSGBU(I)=HSG(I)
109         HFGBU(I)=HFG(I)
110     RETURN
111     END IF
112     GO TO 10
113     END

```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

```

*****
*           SUBROTINA - 3           *
*   CALCULO DA PRESSAO DE VAPOR PARA   *
*   AMBAS TEMPERATURAS               *
*****

```

```

114     SUBROUTINE PV(T1,T2,I,PVSBS,HFGBS,HSGBS,PVSBU,HFGBU,
1      HSGBU,PATM,PVC)
115     DOUBLE PRECISION PVSBS(300),PVSBU(300),PATM,
*HFGBS(300),PVBU(300),T1,T2,DIV1,DIV2,
*HFGBU(300),PVS(300),PVC(300),HSGBS(300),HSGBU(300)
116     EXTERNAL HFG1,HFG2,HFG3
117     T = T2
118     IF ((T.GE.459.69).AND.(T.LE.491.69)) THEN DO
119         HF = HFG1(T)
120     ELSE DO
121         IF ((T.GE.491.69).AND.(T.LE.609.69)) THEN DO
122             HF = HFG2(T)
123         ELSE DO
124             IF ((T.GE.609.69).AND.(T.LE.959.69)) THEN DO
125                 HF = HFG3(T)
126             END IF
127         END IF
128     END IF
129     DIV1=PVSBU(I)*0.62194*HF+0.2405*(PVSBU(I)-PATM)*(T1-T2)
130     DIV2 = 0.62194*HF-0.037463*(PVSBU(I)/PATM-1.)*(T2-T1)
131     PVC(I) = DIV1 / DIV2
132     RETURN
133     END

```

C

```

134     FUNCTION HFG1(T)
135     HFG1 = 1220.844 - 0.05077*(T-459.69)
136     RETURN
137     END

```

```

138     FUNCTION HFG2(T)
139     HFG2 = 1075.8965 - 0.56983*(T-459.69)
140     RETURN
141     END

```

C

```

142     FUNCTION HFG3(T)
143     HFG3 = (1354673.214 - 0.9125275587*T**2)**(1./2.)
144     RETURN
145     END

```

C

C

C

C

C

C

C

C

```

*****
*           SUBROTINA -4           *
*   CALCULO DA UMIDADE ABSOLUTA E UMIDADE   *
*   RELATIVA DO AR                       *
*****

```

```

146     SUBROUTINE WUR1(T1,T2,I,PVBS,PATM,PVSBS,URE,WE,V)
147     DOUBLE PRECISION PVSBS(300),T1,T2,PATM,
*PVBS(300),PVBU(300),URE(200),V(300),WE(200)
148     IF(T1.GE.0.45969D03 .AND. T1.LE.0.95969D03) THEN DO
149         WE(I)=0.6219D0*PVBS(I)/(PATM-PVBS(I))
150         V(I)= 0.5335D02*T1/(0.144D03*(PATM-PVBS(I)))
151         URE(I)=((PVBS(I)/PVSBS(I))*0.10D03)
152     END IF
153     RETURN
154     END

```

C

```

155     SUBROUTINE WUR2(T1,T2,I,PVBS,PATM,PVSBS,URS,WS,V)
156     DOUBLE PRECISION PVSBS(300),T1,T2,PATM,
*PVBS(300),PVBU(300),URS(200),V(300),WS(200)
157     IF(T1.GE.0.45969D03 .AND. T1.LE.0.95969D03) THEN DO
158         WS(I)=0.6219D0*PVBS(I)/(PATM-PVBS(I))
159         V(I)= 0.5335D02*T1/(0.144D03*(PATM-PVBS(I)))
160         URS(I)=((PVBS(I)/PVSBS(I))*0.10D03)
161     END IF
162     RETURN
163     END

```

C

\$ENTRY

**A P E N D I C E - C**

(Tabelas com as condições do Ar e as condições do Bagaço durante o processo de Secagem)



TABELA C 1      ENSAIO 1

I I I TEMPO I I (MIN) I	I I                    I I                    I I                    I I                    I				I I                    I I                    I I                    I I                    I				I I I CONDICÕES I I DO I I BAGACO I
	I I TBS I I (OC) I	I I TBU I I (OC) I	I I H I I (G.H2O)/ I I (G. AR S.) I	I I HR I I (%) I	I I TBS I I (OC) I	I I TBU I I (OC) I	I I H I I (G.H2O)/ I I (G. AR S.) I	I I HR I I (%) I	
I 0.0 I	I 88.17 I	I 34.85 I	I 0.0132 I	I 3.23 I	I 83.81 I	I 34.85 I	I 0.0150 I	I 4.34 I	I 1.9400 I
I 1.0 I	I 88.17 I	I 34.85 I	I 0.0132 I	I 3.23 I	I 80.20 I	I 34.66 I	I 0.0161 I	I 5.36 I	I 0.8544 I
I 2.5 I	I 88.17 I	I 34.85 I	I 0.0132 I	I 3.23 I	I 82.29 I	I 34.66 I	I 0.0152 I	I 4.66 I	I 0.5115 I
I 5.0 I	I 88.17 I	I 34.85 I	I 0.0132 I	I 3.23 I	I 83.62 I	I 34.28 I	I 0.0137 I	I 4.00 I	I 0.3022 I
I 7.5 I	I 88.17 I	I 34.85 I	I 0.0132 I	I 3.23 I	I 83.81 I	I 34.85 I	I 0.0150 I	I 4.34 I	I 0.2128 I
I 10.0 I	I 88.36 I	I 35.04 I	I 0.0136 I	I 3.29 I	I 83.81 I	I 34.47 I	I 0.0141 I	I 4.08 I	I 0.1402 I
I 12.5 I	I 88.36 I	I 35.04 I	I 0.0136 I	I 3.29 I	I 84.19 I	I 34.85 I	I 0.0149 I	I 4.23 I	I 0.0971 I
I 15.0 I	I 88.74 I	I 35.04 I	I 0.0134 I	I 3.21 I	I 84.00 I	I 34.85 I	I 0.0150 I	I 4.29 I	I 0.0729 I
I 20.0 I	I 89.12 I	I 35.23 I	I 0.0138 I	I 3.24 I	I 84.19 I	I 34.47 I	I 0.0140 I	I 3.97 I	I 0.0434 I
I 25.0 I	I 89.12 I	I 35.42 I	I 0.0142 I	I 3.34 I	I 84.56 I	I 34.47 I	I 0.0138 I	I 3.87 I	I 0.0245 I
I 30.0 I	I 89.50 I	I 35.42 I	I 0.0141 I	I 3.26 I	I 84.56 I	I 34.66 I	I 0.0143 I	I 4.00 I	I 0.0140 I



TABELA C 3      ENSAIO 3

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	130.07	48.67	0.0429	2.42	124.76	48.85	0.0461	3.04	1.1500
1.0	129.88	48.29	0.0412	2.34	119.63	48.67	0.0475	3.66	0.4159
2.5	130.07	48.67	0.0429	2.42	120.96	48.67	0.0469	3.47	0.2320
5.0	130.07	48.29	0.0411	2.32	122.48	48.48	0.0453	3.21	0.1101
7.5	130.07	48.29	0.0411	2.32	124.00	48.85	0.0465	3.13	0.0548
10.0	130.07	48.67	0.0429	2.42	125.33	48.85	0.0459	2.97	0.0331
12.5	130.26	48.67	0.0428	2.40	126.08	49.04	0.0465	2.94	0.0264
15.0	130.07	48.85	0.0438	2.46	126.46	49.23	0.0472	2.95	0.0204
20.0	130.07	48.85	0.0438	2.46	126.27	49.04	0.0464	2.91	0.0144
25.0	130.07	49.04	0.0447	2.51	126.46	48.85	0.0454	2.84	0.0092
30.0	130.07	48.85	0.0438	2.46	126.46	49.04	0.0463	2.89	0.0062

TABELA C 4      ENSAIO 4

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	87.99	35.81	0.0157	3.84	85.52	35.62	0.0162	4.37	1.4900
1.0	87.80	35.62	0.0153	3.77	84.57	35.43	0.0162	4.52	0.7660
2.5	87.99	35.62	0.0152	3.73	84.76	35.62	0.0166	4.59	0.4244
5.0	87.99	35.62	0.0152	3.73	84.57	35.62	0.0166	4.65	0.3062
7.5	87.99	35.62	0.0152	3.73	84.38	35.43	0.0162	4.57	0.2120
10.0	88.18	35.62	0.0151	3.68	84.19	35.62	0.0168	4.76	0.1363
12.5	88.18	35.81	0.0156	3.80	84.38	35.81	0.0172	4.84	0.0987
15.0	87.99	35.62	0.0152	3.73	84.19	35.62	0.0168	4.76	0.0747
20.0	88.18	35.62	0.0151	3.68	84.19	35.43	0.0163	4.63	0.0491
25.0	88.18	35.81	0.0156	3.80	84.38	35.62	0.0167	4.70	0.0273
30.0	88.18	35.81	0.0156	3.80	84.38	35.81	0.0172	4.84	0.0170

TABELA C 5      ENSAIO 5

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	88.94	34.10	0.0111	2.64	84.19	34.10	0.0131	3.72	1.4100
1.0	88.75	33.91	0.0107	2.57	80.78	33.91	0.0141	4.58	0.7549
2.5	88.75	33.91	0.0107	2.57	81.54	33.72	0.0133	4.21	0.5553
5.0	88.56	33.91	0.0108	2.61	83.06	33.91	0.0131	3.90	0.3466
7.5	88.37	33.72	0.0104	2.54	83.44	34.10	0.0134	3.93	0.2349
10.0	88.37	33.91	0.0109	2.64	83.44	34.10	0.0134	3.93	0.1677
12.5	88.56	34.10	0.0112	2.71	83.62	34.29	0.0138	4.01	0.1320
15.0	88.37	33.91	0.0109	2.64	84.00	34.48	0.0141	4.03	0.0994
20.0	88.56	33.91	0.0108	2.61	84.19	34.67	0.0144	4.11	0.0595
25.0	88.75	33.91	0.0107	2.57	84.38	34.48	0.0139	3.93	0.0364
30.0	88.56	33.91	0.0108	2.61	84.57	34.48	0.0138	3.88	0.0217
35.0	88.56	33.91	0.0108	2.61	84.57	34.48	0.0138	3.88	0.0130
40.0	88.56	33.91	0.0108	2.61	84.76	34.29	0.0133	3.70	0.0088

TABELA C 6 ENSAIO 6

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	85.20	34.35	0.0132	3.63	1.4250
1.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	74.39	34.35	0.0178	7.51	0.8962
2.5	88.62	34.16	0.0114	2.73	77.61	34.16	0.0160	5.91	0.6205
5.0	88.62	34.16	0.0114	2.73	80.84	34.16	0.0146	4.75	0.4255
7.5	88.24	34.16	0.0115	2.81	83.31	34.16	0.0136	4.01	0.2926
10.0	88.05	34.35	0.0121	2.96	84.63	34.35	0.0135	3.77	0.2145
12.5	88.05	34.35	0.0121	2.96	84.44	34.54	0.0140	3.95	0.1613
15.0	88.05	34.35	0.0121	2.96	84.82	34.54	0.0139	3.85	0.1271
20.0	88.24	34.35	0.0120	2.92	85.01	34.54	0.0138	3.80	0.0805
25.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	85.20	34.35	0.0132	3.63	0.0505
30.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	84.82	34.54	0.0139	3.85	0.0318
35.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	84.82	34.54	0.0139	3.85	0.0195
40.0	88.62	34.35	0.0118	2.84	85.01	34.54	0.0138	3.80	0.0119



TABELA C 8      ENSAIO 8

I	I CONDICÕES DO AR NA ENTRADA				I CONDICÕES DO AR NA SAÍDA				I CONDIÇÕES DO BAGACO
	I TEMPO (MIN)	I TBS (OC)	I TBU (OC)	I H (G.H2O)/ (G. AR S.) (%)	I HR (%)	I TBS (OC)	I TBU (OC)	I H (G.H2O)/ (G. AR S.) (%)	
I 0.0	I 110.88	I 37.07	I 0.0095	I 1.03	I 97.79	I 37.07	I 0.0149	I 2.53	I 1.0600
I 1.0	I 110.69	I 37.07	I 0.0095	I 1.04	I 44.85	I 36.88	I 0.0372	I 60.17	I 0.7245
I 2.5	I 110.50	I 36.88	I 0.0091	I 1.00	I 49.40	I 37.07	I 0.0357	I 45.97	I 0.4839
I 5.0	I 110.50	I 36.88	I 0.0091	I 1.00	I 74.64	I 37.07	I 0.0247	I 10.20	I 0.3015
I 7.5	I 110.31	I 36.69	I 0.0087	I 0.96	I 85.26	I 36.88	I 0.0197	I 5.32	I 0.2034
I 10.0	I 110.50	I 36.88	I 0.0091	I 1.00	I 89.82	I 36.69	I 0.0172	I 3.92	I 0.1392
I 12.5	I 110.69	I 36.69	I 0.0085	I 0.94	I 90.77	I 37.07	I 0.0179	I 3.92	I 0.1066
I 15.0	I 110.50	I 36.88	I 0.0091	I 1.00	I 95.32	I 37.26	I 0.0165	I 3.05	I 0.0858
I 20.0	I 110.50	I 36.69	I 0.0086	I 0.95	I 95.51	I 37.64	I 0.0174	I 3.21	I 0.0589
I 25.0	I 110.50	I 36.69	I 0.0086	I 0.95	I 97.03	I 37.45	I 0.0163	I 2.84	I 0.0346
I 30.0	I 110.50	I 36.69	I 0.0086	I 0.95	I 97.41	I 37.26	I 0.0156	I 2.68	I 0.0235
I 35.0	I 110.50	I 36.69	I 0.0086	I 0.95	I 97.60	I 37.07	I 0.0150	I 2.57	I 0.0156
I 40.0	I 110.50	I 36.69	I 0.0086	I 0.95	I 97.41	I 37.26	I 0.0156	I 2.68	I 0.0111



TABELA C 9 ENSAIO 9

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO U (T)
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	
0.0	130.07	48.29	0.0411	2.32	126.08	46.96	0.0369	2.37	0.9300
1.0	130.07	48.29	0.0411	2.32	64.79	46.96	0.0642	38.30	0.5374
2.5	130.07	48.10	0.0403	2.28	81.87	47.15	0.0573	16.74	0.3017
5.0	129.88	47.91	0.0395	2.25	97.05	47.34	0.0513	8.48	0.1353
7.5	130.07	47.72	0.0386	2.19	109.58	47.15	0.0449	4.83	0.1027
10.0	130.07	47.91	0.0394	2.23	120.58	47.53	0.0418	3.16	0.0723
12.5	129.88	48.10	0.0404	2.29	125.14	47.72	0.0407	2.67	0.0540
15.0	130.07	48.10	0.0403	2.28	126.27	47.91	0.0411	2.60	0.0430
20.0	130.26	48.29	0.0411	2.31	126.08	47.72	0.0403	2.57	0.0270
25.0	130.07	48.10	0.0403	2.28	126.27	47.91	0.0411	2.60	0.0165
30.0	130.26	48.29	0.0411	2.31	126.46	47.91	0.0410	2.58	0.0101
35.0	130.07	48.29	0.0411	2.32	126.65	48.10	0.0418	2.61	0.0068
40.0	130.07	48.29	0.0411	2.32	126.65	48.10	0.0418	2.61	0.0055

TABELA C 10 ENSAIO 10

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	88.25	35.50	0.0148	3.59	85.59	35.12	0.0150	4.02	1.0350
1.0	88.06	35.50	0.0149	3.64	84.07	34.74	0.0147	4.19	0.5343
2.5	88.06	35.50	0.0149	3.64	83.88	34.93	0.0152	4.37	0.3655
5.0	88.25	35.50	0.0148	3.59	84.07	34.74	0.0147	4.19	0.2403
7.5	88.44	35.69	0.0152	3.66	83.88	34.93	0.0152	4.37	0.1824
10.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	83.69	35.12	0.0158	4.56	0.1459
12.5	88.44	35.69	0.0152	3.66	83.88	34.93	0.0152	4.37	0.1209
15.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.26	35.12	0.0155	4.39	0.1001
20.0	88.63	35.31	0.0142	3.39	84.45	35.31	0.0159	4.47	0.0694
25.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.26	35.50	0.0165	4.66	0.0465
30.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.45	35.50	0.0164	4.60	0.0322

TABELA C 11      ENSAIO 11

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO U (T)
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	
0.0	88.63	35.69	0.0151	3.62	86.16	35.50	0.0157	4.12	1.2000
1.0	88.44	35.50	0.0147	3.55	83.88	35.31	0.0162	4.64	0.6994
2.5	88.25	35.31	0.0143	3.48	83.50	35.12	0.0158	4.62	0.4957
5.0	88.44	35.50	0.0147	3.55	83.88	35.12	0.0157	4.50	0.3573
7.5	88.63	35.31	0.0142	3.39	84.07	35.31	0.0161	4.58	0.2586
10.0	88.44	35.50	0.0147	3.55	83.88	35.31	0.0162	4.64	0.2166
12.5	88.44	35.69	0.0152	3.66	83.88	35.50	0.0166	4.77	0.1801
15.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.07	35.69	0.0170	4.85	0.1544
20.0	88.63	35.31	0.0142	3.39	84.26	35.88	0.0174	4.92	0.1124
25.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.45	35.69	0.0169	4.73	0.0844
30.0	88.63	35.50	0.0146	3.50	84.64	35.88	0.0173	4.81	0.0611

TABELA C 12

ENSAIO 12

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	88.76	35.25	0.0140	3.33	86.29	34.87	0.0140	3.68	1.1500
1.0	88.57	35.25	0.0140	3.37	41.70	34.68	0.0327	62.81	0.9231
2.5	88.38	35.44	0.0146	3.53	63.71	34.87	0.0236	15.72	0.7022
5.0	88.57	35.25	0.0140	3.37	75.47	34.87	0.0186	7.49	0.4985
7.5	88.57	35.44	0.0145	3.48	83.25	35.06	0.0158	4.65	0.3607
10.0	88.38	35.25	0.0141	3.41	84.20	35.06	0.0154	4.37	0.2767
12.5	88.57	35.06	0.0136	3.26	85.72	35.25	0.0152	4.07	0.2213
15.0	88.76	35.25	0.0140	3.33	86.10	34.87	0.0141	3.73	0.1767
20.0	88.19	35.25	0.0142	3.46	86.67	35.06	0.0144	3.71	0.1252
25.0	88.57	35.44	0.0145	3.48	86.48	35.25	0.0149	3.87	0.0888
30.0	88.57	35.44	0.0145	3.48	86.67	35.25	0.0148	3.83	0.0584
35.0	88.57	35.44	0.0145	3.48	86.48	35.25	0.0149	3.87	0.0381
40.0	88.57	35.44	0.0145	3.48	86.67	35.25	0.0148	3.83	0.0319

TABELA C 13 ENSAIO 13

CONDICÕES DO AR NA ENTRADA		CONDICÕES DO AR NA SAÍDA						CONDICÕES DO BAGACO	
TEMPO (MIN)	TBS	TBU	H (G.H2O) / (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O) / (G. AR S.)	HR (%)	CONDICÕES DO BAGACO
0.0	130.50	43.03	0.0197	1.13	126.52	42.65	0.0200	1.30	1.1250
1.0	130.31	43.22	0.0204	1.18	45.87	42.65	0.0553	82.62	0.8604
2.5	130.31	43.03	0.0198	1.14	72.44	42.84	0.0440	19.36	0.5089
5.0	130.12	42.84	0.0192	1.12	97.11	42.65	0.0325	5.52	0.3075
7.5	130.50	43.03	0.0197	1.13	115.89	42.84	0.0252	2.26	0.1245
10.0	130.31	43.22	0.0204	1.18	123.67	43.03	0.0225	1.59	0.1199
12.5	130.31	43.41	0.0211	1.22	124.62	43.22	0.0228	1.56	0.1006
15.0	130.50	43.22	0.0204	1.17	125.95	43.22	0.0223	1.47	0.0838
20.0	130.31	43.60	0.0218	1.26	126.14	43.03	0.0215	1.41	0.0588
25.0	130.31	43.22	0.0204	1.18	126.52	43.22	0.0220	1.43	0.0450
30.0	130.31	43.41	0.0211	1.22	126.52	43.41	0.0227	1.47	0.0324
35.0	130.31	43.41	0.0211	1.22	126.71	43.22	0.0219	1.41	0.0239
40.0	130.31	43.41	0.0211	1.22	126.52	43.22	0.0220	1.43	0.0198

TABELA C 14

ENSAIO 14

TEMPO (MIN)	CONDICOES DO AR NA ENTRADA				CONDICOES DO AR NA SAIDA				CONDICOES DO BAGACO
	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	TBS (OC)	TBU (OC)	H (G.H2O)/ (G. AR S.)	HR (%)	U (T)
0.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	81.02	36.05	0.0193	6.17	0.9000
1.0	88.23	36.43	0.0172	4.16	59.01	35.86	0.0282	23.12	0.6088
2.5	88.42	36.62	0.0176	4.23	72.29	35.48	0.0215	9.85	0.4575
5.0	88.42	36.81	0.0181	4.35	78.74	35.67	0.0192	6.76	0.3115
7.5	88.23	36.43	0.0172	4.16	80.07	35.86	0.0192	6.38	0.2365
10.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	80.64	36.05	0.0194	6.32	0.1783
12.5	88.61	36.81	0.0181	4.30	81.02	36.24	0.0198	6.32	0.1575
15.0	88.42	37.00	0.0187	4.47	81.40	36.62	0.0206	6.49	0.1348
20.0	88.61	36.81	0.0181	4.30	81.78	36.62	0.0204	6.34	0.1113
25.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	82.16	36.43	0.0198	6.05	0.0946
30.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	82.16	36.43	0.0198	6.05	0.0785
35.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	82.35	36.62	0.0202	6.13	0.0625
40.0	88.42	36.62	0.0176	4.23	82.16	36.43	0.0198	6.05	0.0538

## A P E N D I C E - D

(Programas de Computação: Cálculo dos Parâmetros e Ajuste da Equação 5.5).

26  
25  
24  
23  
22  
21  
20  
19  
18

```
SDV = 0
SXQ = 0
SXY = 0
SY = 0
SX = 0
REAL A,B,K,TETA,TEST(10),YQBS(10),DESV
REAL X(N),Y(N),SX,SY,SXY,SXQ,SDV,DV
INTEGER N,I
SUBROUTINE CORREL(X,Y,YQBS,N)
```

```
*****
* SUBROTINA
* METODO DOS MINIMOS QUADRADOS
*****
```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

```
END
STOP
```

17  
16

```
CONTINUE
CALL CORREL(T,U,UM,LL)
CHAMADA DA SUBROTINA
```

C  
10

```
CONTINUE
L = TAM(I)
DO 20 J=1,L
  READ(5,4) T(J),UM(J)
  FORMAT(F4.1,F7.4)
  U(J) = ALOG(UM(J))
```

13  
12  
11  
10  
9  
8

```
LEITURA E CALCULO DO LN DOS DADOS
```

C  
C  
C

```
+*CM,6X,TEMPERATURA = ,I3,I3,IX,OC,6X,VAZAO = ,I4,IX,
FORMAT(4(//),10X,ENSAIO = ,I3,6X,ALTURA = ,F4.1,IX,
WRITE(6,2) ENS(I),ALT(I),TEMP(I),VAZ(I)
FORMAT(12,F5.1,14,12)
READ(5,1)ENS(I),ALT(I),TEMP(I),VAZ(I),TAM(I)
```

2  
1

```
LEITURA DAS CONDICIONES OPERATIVAS DOS ENSAIOS
```

C  
C  
C

```
DO 10 I=1,14
REAL ALT(15),TEMP(15),VAZ(15),TAM(15)
INTEGER ENS(15),TEMP(15),VAZ(15),TAM(15)
```

3  
2  
1

```
ONDE X(I) = T E Y(I) = LN U*
```

C  
C  
C

```
LN U* = LN (TETA) - K.T
OU SEJA
```

C  
C  
C

```
U* = TETA*EXP (-K.T)
*****
* PROGRAMA QUE DETERMINA POR RESSAIDA LINEAR
* OS PARAMETROS K E TETA, UTILIZANDO OS
* PONTOS A TEMPOS GRANDES DAS CURVAS DE SECAGEM.
*****
```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

\$JOB LINDAUREA, TIME=30, PAGES=20



```
27      DO 30 I=1,N
28          SX = SX+X(I)
29          SY = SY+Y(I)
30          SXY= SXY+X(I)*Y(I)
31          SXQ= SXQ+X(I)**2.
32      30  CONTINUE
      C    CALCULO DO COEFICIENTE ANGULAR E DE INTERCECAO
      C
33          A = (N*SXY-SX*SY)/(N*SXQ-SX**2.)
34          B = (SY*SXQ-SX*SXY)/(N*SXQ-SX**2.)
      C
      C    PELA EQUACAO (1) TEMOS
      C    LN(TETA) = B      E      -K = A      ENTAO
35          TETA = EXP(B)
36          K     = (-A)
      C
37          WRITE(6,6) K,TETA
38      6  FORMAT(//,16X,'K      =',F10.6,//,16X,'TETA =',F10.6)
      C
39          RETURN
40          END
      C
$ENTRY
```

```

$JOB LINDAUREA,TIME=30,PAGES=20
C
C *****
C * PROGRAMA QUE CORRELACIONA AS CURVAS DE SECAGEM *
C * COM A EQUACAO 5.5 , DETERMINANDO O NUMERO DE *
C * TERMOS DA SERIE, O DESVIO ABSOLUTO E OS ERROS *
C * PERCENTUAIS RELATIVOS DOS DADOS ESTIMADOS EM *
C * RELACAO AOS DADOS OBSERVADOS. *
C *****
C
1 INTEGER ENS(15),TEMP(15),VAZ(15),TAM(15),NT(100),I,L,J,Z
2 REAL ALT(15),T(180),U(180),UCAL(180),K(15),TETA(15)
3 REAL S(500),TOL,SOMT,SERIE,DIF
C
4 Z = 0
5 DO 10 I=1,14
6 TOL = 1E-05
7 Z = Z+1
C
C LEITURA DAS CONDICoes OPERATIVAS DOS ENSAIOS E DOS
C PARAMETROS K E TETA.
C
8 READ(5,1)ENS(I),ALT(I),TEMP(I),VAZ(I),TAM(I),
+ K(I),TETA(I)
9 1 FORMAT(I2,F5.1,I4,I4,I3,2(F9.6))
C
10 WRITE(6,2) Z,ENS(I)
11 2 FORMAT('1',4(/),23X,'TABELA E',I3,5X,'ENSAIO',I3)
12 WRITE(6,21)Z,ENS(I)
13 21 FORMAT('+',22X,'TABELA E',I3,5X,'ENSAIO',I3)
14 WRITE(6,22)Z,ENS(I)
15 22 FORMAT('+',22X,'TABELA E',I3,5X,'ENSAIO',I3)
C
16 WRITE(6,3)
17 3 FORMAT(/,23X,67(' '),/,23X,'I',9X,'I',14X,'I',14X,'I',
+10X,'I',14X,'I',/,23X,'I',2X,'TEMPO',2X,'I',4X,'U* OBS',
+4X,'I',4X,'U* EST',4X,'I',4X,'NT',4X,'I',2X,'ERRO DE U*',
+2X,'I',/,23X,'I',2X,'(MIN)',2X,'I',14X,'I',14X,'I',10X,
+'I',5X,'(/)',6X,'I',/,23X,'I',9(' '),'I',14(' '), 'I',
+14(' '), 'I',10(' '), 'I',14(' '), 'I')
C
18 L = TAM(I)
19 DO 20 J=1,L
20 READ(5,4) T(J),U(J)
21 4 FORMAT(F4.1,F7.4)
22 N = 0
23 SOMT = 0
24 5 N = N+1
25 SERIE = (1./2.**N)*EXP(-((N**3.+3.*N+1.)*(K(I)*T(J)))
26 SOMT = SOMT+SERIE
27 S(N) = (1.-TETA(I))*SOMT
28 IF (N-1)5,5,6
29 6 DIF = ABS(S(N)-S(N-1))
30 IF (DIF-TOL)7,7,5
31 7 UCAL(J) = TETA(I)*EXP(-(K(I)*T(J)))+S(N)
32 NT(J) = N
33 20 CONTINUE

```

```

C   CHAMADA DA SUBROTINA
34  CALL ESTAT(T,U,UCAL,L,NT,DESV)
35  WRITE(6,11)K(I)
36  11  FORMAT(2(/),49X,'K      =',F7.4)
37  WRITE(6,12)K(I)
38  12  FORMAT('+',48X,'K      =',F7.4)
39  WRITE(6,13)K(I)
40  13  FORMAT('+',48X,'K      =',F7.4)
41  WRITE(6,14)TETA(I)
42  14  FORMAT(/,49X,'TETA  =',F7.4)
43  WRITE(6,15)TETA(I)
44  15  FORMAT('+',48X,'TETA  =',F7.4)
45  WRITE(6,16)TETA(I)
46  16  FORMAT('+',48X,'TETA  =',F7.4)
47  WRITE(6,17)DESV
48  17  FORMAT(/,49X,'DESVIO =',F7.4)
49  WRITE(6,18)DESV
50  18  FORMAT('+',48X,'DESVIO =',F7.4)
51  WRITE(6,19)DESV
52  19  FORMAT('+',48X,'DESVIO =',F7.4)
53  10  CONTINUE
54  WRITE(6,31)
55  31  FORMAT('1')
C
56  STOP
57  END

C
C

58  SUBROUTINE ESTAT(T,U,UCAL,N,NT,DESV)
59  INTEGER N,I,NT(N)
60  REAL T(N),U(N),UCAL(N),SDV,DV,DESV,ERRP(15)
C
61  SDV = 0
62  DO 30 I=1,N
63  DV   = ABS(U(I)-UCAL(I))*2.
64  SDV  = SDV+DV
C
C   CALCULO DO ERRO PERCENTUAL RELATIVO DE U*
65  ERRP(I) = (ABS(UCAL(I)-U(I))/U(I))*100.
66  WRITE(6,8) T(I),U(I),UCAL(I),NT(I),ERRP(I)
67  8  FORMAT(23X,'I',2X,F4.1,3X,'I',2(4X,F6.4,4X,'I'),
+4X,I2,4X,'I',4X,F5.2,5X,'I',/,23X,'I',9(' '), 'I',
+2(14(' '), 'I'),10(' '), 'I',14(' '), 'I')
68  30  CONTINUE
C
C   CALCULO DO DESVIO PADRAO DA ESTIMATIVA
69  DESV = (SDV/(N-2.))**.5
C
70  RETURN
71  END
C

```

\$ENTRY

**A P Ê N D I C E - E**

**(Tabelas Obtidas no Computador Utilizando  
a Equação 5.5).**

TABELA E 1      ENSAIO 1

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.4404	0.4512	4	2.45
2.5	0.2637	0.2589	3	1.81
5.0	0.1558	0.1442	3	7.45
7.5	0.1097	0.0968	2	11.80
10.0	0.0723	0.0700	2	3.13
12.5	0.0500	0.0521	2	4.16
15.0	0.0376	0.0391	2	3.94
20.0	0.0224	0.0222	2	1.07
25.0	0.0126	0.0126	2	0.11
30.0	0.0072	0.0071	2	0.70

K = 0.1131

TETA = 0.2128

DESVIO = 0.0071

TABELA E 2      ENSAIO 2

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.4171	0.4341	5	4.08
2.5	0.2599	0.2319	4	10.78
5.0	0.1396	0.1149	3	17.71
7.5	0.0848	0.0716	2	15.62
10.0	0.0485	0.0506	2	4.40
12.5	0.0372	0.0380	2	2.21
15.0	0.0279	0.0293	2	4.85
20.0	0.0179	0.0177	2	1.07
25.0	0.0108	0.0108	2	0.07
30.0	0.0066	0.0066	2	0.26

K = 0.0988

TETA = 0.1277

DESVIDO = 0.0144

TABELA E 3      ENSAIO 3

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.3616	0.4409	5	21.93
2.5	0.2017	0.2285	4	13.26
5.0	0.0958	0.1017	3	6.17
7.5	0.0476	0.0554	3	16.43
10.0	0.0288	0.0355	2	23.28
12.5	0.0230	0.0255	2	10.79
15.0	0.0178	0.0195	2	9.61
20.0	0.0125	0.0124	2	0.91
25.0	0.0080	0.0081	2	1.42
30.0	0.0054	0.0053	2	0.98

K = 0.0831

TETA = 0.0647

DESVIO = 0.0282

TABELA E 4      ENSAIO 4

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.5141	0.4899	5	4.72
2.5	0.2849	0.2984	3	4.75
5.0	0.2055	0.1759	3	14.39
7.5	0.1423	0.1216	2	14.52
10.0	0.0915	0.0901	2	1.50
12.5	0.0663	0.0686	2	3.50
15.0	0.0502	0.0528	2	5.15
20.0	0.0330	0.0315	2	4.51
25.0	0.0184	0.0189	2	2.48
30.0	0.0114	0.0113	2	0.99

K      = 0.1026

TETA   = 0.2453

DESVIO = 0.0152



TABELA E 5      ENSAIO 5

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.5354	0.5374	5	0.37
2.5	0.3938	0.3531	3	10.34
5.0	0.2458	0.2245	3	8.67
7.5	0.1666	0.1609	2	3.41
10.0	0.1190	0.1210	2	1.69
12.5	0.0936	0.0927	2	0.97
15.0	0.0705	0.0715	2	1.40
20.0	0.0422	0.0428	2	1.35
25.0	0.0258	0.0256	2	0.66
30.0	0.0154	0.0154	2	0.25
35.0	0.0092	0.0092	2	0.08
40.0	0.0062	0.0055	2	10.98

K = 0.1024

TETA = 0.3313

DESVIDO = 0.0140

TABELA E 6      ENSAIO 6

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRD DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	16	0.00
1.0	0.6289	0.5763	5	8.37
2.5	0.4355	0.3965	4	8.95
5.0	0.2986	0.2633	3	11.81
7.5	0.2053	0.1936	2	5.68
10.0	0.1505	0.1486	2	1.28
12.5	0.1132	0.1160	2	2.50
15.0	0.0892	0.0912	2	2.29
20.0	0.0565	0.0568	2	0.54
25.0	0.0355	0.0354	2	0.17
30.0	0.0223	0.0221	2	0.82
35.0	0.0137	0.0138	2	0.75
40.0	0.0084	0.0086	2	2.55

K      = 0.0943

TETA   = 0.3743

DESVIO = 0.0227

TABELA E 7      ENSAIO 7

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	16	0.00
1.0	0.7024	0.6064	5	13.67
2.5	0.4992	0.4286	4	14.14
5.0	0.3449	0.2926	3	15.15
7.5	0.2272	0.2203	3	3.03
10.0	0.1722	0.1737	2	0.89
12.5	0.1359	0.1402	2	3.13
15.0	0.1110	0.1143	2	2.99
20.0	0.0759	0.0770	2	1.48
25.0	0.0530	0.0522	2	1.58
30.0	0.0354	0.0354	2	0.10
35.0	0.0260	0.0240	2	7.76
40.0	0.0213	0.0163	2	23.65

K = 0.0777

TETA = 0.3635

DESVIDO = 0.0394

TABELA E 8      ENSAIO 8

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.6835	0.5551	5	18.78
2.5	0.4565	0.3697	4	19.01
5.0	0.2844	0.2380	3	16.33
7.5	0.1919	0.1728	2	9.94
10.0	0.1313	0.1326	2	1.02
12.5	0.1006	0.1044	2	3.74
15.0	0.0810	0.0830	2	2.47
20.0	0.0556	0.0531	2	4.54
25.0	0.0327	0.0341	2	4.18
30.0	0.0222	0.0219	2	1.44
35.0	0.0148	0.0141	2	5.04
40.0	0.0105	0.0090	2	14.03

K = 0.0885

TETA = 0.3115

DESVIDO = 0.0491

TABELA E 9      ENSAIO 9

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.5778	0.4773	5	17.39
2.5	0.3244	0.2813	4	13.28
5.0	0.1455	0.1588	3	9.14
7.5	0.1104	0.1073	2	2.84
10.0	0.0778	0.0790	2	1.59
12.5	0.0581	0.0605	2	4.11
15.0	0.0462	0.0470	2	1.74
20.0	0.0291	0.0288	2	1.08
25.0	0.0177	0.0177	2	0.03
30.0	0.0109	0.0109	2	0.02
35.0	0.0073	0.0067	2	8.12
40.0	0.0059	0.0041	2	30.02

K = 0.0971

TETA = 0.2004

DESVIO = 0.0332

TABELA E 10      ENSAIO 10

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.5162	0.5801	5	12.38
2.5	0.3532	0.3952	4	11.90
5.0	0.2322	0.2596	3	11.79
7.5	0.1762	0.1912	3	8.53
10.0	0.1410	0.1493	2	5.85
12.5	0.1168	0.1200	2	2.76
15.0	0.0968	0.0980	2	1.21
20.0	0.0670	0.0664	2	0.82
25.0	0.0450	0.0454	2	0.90
30.0	0.0311	0.0311	2	0.08

K      = 0.0757

TETA   = 0.3014

DESVIO = 0.0277

TABELA E 11      ENSAIO 11

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.5828	0.6300	5	8.09
2.5	0.4131	0.4527	4	9.59
5.0	0.2977	0.3140	3	5.46
7.5	0.2155	0.2395	3	11.14
10.0	0.1805	0.1920	3	6.37
12.5	0.1500	0.1584	2	5.59
15.0	0.1287	0.1328	2	3.20
20.0	0.0937	0.0956	2	2.03
25.0	0.0704	0.0696	2	1.07
30.0	0.0509	0.0509	2	0.02

K = 0.0624

TETA = 0.3306

DESVIO = 0.0232

TABELA E 12      ENSAIO 12

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	16	0.00
1.0	0.8027	0.6781	5	15.52
2.5	0.6106	0.5173	4	15.28
5.0	0.4335	0.3796	3	12.43
7.5	0.3136	0.2972	3	5.24
10.0	0.2406	0.2394	2	0.50
12.5	0.1924	0.1955	2	1.63
15.0	0.1537	0.1608	2	4.60
20.0	0.1089	0.1095	2	0.59
25.0	0.0772	0.0749	2	3.01
30.0	0.0507	0.0512	2	1.03
35.0	0.0331	0.0350	2	5.86
40.0	0.0277	0.0240	2	13.45

K = 0.0759

TETA = 0.4994

DESVIDO = 0.0500



TABELA E 13      ENSAIO 13

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.7648	0.5603	5	26.74
2.5	0.4523	0.3648	4	19.35
5.0	0.2734	0.2251	3	17.68
7.5	0.1640	0.1585	3	3.34
10.0	0.1107	0.1206	2	8.98
12.5	0.0894	0.0963	2	7.70
15.0	0.0745	0.0790	2	6.03
20.0	0.0522	0.0553	2	5.90
25.0	0.0399	0.0394	2	1.18
30.0	0.0288	0.0283	2	1.85
35.0	0.0212	0.0203	2	4.27
40.0	0.0176	0.0146	2	17.18

K = 0.0662

TETA = 0.2056

DESVIO = 0.0688

TABELA E 14      ENSAIO 14

TEMPO (MIN)	U* OBS	U* EST	NT	ERRO DE U* (%)
0.0	1.0000	1.0000	17	0.00
1.0	0.6764	0.6864	6	1.48
2.5	0.5083	0.5161	5	1.53
5.0	0.3461	0.3731	4	7.80
7.5	0.2628	0.2922	3	11.20
10.0	0.1981	0.2393	3	20.80
12.5	0.1750	0.2018	3	15.31
15.0	0.1497	0.1738	3	16.08
20.0	0.1237	0.1342	2	8.48
25.0	0.1051	0.1068	2	1.66
30.0	0.0873	0.0863	2	1.12
35.0	0.0694	0.0702	2	1.16
40.0	0.0597	0.0573	2	4.06

K = 0.0402

TETA = 0.2857

DESVIO = 0.0210