



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II**  
**PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. MECÂNICA**



# **PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE  
SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

**ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**DEZEMBRO / 1995**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA SECAGEM E  
DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE  
CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

**ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA**

**Campina Grande - Paraíba  
Dezembro de 1995**

**Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**ESTUDO DA SECAGEM E  
DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE  
CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Projeto do Produto Mecânico

Sub-área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Sandoval Farias da Mata

Universidade Federal da Paraíba

Campina Grande  
Universidade Federal da Paraíba  
1995



L732e Lima, Antônio Gilson Barbosa de.  
Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda / Antônio Gilson Barbosa de Lima. - Campina Grande, 1995.  
144 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1995.

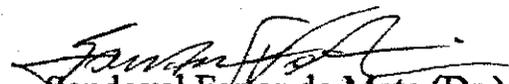
1. Bicho-da-Seda - Casulos. 2. Secagem. 3. Dimensionamento de Secador. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Mata, Sandoval Farias de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 628.2:66.047(043)

**ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE  
CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

**Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM  
15 DE DEZEMBRO DE 1995**

  
Sandoval Farias da Mata (Dr.)

ORIENTADOR

  
Odélsia Leonor Sánchez de Alsina (Dr.<sup>a</sup>)

MEMBRO

  
José Tomáz Vieira Pereira (Dr.)

MEMBRO

  
Sílvio José Rossi (Dr.)

MEMBRO

**Campina Grande-Pb.**

**1995**

**ESTUDO DA SECAGEM E  
DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE  
CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

## **DEDICATÓRIA**

*À DEUS*

*Por ter me dado saúde e sabedoria para alcançar o objetivo desejado.*

*Aos meus pais, irmãos, minha esposa Telma e em especial aos meus filhos Celso e Wanderson, pelo amor e apoio à realização deste trabalho*

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

À Prefeitura Municipal de Campina Grande, pelo apoio e fornecimento de recursos materiais e humanos indispensáveis para este trabalho.

Ao Professor Sandoval Farias da Mata, pela orientação, amizade e apoio à realização deste trabalho.

À Universidade Estadual da Paraíba, pela liberação das atividades durante o período em que fui professor daquela Instituição, e cujo período coincidiu com o do curso de pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, por ter-me permitido, dar continuidade as atividades de mestrado, sem prejuízo para as atividades acadêmicas.

Ao Departamento de Engenharia Química - Laboratório de Processos Químicos e em particular à Professora Odélsia Leonor Sánchez de Alsina, pela orientação, concessão de material bibliográfico e equipamentos de laboratório.

À Cooperativa dos Cafeicultores e Agropecuaristas do Maringá-COCAMAR, na pessoa do Sr. Walter Saragoça, pelo fornecimento de material para realização dos experimentos de secagem e concessão de estágio naquela cooperativa.

Ao Professor Inácio Batista Dantas pelo fornecimento de material e apoio à realização deste trabalho.

Aos Professores Yoge Gerônimo Ramos da Costa, Raimundo Nonato C. Duarte e demais professores do DEM/Área de Térmica e Fluidos, pelas sugestões e incentivo.

Ao Professor Natanael Victor de Oliveira, pelos relevantes serviços prestados ao curso e, por conseguinte, aos alunos de Mestrado, como também pelo incentivo, apoio e sugestões a este trabalho.

Ao Sr. Luiz Roberto Rocha de Lucena, pela amizade, apoio, sugestões e serviços prestados, quando da digitação deste trabalho.

À colega Luciana, mestranda em Engenharia Química, pelo fornecimento de material e colaboração a este trabalho.

À Srta. Lúcia Márcia Donato Quirino, pela sua amizade e apoio, durante o curso de pós-graduação.

Aos colegas do curso William, Valdemir, Rafael, Flávio, Naécio e demais, pelo apoio e incentivo, durante todo o Mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A operação unitária de secagem tem relevante importância para o armazenamento de produtos biológicos. O casulo verde produzido pelo *Bombix mori* L. é composto de 3 partes: a casca, a crisálida e o espólio, possuindo um teor de umidade inicial de 68 a 70% ( b.u.), sendo que a casca ( que é formada por fio de seda ), é constituída basicamente de fibroína e sericina. É um material de forma variável e é comercializado com o objetivo de se gerar fio de seda e, conseqüentemente produtos de alto valor agregado, a partir de sua industrialização. A secagem de casulos do bicho-da-seda, devido ao seu alto teor de umidade e baixo ciclo de vida da crisálida ( 4 a 5 dias após a colheita ), passa a ser de suma importância, na medida em que os casulos precisam ser armazenados com teor de umidade de 10 a 12% ( b.s.), de forma a minimizar a sua deterioração, como também impedir que a crisálida se transforme na mariposa, matando-a, evitando o rompimento do casulo ( produzido por um suco alcalino, emitido pela mariposa), o que leva à inutilização do fio, pelo seu elevado número de rupturas. O objetivo deste trabalho é dar uma contribuição ao conhecimento relativo à secagem de casulos do bicho-da-seda e apresentar o projeto de um secador protótipo de operação contínua e fluxos cruzados. Foram realizados experimentos de secagem em leito fixo e fluxos cruzados. Verificou-se as influências da temperatura e da vazão do ar, como também da espessura da camada, na secagem de casulos do bicho-da-seda *Bombix mori* L.. Concluiu-se que a cinética de secagem depende fortemente da temperatura do ar, independe da vazão de ar e depende levemente da espessura da camada de casulos. Foram propostas equações para descrever o comportamento da cinética de secagem de casulos em leito fixo, obtendo alto coeficiente de determinação ( $> 0,99$ ). Apresentou-se o projeto de um secador de operação contínua e fluxos cruzados, a modelagem matemática e as hipóteses utilizadas para o seu dimensionamento. Comparando-se o mesmo a outros secadores semelhantes, concluiu-se que o secador proposto é técnico e economicamente viável.

## ABSTRACT

The drying unit operation has relevant importance to the storage of biological products. The cocoon produced by the *Bombix mori* L. consists of 3 parts: the shell, the chrysalis and the booty and possesses an initial moisture content of 68-70% (w.b.), with the shell (which is formed for silk yarn) basically constituted of fibroin and sericin. The cocoon is a material of variable form and it is marketed with the objective to produce silk yarns, which are used on the manufacturing of high cost products. Due to its high moisture content and the low life cycle of chrysalis ( 4-5 days after crop of the cocoon ), the drying of the silkworm cocoon is a very important operation as they need to be stored with low moisture content (10-12% d.b.) in order to minimize its deterioration as well as to prevent the transformation of the chrysalis into a moth. If this process occurred, the cocoon would break by an alkaline juice expelled by the moth . The purpose of the work is to study the silkworm cocoon drying and to present a project of a drier prototype of continuous operation and crossflow. Drying experiments were made in fixed bed and crossflows. Influences of the air temperature, the airflow and layer thickness during the silkworm cocoon drying *Bombix mori* L. were tested. The conclusion was that the drying kinetic depends strongly in the air temperature, it does not depend on the airflow and depends slightly on the cocoon layer thickness. Equations to describe the cocoon drying kinetic behavior in fixed bed were proposed and a high determination coefficient was obtained (  $> 0,99$  ). The project of a drier prototype of continuous operation and crossflow, the mathematical modeling and the hypotheses used to define its dimensions were presented. Comparing this to similar ones, it proved to be technically and economically viable.

## LISTA DE NOTAÇÕES

$\overline{a_1}, \overline{a_2}, \overline{b_1}, \overline{b_2}$  = constantes da equação 28, que dependem do produto.

$\overline{a_4}, \overline{a_5}, \overline{b_4}, \overline{b_5}$  = constantes da equação 30, que dependem do produto.

$\overline{a_6}, \overline{b_6}$  = constantes da equação 31, que dependem do produto.

$\overline{A}, \overline{B}$  = constantes da equação 28, que dependem da temperatura do produto.

$\overline{a_3}, \overline{b_3}$  = constantes da equação 29, que dependem do produto

$A = A_1 U_0$  = parâmetro da equação 62

$A^*$  = área específica ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ )

$A_i; a_i$  = constantes características do produto ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )

$c$  = calor específico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$C$  = constante da equação 5

$C$  = elemento químico Carbono

$C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  = parâmetros da equação 63

$c_a$  = calor específico do ar seco à pressão constante ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$c_l$  = calor específico do líquido ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$c_p$  = calor específico do produto ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$c_v$  = calor específico do vapor d'água, à pressão constante ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$c_w$  = calor específico da água ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$D$  = coeficiente de difusão aparente ou efetivo ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$D_0$  = coeficiente de difusão para temperaturas elevadas ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$dU/dt$  = taxa de secagem (U em b.s)

$E$  = espessura do leito (cm)

$E_a$  = energia de ativação ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$(f_1)$  = equação de camada fina apropriada

$(f_2)$  = equação de camada fina apropriada

$g$  = aceleração da gravidade ( $m \cdot s^{-2}$ )

$\Delta h_{fg}^*$  = variação do calor latente de vaporização da água no produto ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$h_{fg}^*$  = calor latente de vaporização da água do produto ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$H$  = elemento químico Hidrogênio

$h_w$  = calor diferencial específico de sorção ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$h_{fg}$  = calor latente de vaporização da água livre (dependente de  $T$ ) ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$h_m$  = coeficiente de transferência de massa por convecção entre a água e o ar. ( $m \cdot s^{-1}$ )

$h_{m_y}$  = coeficiente local de transferência de massa por convecção ( $m \cdot s^{-1}$ )

$h_y$  = coeficiente local de transferência de calor convectiva ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$\bar{J}_q$  = fluxo de calor ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$\bar{J}_l$  = fluxo de líquido ( $Kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$\left(\bar{J}_q\right)_m$  = fluxo de calor na ausência de massa ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$\bar{J}_v$  = fluxo de vapor ( $Kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$K_v$  = condutividade de vapor ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$K_t$  = condutividade térmica aparente ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$k = a_1 D$  = parâmetro da equação 62

$K_a$  = condutividade térmica do ar, dependente da temperatura ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$K_h$  = condutividade hidráulica ( $s^{-1}$ )

$K_{ij}$  = coeficientes fenomenológicos ( $i = j = 1, 2, 3$ )

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

$K_l$  = condutividade líquida (s)

$L$  = adimensional de profundidade para o ponto em que  $U$  é computado

$\dot{m}_w$  = fluxo de massa evaporada ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$m$  = massa da amostra no tempo  $t$  (kg)

$m_a$  = massa de ar no cilindro 1 (kg)

$M$  = razão de umidade do grão, (adimensional)

$M_a$  = peso molecular do ar =  $28,966 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

$m_{a1}$  = massa de ar no cilindro 1 (kg)

$m_{a2}$  = massa de ar no cilindro 2 (kg)

$m_o$  = massa inicial da amostra antes do processo inicial de secagem (g)

$m_s$  = massa da amostra seca (g)

$M_w$  = massa molecular da água =  $18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

$N$  = elemento químico Nitrogênio

$O$  = elemento químico Oxigênio

$P$  = pressão total (Pa)

$P_{a1}$  = pressão no cilindro 1 (Pa)

$P_{a2}$  = pressão no cilindro 2 (Pa)

$P_{atm}$  = pressão ambiente (Pa)

$P_r$  = N<sup>o</sup>. de Prandtl (adimensional)

$P_v$  = pressão de vapor à temperatura  $T$  (Pa)

$P_{vs}$  = pressão do vapor de saturação (Pa)

$P_{vu}$  = pressão de vapor à temperatura de bulbo úmido (Pa)

$Q$  = vazão específica de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$q_{\text{conv}}$  = taxa de calor transferido por convecção do ar para a água (W)

$q_{\text{evap}}$  = quantidade de calor latente de vaporização (W)

$\overline{R^2}$  = coeficiente de determinação

$r$  = distância radial ou espessura, na equação 5 (m)

$R_a$  = constante particular do gás ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$R_c$  = razão de convecção de unidades produto/ar (kg de matéria seca/kg de ar seco)

$R_o$  = constante universal dos gases =  $8314 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$R_v$  = constante dos gases para o vapor d'água =  $462,69 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$S$  = área de troca de calor ( $\text{m}^2$ )

$Sc$  = No. de Schmidt (adimensional)

$T$  = temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  = tempo (s)

$t^*$  = tempo acumulado de secagem (h)

$T_{\text{abs}}$  = temperatura absoluta (K) =  $T + 273$

$T_{\text{bu}}$  = temperatura do bulbo úmido (K)

$T_e$  = temperatura na qual o ar está em equilíbrio com o grão com o seu teor inicial de umidade, depois de ter o ar sido resfriado ao longo de uma linha de temperatura de bulbo úmido constante ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{ent}}$  = temperatura do ar na entrada do secador (K)

$T_f$  = temperatura final do ar (K)

$T_o$  = temperatura do ar antes da secagem ( $^{\circ}\text{C}$ )

$U$  = teor de umidade do produto no tempo (b.s.)

$U$  = teor de umidade do produto (b.s.)

$U_{\text{b.s.}}$  = teor de umidade do produto em base seca (b.s.)

$U_e$  = teor de umidade de equilíbrio (b.s)

$U_f$  = teor de umidade final (b.s.)

$U_o$  = umidade inicial da amostra (b.u)

UR = umidade relativa do ar (decimal)

$V_a$  = velocidade do ar ( $m \cdot s^{-1}$ )

$V_p$  = velocidade do produto ( $m \cdot s^{-1}$ )

$V_{a1}$  = volume de ar no cilindro 1 ( $m^3$ )

$V_{a2}$  = volume de ar no cilindro 2 ( $m^3$ )

$x$  = razão de umidade do ar (adimensional)

$X$  = distância do ponto de entrada do ar até o grão ( m )

$x_{ent}$  = razão de umidade do ar na entrada do secador (kg de água/kg de ar seco)

$x_o$  = razão de umidade do ar antes da secagem (umidade absoluta), (kg/kg de ar seco)

$y$  = profundidade da camada de grãos ( $m$ ); coordenada direcional (cm)

$Y$  = adimensional de tempo até que  $U$  seja computado

$\Delta$  = variação

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\eta$  = parâmetros da equação 46

$s$  = porosidade (decimal)

$\theta$  = temperatura do produto ( $^{\circ}C$ )

$\theta_o$  = temperatura do grão antes da secagem ( $^{\circ}C$ )

$\mu_a$  = viscosidade dinâmica do ar, dependente da temperatura ( $N \cdot s \cdot m^{-2}$ )

$\rho_v$  = massa específica do vapor ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\rho$  = massa específica ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\rho_a$  = densidade do ar ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\rho_l$  = massa específica de líquido ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\rho_p$  = densidade real do produto ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\rho_{ap}$  = densidade aparente ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\rho V$  = fluxo de massa ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$\rho_a V_a$  = fluxo da massa do ar ( $\text{kg de ar seco} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$\tau$  = tempo de meia resposta (h)

$\phi$  = potencial químico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$\Psi$  = potencial hidráulico capilar ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$\nabla$  = operador nabla =  $\frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$  (em coordenadas cartesianas)

$\nabla^2$  = operador de Laplace

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Produção mundial de casulos verdes (toneladas).....	2
TABELA 2 - Produção brasileira de seda por Estados (toneladas).....	3
TABELA 3 - Produção, consumo interno e exportação brasileira de fio de seda.....	5
TABELA 4 - Composição média dos casulos verdes.....	43
TABELA 5 - Composição química da seda da amoreira.....	44
TABELA 6 - Constituição química do fio de seda bruta.....	46
TABELA 7 - Composição média do fio de seda bruta.....	46
TABELA 8 - Composição química percentual da fibroína.....	48
TABELA 9 - Análise da fibroína da seda.....	48
TABELA 10 - Propriedades físicas das fibras naturais.....	52
TABELA 11 - Parâmetros de secagem de casulos do bicho-da-seda.....	56
TABELA 12 - Experimentos realizados em função da espessura da camada do leito fixo, da temperatura e da vazão do ar para a secagem de casulos do bicho-da-seda <i>Bombix mori</i> L.....	73
TABELA 13 - Valores dos parâmetros após ajuste dos dados experimentais.....	81
TABELA 14 - Comportamento do parâmetro A.....	89
TABELA 15 - Comportamento do parâmetro k.....	89
TABELA 16 - Comparação do parâmetro k obtido com o ajuste da equação 62 utilizando-se os dados experimentais, com o proposto pela equação 63.....	91

TABELA 17 - Extrapolação do parâmetro $k$ , para diversas condições de operação obtida a partir da equação 63.....	92
TABELA 18 -Evolução da massa da amostra, do teor de umidade e das temperaturas da casca, da câmara e do ambiente externo, em função do tempo de secagem (secador de fluxos cruzados - COCAMAR-PR).....	93
TABELA 19 - Evolução do teor de umidade de casulos do bicho-da-seda, das temperaturas da câmara e do ambiente externo, pressão do vapor d'água nos trocadores de calor, em função do tempo de secagem (secador de fluxos cruzados -EMPARN-RN).....	94
TABELA 20 - Características do isolamento térmico e dados do secador proposto.....	103
TABELA 21 - Características dos aquecedores de ar.....	104
TABELA 22 - Valores do parâmetro $k$ .....	105
TABELA 23 - Resultado do ajuste da equação 62, aplicada à secagem de casulos, no secador de fluxos cruzados proposto.....	106
TABELA 24 - Comparação da cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda em secadores de fluxos cruzados, obtida experimentalmente e proposta.....	107

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Vista interna do casulo.....	6
FIGURA 2 - Fenômeno de secagem.....	10
FIGURA 3 - Técnica de secagem concorrente.....	25
FIGURA 4 - Técnica de secagem contra-corrente.....	25
FIGURA 5 - Técnica de secagem a corrente cruzada.....	26
FIGURA 6 - Representação esquemática de uma camada delgada.....	28

FIGURA 7 - Volume elementar de uma camada de grãos .....	34
FIGURA 8 - Formas dos casulos do bicho-da-seda <i>Bombix mori</i> L.....	43
FIGURA 9a - Corte transversal do filamento de seda ao microscópio.....	44
FIGURA 9b - Secção transversal ampliada do filamento de seda.....	45
FIGURA 10 - Filamento de seda visto ao microscópio.....	45
FIGURA 11 - Picnômetro de comparação a ar.....	61
FIGURA 12 - Esquema do secador protótipo utilizado na secagem em leito fixo .....	63
FIGURA 13 - Esquema do secador de fluxos cruzados (COCAMAR-PR).....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 - Comportamento de um produto biológico durante a secagem.....	23
GRÁFICO 02 - Curva de absorção e dessorção da seda Tasar a 25°C .....	50
GRÁFICO 03 - Curvas de secagem de casulos sob diferentes temperaturas e umidades .....	54
GRÁFICO 04.- Efeito da espessura do leito durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para a temperatura de 90°C e vazão de ar de 8345,3 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> .....	75
GRÁFICO 05.- Efeito da temperatura do ar durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para vazão de ar de 8345,3 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> e espessura do leito de 2,0 cm.....	77
GRÁFICO 06.- Efeito da fluxo de ar durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para a temperatura de 83°C e espessura do leito de 2,0 cm.....	80

GRÁFICO 07 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=90^{\circ}C$ , $Q=8345,3m^3/hm^2$ , $E=5,5cm$ e $UR=3,7\%$ .....	82
GRÁFICO 08 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=90^{\circ}C$ , $Q=8345,3m^3/hm^2$ , $E=4,0cm$ e $UR=3,9\%$ .....	83
GRÁFICO 09 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=90^{\circ}C$ , $Q=8345,3m^3/hm^2$ , $E=2,0cm$ e $UR=4,3\%$ .....	84
GRÁFICO 10 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=70^{\circ}C$ , $Q=8345,3m^3/hm^2$ , $E=2,0cm$ e $UR=6,5\%$ .....	85
GRÁFICO 11 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=83^{\circ}C$ , $Q=8345,3m^3/hm^2$ , $E=2,0cm$ e $UR=4,1\%$ .....	86
GRÁFICO 12 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=83^{\circ}C$ , $Q=4768,7m^3/hm^2$ , $E=2,0cm$ e $UR=4,0\%$ .....	87
GRÁFICO 13-Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo: $T=83^{\circ}C$ ; $Q=1986,9m^3/hm^2$ , $E=2,0cm$ e $UR=4,9\%$ .....	88
GRÁFICO 14-Comparação dos teores de umidade de casulos do bicho- da-seda, obtidos experimentalmente e proposto, em secadores de operação contínua e fluxos cruzados .....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRASSEDA - Associação Brasileira dos Produtores de Seda

Amb. - Ambiente

b.s. - Bulbo Seco

b.u. - Bulbo Úmido

CACEX - BB - Carteira de Comércio Exterior do Banco do Brasil

COCAMAR - Cooperativa dos Cafeicultores e Agropecuaristas do Maringá Ltda.

Condutiv. - Condutividade

Control. - Controlada

EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

MG - Minas Gerais

PB - Paraíba

PR - Paraná

RJ - Rio de Janeiro

RN - Rio Grande do Norte

S.A. - Sociedade Anônima

SP - São Paulo

Temp. - Temperatura

Ton. - Tonelada

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1-Histórico da sericicultura .....	1
1.2-Aspectos mercadológicos da seda e do fio de seda .....	4
1.2.1-No mundo .....	4
1.2.2-No Brasil .....	4
1.3 - Objetivos do trabalho .....	7
CAPÍTULO 2 .....	9
REVISÃO DA LITERATURA .....	9
2.1-Análise do processo de secagem .....	9
2.2-Teorias de secagem .....	11
2.2.1-Teoria da difusão líquida .....	11
2.2.2-Teoria capilar .....	13
2.2.3 -Teoria da vaporização-condensação .....	13
2.2.4-Teoria de Luikov .....	14
2.2.5-Teoria de Fortes e Okos .....	16
2.3-Estudo da taxa de secagem .....	19
2.4-Modelos matemáticos e formas de secagem .....	24
2.4.1-Modelo de Hukill .....	26
2.4.2-Modelo de Thompson .....	27
2.4.3-Modelo da Universidade Estadual de Michigan .....	32

2.4.3.1-Secagem em camada fixa .....	33
2.4.3.2-Secagem em fluxo cruzado .....	36
2.5-Secador de fluxos cruzados .....	39
CAPÍTULO 3 .....	41
SERICICULTURA .....	41
3.1-Aspectos científicos .....	41
3.1.1-Espécies e ciclo vital do bicho-da-seda .....	41
3.1.2-Características físicas e químicas do casulo e fio de seda .....	42
3.2-Aspectos tecnológicos .....	53
3.2.1-Secagem de casulos do bicho-da-seda .....	53
CAPÍTULO 4 .....	59
MATERIAL E MÉTODOS .....	59
4.1.-Material .....	59
4.2.-Métodos experimentais .....	59
4.2.1.-Determinação da porosidade .....	59
4.2.2.-Secagem em leito fixo .....	62
4.2.3.-Secagem em fluxos cruzados .....	66
4.2.3.1.-COCAMAR (Maringá-PR) .....	66
4.2.3.2.-EMPARN (Canguaretama RN) .....	68
4.3.-Métodos matemáticos .....	69
CAPÍTULO 5 .....	72
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	72
5.1.-Porosidade .....	72
5.2.-Secagem em leito fixo .....	72
5.2.1.-Influência da espessura do leito .....	74

5.2.2.-Influência da temperatura do ar de secagem .....	76
5.2.3.-Influência da vazão de ar de secagem .....	78
5.2.4.-Modelagem matemática .....	79
5.3.-Secagem em fluxos cruzados .....	93
5.4-Comparação entre os secadores de fluxos cruzados e leito fixo .....	94
5.5.-Secador de casulos .....	96
5.5.1.-Considerações gerais do secador proposto.....	96
5.5.2.-Dimensionamento do secador .....	97
5.5.2.1.-Estrutura metálica.....	98
5.5.2.2.-Isolamento térmico .....	103
5.5.2.3.-Sistema de insuflamento, retorno e exaustão de ar quente .....	103
5.5.3.-Comparação entre os secadores proposto e de fluxos cruzados utilizados nos experimentos .....	105
5.5.3.1.-Cinética de secagem.....	105
5.5.3.2.-Aspectos técnico e econômico.....	109
CAPÍTULO 6 .....	112
CONCLUSÃO.....	112
CAPÍTULO 7.....	114
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	115
APÊNDICE A-Resultados dos experimentos para determinação da porosidade dos casulos do bicho-da-seda.....	124
APÊNDICE B-Resultados dos experimentos realizados para determinar a cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda, em leito fixo .....	126

APÊNDICE C-Comparação do teor de umidade obtido nos experimentos de secagem em leito fixo e o dado pela equação proposta.....	134
APÊNDICE D-Programa em linguagem FORTRAN, utilizado para extrapolar os resultados do parâmetro "k", para várias condições de secagem.....	142
APÊNDICE E-Desenhos do secador de operação contínua e fluxos cruzados proposto.....	144

# CAPÍTULO 1

---

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Histórico da sericicultura

A sericicultura (criação do bicho-da-seda) é uma atividade multimilenar. Há cerca de 6000 anos atrás os chineses deram início ao seu desenvolvimento e ainda hoje se mantém registro, segundo o qual 4600 anos atrás o Imperador chinês Hwang-Te destinava a criação do bicho-da-seda a sua esposa Hsiling-Shi, o que estimulou a produção de tecidos através de fios de seda. Com a reativação comercial com a Pérsia, há mais ou menos 2500 anos, e mais tarde com outros países, a exportação de seda grege (combinação de diversos fios babas retirados diretamente dos casulos, formando um fio único sem torção) e dos tecidos de seda tomou grande importância. No século IV da nossa era, a sericicultura já estava estabelecida na Índia e na Ásia Central. Há 1500 anos houve uma expansão gradativa da atividade para a Itália, Espanha, França, Alemanha e Inglaterra, onde surgiram notáveis avanços na indústria de tecelagem. Nos Estados Unidos da América, a primeira indústria de tecelagem de seda foi introduzida em 1838. Pouco a pouco, a sericicultura, vinda do Oriente, e com o avanço das pesquisas científicas e da extensão tecnológica, está se firmando em todo o mundo, tornando-se em uma atividade relativamente econômica, com a produção mundial de casulos verdes bastante significativa (TAB. 1).

No Brasil, a implantação da sericicultura data do século XIX, por iniciativa do Imperador D. Pedro I. Posteriormente, com apoio do Imperador D. Pedro II, no século XIX, a atividade sericícola foi progressivamente alcançando seu desenvolvimento, com a fundação da "Imperial Companhia Seropédica Fluminense", implantada no município de Itaguaí - RJ, (HANADA e WATANABE-1986).

TABELA 1

## Produção mundial de casulos verdes (Toneladas)

Países	Anos					
	1990		1991		1992	
	Ton.	%	Ton.	%	Ton.	%
China	480.000	65,4	551.000	69,3	600.000	69,9
Índia	116.700	15,9	107.200	13,5	129.700	15,1
Ex. URSS	46.000	6,3	46.000	5,8	46.000	5,4
Tailândia	17.400	2,4	18.000	2,3	18.000	2,1
Brasil	15.800	2,1	17.200	2,2	17.600	2,0
Japão	24.900	3,4	20.800	2,6	15.600	1,8
Coreia do Norte	14.000	1,9	14.000	1,7	14.000	1,6
Vietnã	4.500	0,6	6.000	0,8	4.800	0,6
Coreia do Sul	4.600	0,6	3.900	0,5	2.600	0,3
Turquia	1.300	0,2	1.300	0,2	1.300	0,2
Outros	9.000	1,2	9.000	1,1	9.000	1,0
<b>Total</b>	<b>734.200</b>	<b>100</b>	<b>794.400</b>	<b>100</b>	<b>858.600</b>	<b>100</b>

FONTE - Revista Globo Rural Especial: Como Criar (1994)

Na primeira metade deste século, com o apoio do Governo Federal, houve várias tentativas de desenvolvimento da sericicultura, com os surgimentos das Estação Experimental de Barbacena-MG, em 1912, e da S.A Indústria de Seda Nacional, em Campinas-SP, em 1921, que tinham como objetivos, além da formação de técnicos, produzir mudas selecionadas de amoreira e ovos do bicho-da-seda. Com o desenvolvimento petroquímico no período de 1946 a 1950, assim como em 1973, a sericicultura atravessou uma acentuada crise, com o surgimento dos fios sintéticos (nylon), (FONSECA e FONSECA - 1988).

Atualmente a sericicultura atravessa uma razoável situação, se comparada com outras culturas. Suas atividades concentram-se nos Estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba. A TAB. 2, a seguir, apresenta a evolução da seda no período de 1989 a 1993 para os três primeiros estados mencionados e até 1994 para os dois primeiros estados.

TABELA 2

## Produção brasileira de seda por Estados (toneladas)

Anos	Estados						Total em Ton.
	São Paulo		Paraná		Minas Gerais		
	Ton.	%	Ton.	%	Ton.	%	
1989	917	54,07	742	43,75	37	2,18	<b>1.696</b>
1990	955	56,41	688	40,64	50	2,95	<b>1.693</b>
1991	1.183	56,96	837	40,30	57	2,74	<b>2.077</b>
1992	1.225	53,35	1.013	44,12	58	2,53	<b>2.296</b>
1993	1.273	51,96	1120	45,71	57	2,33	<b>2.450</b>
1994*	3.039	18,22	13.640	81,78	---	---	<b>16.679</b>

FONTE - Revista Globo Rural Especial: Como Criar (1994).

\* ABRASSEDA

No Estado da Paraíba, a sericicultura foi iniciada, em 1906, com um plantio de amoreira, alimento básico do bicho-da-seda, no então "Campo de Demonstração do Espírito Santo", na cidade do Espírito Santo. Em 1932, com o apoio do Governo Estadual foram plantados 200 ha de amoreira e criado o "Instituto Sérico da Paraíba" com o objetivo de desenvolver a cultura através de métodos específicos, (DANTAS - 1987). A sericicultura sofreu um período de decadência a partir dos anos 40, ressurgindo em 1985, com a implantação de um projeto piloto no Centro de Formação de Tecnólogos, Campus IV - UFPB, na cidade de Bananeiras. O projeto piloto serviu de base para difusão da cultura no Nordeste, especialmente para os Estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba.

A partir de 1991, o Governo do Estado, aproveitando a experiência adquirida devido aos trabalhos desenvolvidos em Bananeiras, elaborou um projeto para fomentar o desenvolvimento da sericicultura, que prevê uma produção de 600 toneladas de casulos verdes para os próximos 05 anos, e apoiou a criação de uma Associação dos Sericultores. A Associação dos Sericultores do Estado da Paraíba foi fundada em 28 de setembro de 1991, na cidade de Campina Grande, onde tem sede e foro.

## **1.2 - Aspectos mercadológicos da seda e do fio de seda**

### **1.2.1 - No mundo**

Nos países em que a sericicultura está em fase de desenvolvimento, a indústria sérica é comumente considerada de grande interesse, elevando a taxa de emprego, garantindo renda agrícola compensadora e conseguindo intercâmbio comercial pela exportação de seus produtos.

A situação da oferta e da procura da seda se traduz, sob um plano mundial, por um importante excedente de oferta, fazendo com que o desenvolvimento futuro da sericicultura dependa, em grande parte, do crescimento do consumo e da existência de mão-de-obra.

Segundo FONSECA e FONSECA (1988), cerca de 50 países em todo o mundo são produtores de seda. Segue-se a relação, em ordem alfabética, dos países produtores mais importantes: Afeganistão, Alemanha, Bangladesh, Brasil, Bulgária, Burma, Camboja, China (República Popular da China), Chipre, Coreia do Norte, Coreia do Sul, Egito, Equador, Espanha, França, Grécia, Hungria, Índia, Indonésia, Irã, Itália, Iugoslávia, Japão, Líbano, Madagascar, Paquistão, Polónia, República Árabe Unida, Riu-Kiu (Ilhas), Romênia, Síria, Sri Lanka, Tailândia, Taiwan, Tchecoslováquia, Turquia, URSS (Rússia) e Vietnã.

### **1.2.2 - No Brasil**

De início, no Brasil, a sericicultura caracterizou-se por uma quase total dependência do mercado externo, atravessando fases de grande desenvolvimento, como também de grande depressão. Essas variações foram produzidas basicamente pelas profundas variações de preços dos casulos produzidos, de tal forma que não havia nenhuma uniformidade na expansão da produção de seda.

Novas áreas com amoreira foram plantadas e novas regiões produtoras de casulos foram se formando, principalmente nos Estados de São Paulo e Paraná.

Nos últimos anos, a produção de seda vem experimentando aumentos substanciais bem como seu consumo nacional.

A exportação brasileira de fio de seda aumentou substancialmente. Do total das exportações de fio de seda, cerca de 72% é dirigido a grandes produtores mundiais, como Japão, China, Cingapura e Coréia do Sul, segundo a CACEX - BB, (FONSECA e FONSECA - 1988).

A TAB. 3, a seguir, fornece informações relativas à situação real do País, no que diz respeito à produção, consumo interno e exportação de fio de seda, no período 1975 - 1990.

**TABELA 3**

**Produção, consumo interno e exportação brasileira de fio de seda**

Anos	Fio de Seda (1000 toneladas)		
	Produção	Consumo interno	Exportação <sup>1</sup>
1975	1,20	0,10	1,10
1976	1,20	0,12	1,08
1977	1,12	0,26	0,86
1978	1,12	0,30	0,82
1979	1,15	0,43	0,72
1980	1,28	0,44	0,84
1981	1,33	0,36	0,97
1982	1,31	0,49	0,82
1983	1,35	0,30	1,05
1984	1,50	0,24	1,26
1985	1,58	0,35	1,23
1986	1,63	0,51	1,12
1987	1,58	0,53	1,05
1988	1,75	0,49	1,26
1989	1,70	0,48	1,22
1990	1,69	0,33 <sup>2</sup>	1,36

Valor médio: US\$46,94/kg de seda exportada

FONTE - Revista Têxtil ( 1992 )

<sup>1</sup> Diferença entre a produção e o consumo interno

<sup>2</sup> Dados Preliminares

O casulo produzido pelo bicho-da-seda *Bombix mori* L., material de forma variável porém definida, é atualmente comercializado com o objetivo de se gerar fio de seda e conseqüentemente produtos de alto valor agregado, a partir de sua industrialização. O casulo comercial é resultante de um conjunto de operações tecnológicas na cultura da amoreira e na criação do bicho-da-seda. Estas operações têm por finalidade modificar as características físicas e químicas, qualitativa e / ou quantitativamente dos casulos verdes, características estas que são indispensáveis para o seu melhor aproveitamento e comercialização futura.

Na época de colheita, o casulo (FIG.1) possui em média, de sua massa, para a casca (17,0 à 24,4%), crisálida (75,0 à 82,3%) e espólio, que são os despojos deixados pelo bicho-da-seda dentro do casulo na metamorfose de larva à crisálida e desta à mariposa (0,6 à 0,7%), (FONSECA e FONSECA-1988); dos quais 68,2% é de água; 14,3% é de seda grege, 16,8% é de crisálida e 0,7% são materiais gomosos solúveis em água, (BIACHI - 1945).

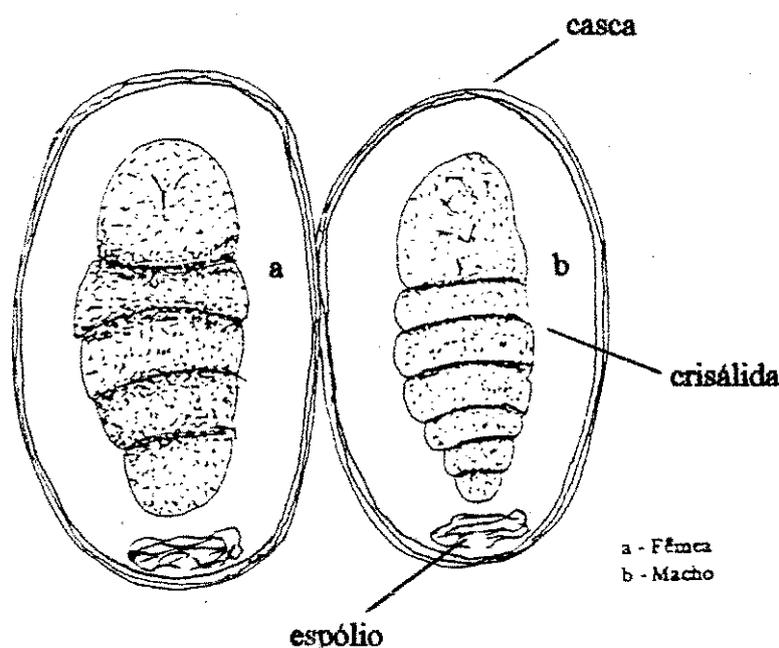


FIGURA 1- Vista interna do casulo

Segundo HANADA e WATANABE (1986), o potencial industrial de uso para a casca do casulo pode ser dividido em dois grupos. O grupo I compreende aqueles usos nos quais a casca é empregada para a obtenção do fio de seda, que por sua vez serve de matéria prima para a fabricação de produtos tais como: camiseta, vestido, paletó, pintura em seda, regulador de volume de som dos receptores, etc. O grupo II compreende aqueles usos nos quais se aproveita o envoltório inicial do casulo situado acima da casca propriamente dita, a anafia, para produção de produtos tais como: barbante, estofamento, travesseiros, etc.<sup>3</sup>

A casca do casulo, depois de retirada a anafia, é constituída unicamente do fio de seda, que por sua vez é composto basicamente de sericina (20 à 30%) e fibroína (70 à 80%), (HANADA e WATANABE-1986).

Dada a sua grande importância, para fins de comercialização, pode-se admitir a necessidade de secagem dos casulos do bicho-da-seda para posterior armazenagem e utilização como matéria-prima para a indústria de fiação, com conseqüente exportação do fio de seda. Sendo assim, o fio de seda desempenha relevante papel na economia de divisas, pelo seu caráter de exportação.

### 1.3 - Objetivos do trabalho

A secagem dos casulos do bicho-da-seda, em que pese o seu alto teor de umidade, (68 à 70%) em base úmida <sup>4</sup>, BANSAL e GARG (1987), e o baixo ciclo de vida da crisálida (10 à 12 dias, a partir do início de encasulamento e 4 a 5 dias após a colheita do casulo), HANADA e WATANABE (1986), passa a ter relevante importância, na medida em que estes precisam ser armazenados, de forma a minimizar sua deterioração, e evitar-se o seu rompimento, com posterior inutilização, pela metamorfose da crisálida em mariposa, em virtude da morte da primeira.

---

<sup>3</sup> A crisálida tem quase o teor nutritivo da carne bovina e pode ser utilizada como proteínas, adubo, ração, bem como na fabricação de óleo e seus derivados e alimento.

<sup>4</sup> Define-se, tradicionalmente, teor de umidade em base úmida (b.u.), como sendo a massa de água por unidade de massa total, e teor de umidade em base seca (b.s.), a relação massa de água por unidade de matéria seca.

A secagem defeituosa de casulos produz uma enorme dificuldade em se manufaturar os mesmos, que é detectada em exames pré-estocagem, que visam principalmente a análise do lote quanto à sua qualidade de fio e fiabilidade.

Os secadores de fluxos cruzados, com processo de secagem contínua ou intermitente, são utilizados para secagem artificial de casulos do bicho-da-seda e são, de um modo geral, de custo elevado, dificultando a sua aquisição generalizada por parte dos produtores de casulos, mesmo a nível de associação.

Esta pesquisa tem por objetivo dar uma contribuição ao conhecimento relativo à secagem de materiais porosos de granulometria e composição química variadas, em particular a secagem de casulos produzidos pelo bicho-da-seda *Bombix mori* L., e apresentar o projeto de um secador protótipo de secagem contínua, de fluxos cruzados.

O presente trabalho limita-se apenas a fornecer informações acerca do casulo do bicho-da-seda, no que diz respeito à secagem e propriedades físicas e químicas, bem como do dimensionamento de um secador de fluxos cruzados, a fim de serem garantidas todas as etapas de produção do casulo até a indústria de fiação.

# CAPÍTULO 2

---

## REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 - Análise do processo de secagem

A operação unitária de secagem tem relevante importância em várias áreas do conhecimento e consiste, resumidamente, em reduzir a quantidade de líquido (geralmente água) de um material sólido, através de evaporação.

Em geral, a secagem é sempre realizada por intermédio de ar quente, como fluido de trabalho, que atravessa o material a secar. Essa corrente de ar quente fornece energia, sob a forma de calor, ao material, transformando a umidade em vapor, e este vapor é arrastado pela própria corrente de ar. A temperatura do ar quente é limitada pela natureza do material a ser seco. Sendo assim, o fenômeno de secagem é essencialmente dinâmico e corresponde a uma dupla transferência de energia e de massa, regidas por leis físico-químicas.

A condição necessária e suficiente para que um produto seque é que a pressão parcial do vapor d'água sobre a sua superfície seja superior à pressão parcial do vapor d'água no ar. No caso de haver uma igualdade entre estas pressões, não há mais secagem, mas equilíbrio higroscópico<sup>5</sup> entre o produto e o ar, conseqüentemente, não há permuta de água entre o produto e o ar que o envolve (FIG. 2).

---

<sup>5</sup> A denominação higroscópico aplica-se aos produtos que retêm água.

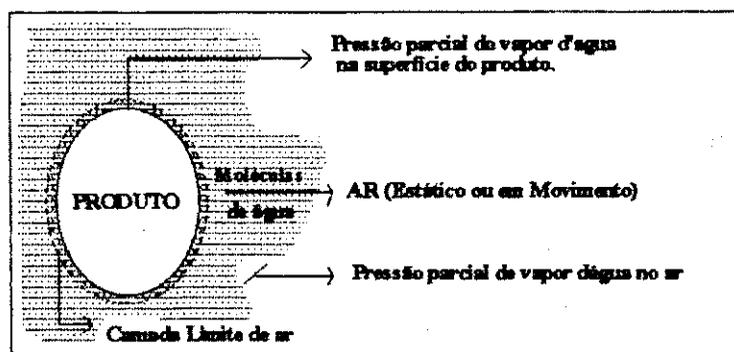


FIGURA 2 - Fenômeno de secagem

Existem dois métodos muito utilizados para análise do processo de secagem de produtos higroscópicos. São eles:

- O empírico
- O teórico

Segundo FORTES e OKOS, citado por ALVARENGA et alii (1980), o método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais, que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório, baseando-se nas condições externas, tais como temperatura e umidade do ar de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e umidade no interior dos grãos.

Já o método teórico frequentemente considera não somente as condições externas, mas também os mecanismos de movimento de água e seus efeitos.

Segundo GORLING, citado por ALVARENGA et alii (1980), muitas mudanças ocorrem durante a secagem interna, tais como a mudança na forma e estrutura dos produtos, grandes transformações enzimáticas em geral etc, acentuando-se, assim, a necessidade do desenvolvimento de modelos teóricos.

Baseado na literatura pode-se citar os seguintes mecanismos de transporte de água em sólidos (VAN ARSDEL et alii -1973, BROOKER et alii -1974 e HALL -1980):

- Difusão líquida, devido ao gradiente de concentração;

- Difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor (causado pelo gradiente de temperatura);
- Fluxo de líquido e de vapor, devidos à diferença de pressão total, causada por pressões externas, contração, alta temperatura e capilaridade;
- Escoamento por efusão (escoamento de Knudsen). Ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor for da mesma ordem de grandeza que o diâmetro dos poros. Este mecanismo só é importante para condições de alto vácuo;
- Movimento de líquido, devido à força gravitacional, que não influi significativamente na secagem de grãos;
- Difusão superficial, devido à difusão da mistura pelos poros da superfície do grão.

Diversas teorias foram propostas para explicar o processo de secagem. Pode-se citar, segundo ALVARENGA et alii (1980), as teorias da difusão líquida, capilar, de vaporização-condensação, de Luikov, de Philip e de Vries, de Berger e Pei e de Fortes e Okos, entre outras.

## 2.2 - Teorias de secagem

### 2.2.1 - Teoria da difusão líquida

Diversos autores consideram a difusão de água líquida como o principal mecanismo de secagem de grãos.

A segunda lei de FICK<sup>6</sup>, dada a seguir, tem sido utilizada, uma vez que estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

<sup>6</sup> Admite-se à ausência de reações químicas e às condições de difusão transiente unidimensional

Segundo FORTES e OKOS, citados por ALVARENGA et alii (1980), e KEEY e WHITNEY e PORTERFIELD, citados por NEVES et alii (1982), muitos pesquisadores na área de secagem de alimentos e de grãos preferem a teoria da difusão líquida. No geral o coeficiente de difusão é considerado constante ou linearmente dependente da temperatura e /ou concentração ou, ainda, dependente da temperatura, segundo uma equação do tipo Arrhenius.

$$D = D_0 \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{(R_v T_{abs})}\right] \quad (2)$$

Experimentalmente, DONZELES et alii (1983) determinaram o coeficiente de difusão líquida para milho, dando como resultado:

$$D = 5,84 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{-2958}{T}\right)$$

onde T é a temperatura de secagem em °C e D, expresso em  $m^2 \cdot \text{min}^{-1}$ .

Segundo BERGER, citado por ALVARENGA et alii (1980), a difusão líquida, como único mecanismo de movimento de água, tem sofrido severas críticas, apresentando constantemente discrepâncias entre os valores experimentais e teóricos.

A difusão em sólidos é complexa devido à forte influência do campo de forças moleculares sobre o processo. O valor numérico do coeficiente de difusão para líquidos e sólidos é muito menor do que para gases, principalmente devido aos maiores campos de força molecular, ao maior número de colisões e à conseqüente redução na liberdade de movimento das moléculas, (HOLMAN - 1983).

Mais recentemente, NOGUEIRA e PARK (1992), estudando a secagem de banana verificaram a dependência da difusividade efetiva com a velocidade e a temperatura do ar de secagem. Neste trabalho encontram-se tabelados os valores de D, para as temperaturas do ar de 50, 60 e 70 °C, nas velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s, para cada temperatura. Constatou-se um aumento da difusividade efetiva com o aumento da velocidade do ar de secagem, para cada temperatura utilizada.

### 2.2.2 - Teoria capilar

A teoria capilar é baseada no conceito de potencial capilar, que pode ser definido como a diferença de pressão entre a água e o ar na interface água-ar presente no capilar. Segundo HAVER, citado por ALVARENGA et alii (1980), a curvatura na interface é produzida pela tensão superficial da água.

A equação do fluxo capilar líquido é dada por:

$$\bar{J}_l = K_h \nabla \Psi \quad (3)$$

Para condições de temperatura constante, considera-se que o potencial capilar seja proporcional ao gradiente de concentração de água.

A teoria capilar afirma que na secagem de sólidos granulares o fluxo de água é inteiramente comandado pelas forças capilares, sendo, portanto independente da concentração de água.

MILLER e MILLER, citados por ALVARENGA et alii (1980), explicam este fato dizendo que a força que induz o evento é um gradiente de tensão. Somente para materiais homogêneos e isotrópicos é que a tensão capilar é proporcional ao teor de umidade.

O transporte capilar, como único mecanismo de movimento de umidade, não tem sido aplicado a materiais biológicos.

### 2.2.3 - Teoria da vaporização-condensação

A teoria de vaporização-condensação admite que a água, num meio poroso, migra inteiramente na fase gasosa. HENRY, citado por ALVARENGA et alii (1980), considera a difusão simultânea de calor e massa e, pressupõe que os poros tenham uma rede contínua de espaços incluídos no sólido. Considera ainda, que a quantidade total de vapor dentro do sólido varia linearmente de acordo com a concentração de água e a temperatura mantendo-se constante o coeficiente de difusão.

### 2.2.4 - Teoria de Luikov

Baseia-se na termodinâmica dos processos irreversíveis e 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.

Esse potencial de transferência de massa foi criado por Luikov por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura (ALVARENGA et alii - 1980).

LUIKOV e seus colaboradores, segundo BROOKER et alii (1974), desenvolveram um modelo matemático para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos baseado nos mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e difusão e convecção de água no interior do meio poroso.

O processo é descrito por um sistema de equações diferenciais parciais da forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} U + \nabla^2 K_{12} \theta + \nabla^2 K_{13} P$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} U + \nabla^2 K_{22} \theta + \nabla^2 K_{23} P$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} U + \nabla^2 K_{32} \theta + \nabla^2 K_{33} P$$

As equações acima podem ser simplificadas, uma vez que o gradiente de pressão total só é significativo para temperaturas de secagem bem acima da faixa de temperatura empregada na secagem de grãos. Sendo assim, as equações acima tornam a forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} U + \nabla^2 K_{12} \theta$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} U + \nabla^2 K_{22} \theta$$

Segundo HUSAIN et alii, citados por BROOKER et alii (1974), as duas equações acima têm sido aplicada para diversos produtos. Concluiu-se que os efeitos combinados de temperatura e de umidade na análise da secagem de grãos são requeridos em um número muito limitado de grãos. Assim as equações fenomenológicas recebem a forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} U$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} \theta$$

Na prática, os gradientes de temperatura no produto não são considerados, assim, as equações de Luikov se transformam em :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} U \quad (4)$$

O fluxo de umidade dentro do grão ocorre geralmente por difusão (líquido e/ou vapor) e, portanto, o coeficiente fenomenológico  $K_{11}$  é denominado coeficiente de difusão e, denotado por  $D$ .

Para um valor constante de  $D$ , a EQ.4 pode ser escrita como:<sup>7</sup>

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right] \quad (5)$$

onde:

$C = 0$  ( zero ) para corpos planos

$C = 1$  ( um ) para corpos cilíndricos

$C = 2$  ( dois ) para corpos esféricos

<sup>7</sup> Admitindo ausência de reações químicas e as condições de difusão transiente unidimensional.

Várias soluções da equação para várias formas de sólidos tem sido utilizada para grãos, assumindo as seguintes condições inicial e de contorno:

$$U(R, t) = Ue$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

em que R é o valor máximo de r.

As soluções analíticas da equação para o teor de umidade médio, admitindo os grãos com diversas formas regulares, podem ser obtidas diretamente da literatura sobre difusão, como exemplo *The Mathematics of Diffusion* de J. CRANK (1957), citado por BROOKER et alli (1974), e o *Numerical Solution of Diffusion and Equations* de CHU e HUSTRULIO (1968), citados por BAKKER-ARKEMA et alli (1974).

### 2.2.5 - Teoria de Fortes e Okos

Tendo por base os conceitos termodinâmicos de processos irreversíveis, FORTES e também FORTES e OKOS, citados por ALVARENGA et alii (1980) e NEVES et alii (1983), propuseram um modelo, aceitando o princípio de equilíbrio local e as validades:

- da equação de Gibb para condições de não-equilíbrio;
- das leis fenomenológicas lineares;
- das relações fundamentais de Onsager;
- de poder um sistema ser tomado como um contínuo;<sup>8</sup>
- de a água migrar nas fases de líquido e de vapor;
- de ser a razão de transferência de calor e massa mais lenta que a razão de mudança de fase;
- do princípio de Curie.

<sup>8</sup> Meio material no qual o caminho livre das moléculas, da substância considerada, é muito menor que a ordem de grandeza da menor dimensão relevante característica do problema.

Segundo FORTES e OKOS, citados por ALVARENGA et alii (1980), a diferença fundamental entre a teoria de FORTES e OKOS e as teorias citadas nos itens 2.2.1.a a 2.2.4., é que a força motriz para o movimento isotérmico, tanto do líquido quanto do vapor, é um gradiente do teor de umidade de equilíbrio<sup>9</sup> e não do teor de umidade. A força motriz para a transferência de líquido e vapor é o gradiente do potencial químico, que por sua vez é função da temperatura, da umidade relativa e do teor de umidade de equilíbrio.

Assim, o teor de umidade de equilíbrio é apresentado como uma escolha mais natural para o potencial de transporte de massa que o conceito proposto por Luikov.

Além disso, admitindo-se as seguintes equações para fluxos:

- **De líquido**

$$\bar{J}_l = \rho_l K_l \nabla \phi \quad (6)$$

- **De vapor**

$$\bar{J}_v = -K_v \nabla \rho_v \quad (7)$$

- **De calor na ausência de transporte de massa**

$$\left( \bar{J}_q \right)_m = -K_t \nabla T \quad (8)$$

e aplicando-se as relações de Onsager, FORTES e OKOS, citados por ALVARENGA et alii (1980) e NEVES et alii (1983), derivaram as seguintes equações, para corpos capilares porosos.

---

<sup>9</sup> O teor de umidade de equilíbrio define-se como sendo o teor de umidade que o produto atinge quando é submetido, por um tempo suficientemente longo, a condições controladas de temperatura e umidade do ar.

- **Fluxo de calor**

$$\begin{aligned} \bar{J}_q = & -K_t \nabla T - \left[ \rho_l K_l R_v \ln(UR) + K_v \left( \rho_v \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_v}{dT} \right) \right] \frac{R_v T^2}{UR} \frac{\partial UR}{\partial T} \nabla U + \\ & + T \left[ \rho_l K_l R_v \ln(UR) + K_v \left( \rho_v \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_v}{dT} \right) \right] g \end{aligned} \quad (9)$$

- **Fluxo de líquido**

$$\bar{J}_l = -\rho_l K_l R_v \ln(UR) \nabla T - \rho_l K_l \frac{R_v T}{UR} \left( \frac{\partial UR}{\partial U} \right) \nabla U + \rho_l K_l g \quad (10)$$

- **Fluxo de vapor**

$$\bar{J}_v = -K_v \left( \rho_v \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_v}{dT} \right) \nabla T - K_v \rho_v \left( \frac{\partial UR}{\partial U} \right) \nabla U \quad (11)$$

considerando desprezível o efeito gravitacional.

A equação da conservação da massa é:

$$\frac{\partial(\rho_s U)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\bar{J}_l + \bar{J}_v) \quad (12)$$

- **Da conservação de energia**

$$\rho_s c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_s h_w \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot \bar{J}_q - h_{fg} \nabla \cdot \bar{J}_v - \bar{J}_l \cdot c_l \nabla T - \bar{J}_v \cdot c_v \nabla T \quad (13)$$

Estas equações já foram usadas para analisar a transferência de calor e massa em solos, em regime transiente, segundo FORTES e OKOS, citados por ALVARENGA et alii (1980) e NEVES et alii (1983); para secagem de milho, segundo FORTES, citado por ALVARENGA et alii (1980); para milho extrudado, segundo FORTES e OKOS,

citados por ALVARENGA et alii (1980) e mais recentemente essas mesmas equações foram usadas por NEVES et alii (1983), para modelagem físico-matemática do processo de seca-aeração de grãos de milho.

### 2.3 - Estudo da taxa de secagem

A velocidade (taxa de secagem) na qual um líquido evapora, de um material, quando submetido a um conjunto de condições, não pode ainda ser prevista teoricamente, devendo-se recorrer a experimentos relativos ao material em determinadas condições, (BLACKADDER e NEDDERMAN - 1982).

As velocidades de secagem são determinadas expondo-se o material úmido a uma corrente de gás à temperatura e umidade absoluta (ou relativa) e medindo-se o teor de umidade do produto como função do tempo.

Sendo assim, a velocidade de secagem é função do teor de umidade do material e das temperatura e umidade absoluta (ou relativa) do gás.

Segundo MATA et alii (1984), vários produtos biológicos, quando estão sendo secos individualmente ou em camada fina, apresentam uma perda de umidade a uma taxa constante durante o período inicial da secagem, seguido por um período de secagem a uma taxa decrescente. Todavia, a secagem de grãos e cereais, geralmente, ocorre inteiramente no período à taxa decrescente.

Segundo BROOKER et alii, citados por MATA et alii (1984), os produtos biológicos, inclusive os grãos e cereais, quando submetidos à secagem em camadas espessas, ao invés de em partículas individuais ou camada fina, apresentam, inicialmente, um período de secagem a uma taxa constante. Isto é devido à diferença entre o comportamento de um grão individualmente e uma camada espessa de grãos.

Segundo BROOKER et alii (1974), a taxa de secagem de produtos biológicos com teor de umidade inicial acima de (70 a 75%), durante o primeiro período de secagem, é uma função de três parâmetros externos:

... que mantêm a taxa de secagem também será. A secagem à taxa constante pode ser observada em produtos cuja resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa à remoção de vapor d'água da superfície do produto para o meio ambiente.

A taxa de secagem constante de um produto biológico pode ser aproximada pela análise de um termômetro de bulbo úmido.

Maiores informações sobre esta análise podem ser encontradas em FOUST et alii (1960) e ROSSI (1987).

A equação que quantifica o fluxo de calor fornecido pelo ar ao bulbo úmido, desprezando-se as trocas de calor por radiação e condução é, (MATA et alii - 1984):

$$q_{conv} = h S ( T - T_{bu} ) \quad (14)$$

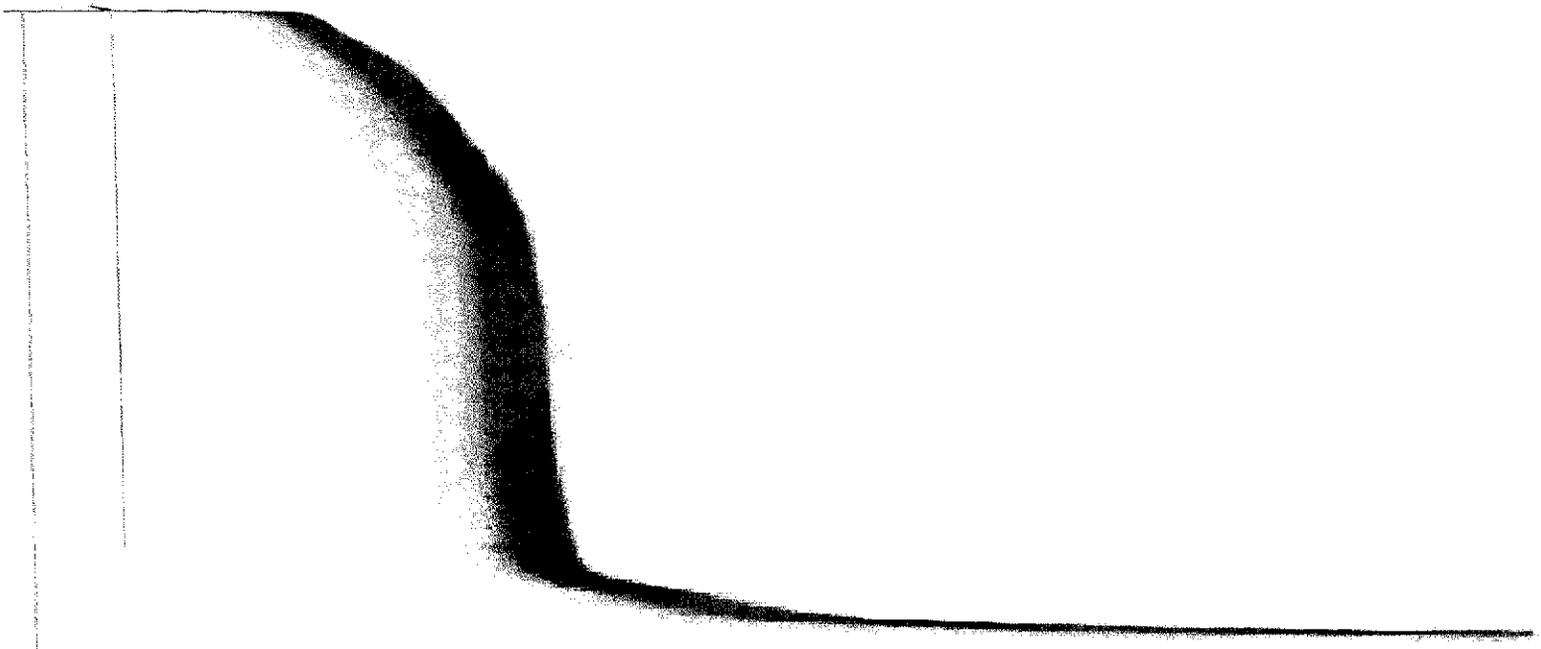
A quantidade de calor latente de vaporização da água do bulbo fornecida ao ar insaturado é:

$$q_{evap} = \dot{m}_w h_{fg} \quad (15)$$

Sendo:

$$\dot{m}_w = h_m S ( \rho_u - \rho ) \quad (16)$$

considerando-se o vapor d'água como gás perfeito, vem:



$$\rho = \frac{P_V M_w}{R_0 T_{abs}} \quad (17)$$

$$\rho_u = \frac{P_{Vu} M_w}{R_0 T_{abs}} \quad (18)$$

Assim, substituindo-se os valores na equação (16), tem-se:

$$\dot{m}_w = \frac{h_m S M_w (P_{Vu} - P_v)}{R_0 T_{abs}} \quad (19)$$

Combinando-se as equações (14), (15) e (19), tem-se:

$$\dot{m}_w = \frac{hS(T - T_{bu})}{h_{fg}} = \frac{h_m S (P_{Vu} - P_v)}{R_v T_{abs}} \quad (20)$$

com:

$$R_v = \frac{R_0}{M_w} \quad (21)$$

Como  $(\dot{m}_w)$  é a taxa de evaporação da unidade pode-se escrever,

$$m_s \frac{dU}{dt} = \frac{h_m S}{R_v T_{abs}} (P_{Vu} - P_v) = \frac{hS}{h_{fg}} (T - T_{bu}) \quad (22)$$

O cálculo preciso da taxa de secagem constante é possível se a área superficial  $S$  e os coeficientes  $h_m$  e  $h$  forem conhecidos, o que muitas vezes é difícil de serem obtidos com precisão, em virtude da heterogeneidade nas formas dos produtos biológicos.

<sup>10</sup> Percebe-se que a equação apresentada por MATA et alii (1984) em seu trabalho, está incorretamente dimensionalizada, implicando num possível erro de impressão. A EQ.22 apresenta-se na forma corrigida.

Segundo HOLMAN (1983), quando a transferência de calor e a transferência de massa ocorrem simultaneamente, os coeficientes locais de transferência de calor e de massa podem ser relacionados por:

$$\frac{h_y}{h_{m_y}} = \rho_a c_a \left( \frac{S_c}{P_r} \right)^{2/3} \quad (23)$$

onde:

$$S_c = \frac{\mu_a}{\rho_a D} \quad e \quad P_r = \frac{c_a \mu_a}{K_a}$$

Segundo ROSSI (1987), o número de Schmidt é igual a 0,6 para o sistema ar/água em condições próximas às ambientais, e é independente da pressão, sofrendo pequenas variações com a temperatura, de acordo com PERRY (1963), citado por BROOKER et alii (1974).

A mesma relação pode ser usada com os coeficientes médios  $h$  e  $h_m$ , e aplica-se ao escoamento laminar e também ao turbulento, ( INCROPERA e WITT - 1992 ).

O teor de umidade no qual a taxa de secagem de um produto muda de uma taxa constante para uma taxa decrescente é chamado de teor umidade crítico. Este teor de umidade depende das características geométricas do produto, tais como forma e tamanho e também das condições de secagem. Além deste ponto, a temperatura da superfície do produto aumenta e a taxa de secagem cai rapidamente, (FOUST et alii - 1960).

Os grãos e cereais como partículas individuais ou camadas finas não apresentam, geralmente, o período de secagem à taxa constante, a menos que sejam colhidos em estágio muito imaturo ou tenha havido condensação de umidade ou chovido sobre eles. O GRAF. 1 mostra o comportamento de secagem de um produto biológico.

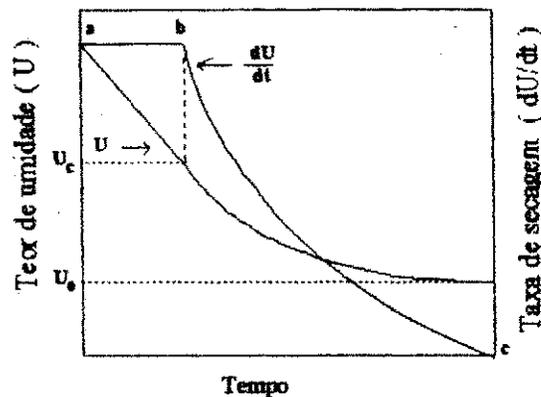


GRÁFICO 1 - Comportamento de um produto biológico durante a secagem (ab=período de secagem à taxa constante, bc=período de secagem à taxa decrescente)  
 FONTE - MATA et alii (1984).

Durante o período de secagem à taxa decrescente, a superfície do produto não se encontra coberta por uma camada fina (filme) de água, porque a resistência interna ao transporte das moléculas de água se torna maior que a resistência externa.

Os grãos, geralmente, só apresentam o período de secagem à taxa decrescente. Portanto, a taxa de secagem diminui continuamente durante o processo de secagem.

A previsão da taxa de secagem de um produto biológico durante o período de secagem à taxa decrescente é mais complicada do que durante o período à taxa constante. Neste caso, não somente devem ser considerados os mecanismos de transferência externas (transferência de calor e massa por convecção), como também os mecanismos de transferência no interior do produto (difusão de calor e massa). Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento de secagem de grãos durante o período de secagem à taxa decrescente, em geral as relações semi-empíricas<sup>11</sup> têm-se mostrado como melhores opções para prever o fenômeno.

Segundo ROMERO (1988), o período à taxa de secagem decrescente está dividido em duas zonas de secagem: a zona em que a superfície evaporante não fica completamente saturada pela água dentro do sólido, e por isso a velocidade de secagem diminui na fração insaturada, com conseqüente diminuição da velocidade para toda a superfície do produto, e a zona em que a superfície evaporante está totalmente seca. Neste caso o plano de evaporação desloca-se para o interior do sólido, e a velocidade agora é governa-

<sup>11</sup> BROOKER et alii (1974)

da pela velocidade do movimento da umidade interna; a influência dos parâmetros externos diminui.

A taxa de secagem aproxima-se de zero num certo valor de umidade, denominado teor de umidade de equilíbrio ( $U_e$ ), que é o menor teor de umidade atingível, no processo de secagem, com o sólido submetido a certas condições físicas (GRAF. 1). Vários modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos têm sido propostos para a determinação do teor de umidade de equilíbrio, entre os quais pode-se citar as equações de SMITH (1947), HENDERSON (1952) e CHUNG e PFOST (1967), citados por GUSTAFSON e HALL (1974) e CHEN (1971).

A secagem de um só grão individualmente ou de uma só camada de grãos não altera as condições do ar significativamente. Entretanto, quando os grãos são amontoados dentro de um secador formando camadas espessas, o ar que passa por essas camadas se modifica. Sua temperatura diminui ao ceder calor sensível para os grãos e sua umidade aumenta ao receber a água evaporada do produto. Conseqüentemente, seu potencial de secagem diminui. Um modelo matemático completo que possa simular o processo de secagem nessa situação deve conter equações que calculem todas as variações de temperatura e umidade, tanto para o produto como para o ar, (VILELA-1977, citado por MATA et alii - 1984).

A importância prática da secagem de produtos em camada fina é muito limitada, porque raramente os produtos biológicos são secos em camadas delgadas. Os produtos são secos, geralmente, em camadas espessas, estacionárias ou em movimento, (BROOKER et alii - 1974).

## 2.4 - Modelos matemáticos e formas de secagem

Atualmente, existe uma gama de modelos matemáticos desenvolvidos e que levam em consideração várias características do produto, tais como teor de umidade da matriz sólida com a altura do leito, o tempo de secagem, a vazão e a temperatura do ar. Entre eles cita-se os modelos de Hukill, Thompson e da Universidade Estadual de Mi-

chigan. Todos, entretanto, pressupõem condições e simplificações que os limitam, quase sempre, aos produtos estudados.

Apesar de suas limitações, vários pesquisadores utilizam estes modelos para simulação de secagem em secadores de diversos tipos.

Em função da natureza dos produtos a serem secados, realiza-se a secagem artificial, retirando a água segundo três técnicas de secagem, as quais estão descritas a seguir, (LASSERAN - 1978):

- **Secagem concorrente ou "anti-méthodique":**

O ar e o produto avançam paralelamente, no mesmo sentido, no interior do secador. A desidratação da alfafa ou os secadores "Flash" para produtos pulverulentos (amidos) são deste tipo, (FIG. 3).



FIGURA 3 - Técnica de secagem concorrente

- **Secagem contra-corrente ou "méthodique"**

O ar e o produto avançam paralelamente, mas em sentido oposto, no interior do secador. Esta técnica é adotada para os produtos frágeis e difíceis de secar, por exemplo, as ameixas secas nos secadores "túneis" ou o leite concentrado nos secadores "por atomização", (FIG. 4).

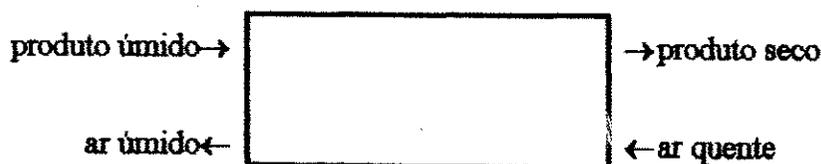


FIGURA 4 - Técnica de secagem contra-corrente

• **Secagem a corrente cruzada ( fluxos cruzados ).**

O ar quente circula perpendicularmente no sentido do escoamento do produto. Nessa técnica de secagem, o produto é submetido à ação do ar quente, de características constantes do início ao fim da secagem. Esse modo de secagem é reservado aos produtos granulados, que podem ser dispostos em camadas estáticas ou móveis, mas não compactas.

Esta técnica é particularmente adaptada para secagem de grãos embora com alguns inconvenientes que lhes são inerentes tais como: gradientes de temperatura e de teor de umidade ao longo da massa de grãos para camadas espessas, (FIG. 5).

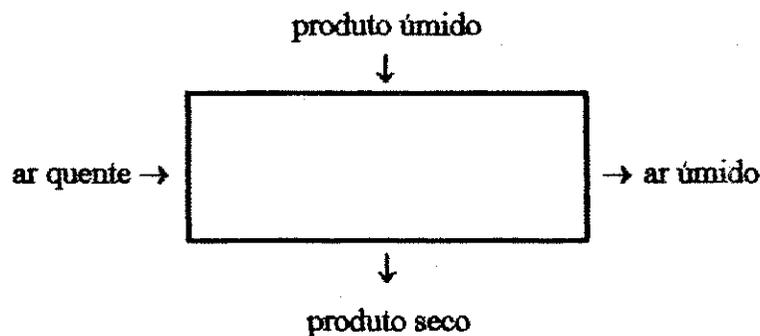


FIGURA 5 - Técnica de secagem a corrente cruzada

**2.4.1 - Modelo de Hukill**

Segundo BAKKER-ARKEMA et alii (1974) e QUEIROZ et alii (1982), HUKILL desenvolveu uma expressão analítica que possibilita determinar o teor de umidade do grão, relacionando-o com a altura total da camada de grãos e com o tempo de secagem, considerando desprezível o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce, exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos.

A equação proposta por HUKILL e que permite predizer o processo de secagem de uma massa de grãos é:

$$M = \frac{2^L}{2^L + 2^F - 1} = \frac{U - U_e}{U_o - U_e} \quad (24)$$

Define-se o adimensional de profundidade por:

$$L = \frac{X \rho_p h^*_{fg} (U_o - U_e)}{c_a \rho_a V_a \tau (\theta_o - T_e)} \quad (25)$$

O adimensional de tempo é definido por:

$$Y = \frac{t^*}{\tau} \quad (26)$$

O tempo de meia resposta é o tempo para que uma camada de grãos diminua a sua razão de umidade de 1 para 0,5 sob determinada condição de ar, e pode ser obtido, para grãos de milho, pela equação matemática, obtida por regressão linear, utilizando-se os dados de BROOKER et alii (1974), segundo QUEIROZ et alii (1982). A equação é a seguinte:

$$\tau = \exp ( 2,413 - 0,016 U_o + 0,003T - 0,001U_oT ) \quad (27)$$

O teor de umidade de equilíbrio do produto pode ser determinado mediante o uso de uma equação de umidade de equilíbrio aplicada para cada tipo de grão em particular.

#### 2.4.2 - Modelo de Thompson

THOMPSON et alii, citados por QUEIROZ et alii (1982) e MATA et alii (1984), desenvolveram um modelo semi-empírico para prever a influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto no processo de secagem. Neste modelo, THOMPSON et alii, dividiram o processo contínuo de secagem em diversos pequenos processos, simulando-os através de cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. (FIG. 6).

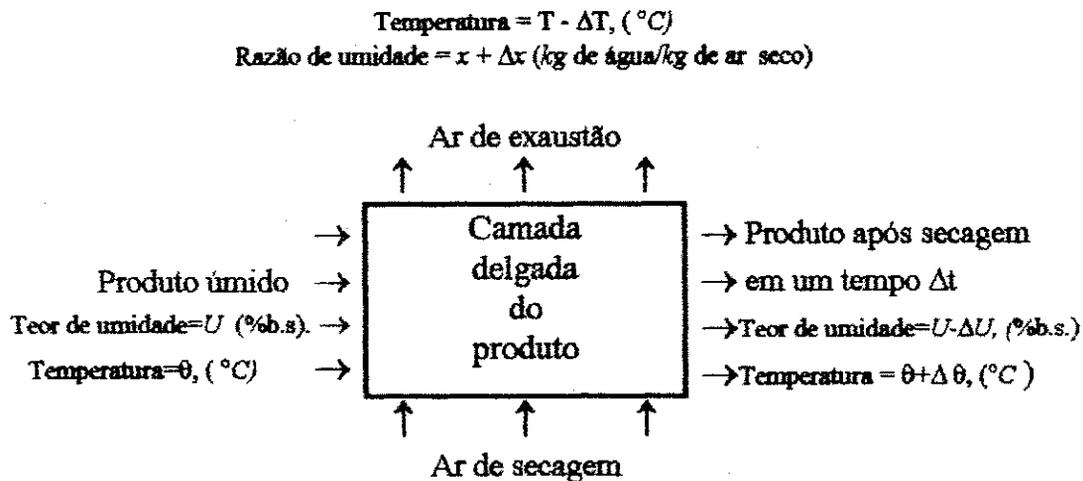


FIGURA 6 - Representação esquemática de uma camada delgada.

A FIG. 6, mostra a passagem do ar de secagem, à temperatura  $T$  e à razão de umidade  $x$ , através de uma camada delgada de grãos com teor de umidade  $U$  e temperatura  $\theta$ , durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Durante esse tempo, uma quantidade de umidade,  $\Delta U$ , é evaporada e transportada pelo ar, aumentando assim sua razão de umidade para  $x + \Delta x$ . Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de  $\Delta T$ , proporcional ao aumento da temperatura do grão,  $\Delta \theta$ , e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de umidade ( QUEIROZ et alii - 1982 )

No modelo, THOMPSON et alii admitiram as seguintes hipóteses, (MATA et alii - 1984).

- A secagem de uma camada delgada é representada pela equação:

$$t = \bar{A} \ln ( M ) + \bar{B} [ \ln ( M ) ]^2 \quad (28)$$

<sup>12</sup> Define-se tradicionalmente umidade absoluta como sendo a relação entre a massa de água contida no ar úmido por unidade de massa de ar seco, (ROSSI - 1987).

onde:

$$\bar{A} = \bar{a}_1 + \bar{a}_2 \theta$$

$$\bar{B} = \bar{b}_1 e^{(\bar{b}_2 \theta)}$$

$$M = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e}$$

- A temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve;
- O teor de umidade de equilíbrio do produto, para determinado estado do ar de secagem, é representado por:

$$U_e = \bar{a}_3 \left[ -\frac{\ln(1 - UR)}{T_e + 45,6} \right]^{\bar{b}_3} \quad (29)$$

- O calor latente de vaporização da água do produto é representado por:

$$h^*_{fg} = (\bar{a}_4 - \bar{b}_4 \theta) \left[ 1 + \bar{a}_5 \exp(\bar{b}_5 U) \right] \quad (30)$$

- O calor específico do produto, modificado é dado por:

$$c_p = \left[ \bar{a}_6 + \bar{b}_6 \left( \frac{U}{100 + U} \right) \right] R_c \quad (31)$$

Com o objetivo de simplificar o processo de secagem, o mesmo foi dividido em sub-processos, possibilitando determinar as variações que ocorrem em uma camada delgada, tais como, temperatura de equilíbrio entre o grão e o ar, quantidade de umidade removida e resfriamento evaporativo do ar e do grão.

A temperatura de equilíbrio,  $T_e$ , é determinada utilizando-se o seguinte balanço energético:

$$\begin{aligned} & [ \text{Entalpia do ar antes da secagem} ] \\ & \quad + \\ & [ \text{Entalpia do produto antes da secagem} ] \\ & \quad = \\ & [ \text{Entalpia do ar na temperatura de equilíbrio} ] \\ & \quad + \\ & [ \text{Entalpia do produto na temperatura de equilíbrio} ] \end{aligned}$$

isto é:

$$\left[ c_a T_0 + x_0 \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + c_v T_0 \right) \right] + c_p \theta_0 = \left[ c_a T_e + x_0 \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + c_v T_e \right) \right] + c_p T_e \quad (32)$$

O teor de umidade de equilíbrio,  $U_e$ , é calculado pela equação (29), utilizando a temperatura de equilíbrio  $T_e$ , obtida pela equação (32), e a umidade relativa do ar é determinada por intermédio da temperatura de equilíbrio e da razão de umidade do ar,  $x_0$ , que está entrando na camada de grãos.

A quantidade de água perdida pelo produto no intervalo de tempo  $\Delta t$  é calculada pela equação de camada delgada, (EQ. 28).

As condições finais do ar e do produto, após o intervalo de tempo  $\Delta t$ , são obtidas da seguinte forma:

- A umidade perdida pelo produto  $\Delta U = U_0 - U_f$ , é fornecida ao ar, aumentando sua razão de umidade de:

$$\Delta x = \left( \frac{U_0 - U_f}{100} \right) R_c = x_0 - x_f \quad (33)$$

- A temperatura final do ar,  $T_g$ , é obtida a partir do seguinte balanço energético:

$$\begin{aligned} 1004,4 T_e + x_0 \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + 1883,3 T_e \right) + c_p \theta_e + c_w \Delta x \theta_e &= \\ = 1004,4 T_f + x_f \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + 1883,3 T_f \right) + c_p T_f + \Delta h^*_{fg} \Delta x & \end{aligned} \quad (34)$$

Depois de se ter determinado a temperatura e a razão de umidade do ar, utilizando os balanços energéticos citados, é necessário determinar se estes são consistentes, isto é, se a umidade relativa do ar, determinada matematicamente, é inferior a 100%. Caso isso não ocorra será, então, necessário realizar novo balanço energético, para simular a condensação de vapor d'água no grão. O novo balanço de energia é dado por:

$$\begin{aligned} 1004,4 T_0 + x_0 \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + 1883,3 T_0 \right) + c_p \theta_0 + (x_f - x_0) c_w \theta_0 &= \\ = 1004,4 T_f + x_f \left( 2,46 \cdot 10^{-6} + 1883,3 T_f \right) + c_p T_f & \end{aligned} \quad (35)$$

onde:

$\theta_0$ ,  $T_0$  e  $x_0$  representam o ponto compatível

$\theta_f$ ,  $T_f$  e  $x_f$  representam o ponto de estado a ser determinado

No balanço energético citado acima há duas variáveis desconhecidas, a temperatura final,  $T_f$ , e a razão de umidade final,  $x_f$ , já que se assume  $T_f = \theta_f$ .

Obtêm-se estas duas variáveis usando-se o método de interpolação, até que se encontrem os valores de  $T_f$  e  $x_f$  que correspondem a uma umidade relativa do ar bem próxima de 100%. Assim, o novo teor de umidade do produto, pode ser determinado pela equação.

$$U_f = U_o - 100 \left( \frac{x_f - x_0}{R_c} \right) \quad (36)$$

No caso de simulação de secagem contínua em secadores de fluxos cruzados e de fluxo concorrente, admite-se que o produto escoar dentro do secador sem que ocorra revolvimento dos grãos. Sendo assim, a secagem contínua descrita anteriormente, funcionará como secagem em lote, (QUEIROZ et alii - 1982).

Segundo QUEIROZ et alii (1991), o modelo de Thompson et alii (1968), de natureza semi-teórica, tem sido usado com sucesso na simulação de secagem de diversos produtos.

Trabalhos de validação realizados por ROBERTS e BROOKER (1975), PEREIRA (1985) e UÇKAN e ULKÜ (1986), demonstram que o modelo de Thompson et alii simula o processo de secagem com boa exatidão. Além disso, esse modelo apresenta a vantagem de ser de fácil solução, consumir pouco tempo de computação e apresentar solução mais estável quando comparado com outros modelos mais complexos, (GUIMARÃES et alii - 1991).

#### **2.4.3 - Modelo da Universidade Estadual de Michigan**

O modelo de secagem da Universidade Estadual de Michigan é usado para simular a secagem de grãos e baseia-se nas prévias idéias de SHUMANN (1929), VAN ARSDEL (1955) e KLAPP (1961), citados por BAKKER-ARKEMA et alii (1974).

Neste modelo, citado por BAKKER-ARKEMA et alii (1974), MATA et alii (1984) e MATA (1985), foram assumidas as seguintes suposições:

- a redução de volume durante a secagem é desprezível;
- o gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- a condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- a distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- as paredes do silo são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;

- as capacidades caloríficas do ar e dos grãos são constantes durante pequenos intervalos de tempo;
- as variações da temperatura e a razão de umidade do ar com respeito ao tempo são desprezíveis quando comparadas com as variações de temperatura e razão de umidade com respeito à posição;

$$\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial T}{\partial y} \quad e \quad \frac{\partial x}{\partial t} \ll \frac{\partial x}{\partial y}$$

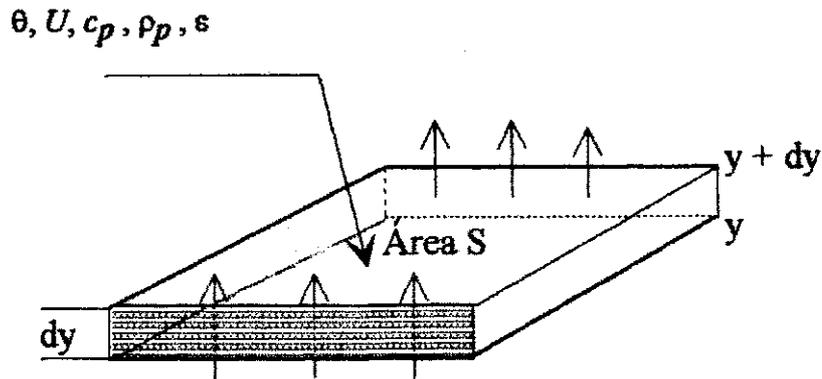
- uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida.

Os modelos de secagem apresentados abaixo são aplicáveis à secagem em camada espessa de todos os grãos e cereais, e são baseados nas leis de transferência de calor e massa.

O modelo aqui referenciado foi utilizado por BAKKER-ARKEMA et alii (1971), para determinar o efeito da área superficial do grão nas taxas de transferência de calor e massa, com grande sucesso.

#### 2.4.3.1 - Secagem em camada fixa

O modelo de secagem em camada fixa é baseado nos balanços de massa e energia, escritas para um volume diferencial ( $S \, dy$ ) localizado numa posição arbitrária da camada de grãos, conforme FIG. 7.



$x, T, V_a, \rho_a, c_a$   
 FIGURA 7 - Volume elementar de uma camada de grãos

Sendo assim, temos as seguintes análises:

• **Balço de energia para a entalpia do ar.**

$$\begin{aligned}
 & \text{[ Energia que entra na área } S \text{ na posição } y \text{ ]} \\
 & \quad - \\
 & \text{[ Energia que sai da área } S \text{ na posição } y+dy \text{ ]} \\
 & \quad = \\
 & \text{[ Energia transferida ao produto, por convecção ]} \\
 & \quad + \\
 & \text{[ Variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios ]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned}
 & (\rho_a V_a c_a + \rho_a V_a x c_v) S T dt - (\rho_a V_a c_a + \rho_a V_a x c_v) \left( T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S dt = \\
 & = A^* h (T - \theta) S dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned}$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h (T - \theta) A^*}{\rho_a V_a (c_a + x c_v)} \quad (37)$$

Os índices  $a$ ,  $v$ ,  $w$ , e  $p$  indicam que as propriedades que os contêm se referem ao ar, vapor, água e produto, respectivamente.

• **Balanço de energia para a entalpia do produto**

$$\begin{aligned}
 & \text{[ Energia transferida por convecção, do ar ao produto ]} \\
 & \quad = \\
 & \quad \text{[ Energia requerida para aquecer o produto ]} \\
 & \quad + \\
 & \quad \text{[ Energia requerida para evaporar a água do produto ]} \\
 & \quad + \\
 & \quad \text{[ Energia requerida para aquecer o vapor de água evaporada ]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned}
 A^* h S (T - \theta) dy dt &= (\rho_p c_p + \rho_p c_w U) S dy \frac{\partial \theta}{\partial t} dt - \\
 - h^*_{fg} \rho_a V_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt &- c_v (T - \theta) \rho_a V_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt
 \end{aligned}$$

e reagrupando obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h A^*}{\rho_p c_p + \rho_p c_w U} (T - \theta) + \left[ \frac{h^*_{fg} + c_v (T - \theta)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w U} \right] \rho_a V_a \frac{\partial x}{\partial y} \quad (38)$$

• **Balanço da massa de ar**

$$\begin{aligned}
 & \text{[ Quantidade de vapor de água que sai da área S na posição } y+dy \text{ ]} \\
 & \quad - \\
 & \quad \text{[ Quantidade de vapor de água que entra na área S na posição } y \text{ ]} \\
 & \quad + \\
 & \quad \text{[ Variação da umidade do ar nos espaços vazios ]} \\
 & \quad = \\
 & \quad \text{[ Umidade cedida pelo produto ]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned} & -\rho_a V_a S x dt + \rho_a V_a S \left( x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt + \varepsilon S \rho_a \frac{\partial x}{\partial t} dy dt = \\ & = \rho_p S \frac{\partial U}{\partial t} dy dt \end{aligned}$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial x}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a V_a} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (39)$$

#### • Balanço de massa do produto

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada delgada, apropriada para cada produto, que é dada por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_1 \quad (40)$$

onde ( $f_1$ ) representa uma equação de camada fina apropriada.

#### 2.4.3.2 - Secagem em fluxo cruzado

Em um secador de fluxos cruzados o ar escoia na direção  $z$  e o grão na direção  $y$ , perpendicular a  $z$ .

Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa. Portanto, fazendo-se os balanços de energia e de massa para o ar de secagem e para o grão, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{-h A^*}{\rho_a V_a c_c + \rho_a V_a c_v x} (T - \theta) \quad (41)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \left( \frac{h A^*}{\rho_p V_p c_p + \rho_p V_p c_w U} (T - \theta) \right) + \left( \frac{h^* f_g + c_v (T - \theta)}{\rho_p V_p c_p + c_w U} \frac{\rho_a V_a}{\rho_p V_p} \frac{\partial x}{\partial z} \right) \quad (42)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z} = - \frac{\rho_p V_p}{\rho_a V_a} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (43)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_2 \quad (44)$$

onde ( $f_2$ ) representa uma equação de camada fina apropriada.

Para resolver quaisquer dos modelos anteriormente descritos, faz-se necessário que as condições iniciais e de contorno sejam conhecidas. Essas condições são (a) a temperatura e o teor de umidade iniciais do grão e (b) a temperatura e razão de umidade iniciais do ar de secagem.

Para os modelos de secagem em camada fixa e fluxos cruzados as condições são:

$$T(0, t) = T_{ent}$$

$$b(y, 0) = b_0$$

$$U(y, 0) = U_0$$

$$x(0, t) = x_{ent}$$

ROA e MACEDO (1976a), citados por ROSSI e ROA (1980) propuseram a seguinte equação empírica de secagem em camadas delgadas:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \beta (U - U_e) (P_{vs} - P_v)^\eta t^{\beta-1} \quad (45)$$

Com condições iniciais  $U(t=0) = U_0$ , a equação integrada para condições constantes de temperatura e umidade do ar, fornece o seguinte resultado:

$$M = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \exp\left[-\alpha(P_{vs} - P_v)^\eta t^\beta\right] \quad (46)$$

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\eta$  da equação são obtidos por regressão linear ou não-linear a partir dos dados experimentais de secagem em camadas delgadas dos produtos.

As simulações de secagem para os fluxos concorrente e contra-corrente são feitas similarmente à maneira utilizada para leito fixo, segundo MATA et alii (1984) e MATA (1985)

A solução analítica para os sistemas de equações obtidos a partir do modelo da Universidade Estadual de Michigan é impossível; sendo assim, usam-se técnicas numéricas de diferenças finitas ou outros métodos.

Os modelos de camada fixa e de fluxos cruzados podem ser resolvidos por métodos convencionais de diferenças finitas, (BROOKER et alii -1974).

BAKKER-ARKEMA et alii (1974) fornece em seu trabalho o modelo da Universidade Estadual de Michigan na forma discretizada, escrito em linguagem Fortran, bem como os resultados da simulação de secagem de milho, utilizando o referido modelo.

MARTINS (1982) utilizou o modelo da Universidade Estadual de Michigan na simulação da secagem de milho em leito fixo. Neste caso, as equações diferenciais foram convertidas em diferenciais ordinárias por meio de discretização da variável espacial, utilizando um programa computacional desenvolvido por HINDMARSH.

VASCONCELOS e ALSINA (1992) utilizaram o modelo da Universidade Estadual de Michigan para simular a secagem de feijão carioca, considerando o mesmo, segundo eles, satisfatório, com algumas restrições, após a comparação dos resultados teóricos com os experimentais.

## 2.5 - Secador de fluxos cruzados

Existe uma gama de secadores que atendem às necessidades específicas de determinados processos, alguns são sofisticados, outros sumariamente simples, atendendo somente a algumas peculiaridades do processo de secagem.

A adoção de uma técnica de secagem determinada depende de fatores tão diversificados quanto valor do investimento, escala de produção, custo de energia, área disponível, qualidade final do produto, tipo de operação (contínua ou intermitente), nível adequado de automatização, segurança contra acidentes, nível de poluição tolerável no local de produção, sazonalidade no suprimento de matéria prima, dificuldade de treinamento de operadores, dependência ou independência da tecnologia de terceiros, dificuldades na reposição das peças e muitos outros, (BERNAUER e ROCHA - 1984)

Os secadores de grãos de fluxos cruzados são hoje os mais utilizados em todo o mundo, por serem de simples construção e operação, e apresentarem menor custo inicial do que outros tipos de secadores.

Os modelos existentes geralmente trabalham de forma intermitente, processando um lote de produto de cada vez, o que proporciona uma baixa capacidade de secagem.

O secador de grãos de fluxos cruzados convencional apresenta a desvantagem da formação de gradientes de temperatura e de teor de umidade ao longo da massa de grãos.

Para reduzir as desvantagens apresentadas pelos secadores de fluxos cruzados convencionais, várias modificações têm sido feitas no seu projeto visando principalmente reduzir os gradientes de teor de umidade e melhorar a eficiência energética de secagem.

PAULSEN e THOMPSON (1973) estudaram a reversão do fluxo de ar no secador de fluxos cruzados por meio de simulação matemática e concluíram que a utilização dessa técnica pode reduzir em cerca de 60 à 75% o gradiente de teor de umidade do produto na saída do secador.

BAKKER - ARKEMA et alii (1979) realizaram testes comparativos entre secadores de fluxos cruzados com e sem reaproveitamento do ar de exaustão e concluíram que a utilização do reaproveitamento do ar pode propiciar economia de energia de até 50%, (MELONI e QUEIROZ -1991).

Segundo MELONI e QUEIROZ (1991), a quantidade de ar de exaustão que pode ser reaproveitada depende das características de projeto do secador, do teor de umidade inicial e do fluxo de grãos.

A configuração do secador de fluxos cruzados resulta em muitos parâmetros de projeto e de operação os quais podem ser ajustados para atingir o desempenho máximo do secador. Uma vez que existe uma simetria no perfil de temperatura e de teor de umidade do produto ao longo da largura do secador, esta dimensão afeta somente a capacidade total do secador. A altura da coluna de secagem e o fluxo de produto são escolhidos de tal forma a encontrar o tempo de residência apropriado do produto no secador. Dessa forma, a espessura da coluna e o tempo de residência do produto no secador são os principais parâmetros de projeto, juntamente com os parâmetros operacionais, temperatura e fluxo de ar, ( HAWK et alii - 1978, citado por MELONI e QUEIROZ, - 1991 ).

# CAPÍTULO 3

---

## SERICICULTURA

### 3.1 - Aspectos científicos

#### 3.1.1 - Espécies e ciclo vital do bicho-da-seda

No mundo são conhecidos oito espécies de bicho-da-seda, criados com a finalidade de produzir fios de seda. São, da família Bombycidae, o *Bombix mori* L., e da família Saturniidae, os *Antheraea pernyi* GUERIN, *mylitta* DRURY, *yamamai* GUERIN, e *assama* HELFER; o *Atlas ricini* BOISDUVAL; O *Philosamia cynthia* DRURY e o *Eriogyna pyretorum* WESTWOOD.

Atualmente, são produzidos quatro espécies de sedas natural ou animal: a seda produzida pelo *Bombix mori* L., animal que se alimenta da folha da amoreira, que é a mais importante e contribui com 95% do total da produção mundial; e as produzidas pelas *Mouga*, *Eri* e *Tasar*, responsáveis pelos 5% restantes.

A *Mouga*, a *Eri* e a *Tasar* são considerados bichos-da-seda selvagens e pertencem à família Saturniidae, alimentando-se de diversas outras espécies de plantas, tais como carvalho, mamoneira, etc.

O *Bombix mori* L., durante sua vida, passa por quatro estágios: ovo, larva, pupa (crisálida) e imago (mariposa). A larva nascida de um ovo, com menos de 0,5 mg de peso, alimentando-se com folhas de amoreira, dentro de mais ou menos quatro semanas cresce mais de 10 mil vezes em relação ao seu peso inicial, (FONSECA e FONSECA-1988).

Durante esse período o bicho-da-seda normal exuvia (troca de pele) quatro vezes; e ao final começa então a fiar a seda pelo orifício de sua fiandeira a uma razão de 10 a 15 *cm/min*, (OLNEY-1947), e tece o casulo (invólucro de seda, em que se abriga a larva, para no seu interior se proteger dos agentes externos) encerrando-se nele. O comprimento de fios de seda de casulos varia normalmente de 800 a 1.500 metros, com espessura de 0,002mm, (HANADA e WATANABE - 1986 ), em discordância com alguns autores que chegam a afirmar que seu comprimento pode alcançar até 4.000m e nunca apresenta espessura uniforme, (ERHARDT et alii - 1976).

A larva dentro do casulo, através da metamorfose, transforma-se em pupa (ninfá ou crisálida) e esta em mariposa, que com auxílio de um suco alcalino secretado no estômago umedece a casca do casulo, amolecendo-a e facilitando assim o rompimento para sua saída do mesmo.

### 3.1.2 - Características físicas e químicas do casulo e fio de seda

O casulo verde produzido pelo *Bombix mori* L. é composto de três partes: a casca (17,0 à 24,4%), a pupa (crisálida) (75,0 à 82,3%) e a exúvia (espólio) (0,6 à 0,7%). A primeira é tecida pela larva, cruzando os filamentos de seda uns sobre os outros, em forma de S ou 8, formando os vários estratos do casulo. A massa do casulo varia de 1,5 à 2,5 g, ( FONSECA e FONSECA -1988).

A temperatura, a umidade e a ventilação, bem como o poder nutritivo da amoreira, antes e durante a formação do casulo, influem diretamente tanto no tempo de duração do encasulamento bem como na qualidade dos casulos e no desenrolamento de fios no processo de fiação,( HANADA e WATANABE -1986).

Conforme a raça do bicho-da-seda (Chinesa, Japonesa ou Indiana) podem ser diferentes, a cor e o tipo ou conformação do casulo.

A cor dos casulos pode apresentar diversas tonalidades das seguintes cores: branco, rosado, amarelo (cor de ouro) ou esverdeada. No que diz respeito a forma geométrica,

pode ser, esférica, oval ou elipsoidal, cintada, e ocasionalmente, pode ser também pontiaguda ou fusiforme (FIG. 8).

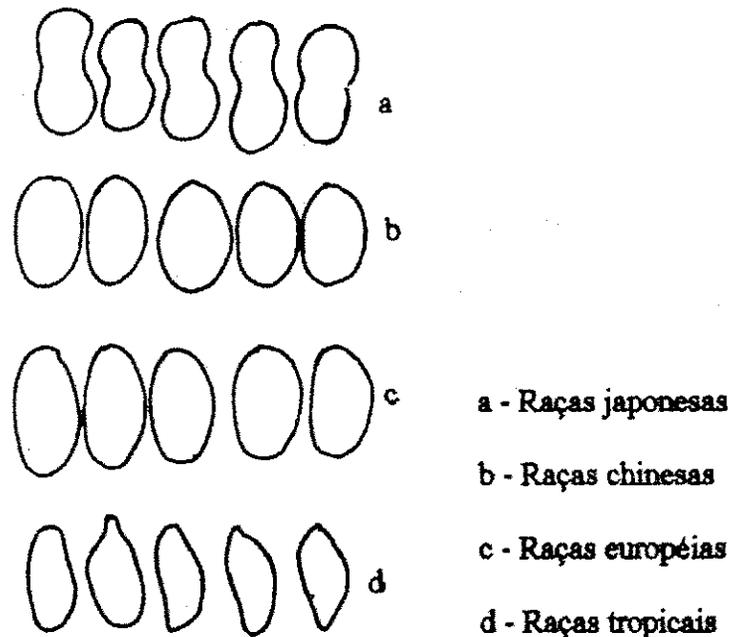


FIGURA 8 - Formas dos casulos do bicho-da-seda *Bombix mori* L.  
FONTE - FONSECA e FONSECA (1988), p.217

A composição média dos casulos verdes ou frescos é dada pela TAB. 4, (BIANCHI -1945).

TABELA 4

Composição média dos casulos verdes

COMPONENTE	% EM MASSA
Água	68,20 %
Seda grége	14,30 %
Materiais gomosos solúveis em água	0,70 %
Crisálida	16,80 %

Como percebe-se pela análise da TAB. 4, existe no casulo uma grande quantidade de água, sendo que a maior parte desta água se encontra na crisálida.

A TAB. 5, indica em percentagem as análises de amostra dos casulos do *Bombix mori* L., segundo H. SILBERMANN (1885), citado por MAUERSBERGER (1947).

TABELA 5

## Composição química da seda da amoreira

COMPONENTE	PERCENTAGEM NO CASULO			
	BRANCO		AMARELO	
	Casulos	Seda bruta	Casulos	Seda Bruta
Fibroina	73,59	76,20	70,02	72,35
Cinza de Fibroina	0,09	0,09	0,16	0,16
Sericina	22,28	22,01	24,29	23,13
Cera e gordura	3,02	1,36	3,46	2,75
Sais	1,06	0,30	1,92	1,60

Examinada ao microscópio, a seda bruta produzida pelo *Bombix mori* L. exibe uma aparência que a distingue facilmente das outras fibras têxteis, pois é composta de dois filamentos finos paralelos.

Observando-se a secção transversal do filamento do casulo (FIG. 9a e 9b), vê-se que é aproximadamente elíptica, mostrando as duas bordas triangulares completamente circundadas por uma goma, normalmente revestindo uma a outra com um aspecto plano triangular (MAUERSBERGER - 1947).

A vista longitudinal (FIG. 10) mostra uma estrutura de superfície muito irregular, principalmente na camada externa, que consiste de fissuras transversais, dobras, rugas e pedaços irregulares, (MAUERSBERGER - 1947).

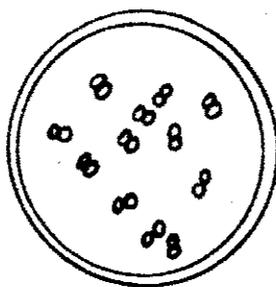


FIGURA 9a - Corte transversal do filamento de seda ao microscópio  
 FONTE - FONSECA e FONSECA (1988), p.219

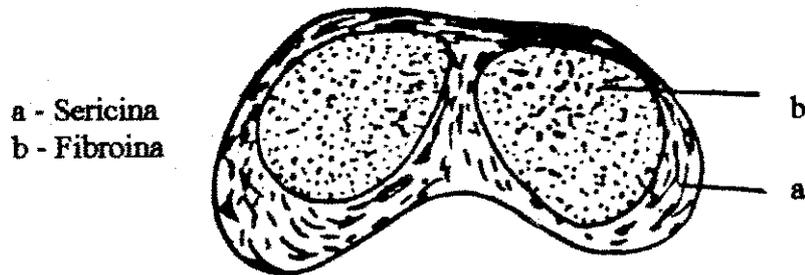


FIGURA 9b - Secção transversal ampliada do filamento de seda.  
FONTE - FONSECA e FONSECA (1988), P.220

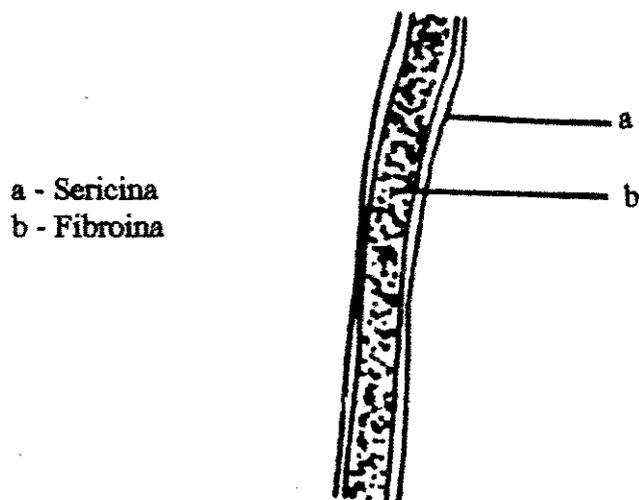


FIGURA 10 - Filamento de seda visto ao microscópio  
FONTE - FONSECA e FONSECA (1988), p.219

A constituição do fio de seda é dada pela TAB. 6, (HANADA e WATANABE-1986).

TABELA 6

## Constituição química do fio de seda bruta

COMPONENTE	PERCENTAGEM
Fibroína	70 ~ 80 %
Sericina	20 ~ 30 %
Cera	0,4 ~ 0,8 %
Carboidratos	1,2 ~ 1,6 %
Pigmentos	+ ou - 0,2 %
Inorgânicos	+ ou - 0,7 %

A composição média do filamento é dada pela TAB. 7, (FONSECA e FONSECA -1988).

TABELA 7

## Composição média do fio de seda bruta

COMPONENTE	PERCENTUAL
Fibroína	72 ~ 80 %
Sericina	19 ~ 27 %
Gordura e cera	0,5 ~ 1,0 %
Carboidrato	1,0 ~ 1,5 %
Materiais corantes e inorgânicos	1,0 ~ 1,5 %

De acordo com H. SILBERMANN (1885), citado por MAUERSBERGER (1947), a composição média do filamento é mostrada na TAB. 5. Percebe-se que além da existência da fibroína que é a parte interna do filamento, e da sericina, que circula a fibroína, há também presente na seda bruta cerca de 2% de cera, e cerca de 1% de material mineral.

A fibra de seda é uma substância nitrogenada e tanto a sericina como a fibroína, contém uma grande quantidade de aminoácidos, (OLNEY -1947).

A sericina tem aparência de uma goma-arábica e envolve a fibroína do fio-baba de cada casulo, solidificando-se depois de expelida pela larva, quando exposto ao ar por algumas horas, (FILHO - 1973).

MAUERSBERGER (1947), cita trabalho de WALTERS-HOUGEN (1934), onde revela que a sericina é uma proteína albuminóide insolúvel em água fria, e pode ser decomposta em vários aminoácidos dos quais pelo menos doze tem sido obtido; alanina, tirosina, glicina existem em maior abundância.

Segundo HARPER (1921), KRAMER, citado por BIANCHI (1945), e GROVER (1928), citado por MAUERSBERGER (1947), a fórmula empírica para a sericina é  $C_{15} H_{25} N_5 O_8$

A quantidade total de sericina presente na seda bruta é variável, dependendo do tipo de seda e da região ou país de sua origem. Ela é o material que produz na fibra a sensação de rigidez e aspereza, e é totalmente solúvel em água quente.

De acordo com MOSHER (1930), citado por MAUERSBERGER (1947), a sericina pode ser completamente dissolvida por soluções ácidas tendo um pH abaixo de 2,5 e por soluções alcalinas tendo um pH acima de 9,5.

A fibroína é a substância protéica que constitui tudo quanto resta da seda bruta depois de completamente purgada, isto é, depois da retirada total da sericina, (BIANCHI -1945).

A fibroína da seda da amoreira, segundo HARRIS (1932), citado por MAUERSBERGER (1947), tem um ponto isoelétrico de pH 2,5, é colorida de rosa por vários reagentes; e é insolúvel em amônia, em soluções de carbonatos alcalinos, e em solução de 1% de soda cáustica.

Segundo MAUERSBERGER (1947), a fibroína é dissolvida por soluções de soda cáustica forte (5%), especialmente na temperatura de ebulição, é também solúvel em diversos tipos de ácidos e em soluções alcalinas de hidróxidos de metais, tais como níquel, zinco e cobre.

A composição química e estrutura molecular da fibroína não tem sido completamente resolvida e há várias questões pendentes que necessitam de elucidação, (MARSH - 1948).

Pesquisa desenvolvida por HALL (1979a), revela que a fibroína tem a seguinte fórmula molecular  $(C_{24} H_{38} O_8 N_8)_n$ , onde n representa um número inteiro elevado.

Embora análises quantitativas tenham sido feitas por diversos pesquisadores não há completo acordo entre os resultados.

De acordo com ERHARDT et alii (1976), a composição química percentual da fibroína é dada pela TAB. 8.

TABELA 8

## Composição química percentual da fibroína

ELEMENTO QUÍMICO	C	H	O	N
PERCENTUAL	48,5%	6,5%	26,7%	18,3%

A TAB.9 apresenta uma análise da composição percentual da fibroína da seda, citada por MARSH (1948), em trabalhos de BERGMANN e ABDERHALDEN, como também os resultados obtidos por COHNEIM, citado por MAUERSBERGER (1947).

TABELA 9

## Análise da fibroína da seda

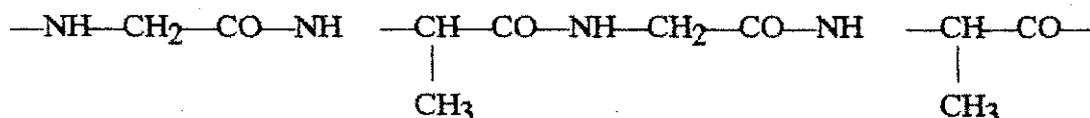
COMPONENTE	PERCENTAGEM		
	BERGMANN	ABDERHALDN	COHNEIM
Glicina	43,8	40,5	36,0
Alanina	26,4	25,0	21,9
Tirosina	13,2	11,0	10,0
Arginina	0,95	1,5	1,0
Lisina	0,25	0,9	indeterminado
Histidina	0,07	0,8	indeterminado
Prolina	-----	1,0	-----
Leucina	-----	2,5	1,5
Serina	-----	1,8	1,6
Fenilalanina	-----	1,5	1,5
Ácido $\mu$ -Pirrolidono Carboxílico	-----	-----	0,3
Triptofânio	-----	-----	indeterminado
Ácido Amino-Valérico	-----	-----	indeterminado

NADIGER et alii (1985), investigando a composição dos aminoácidos das diversas variedades de seda; da Amoreira, Tasar, Eri e Mouga, concluíram que a fibroína da amoreira é constituída de glicina, alanina e serina, enquanto que as demais espécies são formadas basicamente por alanina. Outros aminoácidos foram encontrados na seda, mas suas quantidades presentes foram desprezadas, em relação as quantidades dos demais aminoácidos citados.

BHAT et alii (1980), utilizando a técnica de difração eletrônica concluíram, para fibroína da seda indiana (*Bombix mori* L., Tasar, Eri e Mouga), que a mesma possui estrutura cristalina e é constituída de, basicamente glicina, alanina e serina. Resultados estes, confirmados por NADIGER e BHAT (1985) para a seda da amoreira.

Dos dados acima, de qualquer modo, pode-se concluir que a seda é principalmente compreendida de glicina, alanina, tirosina e serina.

Segundo BERGMANN e NIERNANN (1938), citados por OLNEY (1945), OLNEY (1947) e MARSH (1948), a fibroína tem a seguinte fórmula estrutural, formada pela união dos alfa aminoácidos glicina e alanina:



Como a unidade de repetição da proteína, fibroína da seda, é um aminoácido, pode-se supor que a mesma tenha algumas das propriedades dos aminoácidos, tal como, caráter anfótero, ou seja, propriedades de combinar-se com ácidos e bases para formar sais.

A seda é parte integrante da categoria de produtos higroscópicos.

HESS (1941), BIANCHI (1945), MAUERSBERGER (1947), afirmaram que a seda é muito higroscópica, e sob circunstâncias favoráveis, absorverá até 30% de seu peso, de umidade, e contudo parece ser seca. Esta umidade é adsorvida na superfície interna da fibra.

Esses produtos tem a propriedade de realizar trocas de água, sob a forma de vapor, com o ar ambiente que os envolve, por absorção (adsorção) ou dessorção<sup>13</sup>, considerando-se as características hídricas dos produtos e do ar que o circunda.

Todas as fibras têxteis quando expostas à atmosfera úmida, de UR(umidade relativa) variando de 0 a 100%, a uma certa temperatura, absorve umidade em equilíbrio em quantidade, que quando plotadas em um gráfico, fornecem a curva de adsorção, semelhante a curva A (GRAF. 2).

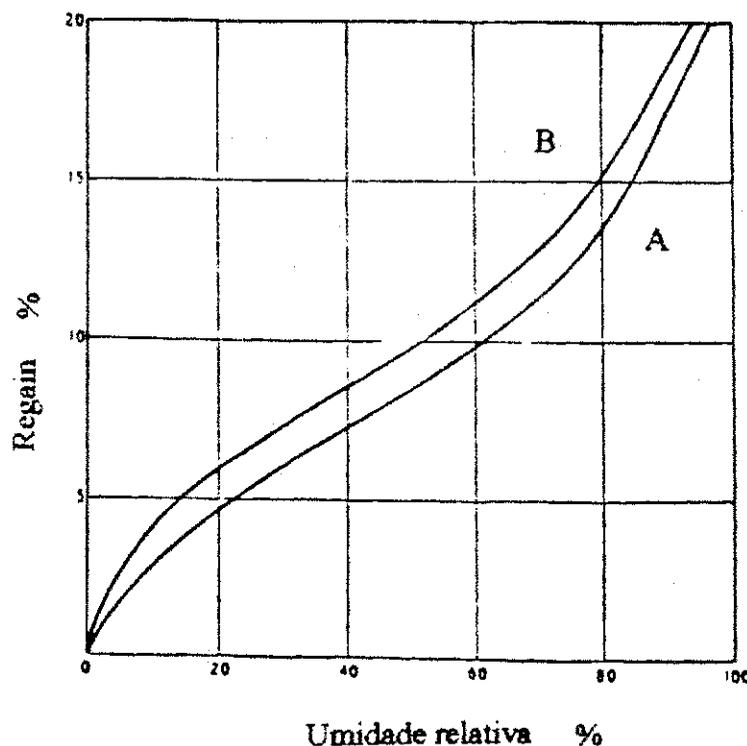


GRÁFICO 2 - Curva de adsorção e dessorção da seda Tasar à 25 °C  
FONTE - GARNER (1949), p. 3.

<sup>13</sup> Dessorção = secagem; absorção = reumidificação

Por outro lado, se a fibra for secada por exposição em atmosfera de UR. reduzidas sucessivamente, a curva de secagem é obtida e assemelha-se a curva B (GRAF. 2).

O percentual Regain é o percentual de água que o material possui em relação ao seu peso seco.

Estas curvas são de grande importância técnica, uma vez que a água absorvida ou perdida pela fibra têxtil, modifica suas propriedades físicas, tais como: peso, espessura, fiabilidade, alongamento<sup>14</sup> etc.

O equilíbrio higroscópico dos materiais biológicos a uma certa UR e temperatura, é mais elevado durante a dessorção do que durante a adsorção, e esta diferença está em torno de 1% de umidade, em base seca, (KOSOSKI - 1977). CHUNG e PFOST, citados por BROOKER et alii (1974), afirmam que esse efeito de histerese pode ser devido ao encolhimento do grão durante a dessorção, reduzindo assim, a disponibilidade de água de ligação na sua superfície.

De acordo com HESS (1941), MAUERSBERGER (1947), HALL (1975b), e HOLLEN et alii (1979b), a seda livre da sericina apresenta uma densidade de 1,25g/cm<sup>3</sup>; no seu estado bruto, a seda apresenta uma densidade que varia de 1,30 a 1,37 g/cm<sup>3</sup>, HESS (1941), concordando com o valor atribuído por MAUERSBERGER (1947) e por HALL (1975b), que é de 1,33 g/cm<sup>3</sup>, e discordando do valor de 1,38 g/cm<sup>3</sup>, apresentado por ERHARDT et alii (1976).

Segundo HESS (1941), BIANCHI (1945) e OLNEY (1947), a seda pode ser aquecida até a temperatura de 140 °C, sem perigo de decomposição, contudo, ela é rapidamente desintegrada a temperaturas superiores a 165 °C, dando como produtos gases, sólidos e líquidos, semelhantes aos obtidos pela destilação seca das outras substâncias protéicas.

---

<sup>14</sup> O alongamento representa a ductilidade e não deve ser confundido com o alongamento elástico, que representa apenas uma pequena percentagem da ductilidade.

A seda é um mau condutor de calor, possuindo uma condutividade térmica de 0,040 W/m.K, segundo WEAST (1979), citado por HALL (1980a), e submetida a temperatura elevada e por tempo prolongado, perde em resistência à ruptura e elasticidade.

A seda, bruta ou livre da cola (sericina), é a mais resistente das fibras naturais, (CORBMAN - 1975). Segundo WOOLMAN e MCGOWAN (1943), a resistência à tração da seda bruta é aproximadamente 441,27 kPa.

O conteúdo da água na fibra têxtil tem uma grande influência na sua deformação, resistência e espessura, (GARNER - 1949). Tratando-se da seda, esta conserva cerca de 80 a 90% de sua resistência à seco, quando umedecida, (ERHARDT et alii - 1976).

HOLLEN et alii (1979a), publicaram em seu trabalho, uma série de quadros de propriedades físicas das fibras naturais e sintéticas, que foram aqui reagrupados em parte e resumidos, apenas para as fibras naturais (TAB. 10). Os números são médios ou medianos, mais podem ser tomados como referência.

TABELA 10

Propriedades físicas das fibras naturais

PROPRIEDADE	FIBRA NATURAL		
	Algodão	Seda	Lã
Resistência à abrasão	decrece →		
Absorvidade (umidade "Regain") (%)	7 ~ 11	11	13 ~ 18
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,52	1,25	1,32
Recuperação elástica (% de recuperação para 2 a 5% de extensão).	75	92	99
Alongamento (% de alongamento até ruptura)			
* Úmido	9,5	30	35
* Padrão (T = 21,1°C e UR = 65 %).	3 ~ 7	20	25

A umidade "Regain" é expressada como a percentagem do peso livre de umidade a uma UR = 65%.

## 3.2 - Aspectos tecnológicos

### 3.2.1 - Secagem de casulos do bicho-da-seda

O casulo verde produzido pelo *Bombix mori* L. é composto de uma casca exterior onde existe a seda bruta propriamente dita e no interior a crisálida, que ao final de algum tempo se transforma na mariposa a qual emite uma saliva que rompe o casulo, escapando pela abertura produzida.

A casca é composta de 17 ~ 24% em massa e a crisálida de 83 ~ 76%, sendo que nos casulos verdes, o teor de umidade inicial na casca é de cerca de 11 à 14% (b.u.) e para a crisálida este teor varia entre 74 à 78% (b.u.), mas o teor de umidade desejado ao final do processo é de 10 à 12% (b.s.), (SHIRUO-1986).

Sendo assim, a secagem de casulos, tem por objetivos:

- Interromper o processo da metamorfose da crisálida, matando-a. Desta forma evita-se a sua saída dos casulos, como mariposa, o que provoca a perda do casulo pelo rompimento do fio, não sendo possível, para este o processamento visando a produção de linha, servindo apenas para a produção de materiais semelhantes ao algodão;
- Eliminar a umidade excessiva dos mesmos.

Desta forma, a secagem de casulos em que pese o alto preço de mercado da seda natural, bem como sua elevada aceitabilidade de mercado nacional e internacional, passa a ter relevante importância na medida em que, para fins de comercialização, precisa ser armazenada em local bem seco (baixa umidade), de forma a evitar tanto a sua deterioração, como também a produção de fungos e ação de outros microorganismos, que contribuem significativamente para sua decomposição com conseqüente perda; e posteriormente ser utilizado como matéria-prima de fábricas de fiar seda, para produção contínua de certos produtos.

O comportamento dos casulos verdes, durante o processo de secagem tem sido estudado.

De acordo com SHIRUO (1986), o casulo verde, produzido pelo bicho-da-seda, *Bombix mori* L., tem um comportamento especial na secagem, apresentando dois períodos, o período de secagem com velocidade constante e o de velocidade decrescente, sendo este último menos percebido (GRAF. 3).

Durante o fenômeno de secagem dos casulos, as suas propriedades tecnológicas, podem ser alteradas significativamente, isto deve ser tanto quanto possível evitado.

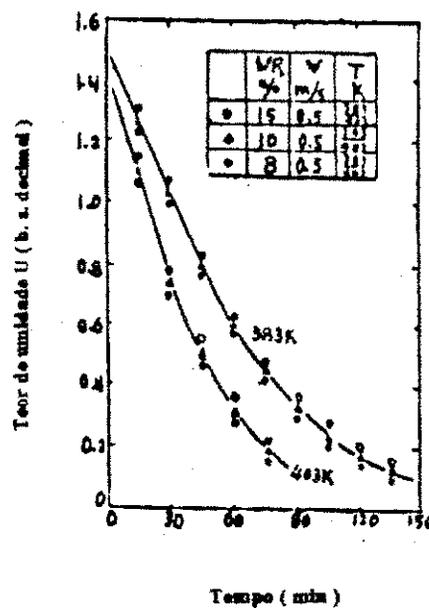


GRÁFICO 3 - Curvas de secagem de casulos sob diferentes temperaturas e umidades  
 FONTE - SHIRUO (1986), p. 241

As influências das temperaturas e umidade do ar para secagem dos casulos do bicho-da-seda têm sido estudadas.

Geralmente, no processo de secagem de casulos, faz-se necessário proteger a sericina de excessiva modificação para possibilitar a obtenção de boas características tecnológicas, alta percentagem de elasticidade (recuperação elástica) e alta percentagem de seda bruta dos casulos.

Levando-se em consideração as diferentes combinações de temperatura e umidade do fluido de trabalho, conduz-se a casulos de qualidades diferentes.

O processo de secagem altera várias propriedades físicas dos casulos quando submetidos a tal processo, entre elas as dimensões e volume.

No caso específico de casulos do bicho-da-seda, a quantidade de água removida, dependendo da temperatura de secagem, pode alcançar os 65% em peso, para uma temperatura de 80°C, (BANSAL e GARG -1987), o que acarreta uma modificação relativa no volume dos casulos.

O percentual de espaços integrantes em massa de material não consolidada é denominado porosidade; tal parâmetro está associado à passagem de ar pelos grãos, (MOHSENIN -1972, citado por PRADO - 1978).

Para TSUKADA (1978), a seda bruta, quando submetida a temperatura acima de 80°C e por tempo prolongado, perde em peso, pela volatilização endotérmica da sericina, e também sofre variação na sua cor. As variações são de branco para amarelo luminoso, amarelo profundo, marron luminoso e preto ( $\approx 190$  °C).

De acordo com TAKAHASHI (1987), a operação de secagem deve ser feita no ponto ideal, isto é, na temperatura certa para matar a crisálida, deixar os casulos em condições ideais de armazenamento e possibilitar a transformação física da sericina, com conseqüente retirada do fio de primeira qualidade.

As formas e temperaturas de secagem de casulos do bicho-da-seda em camada fixa têm sido fornecidas por diversos autores.

Segundo HARPER (1921) e OLNEY (1947), os casulos são postos para secar em temperatura na faixa de 70 a 80°C, com vapor ou ar quente. Quando são secados com vapor, os casulos se mantêm úmidos por um certo período de tempo (10 a 15 min.), e a seguir são postos em locais apropriados até que fiquem secos.

De acordo com MARSH (1948), o procedimento é aquecer o casulo por 10 min. em vapor ou em um forno à temperatura na faixa de 60 a 70.°C por 3 horas, tal resultado está em concordância com os valores apresentados por SILVA (1985), que é, por um período de 3 horas, de 75 °C para a temperatura de secagem.

BANSAL e GARG (1987), fornecem em seu trabalho uma tabela com os seguintes parâmetros de secagem de casulos do bicho-da-seda (TAB. 11).

TABELA 11

**Parâmetros de secagem de casulos do bicho-da-seda**

Teor de Umidade	Porcentagem	Temperatura Máxima
Umidade inicial ( b.u. )	68 ~ 70	80 ° C
Umidade final ( b.u. )	10 ~ 12	

Verifica-se uma redução de 58% da umidade do produto ao final do processo de secagem, após análise da TAB.11.

MOLNÁR et alii (1962) citam experimentos controlados com métodos radioativos, os quais indicam que, em comparação com o tratamento de aquecimento usual de 90 ~ 96°C, a utilização de ondas eletromagnéticas do tipo radiação  $\gamma$  (Gama) como fonte de energia para o aquecimento dos casulos, resulta numa alta taxa de mortalidade das crisálidas do bicho-da-seda *Bombix mori* L. .

No processo de secagem dos casulos verdes, em fluxos contínuos, geralmente adota-se o aquecimento com ar quente.

SHIRUO (1986) referencia que muitas experiências foram feitas anteriormente neste processo de secagem, mas a máxima temperatura de ar quente usada nunca era maior que 100 °C.

Após uma série de pesquisas, opiniões muito diversas e confusas, sustentam que a máxima temperatura de secagem de casulos não será acima de 115 °C, (SHIRUO - 1986).

De acordo com a FIAÇÃO DE SEDA BRATAC S/A, faz-se necessário um controle muito rigoroso de temperatura para os diversos tipos de casulos, visando à escolha da faixa ideal para cada tipo de casulo verde. Segundo ela, utilizando-se uma faixa de temperatura de 120°C, provocará a morte da crisálida e uma dificuldade em se fiar esses casulos, com um número acentuado de emendas. Para o caso de se secar os mesmos em temperaturas baixas, haverá dificuldades no cozimento e na manufatura do fio, provocados pelas emendas e paradas sucessivas das máquinas. Em ambos os casos se acentua uma enorme redução da produção

FONSECA e FONSECA (1988) demonstraram que a secagem é realizada fazendo-se atravessar uma corrente de ar quente, sobre a massa de casulos verdes, com uma temperatura de cerca de 100 a 110 °C; terminando a 40 a 50 °C. A regressão progressiva da temperatura se faz à medida que se vai completando a secagem do casulo.

SHIRUO (1986) afirma que uma das formas amplamente usada na China, de se reduzir as influências das temperaturas e umidade do ar quente sobre os casulos, é utilizar um processo duplo de secagem, que consiste em submeter os casulos verdes a duas câmaras de ar quente a temperaturas diferentes em ordem decrescente.

Este procedimento permite a obtenção de casulos secos de qualidade aceitável para comercialização.

SHIRUO (1986), sugere as seguintes condições favoráveis de secagem, para o referido processo:

- secagem primária  $T = 373$  a  $383$  K e UR = 10%;

- secagem secundária  $T = 353$  à  $363$  K e  $UR = 10$  à  $20\%$

Dados técnicos fornecidos pela YAMATO SANKO MFG. CO., LTD., do secador de fluxos cruzados "YAMATO" COCOON DRYING MACHINE, modelo 65-13P-25W-BL-K são os seguintes:

- temperaturas alta  $120^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  e média à baixa:  $95^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ;
- a massa do casulo após secagem varia com relação à massa inicial de 42 a 40%, o que corresponde a uma variação na quantidade final de água de 11,2 a 8,2%, tomando por base os valores apresentados por BIANCHI (1945), para a composição média dos casulos verdes, e uma variação na umidade final (b.u.) de 20,5 à 26,0 pontos percentuais, ou seja, 25,8 a 35,1% (b.s.).

Pode-se, portanto, concluir, tendo por base as informações fornecidas neste trabalho, que a análise do mecanismo de secagem para casulos do bicho-da-seda é muito complicada e um tanto difícil, e exige estrutura e tecnologia especiais.

A tecnologia de secagem dos casulos verdes é detida pelas grandes empresas de fiação, tais como a Fiação de Seda Bratac S.A. e a Cooperativa dos Cafeicultores e Agropecuarista do Maringá Ltda. (COCAMAR), que absorvem quase toda a produção de casulos do país. Disto resulta que a produção de casulos verdes obtidos pelos produtores é repassada para as empresas a preços relativamente baixos baseados no câmbio comercial.

# CAPÍTULO 4

---

---

## MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. - Material

Os experimentos de secagem em leito fixo e as determinações da porosidade foram realizados no Laboratório de Processos Químicos, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal da Paraíba - Campus II, Campina Grande - PB, enquanto que os de secagem em fluxos cruzados foram realizados na COCAMAR-Maringá-PR e na EMPARN-Canguaretama-RN.

Para a realização dos experimentos foram utilizadas amostras de casulos do Bicho-da-seda, em fase inicial da metamorfose da crisálida, provenientes da Cooperativa dos Cafeicultores e Agropecuaristas do Maringá, localizada no município de Maringá-PR, com exceção do experimento realizado na EMPARN, para o qual utilizou-se amostra da própria região.

O material utilizado nos experimentos foi o casulo do bicho-da-seda *Bombix mori* L., com as características físico-químicas idênticas às do referido material descrito no capítulo anterior.

### 4.2. - Métodos experimentais

#### 4.2.1. - Determinação da Porosidade

A partir da literatura consultada, verificou-se a não existência de resultados das propriedades físicas de casulos de bicho-da-seda (densidade, difusividade térmica, con-

utividade térmica, calor específico, entre outras). Uma vez que pretendia-se apresentar um projeto de secador de operação contínua de fluxos cruzados, necessitava-se da densidade do produto, a fim de poder dimensioná-lo corretamente. Uma das técnicas utilizadas foi a da determinação da porosidade do produto, que uma vez conhecida determina-se a densidade do mesmo

A porosidade é definida pela razão do volume de espaços vazios ao volume do leito. Conforme a definição, a porosidade se relaciona com a densidade do material mediante a equação a seguir, referenciada por GUSTAFSON e HALL (1972), citados por MARIZ (1986):

$$\varepsilon = 1 - \left[ \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \right] \quad (47)$$

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

Para a determinação da porosidade da massa granular, utilizou-se um picnômetro, baseado no modelo proposto por DAY (1964).

O picnômetro de comparação a ar está mostrado esquematicamente na FIG. 11. O princípio do método baseia-se na suposição de assumir o ar como gás perfeito e condições isotérmicas durante o experimento.

Inicialmente todo o sistema se encontra à pressão atmosférica. Com o cilindro 2 repleto do produto até o nível máximo, fecha-se a válvula de conexão e injeta-se ar no cilindro 1, por meio de um compressor de ar. Nesse instante, a pressão do ar no cilindro 1, será:

$$P_{a1} V_{a1} = m_a R_a T_{abs} \quad (48)$$

Quando abre-se a válvula de admissão de ar do cilindro 1 para o cilindro 2, tem-se no cilindro 1:

$$P_{a2} V_{a1} = m_{a1} R_a T_{abs} \quad (49)$$

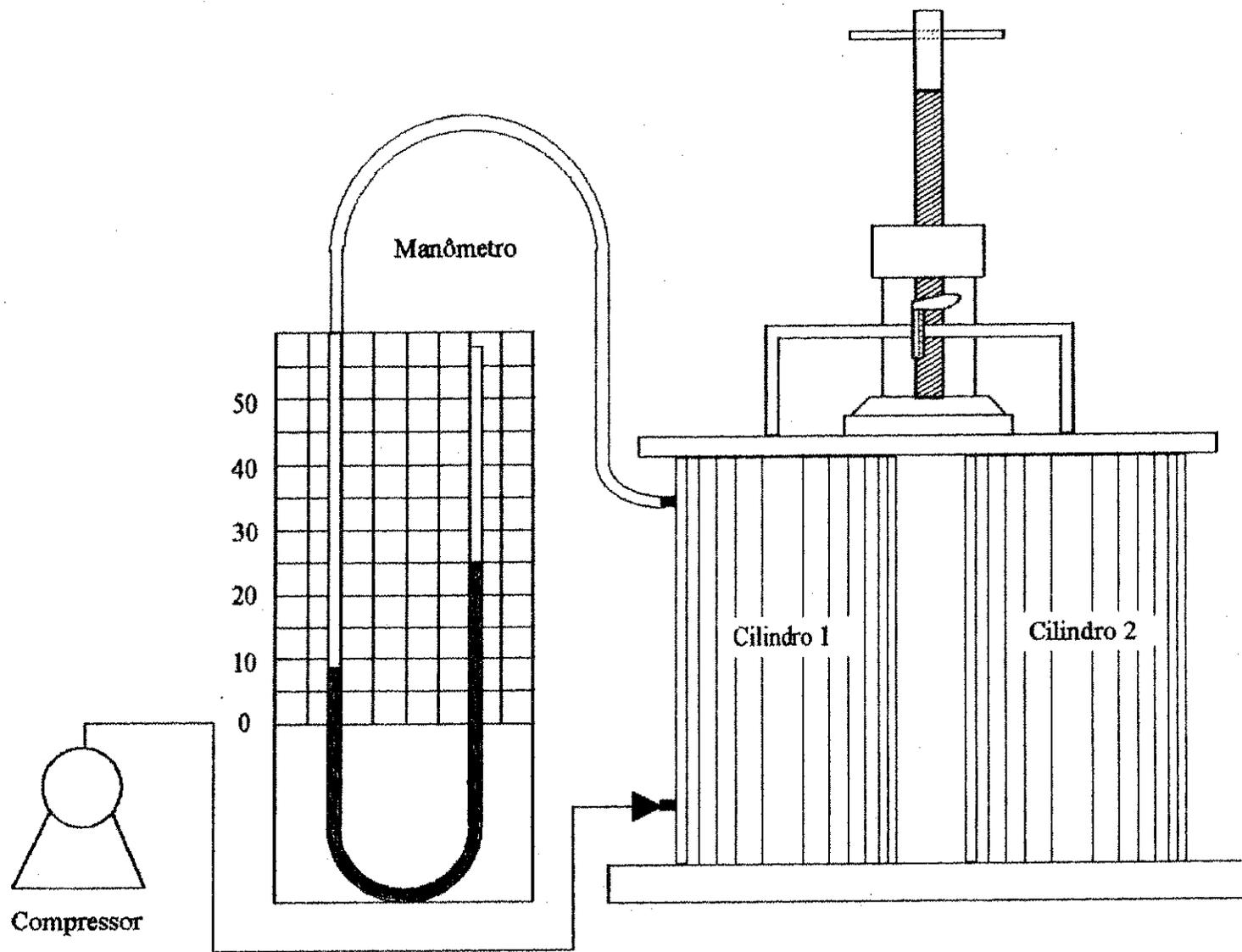


FIGURA 11 - Picnômetro de comparação a ar

e no cilindro 2 :

$$P_{a2} V_{a2} = m_{a2} R_a T_{abs} \quad (50)$$

Todas as pressões são obtidas a partir de um manômetro diferencial, contendo mercúrio como fluido.

Pela conservação da massa, tem-se:

$$m_a = m_{a1} + m_{a2} \quad (51)$$

Então:

$$\frac{P_{a1} V_{a1}}{R_a T_{abs}} = \frac{P_{a2} V_{a1}}{R_a T_{abs}} + \frac{P_{a2} V_{a2}}{R_a T_{abs}} \quad (52)$$

De onde se chega à fórmula da porosidade:

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_{a1} - P_{a2}}{P_{a2}} \quad (53)$$

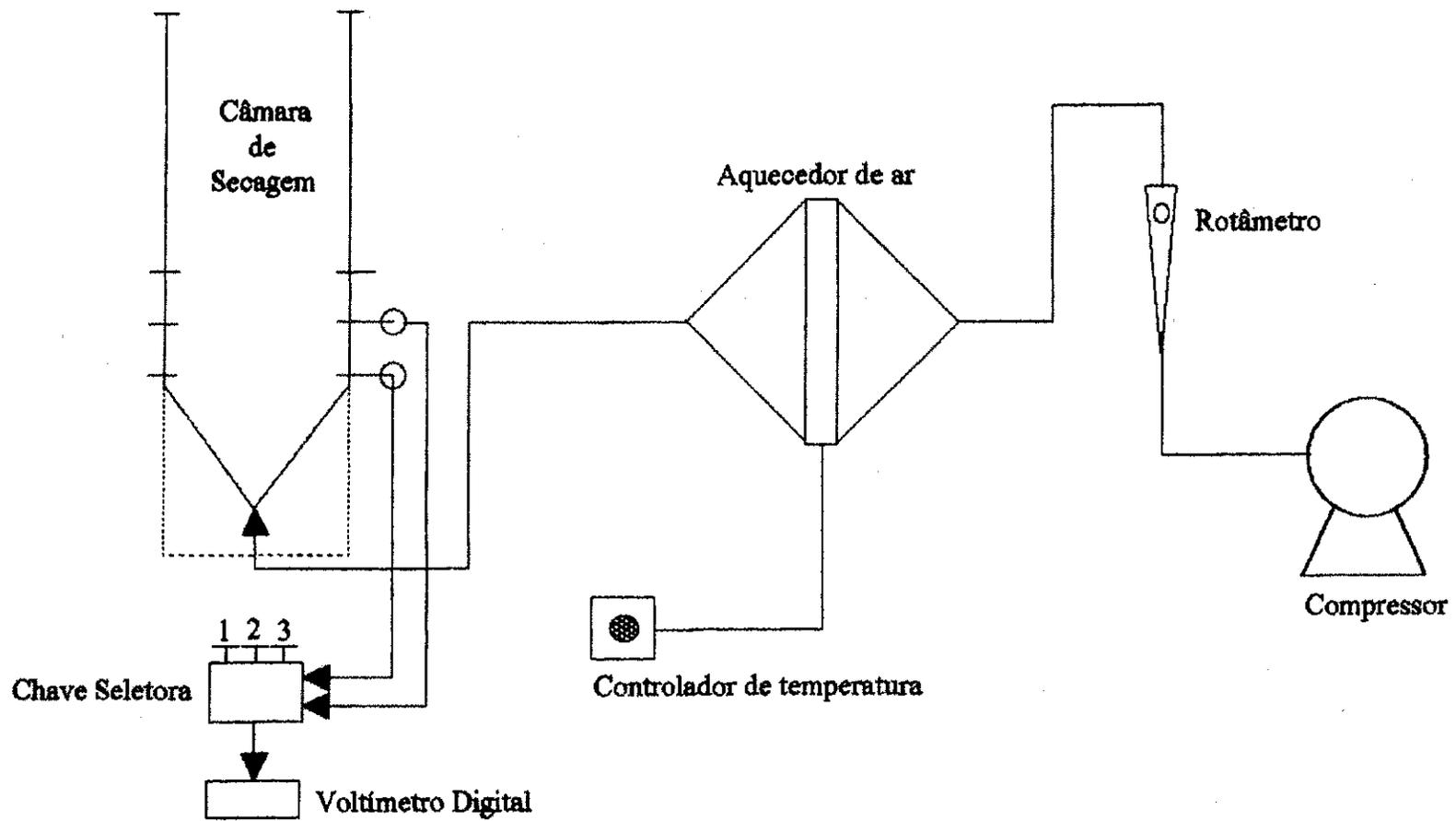
A densidade aparente foi obtida dividindo a massa de casulo contida no cilindro 2 pelo volume do cilindro.

Conhecidas a porosidade e a densidade aparente, a densidade do sólido se calcula a partir da EQ. 47.

#### 4.2.2. - Secagem em leito fixo

A determinação experimental do teor de umidade do produto em função do tempo de secagem foi realizada no equipamento esquemático da FIG. 12 conforme o procedimento:

- escolhe-se a vazão de ar de trabalho mediante a válvula reguladora, a qual é lida a partir de um rotâmetro, colocado na tubulação, e a temperatura de operação, mediante o uso de um controlador de temperatura;



1 - Temperatura de bulbo seco na entrada

2 - Temperatura de bulbo seco na saída

FIGURA 12 - Esquema do Secador Protótipo utilizado na secagem em leito fixo

- são acionados o compressor e o sistema de aquecimento de ar;
- uma vez atingidas as condições de regime permanente no ar que entra na câmara de secagem, é colocada na mesma uma massa pesada, da amostra, contida em suportes de tela de arame que variam de acordo com a altura do leito, o que possibilita a passagem do ar através da massa de casulos;
- a amostra junto com o suporte é retirada da câmara de secagem, em intervalos regulares de cinco minutos, durante todo o experimento, registrando-se a sua massa, as temperaturas de bulbo seco de entrada e saída do ar no leito, bem como as temperaturas e umidade relativa do ar ambiente.

As pesagens foram realizadas em uma balança METTLER PC 440, com precisão de leitura de 0,001g. Para retirar o suporte com a amostra, pesá-lo e recolocá-lo na câmara de secagem, durava em média 10 seg.

As temperaturas de bulbo seco de entrada e saída de ar, no leito, foram medidas com termopares e lidas em um voltímetro e as temperaturas e umidade relativa do ar ambiente, medidas e lidas num medidor LUTRON HT-3003. A pressão atmosférica foi obtida utilizando um barômetro que usa o Mercúrio como fluido de trabalho.

Uma vez que as temperaturas de bulbo seco do ar nas entrada e saída da câmara de secagem foram obtidas em unidades de tensão elétrica, utilizou-se um fator de conversão de 0,0527mV/°C, referente ao termopar de Ferro-constantan usado.

Para obtenção da umidade relativa do ar de secagem, utilizou-se o modelo proposto por ROSSI (1987).

A pressão do vapor de saturação foi determinada através da seguinte equação:

$$P_{vs} = 22105649,25 \exp \left( \frac{d_1 + d_2 T_{abs} + d_3 T_{abs}^2 + d_4 T_{abs}^3 + d_5 T_{abs}^4}{d_6 \cdot T_{abs} - d_7 T_{abs}^2} \right) \quad (54)$$

onde:

$$d_1 = -27405,526$$

$$d_2 = 97,5413$$

$$d_3 = -0,146244$$

$$d_4 = 0,12558 \cdot 10^{-3}$$

$$d_5 = -0,48502 \cdot 10^{-7}$$

$$d_6 = 4,34903$$

$$d_7 = 0,39381 \cdot 10^{-2}$$

A pressão do vapor d'água no ar ambiente foi determinada a partir do conhecimento da pressão do vapor de saturação e da umidade relativa do ar, através da equação:

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (55)$$

Sendo conhecida a  $P_v$ , obteve-se a umidade absoluta do ar nas condições ambiente pela relação:

$$x = 0,622 \left( \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \right) \quad (56)$$

Durante o processo de aquecimento, a umidade absoluta do ar não se modifica, enquanto que suas temperatura e entalpia sofrem modificações com acréscimos. Assim sendo, com a temperatura de bulbo seco do ar após ser aquecido determinou-se a nova  $P_{vs}$  pela EQ. 54, e com o uso da EQ. 55, obteve-se a umidade relativa do ar, na entrada da câmara de secagem.

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos com os experimentos realizados, foi calculado o teor de umidade em base seca, do produto, a partir da seguinte relação matemática (BROOKER et alii - 1974):

$$U_{b.s.} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (57)$$

A massa da amostras seca pode ser obtida por (LASSERAN - 1978):

$$m_s = (1-U_o) m_o \quad (58)$$

A umidade inicial da amostra foi obtida a partir dos resultados apresentados por BIANCHI (1945) e BANSAL e GARG (1987), admitida como sendo 0,68 ( b.u.).

Os dados de cada ensaio foram plotados graficamente na forma U vs t, método recomendado na literatura, para uma melhor análise dos resultados. Analisou-se o comportamento do teor de umidade, como também os efeitos das temperatura do ar, vazão de ar e espessura da camada de casulos, na cinética de secagem do referido produto.

#### 4.2.3. - Secagem em fluxos cruzados

##### 4.2.3.1. - COCAMAR (Maringá-PR)

A determinação experimental do teor de umidade do produto em função do tempo de secagem foi realizado num secador industrial, esquematizado na FIG.13, conforme o procedimento descrito abaixo:

- coloca-se uma amostra de massa "m" de casulos verdes num recipiente de tela de arame;
- a amostra foi depositada para secar, a partir do início da primeira esteira transportadora, na borda de entrada do secador;
- a amostra juntamente com o recipiente, foram retirados quando a mesma atingiu a extremidade oposta da esteira;
- a massa da amostra foi aferida, mediu-se a temperatura da casca e efetuou-se o registro da temperatura média da câmara de secagem, recolocando a amostra na próxima esteira, para, na outra extremidade da mesma, o procedimento se repetir, até que a amostra atinja a saída da última esteira.

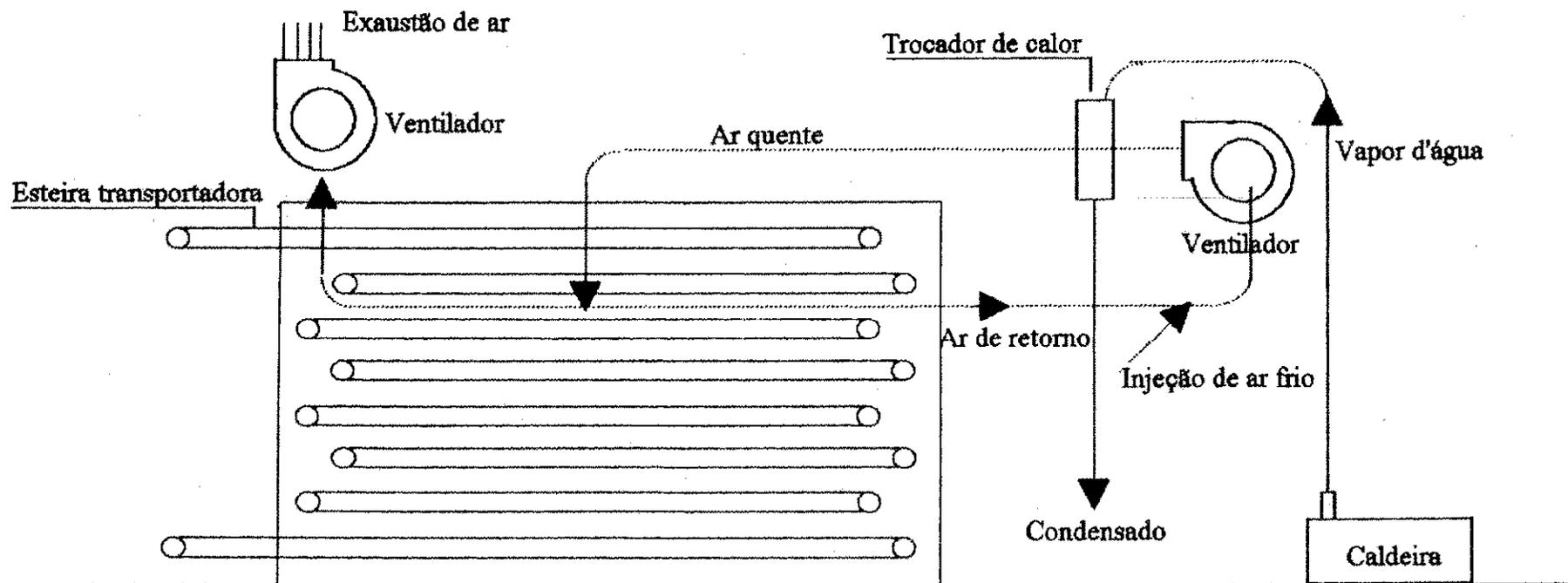


FIGURA 13 - Esquema do secador de fluxos cruzados (COCAMAR-PR)

As pesagens foram realizadas em uma balança de pratos, com precisão de leitura de 0,1g. Retirar o recipiente com a amostra, pesá-lo, medir a temperatura da casca, anotar a temperatura da câmara de secagem e recolocá-lo na esteira transportadora, durava em média 1 minuto. O acesso as esteiras transportadoras se deu através da abertura da porta corredeira, fabricada em perfis laminados e vidro, existente em cada extremidade do secador.

As temperaturas médias das câmaras de secagem, foram medidas através de termômetros, instalados em um painel de leitura, situado nas proximidades do secador.

As temperaturas ambiente foram medidas por intermédio de um termômetro digital marca PRAZIS.

A umidade relativa, obtida a partir do uso de um psicrômetro, representou a média diária das condições ambiente.

Observou-se, também, detalhes de projeto do referido secador, tais como: velocidade da esteira, estrutura metálica e acesso ao interior do mesmo.

#### 4.2.3.2. – EMPARN (Canguaretama - RN)

Procedimento idêntico ao descrito no item anterior foi adotado para a determinação da cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda. O secador utilizado está esquematizado também na FIG. 13. com exceção da quantidade de esteiras que neste caso, passa a ter um total de seis.

As temperaturas das câmaras e ambiente, pesagens da amostra, foram obtidas da mesma forma, já descrita anteriormente no processo de secagem da COCAMAR. A umidade relativa do ar ambiente não foi medida, em virtude da indisponibilidade de instrumento de medida da variável mencionada.

A partir dos experimentos realizados, comparou-se os processos de secagem em leito fixo e fluxos cruzados, a fim de verificar qual das técnicas é a mais viável e sob que condições deve ser executado o processo de secagem de casulos do bicho-da-seda.

### 4.3. - Métodos matemáticos

A equação geral do teor de umidade do produto em função do tempo proposta por NEWMAN (1931), citado por VERMA e NOOMHORM (1986), pode ser expressa por:

$$M = A_1 e^{(-a_1 D t)} + A_2 e^{(-a_2 D t)} + A_3 e^{(-a_3 D t)} + \dots \quad (59)$$

Segundo NEWMAN (1931), citado por VERMA e NOOMHORM (1986), a série converge rapidamente, portanto, deve ser representada apenas pelo primeiro termo. Ele assumiu que a resistência ao fluxo de umidade é concentrado na superfície do material, assim:

$$M = \left( \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \right) = A_1 e^{(-a_1 D t)} \quad (60)$$

Esta equação é comumente conhecida como o modelo logarítmico ou exponencial.

ROSSI e ROA (1980) observaram que o teor de umidade de equilíbrio diminui ao se aumentar a temperatura, mantendo constante a umidade relativa, com seu valor aproximando-se de zero, para umidades relativas menores que 10% e temperaturas superiores a 50 °C. Este resultado foi obtido, após análise de 36 curvas de equilíbrio higroscópico para 20 produtos agrícolas. Sendo assim, supondo que os casulos do bicho-da-seda também apresentem comportamento idêntico ao dos outros produtos biológicos, quanto ao teor de umidade de equilíbrio, pode-se considerar que para o casulo, os seus teores de umidade inicial e em qualquer outro instante, são muito elevados em comparação com o seu teor de umidade de equilíbrio, em quase todo o processo de secagem e portanto, pode-se admitir que:  $M \approx U/U_0$  com boa exatidão. Assim, a equação proposta por NEWMAN (1931) toma a forma:

$$\frac{U}{U_0} = A_1 e^{(-a_1 D t)} \quad (61)$$

ou ainda:

$$U = A e^{(-kt)} \quad (62)$$

Supondo que o teor de umidade inicial do produto tenha uma distribuição uniforme no início do processo de secagem, e que o parâmetro  $k$  seja independente do teor de umidade, pode-se afirmar que a equação 62 é uma forma modificada do Modelo de NEWMAN, para descrever a cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda, com as considerações já citadas.

A partir da forma da curva de secagem e dos dados obtidos experimentalmente, com o objetivo de propor equações empíricas para descrever a cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo, fez-se regressão não linear, com a equação proposta, obtendo-se assim os resultados para os parâmetros da mesma.

A partir de uma análise do comportamento do parâmetro " $k$ ", frente à temperatura, vazão do ar e espessura do leito, durante o processo de secagem, verificou-se uma tendência linear deste parâmetro com relação às variáveis citadas, o que levou a sugerir uma equação a três variáveis, deste parâmetro, a fim de descrever o processo de secagem do produto nas mais diversas condições operacionais preestabelecidas.

A equação proposta tem a forma:

$$k = C_1 + C_2 Q + C_3 T + C_4 E \quad (63)$$

Com um programa em linguagem FORTRAN, que utiliza o algoritmo de LEVENBERGER-MARQUARDT, fez-se regressão desta equação a fim de obter os valores das constantes da mesma.

A fim de que os resultados obtidos neste trabalho pudessem ter um maior significado, procurou-se simular o processo de secagem de casulos em um secador de operação contínua, de fluxos cruzados.

Com base na literatura consultada, experimentos realizados, condições ambientais da cidade de Campina Grande-PB e teor de umidade final do produto, após ser sub-

metido à secagem, apresentou-se o projeto de um secador de operação contínua, de fluxos cruzados que opera em certas condições de secagem, e que possibilitou a determinação do parâmetro  $k$  apropriado a estas novas condições, utilizando-se a EQ.63.

Uma vez conhecidos os resultados do parâmetro mencionado e admitindo que a secagem em fluxos cruzados à baixa velocidade se comporta como secagem em leito fixo, ajustou-se a EQ.62, permitindo a simulação da cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda. A partir daí, compararam-se os resultados preditos com os experimentais (que foram obtidos em secadores industriais em plena atividade), viabilizando, desta forma, as condições de secagem preestabelecidas.

Na metodologia do projeto do novo modelo de secador, seguiu-se o processo adotado convencionalmente por BACK (1983) onde procurou-se explorar os problemas gerados pelas necessidades, ora existentes, fornecer uma gama de soluções plausíveis para os mesmos, e estabelecer dentro de parâmetros, limitações e critérios adotados, a melhor concepção para o projeto.

Dentro dos parâmetros, limitações e critérios adotados, pode-se citar:

- tolerâncias dimensionais;
- nível de perturbação das forças externas e internas no sistema;
- comportamento do produto com o tempo;
- fatores econômicos e humanos;
- fadiga;
- ação do calor e corrosão;
- ergonomia do projeto;
- segurança e normalização.

Também fez-se comparação entre o secador proposto e os já existentes no mercado, a fim de viabilizá-lo técnica e economicamente.

# CAPÍTULO 5

---

---

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Porosidade

Para a determinação da porosidade de casulos do bicho-da-seda, foram feitos 7 experimentos, com teor de umidade admitido de 68% (b.u.). Os resultados estão listados em forma de tabela no Apêndice A. A porosidade média de 0,147 e a densidade real do produto igual a  $158,64 \text{ kg/m}^3$ , foram obtidas a partir das EQ.53 e 47, respectivamente.

A densidade aparente do produto, que é de  $135,32 \text{ kg/m}^3$ , foi obtida dividindo-se a massa média das amostras dos casulos, utilizadas no cilindro 2, e que se encontra na tabela A1, do apêndice A, pelo volume do referido cilindro que é de 1890ml.

Observa-se após analisar os dados da tabela A1 que a massa média dos casulos é de 1,52 g, resultado este em concordância com o apresentado por FONSECA e FONSECA (1988), citado no item 3.1.2..

### 5.2. Secagem em leito fixo

A TAB.12, a seguir, mostra os dados utilizados na realização de sete experimentos para a secagem de casulos do bicho-da-seda *Bombix mori* L., em leito fixo.

Para o bloco que compõem os experimentos 01, 02 e 03, foram variadas as espessuras das camadas dos leitos, fixando-se os demais parâmetros; para o bloco que compõem os experimentos 03, 04 e 05, foram variadas as temperaturas do ar de secagem, fixando-se os demais parâmetros; para o bloco que compõem os experimentos 05, 06 e 07, foram variadas as vazões do ar de secagem, fixando-se os demais parâmetros.

No Apêndice B constam os resultados obtidos e as condições dos experimentos.

TABELA 12

Experimentos realizados em função da espessura da camada do leito fixo, da temperatura e da vazão do ar para a secagem de casulos do bicho-da-seda *Bombix mori* L.

Experimento	Fluxo de Ar (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )	Espes. do leito (cm)	Temp. do Ar (° C)	U. R. (%)	Massa Inicial da Amostra (g)
01	8345,3	5,5	90	3,7	155,06
02	8345,3	4,0	90	3,9	97,75
03	8345,3	2,0	90	4,3	52,35
04	8345,3	2,0	70	6,5	53,21
05	8345,3	2,0	83	4,1	57,23
06	4768,7	2,0	83	4,0	55,33
07	1986,9	2,0	83	4,9	57,13

A interpretação dos resultados foi realizada através da análise das curvas de secagem de U vs t, representadas nos GRAF.04 à 13.

Nas representações gráficas dos experimentos, da secagem, observa-se que o teor de umidade dos casulos decresce com o tempo de secagem, apresentando um período com velocidade constante ( taxa de secagem ) e outro de velocidade decrescente, comportamento este coincidente com as afirmativas de SHIRUO (1986).

Verifica-se que nas diferentes condições operacionais dos experimentos, apesar do teor de umidade do produto ser elevado, existiu um curto período com velocidade de secagem constante, em torno de 40min, decrescendo a partir daí, para todo o restante do experimento. Pode-se supor que este fato está associado a quantidade de água presente na casca ( 30% da sua massa), já que a crisálida contém a maior quantidade de água do mesmo, como também da localização da mesma, no interior do casulo.

Utilizando-se dos dados de FONSECA e FONSECA (1988), contidos na TAB. 4 e da massa média do casulo de 1,52 g, obtida experimentalmente, conclui-se que a massa da casca do casulo é de 0,22 g, em média, e a quantidade de água presente na mesma é de 0,07 g. Obtém-se, assim, uma massa de 0,26 g para a crisálida seca e uma massa de água contida na mesma, quando úmida, de 0,97 g. Este último resultado representa 93,8% da água contida no casulo verde do bicho-da-seda *Bombix mori* L..

### 5.2.1. - Influência da espessura do leito

Para efeito de análise da influência da espessura da camada de casulos, no comportamento da cinética de secagem, foram realizados três experimentos fixando-se a temperatura e a vazão (fluxo) de ar, variando-se a espessura da camada em 2,0, 4,0 e 5,5cm.

Os resultados dos experimentos 01, 02 e 03 estão plotados no GRÁFICO 04, e analisando os referidos resultado observa-se que a espessura da camada de casulos praticamente não influencia a velocidade de secagem, pois as curvas estão quase que sobrepostas, para um período de aproximadamente 1,3h de secagem.

Percebe-se também que, para tempos longos ( tempos superiores a 1,3 h) há uma ligeira tendência de camadas mais espessas apresentarem uma velocidade de secagem menos acentuada. Conclui-se, pois, que a velocidade de secagem diminui com o aumento da altura do leito, para tempos longos.

Baseado na literatura, pode-se afirmar que, para camadas mais espessas, o teor de umidade dos casulos apresenta variações ao longo da camada, sofrendo uma secagem mais acentuada nas camadas mais próximas da entrada de ar quente, pelo fato de, nesta posição, o ar possuir uma umidade absoluta mínima, elevando-se a partir daí, à medida que o mesmo atravessa a massa de casulos e que provoca uma redução na taxa de evaporação da água dos mesmos, gerando um gradiente do teor de umidade. Este fenômeno foi constatado por PEREIRA (1985) ao realizar experimentos de secagem de café, em leito fixo.

Durante todo o experimento, a curva de secagem para uma espessura de 4,0cm apresentou um teor de umidade menor do que a curva com espessura de 2,0cm.

Este fenômeno pode ter ocorrido por influência da umidade inicial da amostra, bem como pelo decréscimo da umidade relativa do ar, no experimento 02.

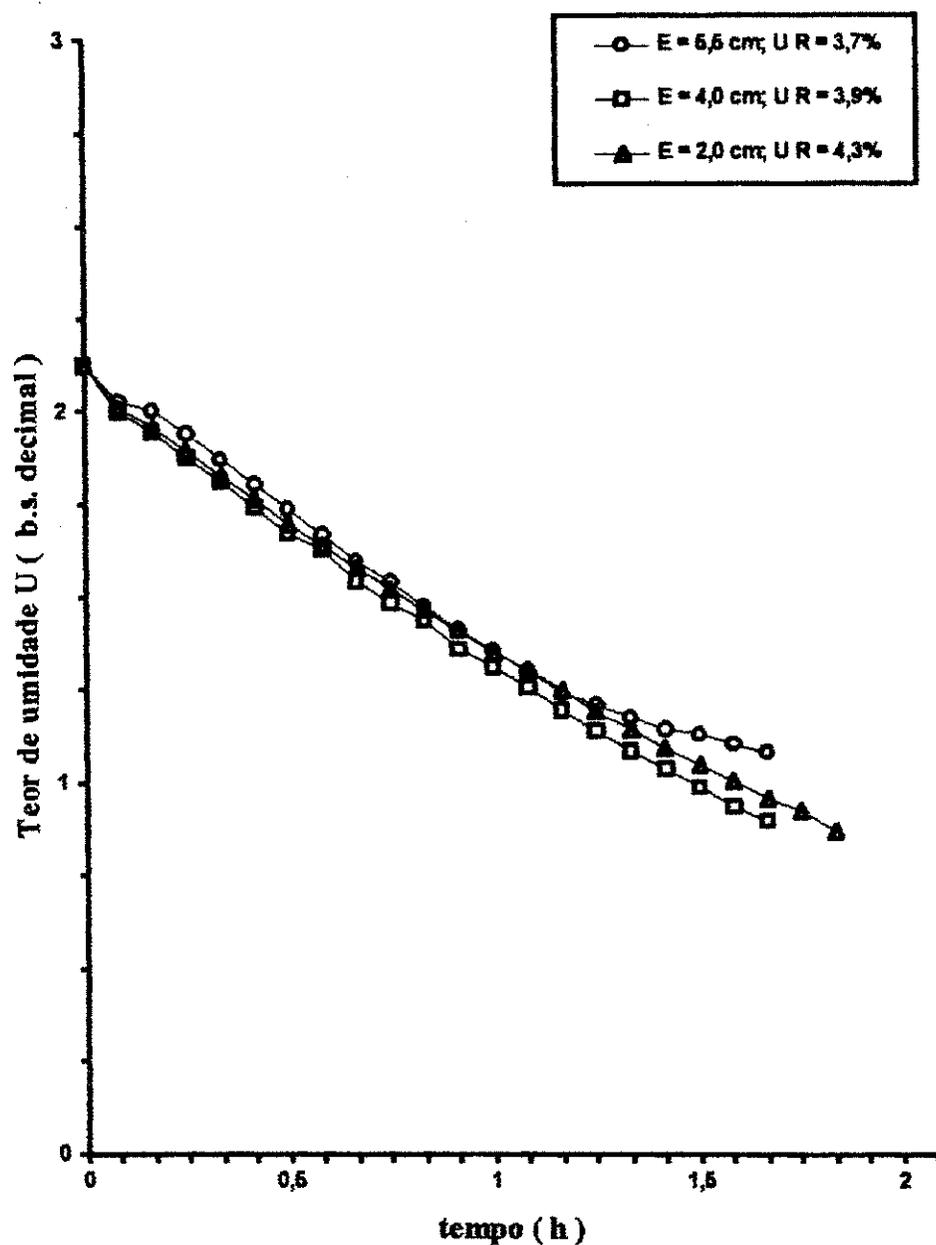


GRÁFICO 04 - Efeito da espessura do leito durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para a temperatura de 90°C e fluxo de ar de 8345,3m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.

### 5.2.2. - Influência da temperatura do ar de secagem

O efeito da temperatura na cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda foi observado fixando-se a vazão de ar e a espessura do leito, variando-se a temperatura. Para isto utilizou-se as temperaturas de 90, 83 e 70°C, no fluxo e espessura do leito, de 8345,3m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> e 2,0cm, respectivamente.

O GRÁFICO 05 representa os resultados dos experimentos 03, 04 e 05, onde constata-se que a temperatura apresenta uma forte influência na cinética de secagem, principalmente para tempos longos, onde a diferença do teor de umidade em todo tempo de secagem é nítida. Este resultado entra em concordância, com os apresentados por LASSERAN (1978), o qual afirma que a taxa de secagem aumenta com a elevação da temperatura.

Verifica-se, assim, que quanto maior a temperatura maior a taxa de evaporação da água, conseqüentemente menor o tempo de secagem para se atingir um certo teor de umidade preestabelecido. Sendo assim, a duração da secagem diminui quando a temperatura do ar quente aumenta; entretanto, não ocorre a mesma proporcionalidade na inversão destes parâmetros.

Tomando-se por base a secagem realizada a 70 °C, um aumento de 70 para 90°C, ou seja de 28,6%, a temperatura do ar de secagem conduz a uma diminuição na duração da secagem de aproximadamente 164,9% até se atingir o teor de umidade de 12% (b. s.), quando o fluxo de ar é de 8345,3m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> e a espessura do leito de 2,0cm.

Os tempos de finais de secagem, para os experimentos 03 e 04, foram obtidos, utilizando-se os valores dos parâmetros da EQ.62, contidos na TAB.13, fornecida adiante, e do teor de umidade final desejado, o que possibilitou a determinação da percentagem da diminuição na duração da secagem.

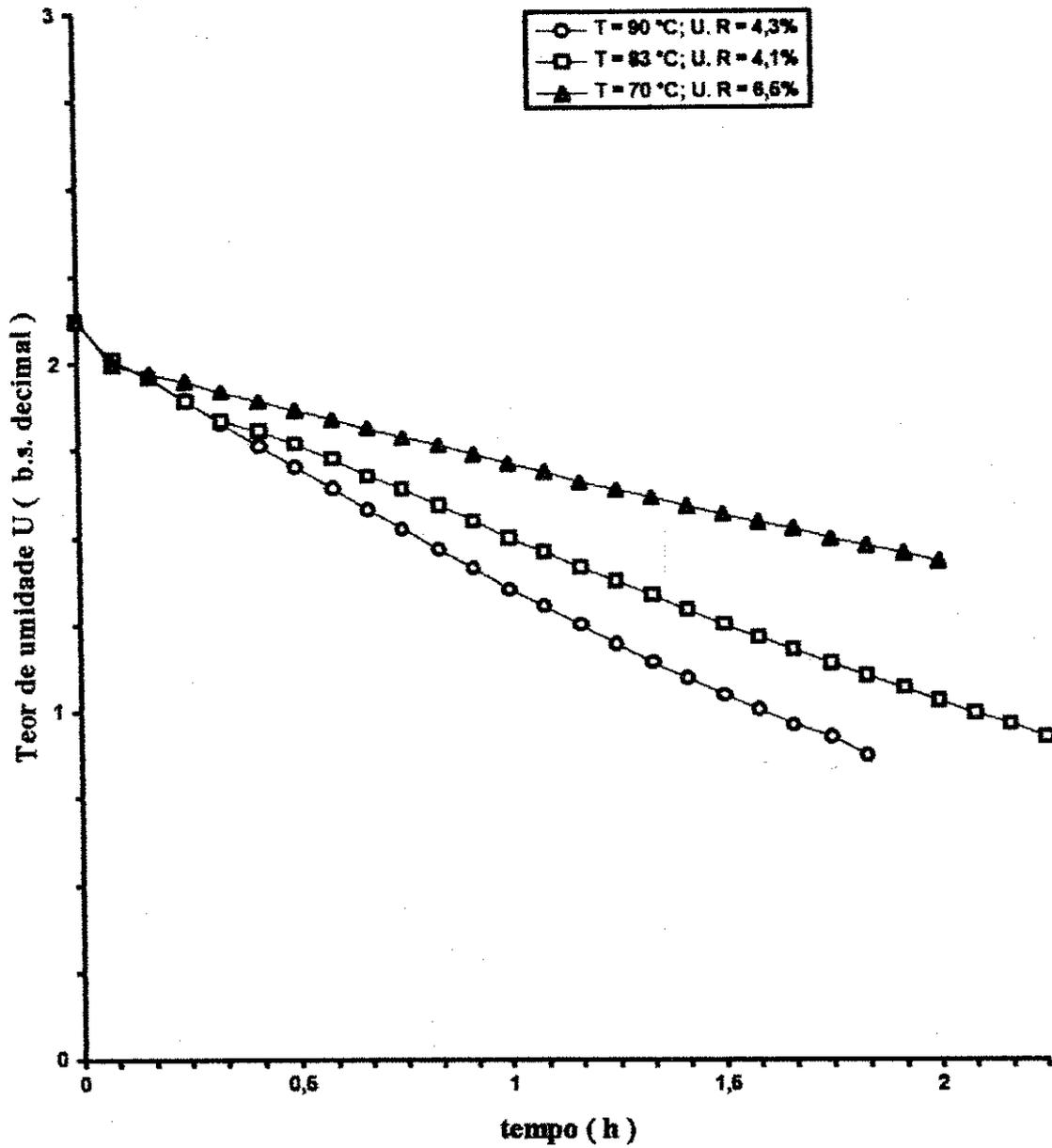


GRÁFICO 05.- Efeito da temperatura do ar durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para fluxo de ar de  $8345,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  e espessura do leito de 2,0cm.

No entanto, verificou-se durante os experimentos com fluxo de  $8345,3\text{m}^3/\text{h.m}^2$  e temperatura de  $90^\circ\text{C}$ , que a casca do casulo foi afetada, caracterizado pela cor amarelada na superfície da mesma, provocada pela volatilização excessiva da sericina. Este resultado concorda com as conclusões apresentadas por TSUKADA (1978). Vale salientar que, adotando-se temperaturas superiores a  $130^\circ\text{C}$ , a qualidade do fio de seda é comprometida, limitando, assim, esta variável no valor acima citado.

### 5.2.3. - Influência da vazão de ar de secagem

Com o objetivo de verificar a influência da vazão de ar, durante o processo de secagem de casulos, fixaram-se a temperatura e a altura do leito durante o processo variando-se a vazão do ar, observando-se assim, o efeito desta variável no experimento.

A altura escolhida para a espessura do leito foi a de  $2,0\text{cm}$ , por esta oferecer condições de trabalho mais eficiente, conforme verificado através dos experimentos 01, 02 e 03.

O GRÁFICO 06 representa o resultado dos experimentos 05, 06 e 07, nos quais pode-se observar uma elevada taxa de secagem, em quaisquer das três vazões utilizadas, com uma significativa taxa de evaporação da água do produto.

No início da secagem há sempre um período irregular. Durante este período, a distribuição de temperatura e umidade da amostra deve-se adaptar às condições de secagem, produzindo, desta forma, pequenas distorções nos resultados obtidos. É o período em regime não permanente, durante o qual a temperatura do produto atinge o seu valor de regime permanente.

Para o tempo superior a trinta minutos, os pontos representativos para o teor de umidade praticamente se sobrepõem, caracterizando que a cinética de secagem independente da vazão do ar de secagem, dentro da faixa operacional dos experimentos realizados.

Quando a taxa de evaporação da água é modificada em função da vazão do ar de secagem, indica que a resistência externa ao transporte de massa é predominante e, portanto, existe um período à taxa constante. Isto se dá em virtude das condições de seca-

gem permanecerem constantes neste intervalo de tempo. Como nas condições dos experimentos em pauta a transferência de massa independe da vazão do ar, conclui-se que a resistência externa é desprezível; portanto, o controle da difusão mássica é difusional interno, indicando a existência de um período à taxa decrescente.

Constata-se que a duração da secagem não é inversamente proporcional ao fluxo de ar, portanto, quando o fluxo de ar foi quadruplicado, o tempo de secagem praticamente permaneceu constante. Sendo diretamente proporcional ao fluxo de ar, o consumo de energia resulta em que a secagem é de melhor rendimento em regime de velocidade reduzida. Isto é, utiliza-se menor quantidade de energia para obter o mesmo resultado que se conseguiria com uma alta vazão de ar de secagem, para camadas de casulos de 2,0 cm de espessura.

Vale salientar que, o fluxo que melhor apresentou resultados, quanto à qualidade do fio de seda (verificado visualmente), não influenciando as propriedades físico-químicas da casca, foi a de  $1986,9 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ , na temperatura máxima de  $83^\circ\text{C}$ , e que corresponde a uma velocidade superficial uniforme do ar através da massa de casulos de aproximadamente  $0,5 \text{ m/s}$ .

#### 5.2.4.- Modelagem matemática

De acordo com a forma da curva obtida experimentalmente e com o objetivo de propor equações empíricas, para descrever a cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda, fez-se regressão não linear, a partir dos resultados experimentais, com uma equação a dois parâmetros, dada pela EQ. 59.

Os resultados dos dados experimentais obtidos a partir da EQ.57, assim como, os resultados obtidos do ajuste com os parâmetros  $k$  e  $A$  da EQ.59, estão plotados nos gráficos 07 à 13.

Na TAB. 13, encontram-se os valores dos parâmetros obtidos mediante ajuste dos dados à curva hipotética correspondente.

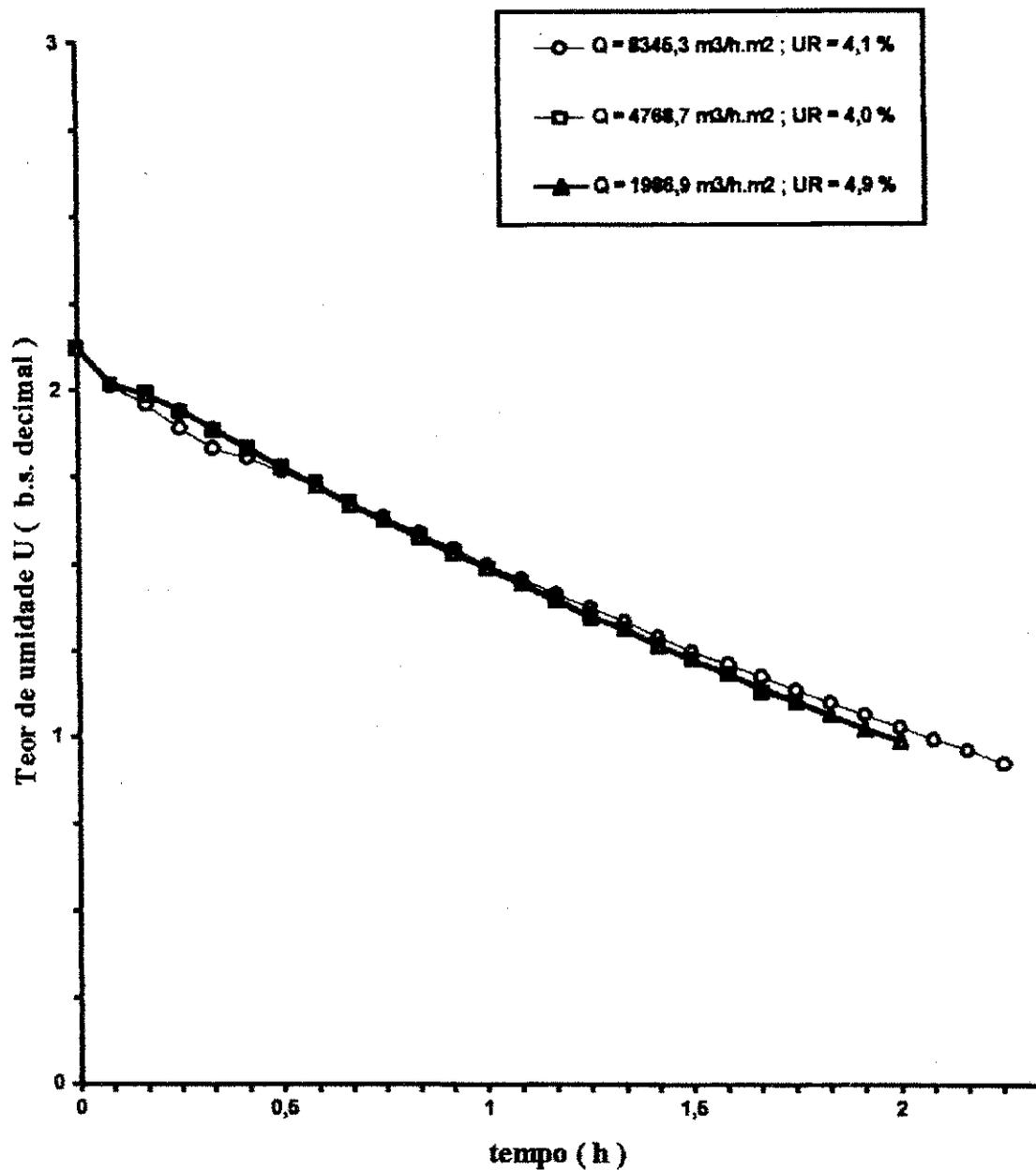


GRÁFICO 06.- Efeito da vazão de ar durante a secagem de casulos do bicho-da-seda para a temperatura de 83°C e espessura do leito de 2,0cm.

A partir da análise dos dados da TAB. 13 e dos gráficos apresentados, verifica-se que estes resultados são satisfatórios, uma vez que o ajuste fornece um coeficiente de determinação mínimo de 0,99, caracterizando que os pontos gerados pela equação obtida, praticamente coincidem com os pontos gerados pelos dados experimentais.

Exceto para o início da secagem, a equação proposta fornece valores do teor de umidade praticamente iguais aos obtidos experimentalmente.

Uma possível explicação para o início da secagem é a existência do período de pré-aquecimento do produto, até atingir sua temperatura de regime permanente, o que a equação não considera. Uma melhora em termos de predição das curvas de secagem poderia ter sido obtida se o parâmetro  $k$  fosse considerado dependente do teor de umidade.

**TABELA 13**

**Valores dos parâmetros após ajuste dos dados experimentais**

Experimento	Condições			A	k	$\bar{R}^2$
	$m^3/h.m^2$	$^{\circ}C$	cm			
01	8345,3	90	5,5	2,13041	0,00728042	0,992260
02	8345,3	90	4,0	2,14782	0,00857250	0,996928
03	8345,3	90	2,0	2,14768	0,00800481	0,997735
04	8345,3	70	2,0	2,04649	0,00303746	0,993865
05	8345,3	83	2,0	2,11181	0,00598556	0,997034
06	4768,7	83	2,0	2,13369	0,00620714	0,997260
07	1986,9	83	2,0	2,14265	0,00633304	0,997697

Para verificar o comportamento de cada parâmetro com a temperatura, vazão de ar e espessura do leito, distribuíram-se os valores da TAB. 13 em duas tabelas (TAB. 14 e 15), onde analisou-se rapidamente o comportamento individual dos parâmetros A e k, frente as condições dos experimentos.

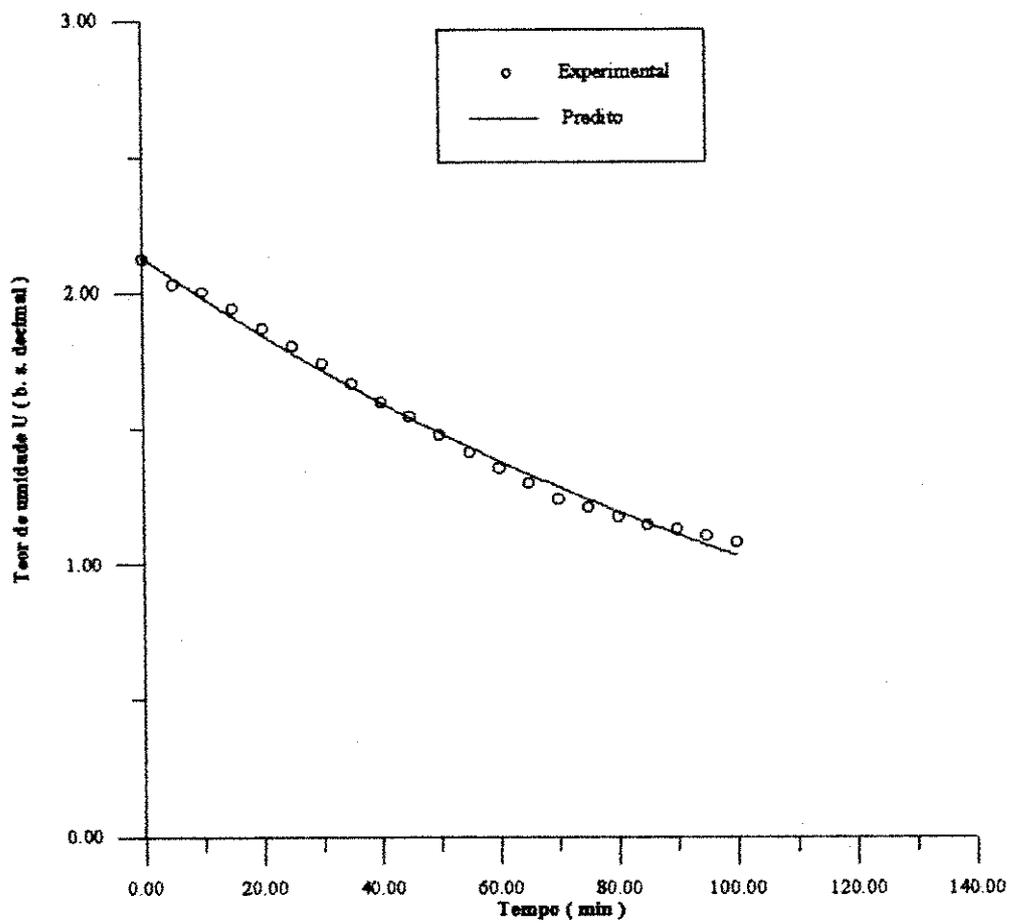


GRÁFICO 07 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=90 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Q=8345,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=5,5 \text{ cm} \quad UR=3,7 \%$$

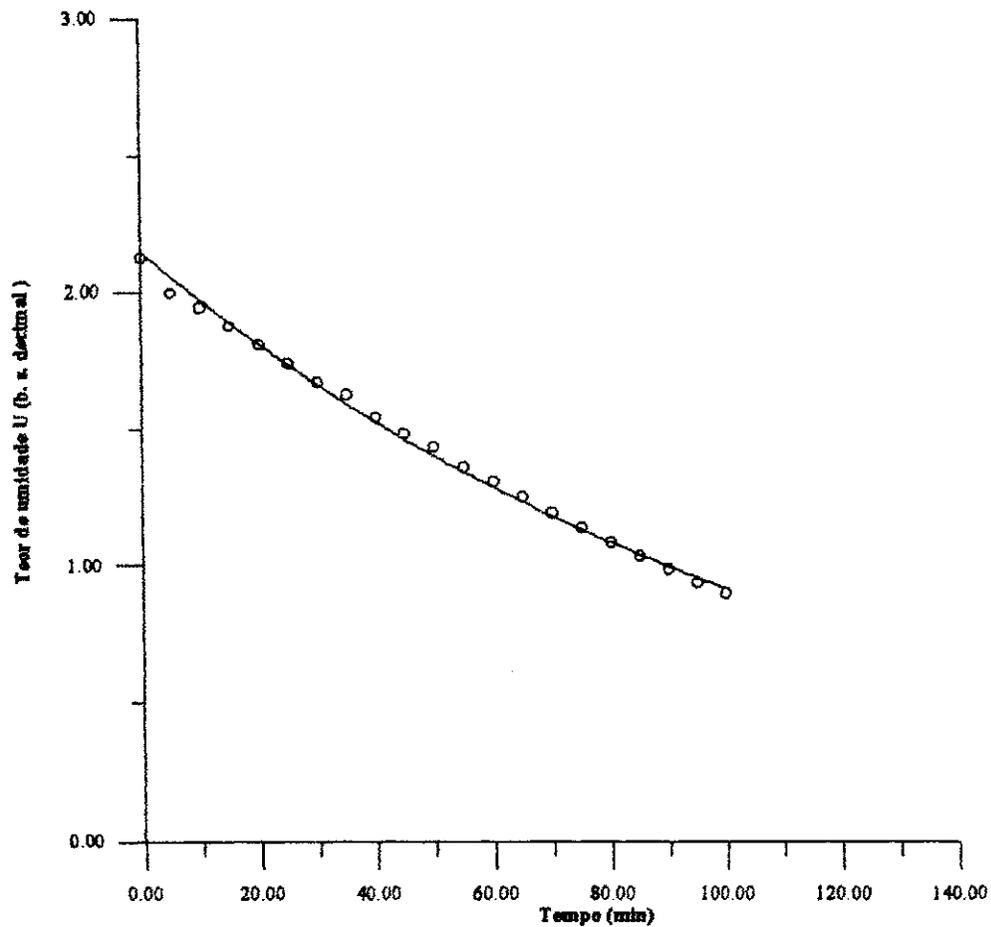


GRÁFICO 08 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=90 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Q=8345,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=4,0 \text{ cm} \quad UR=3,9 \%$$

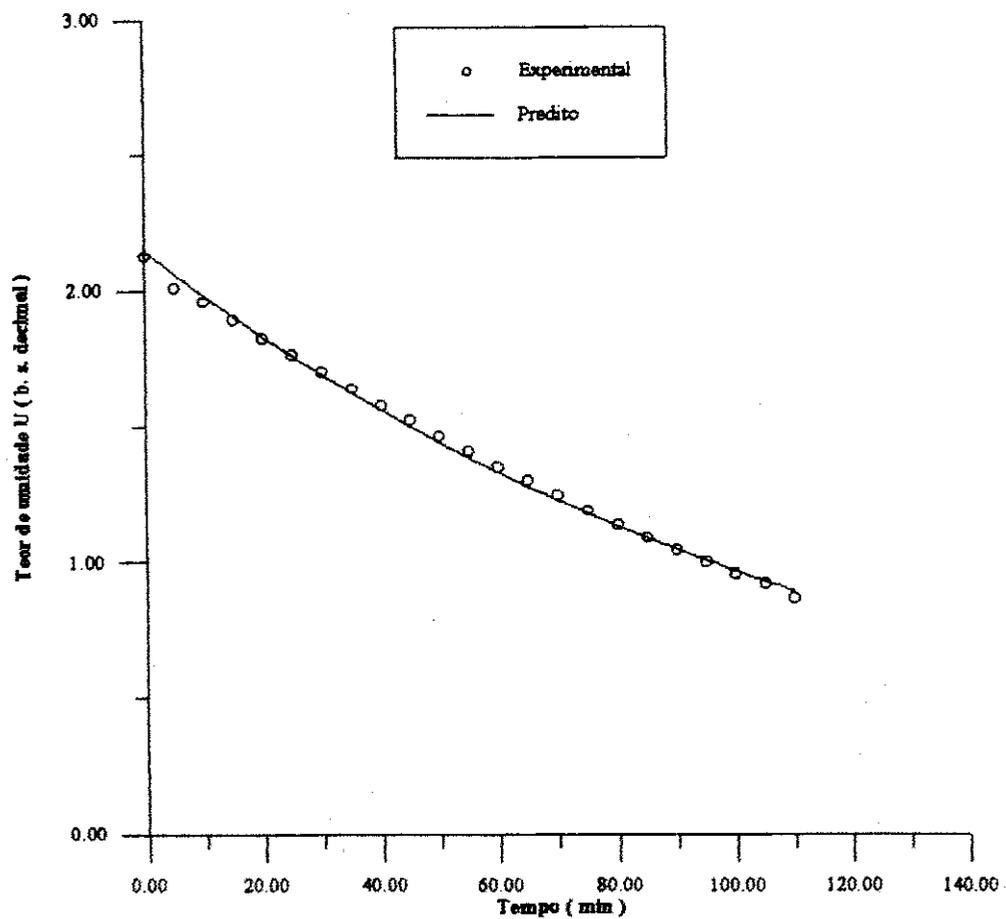


GRÁFICO 09 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=90 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Q=8345,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=2,0 \text{ cm} \quad UR=4,3 \%$$

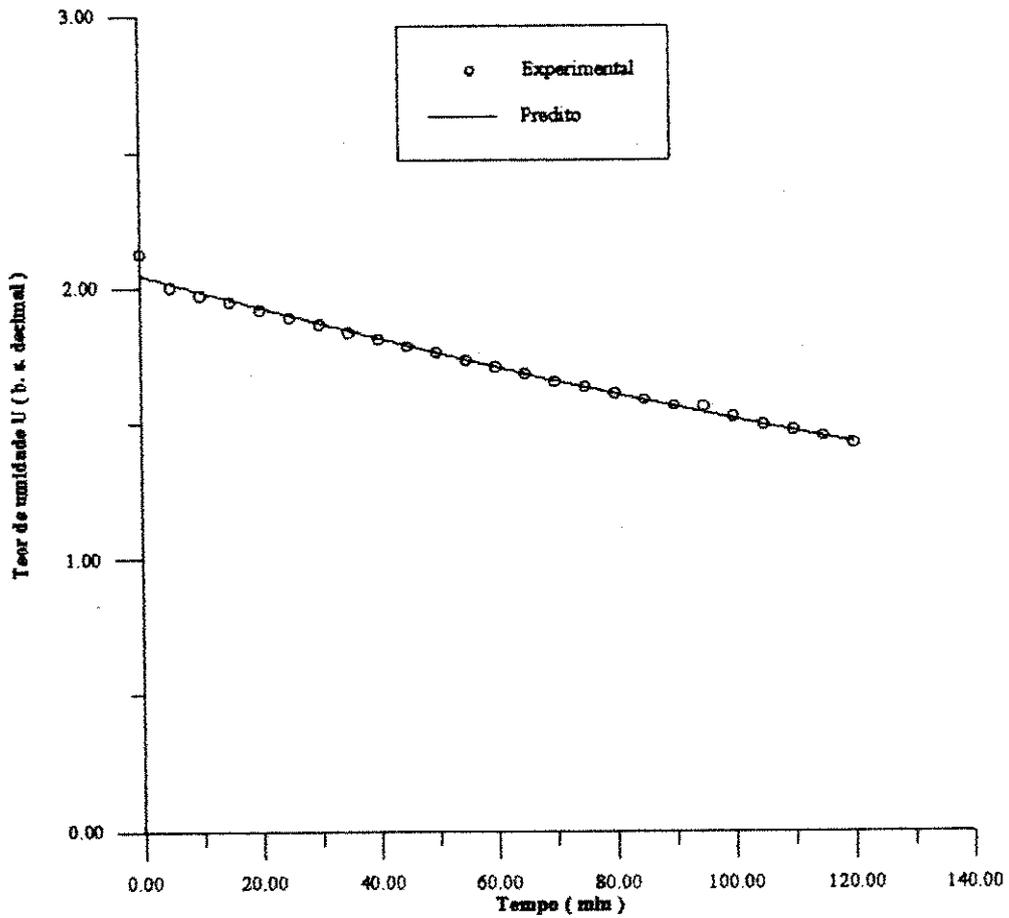


GRÁFICO 10 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=70\text{ }^{\circ}\text{C} \quad Q=8345,3\text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=2,0\text{ cm} \quad UR=6,5\%$$

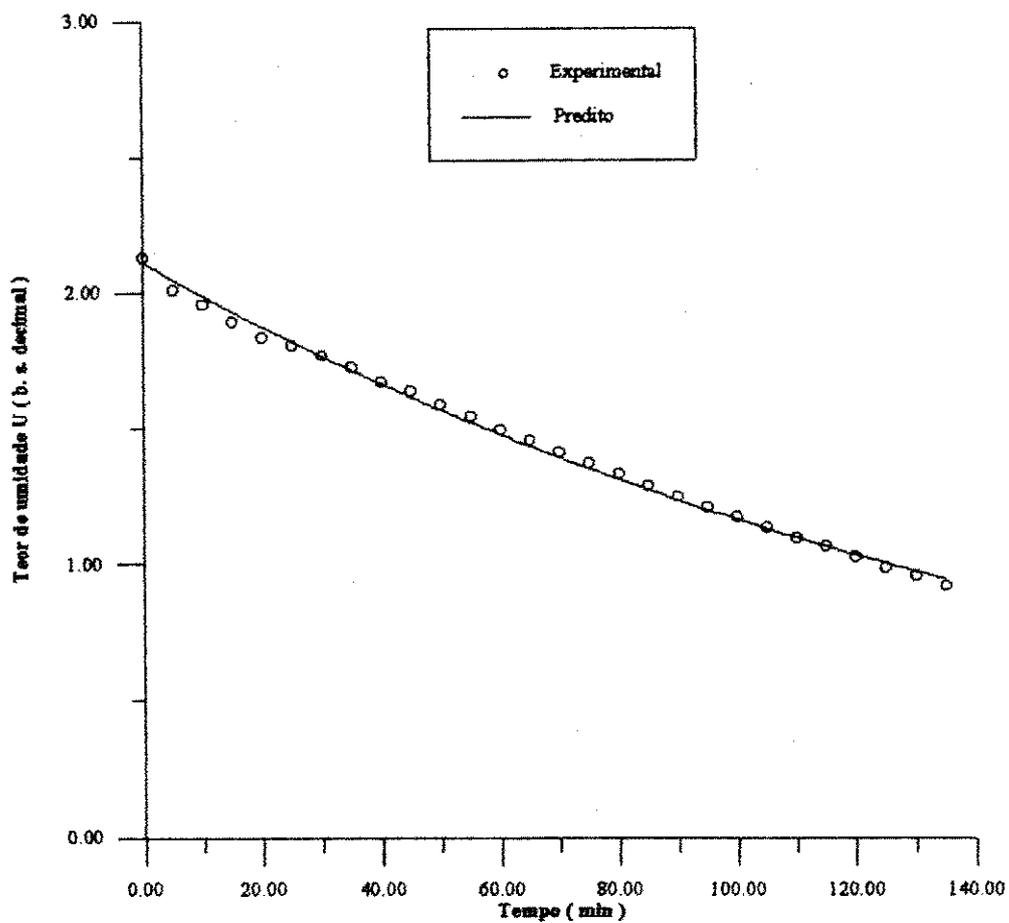


GRÁFICO 11 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Q=8345,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=2,0 \text{ cm} \quad UR=4,1 \%$$

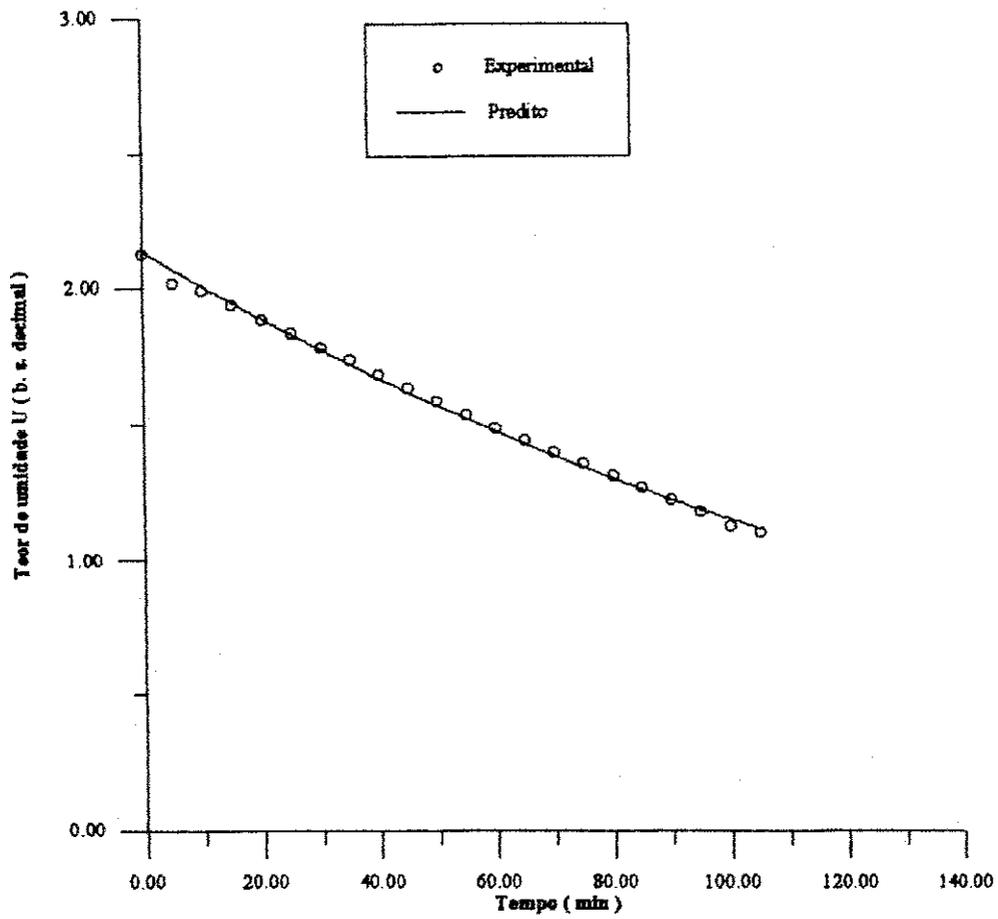


GRÁFICO 12 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=83\text{ }^{\circ}\text{C} \quad Q=4768,7\text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=2,0\text{ cm} \quad UR=4,0\%$$

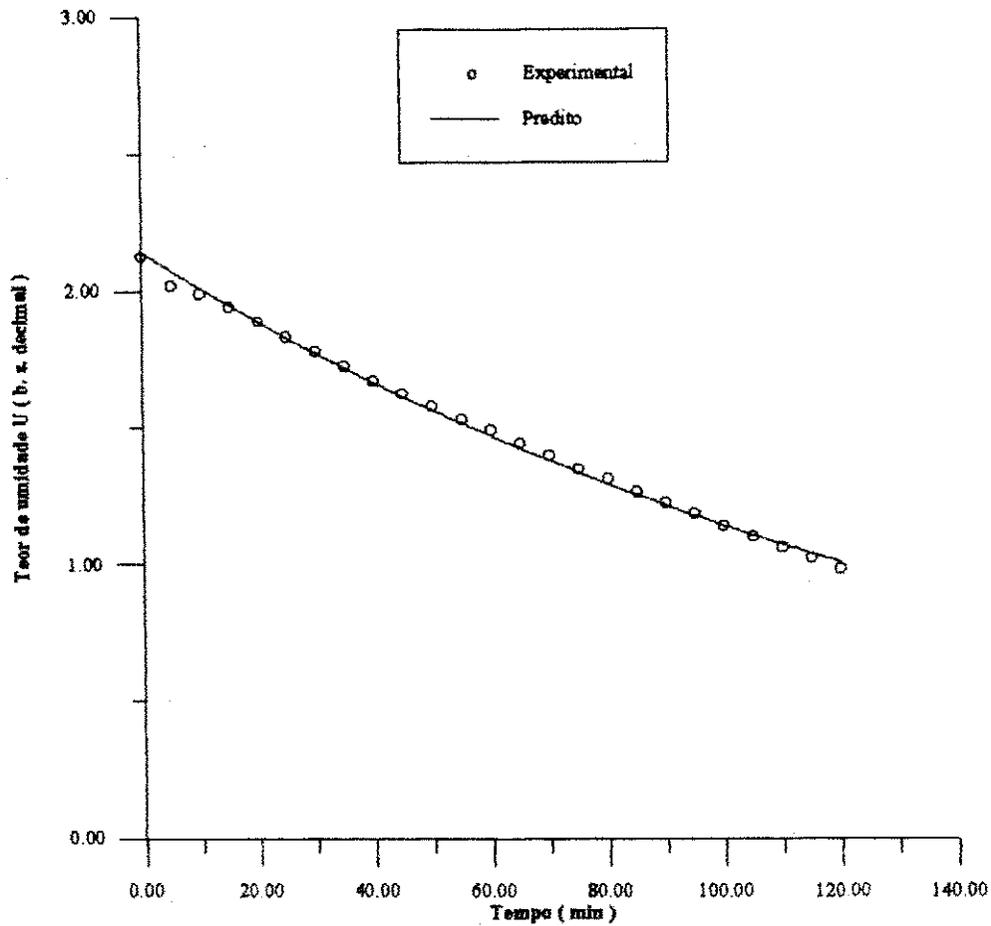


GRÁFICO 13 - Valores experimentais e preditos do teor de umidade, para a secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo.

$$T=83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Q=1986,9 \text{ m}^3/\text{h.m}^2 \quad E=2,0 \text{ cm} \quad UR=4,9 \%$$

**TABELA 14****Comportamento do parâmetro A**

Condições experimentais				
Fluxo ( $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Espessura do Leito (cm)		
		2,0	4,0	5,5
8345,3	90	2,14768	2,14782	2,13041
	83	2,11181	---	---
	70	2,04649	---	---
4768,7	90	---	---	---
	83	2,13369	---	---
	70	---	---	---
1986,9	90	---	---	---
	83	2,14265	---	---
	70	---	---	---

**TABELA 15****Comportamento do parâmetro k**

Condições experimentais				
Fluxo ( $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Espessura do Leito (cm)		
		2,0	4,0	5,5
8345,3	90	0,00800481	0,00857250	0,00728042
	83	0,00598556	---	---
	70	0,00303746	---	---
4768,7	90	---	---	---
	83	0,00620714	---	---
	70	---	---	---
1986,9	90	---	---	---
	83	0,00633304	---	---
	70	---	---	---

Uma análise dos resultados apresentados nas TAB. 14 e 15, mostram que os parâmetros A e k apresentam pequena variação, para as diversas espessuras do leito, fixando-se a temperaturas e a vazão (fluxo) de ar levando a crer que para pequenas espessuras eles são da mesma ordem de grandeza, na média, para as diversas condições de experimento.

Com respeito a esses parâmetros referenciados anteriormente, fixada a espessura do leito, observa-se que os mesmos decrescem com a diminuição da temperatura (vazão constante) e crescem com o decréscimo da vazão (fixado a temperatura). Este último comportamento é contrário às previsões já comentadas neste trabalho, e é devido apenas ao ajuste não-linear, das curvas de secagem. Portanto, optou-se pelos valores de "k", obtidos conforme a seqüência acima citada, para se obter novos valores deste parâmetro, de tal modo que se possa prever o comportamento do teor de umidade do produto com o tempo de secagem em outras situações.

Utilizou-se para isto, a equação empírica (EQ.63), que descreve o comportamento do parâmetro "k" frente a certas condições preestabelecidas.

Feita a regressão linear da EQ. 63, a partir dos dados da TAB.15, com exceção do valor de "k" para as condições de secagem de  $8345,3\text{m}^3/\text{h.m}^2$ ,  $4,0\text{cm}$  e  $90^\circ\text{C}$ , pelas razões já estabelecidas no item 5.2.1 deste trabalho, utilizando o algoritmo de LEVENBERG-MARQUARDT, obtendo-se os seguintes resultados para o ajuste:

$$C_1 = -0,13674101 \cdot 10^{-1} \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

$$C_2 = -0,23600697 \cdot 10^{-7} \left( \frac{\text{min}^{-1}}{\text{m}^3 \cdot \text{h.m}^2} \right)$$

$$C_3 = 0,24547899 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{min}^{-1}}{^\circ\text{C}} \right)$$

$$C_4 = -0,17120603 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{min}^{-1}}{\text{cm}} \right)$$

Utilizando os valores destas constantes na EQ.63, foram obtidos valores do parâmetro k, com um erro médio de 1,28027% e um desvio padrão de 0,00010, dentro das seguintes condições de trabalho:

$$1986,9 \leq Q \leq 8345,3\text{m}^3/\text{h.m}^2$$

$$70 \leq T \leq 90^\circ\text{C}$$

$$2,0 \leq E \leq 5,5\text{cm}$$

As tabelas 16 e 17, mostram uma comparação entre os valores do parâmetro "k", obtidos a partir da EQ. 62, com os obtidos com o ajuste da equação linear utilizando-se os dados experimentais e com uma extrapolação deste parâmetro para outras condições de secagem. Para a extrapolação foi utilizado um programa em linguagem FORTRAN, que se encontra no Apêndice D.

**TABELA 16**

**Comparação do parâmetro k obtido com o ajuste da equação 62 utilizando-se os dados experimentais, com o proposto pela equação 63**

Condições de Secagem			k (min <sup>-1</sup> )		Erro (%)
Q (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )	E (cm)	T (° C)	Ajuste da equação 62	Proposto pela equação 63	
1986,9	2,0	83	0,0063304	0,006311354	-0,30
4768,7	2,0	83	0,00620714	0,006245701	+0,62
8345,3	2,0	70	0,00303746	0,002970064	-2,22
		83	0,00598556	0,006161291	+2,94
		90	0,00800481	0,007879644	+1,56
	4,0	90	0,00857250	0,007537230	-12,08
	5,5	90	0,00728042	0,007280423	0,00

Uma análise dos dados de predição de "k", na TAB.16 mostra que o maior erro obtido foi de 12,08%, justamente nas condições detectadas quando da análise do Gráfico 11, ratificando, assim, que, se o teor de umidade inicial da amostra fosse de 68% (b. u.), o valor do parâmetro "k" seria o encontrado pela EQ. 63.

TABELA 17

Extrapolação do parâmetro k, para diversas condições de operação obtida a partir da equação 63

CONDIÇÕES DE SECAGEM							
Fluxo (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )	Espessura (cm)	Temperatura (° C)					
		60	70	83	90	105	110
1080,0	2,0	0,000686741	0,003141530	0,006332757	0,008051110	0,011733295	0,012960690
	4,0	0,000344329	0,002799118	0,005990345	0,007708698	0,011390883	0,012618278
	5,5	0,000087519	0,002542309	0,005733536	0,007451889	0,011134074	0,012361469
1986,9	2,0	0,000665337	0,003120127	0,006311354	0,008029707	0,011711892	0,012939287
	4,0	0,000322925	0,002777715	0,005968942	0,007687295	0,011369480	0,012596875
	5,5	0,000066116	0,002520906	0,005712133	0,007430486	0,011112671	0,012340066
4768,7	2,0	0,000599685	0,003054475	0,006245701	0,007964054	0,011646239	0,012873634
	4,0	0,000257273	0,002712063	0,005903289	0,007621642	0,011303827	0,012531222
	5,5	0,000000464	0,002455253	0,005646480	0,007364833	0,011047018	0,012274413
8345,3	2,0	0,000515274	0,002970064	0,006161291	0,007879644	0,011561829	0,012789224
	4,0	0,000172862	0,002627652	0,005818879	0,007537232	0,011219417	0,012446812
	5,5	0,000083947	0,002370843	0,005562070	0,007280423	0,010962608	0,012190003

Avaliando-se os resultados de "k", da TAB.17, constata-se que a EQ. 63 não apresenta resultados satisfatórios para a temperatura de 60 °C e espessura de 5,5cm, e que, para a temperatura de 110°C, o fluxo de ar e a espessura do leito praticamente não influenciam o valor deste parâmetro. Isto caracteriza que, para espessuras da camada de casulos de até 5,5cm, a quantidade de água evaporada num certo intervalo de tempo, numa mesma área de escoamento de ar, é praticamente a mesma, admitindo a inexistência de gradiente do teor de umidade na massa de casulos.

Observe-se que o efeito da umidade relativa do ar, sobre o parâmetro k, não foi verificado, pelo fato de as umidades relativa estarem com valores, entre si, muito próximos, para todos os experimentos.

### 5.3. Secagem em fluxos cruzados

Com o intuito de dar continuidade às pesquisas de secagem de casulos do bicho-da-seda, foram realizados três experimentos com amostras diferentes num secador de operação contínua e fluxos cruzados, existente na COCAMAR, situada em Maringá-PR. Os resultados dos ensaios realizados na COCAMAR são fornecidos na Tabela 18.

**TABELA 18**

**Evolução da massa da amostra, teor de umidade e das temperaturas da casca, da câmara e do ambiente externo, em função do tempo de secagem (secador de fluxos cruzados -COCAMAR-PR)**

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Teor de Umidade (b.s. decimal)	Temperatura (° C)		
			Câmara	Casca	Amb.
0	132,7	2,125	-----	28,2	28,2
47	103,0	1,426	125	48	27,0
94	80,1	0,886	112	53	28,6
141	65,5	0,543	104	60	29,7
188	58,5	0,378	100	56	28,8
235	52,9	0,246	98	42	28,8
282	51,0	0,201	92	37	27,7
329	50,8	0,196	64	32	27,6
376	50,6	0,191	62	31	26,4

O secador operou com uma produção nominal de casulos verdes de 4,8ton/dia (1dia = 24horas), para uma velocidade da esteira de 40cm/min, em condições ambientais de 28,3 ° C e Umidade Relativa do ar de 71%.

Também foi realizado um experimento num secador industrial, localizado na EMPARN, em Canguaretama-RN. Os resultados do experimento estão contidos na Tabela 19.

TABELA 19

**Evolução do teor de umidade de casulos do bicho-da-seda, das temperaturas da câmara e do ambiente externo, em função do tempo de secagem (secador de fluxos cruzados -EMPARN-RN)**

Câmara de Secagem	Tempo (h)	Massa da amostra (g)	Teor de Umidade (b.s.decimal)	Temperatura (° C)		
				Control.	Termopar	Ambiente
1	0	500,0	2,125	105	105	30 a 35
	1	385,5	1,410	a		
	2	298,5	0,866	112		
2	3	251,5	0,572	90	95	
	4	226,1	0,412	102		
3	5	215,0	0,344	70	≈ 60	
	6	214,2	0,339	77		

Os dados da TAB. 19, apesar de referirem-se ao único experimento realizado, servem como parâmetros comparativos para o processo de secagem, uma vez que correspondem às condições operacionais reais do secador. Este secador tem uma produção nominal de 1300 kg/24h de operação contínua, para uma espessura de casulos de 6cm.

#### 5.4.Comparação entre os secadores de fluxos cruzados e leito fixo

Com base na literatura consultada e experimentos realizados, pode-se constatar que a secagem em leito fixo apresenta uma série de desvantagens, quais sejam:

- baixa produção, requerendo secadores volumosos;
- gradientes de umidade consideráveis para camadas espessas, necessitando o revolvimento do produto, o que acarreta em atrito excessivo sobre os mesmos e podendo até mesmo deformá-los. Mesmo assim não se consegue uma uniformidade do teor de umidade do produto ao término da secagem;
- para temperaturas baixas, tem-se alto tempo de secagem, a fim de obter-se o teor de umidade final desejado, implicando em aumento do custo de produção;

- para temperaturas altas, tem-se o tempo de secagem reduzido, porém, provoca a volatilização excessiva da sericina ocasionando dificuldades na fiação.

Sendo assim, pode-se concluir que secadores de leito fixo não são os mais viáveis para a secagem de casulos do bicho-da-seda.

No secador de operação contínua de fluxos cruzados que foi utilizado nos experimentos em Maringá-PR, foi verificado uma série de falhas de projeto, as quais estão listadas a seguir:

- alta velocidade da esteira, acarretando o rompimento da mesma com frequência e atrito excessivo entre esta e os casulos, devido a sua alta amplitude de oscilação;
- difícil acesso ao interior do secador, para eventuais limpeza e/ou manutenção, uma vez que a estrutura externa é rebitada, devendo a mesma ser rompida;
- descontrole total da mistura de ar no interior do secador, caracterizado pelas variações de temperatura no seu interior para uma mesma câmara de secagem e ao longo desta. As câmaras de secagem não são separadas, o que possibilita a influência do ar de secagem de uma câmara sobre as outras.

Considerando-se as informações citadas neste item e o elevado preço dos secadores de casulos, importados da China e Japão;

Considerando-se a necessidade de se desenvolver no Brasil, secadores que operem em regime contínuo, mesmo com produtos que apresentem elevados teores de umidade;

Considerando-se a necessidade de viabilizar a atividade sericícola, reduzindo os problemas relativos à secagem de casulos verdes, e possibilitar o início de desenvolvimento de atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de secagem de casulos do bicho-da-seda, projetou-se um secador protótipo.

## **5.5. - Secador de casulos**

### **5.5.1. - Considerações gerais do secador proposto**

A adoção do novo secador foi decidida tendo como base diversos aspectos, tais como:

- secagem do produto com rigoroso controle de temperatura e umidade;
- economia de energia;
- economia de espaço físico;
- facilidade de operação e manutenção;
- custo de investimento;

O equipamento de secagem de casulos verdes será de construção tal que, de acordo com o uso de circulação de ar quente, seque os casulos num processo contínuo uma vez que estes deslocam-se da parte superior do secador para a inferior, através de 6 (seis) esteiras transportadoras, localizadas horizontalmente duas a duas e paralelas entre si, em 3 (três) câmaras de aquecimento distintas e sobrepostas. O ar se desloca perpendicularmente à direção das esteiras, em cada câmara de secagem, atravessando a massa de casulos de cima para baixo. Detalhes de projeto do secador são fornecidos no Apêndice E.

A última esteira, ou seja, a sexta, é responsável pelo efluxo de casulos do secador. Uma vez fora do mesmo, os casulos são resfriados à temperatura ambiente.

As câmaras devem estar separadas entre si por chapas metálicas de zinco, dividindo o interior do equipamento horizontalmente, segundo a capacidade de secagem. Cada câmara deve ser equipada com ventilador, aquecedor de ar, duto de entrada de ar quente e duto de circulação, situados na parte externa do secador.

Propõe-se, baseado nas literaturas, experimentos realizados, sob condições ambientais externas em Campina Grande-PB e teor de umidade final do produto, que as temperaturas do ar nas câmaras de secagem 1, 2 e 3 sejam de 105, 90 e 60° C, respectivamente, e que a velocidade linear das esteiras seja de 8cm/min, o que proporciona uma

## **5.5. - Secador de casulos**

### **5.5.1. - Considerações gerais do secador proposto**

A adoção do novo secador foi decidida tendo como base diversos aspectos, tais como:

- secagem do produto com rigoroso controle de temperatura e umidade;
- economia de energia;
- economia de espaço físico;
- facilidade de operação e manutenção;
- custo de investimento;

O equipamento de secagem de casulos verdes será de construção tal que, de acordo com o uso de circulação de ar quente, seque os casulos num processo contínuo uma vez que estes deslocam-se da parte superior do secador para a inferior, através de 6 (seis) esteiras transportadoras, localizadas horizontalmente duas a duas e paralelas entre si, em 3 (três) câmaras de aquecimento distintas e sobrepostas. O ar se desloca perpendicularmente à direção das esteiras, em cada câmara de secagem, atravessando a massa de casulos de cima para baixo. Detalhes de projeto do secador são fornecidos no Apêndice E.

A última esteira, ou seja, a sexta, é responsável pelo efluxo de casulos do secador. Uma vez fora do mesmo, os casulos são resfriados à temperatura ambiente.

As câmaras devem estar separadas entre si por chapas metálicas de zinco, dividindo o interior do equipamento horizontalmente, segundo a capacidade de secagem. Cada câmara deve ser equipada com ventilador, aquecedor de ar, duto de entrada de ar quente e duto de circulação, situados na parte externa do secador.

Propõe-se, baseado nas literaturas, experimentos realizados, sob condições ambientais externas em Campina Grande-PB e teor de umidade final do produto, que as temperaturas do ar nas câmaras de secagem 1, 2 e 3 sejam de 105, 90 e 60° C, respectivamente, e que a velocidade linear das esteiras seja de 8cm/min, o que proporciona uma

condição satisfatória da secagem (conforme pode-se perceber pela análise da Tabela 24 e do Gráfico 14, fornecidos adiante).

Uma vez que determinou-se no item 5.2.3 a velocidade ótima do ar de secagem, através da massa de casulos como sendo de 0,50 m/s, para a temperatura de 83 °C, propõe-se também uma velocidade do ar através da massa de casulos de 0,30m/s para uma área de escoamento de  $4,7 \times 1,0\text{m}^2$ , velocidade esta aconselhável para o nível de temperatura da 1ª câmara de secagem, que é bem superior a 83 °C, dando como resultado um fluxo total de ar de  $1080,0\text{m}^3/\text{h.m}^2$ . A vazão de ar é dada pelo produto da velocidade do ar através da área de massa de casulos com a área de escoamento, (CREDER-1990). Adotou-se também este mesmo resultado para as demais câmaras de secagem.

Em virtude de ser inviável velocidades excessivas nos dutos de insuflamento e retorno de ar, velocidades estas, limitadas a certos valores para que o nível de ruído não seja prejudicial ao ser humano, optou-se por selecionar uma área de escoamento mínima de  $40 \times 20\text{cm}^2$  nas entrada e saída do ar no secador e uma área de  $40 \times 40\text{cm}^2$  para os dutos principais, das três câmaras de secagem.

Com estes dados e sabendo que o comprimento da esteira é de 4,7m, o tempo de residência do casulo em cada uma destas câmaras é de aproximadamente 1 hora. O tempo médio total de residência dos casulos no secador é de 377min ou 6,3horas.

Para uma condição máxima de 6cm de espessura de casulos, tem-se, baseados nos resultados apresentados, uma produção nominal de 1096 kg/24h de operação contínua, fazendo com que instantaneamente, em regime permanente uma massa de casulos verdes de aproximadamente 35,5 kg esteja sobreposta em cada esteira.

A produção nominal (fluxo mássico) foi obtida multiplicando-se a densidade do produto pela velocidade do material, que é igual à da esteira, pela área da secção transversal de escoamento de  $100 \times 6\text{cm}^2$ , (FOX e McDONALD-1985).

### **5.5.2 - Dimensionamento do secador**

O dimensionamento do secador foi dividido em três fases:

### 5.5.2.1. - Estrutura metálica

Será constituída de perfis em T e L, de aço inoxidável ANSI 304, unidos por parafusos sextavados, tratados termicamente. O dimensionamento das colunas com perfis em L e T, foi feito baseando-se na hiperestaticidade das colunas, aplicando-se a equação dos três momentos, (NASH - 1982), a cada uma das colunas, para o cálculo do momento fletor máximo, seguido da aplicação da teoria da tensão de cisalhamento máxima, para determinação da tensão do projeto. Os efeitos físicos causados de uma coluna sobre as seguintes foram levadas em consideração, uma vez que os esforços solicitantes são elevados. Os desenhos da estrutura metálica encontram-se no Apêndice E.

Para o dimensionamento, das vigas horizontais de perfil em L, foram considerados diversos parâmetros de projeto, tais como: tipo de carregamento, excentricidade da carga e temperatura de trabalho, o que possibilitou o surgimento de tensões normais (de compressão e tração) e de cisalhamento ( devido a torção e ao esforço cortante ).

Os esforços combinados das tensões deram como resultado a tensão de trabalho, que com um coeficiente de segurança adequado obteve-se a tensão do projeto, a qual possibilitou a seleção das vigas.

Maiores informações sobre a abordagem físico-matemática referida acima podem ser obtidos nos livros "Resistência dos Materiais" - 1982 de Ferdinand P. Beer e E. Russell Johnston, Jr., e "Estruturas de Aço"- 1976 de Walter Pfeil.

A esteira transportadora que deverá ser composta de tambores de acionamento e retorno, esteira de tela com correntes nas bordas laterais e roletes de carga e retorno, foi dimensionada levando-se em consideração os seguintes parâmetros de projeto: produção, tipo de produto e suas características (tamanho, capacidade de escoamento, abrasividade), propriedades físicas do produto, fadiga e temperatura (ação do calor e corrosão), baseando-se no livro "Manual de Transportadores contínuo"- Fábrica de Aço Paulista Ltda. Os desenhos referente a esteira transportadora são fornecidos no Apêndice E.

Um maior detalhamento do dimensionamento da esteira transportadora é fornecido abaixo:

- **Capacidade do transportador**

A capacidade de um transportador é função da área de sua secção transversal, da velocidade da correia e do peso específico do material.

Para o dimensionamento da capacidade do transportador levou-se em consideração os seguintes parâmetros de projeto:

- inclinação do transportador
- distância padrão à borda lateral da correia
- largura da correia
- velocidade do transportador
- características do material (tamanho, capacidade de escoamento, ângulo de acomodação do material na esteira, abrasividade, higroscopicidade e densidade).

- **Seleção dos roletes**

Com o objetivo de selecionar os roletes de carga e retorno, levou-se em consideração o regime de trabalho, peso do material, tamanho máximo do casulo, tipo de instalação e condições ambientais internas ao secador.

O espaçamento entre roletes foi definido em função da largura da correia, do peso específico do material, flexa da correia e peso da esteira

Os rolamentos dos roletes trabalham com 11,65% da sua capacidade dinâmica máxima e com 14,23% de sua força radial máxima, para uma vida útil de 50000 horas e serviço contínuo de 24 horas/dia.

- **Tração efetiva na esteira**

Para a determinação das trações na esteira considerou-se os seguintes parâmetros:

- peso do material;

- peso da esteira;
- flexa mínima (1%) na esteira entre os roletes, que é função do espaçamento entre os mesmos;
- abraçamento da correia no tambor de acionamento;
- comprimento do transportador;
- altura de elevação do material;
- resistência a rotação dos roletes e ao deslizamento da esteira e do material sobre os roletes;
- atrito dos acessórios;
- aceleração do material;
- localização de acionamento do transportador.

A partir do cálculo da tração, determinou-se a potência efetiva para o transporte do material.

#### • **Conjunto de acionamento**

Determinada a potência efetiva, selecionou-se o motor e o conjunto de acionamento a ser utilizado, considerando que o tipo de transmissão será com:

- correntes e rodas dentadas sem caixa de óleo;
- queda de voltagem.
- redutores de velocidades (redução de 1:3600).

O conjunto de acionamento foi projetado de acordo com o tipo de serviço e a potência transmitida.

#### • **Dimensionamento dos tambores de acionamento e retorno**

Para o dimensionamento dos tambores determinou-se o diâmetro mínimo do mesmo, que é função do tipo de esteira utilizada e da tensão principal atuante.

O comprimento do tambor foi dado em função da largura da esteira e a distância entre mancais foi calculada em função da folga mínima livre entre a extremidade da esteira e a estrutura, do tipo de mancal utilizado e da folga entre este e o tambor.

A distância entre discos laterais foi obtida a partir do comprimento do tambor e da largura do cubo.

O diâmetro do eixo, foi determinado a partir do conhecimento de que, eixos motrizes transmitem torque e os movidos, servem apenas de apoio. Para este dimensionamento, utilizou-se os seguintes critérios:

- flexão cíclica;
- flexa;
- torção constante.

Os esforços que aparecem nos eixos de tambores são os devidos a força radial resultante, devida as tensões nas esteiras, o peso próprio e a força originada pelo momento torçor, em tambores motrizes.

De posse destes dados, determinou-se os momentos fletor e torçor máximos, selecionou-se o material adequado às condições de trabalho e determinou-se o diâmetro do eixo.

Para o cálculo da espessura dos discos laterais, assumiu-se que os esforços atuantes são de flexão, compressão e cisalhamento, sendo este último para os tambores motrizes. Já no caso do corpo do tambor, a espessura foi obtida em função da tensão máxima na esteira, no local do tambor, da tensão permitida na borda do corpo, levando-se em conta um fator de segurança de 1,5; do ângulo de abraçamento e por último do diâmetro do tambor.

A fim de minimizar o momento fletor transmitido aos discos laterais e aumentar a rigidez do eixo, optou-se por dimensionar um tubo interno ao tambor, que liga os dois cubos.

Para a seleção dos rolamentos do tambor, calculou-se as reações nos mancais e, com a rotação do eixo e o regime de trabalho, obteve-se a capacidade dinâmica que, juntamente com o diâmetro do eixo, possibilitou a determinação do tipo de rolamento e a caixa para o mesmo.

Percebeu-se que o peso próprio do tambor, adicionado ao do eixo e tubo, tendem a comprimir a base do mancal, enquanto que a tensão na correia tende a cisalhar o parafuso de fixação do mancal à estrutura do secador. Assim sendo, tem-se sobre o parafuso de fixação, esforços combinados de tração e cisalhamento. Aplicando a teoria da tensão normal máxima e selecionando o tipo de material, determinou-se as dimensões do parafuso.

As dimensões da chaveta foram determinadas baseando-se na tensão normal de esmagamento e da tensão de cisalhamento atuando no elemento considerado.

Vale salientar que o efeito da alta temperatura, é bastante sentido pelas peças metálicas. Se um elemento de estrutura ou de máquina sofrer variações de temperatura, ele se dilatará ou se contrairá e, se tiver a deformação restringida, aparecerá uma tensão, denominada tensão térmica.

A intensidade da tensão térmica é proporcional à magnitude de deformação que o corpo deveria sofrer e que não ocorreu em virtude de ter sido impedido de se expandir, (FAIRES - 1966). Aumentos de temperatura, também provocam perdas da resistência e da elasticidade do material.

Baseando-se nestas informações procurou-se minimizar os efeitos da propriedade física: temperatura, selecionando-se materiais adequados, resistentes à temperatura e corrosão, bem como possibilitar um pequeno deslocamento lateral das vigas através de um aumento no diâmetro do furo, onde são ajustados os parafusos, para união entre as peças.

### 5.5.2.2. - Isolamento térmico

O revestimento térmico do secador e dos dutos de insuflamento, retorno e exaustão de ar deverá ser constituído de painéis leves, rígidos e incombustíveis de lã de vidro, aglomerados com resinas sintéticas especiais, e resistentes à temperaturas de 200 à 250°C.

Conforme dados fornecidos pela ISOLENGE-Comercial de Isolantes Térmicos Ltda.-São Paulo-SP, a densidade deste material é de 30 kg/m<sup>3</sup>.

A seguir, mostra-se uma tabela contendo mais informações acerca do material isolante, como também do secador.

**TABELA 20**

**Características do isolamento térmico e dados do secador proposto**

ESPECIFICAÇÃO	CÂMARAS		
	01	02	03
Espessura (mm)	25	25	25
Perda de calor pela isolação (kJ/m <sup>2</sup> h)	540,7	575,4	206,7
Temp. externa da superfície isolada (° C)	33,2	29,3	24,8
Conduktiv. térmica do isolante (kJ/mh°C)	0,1523	0,1410	0,1339
Área de troca de calor nos tubos de ar quente (m <sup>2</sup> )	15,5	15,5	15,5
Área de troca de calor na câmara (m <sup>2</sup> )	23,13	14,96	23,81

\* Considerou-se que o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície externa do isolante é: 41,85 kJ/m<sup>2</sup>h° C, e a temperatura ambiente de 20 ° C.

### 5.5.2.3. - Sistema de insuflamento, retorno e exaustão de ar quente

O sistema é composto de ventilador, dutos de sucção, exaustão e retorno e aquecedores de ar, foi dimensionado, levando-se em consideração os seguintes parâmetros: temperatura de secagem e umidade inicial dos casulos, velocidade do fluxo de ar quente sobre a camada de casulos, tempo de permanência dos casulos no secador, umidade e temperatura do ar na saída do secador.

O método usado para o dimensionamento dos dutos de circulação de ar, foi o método da velocidade. Este método é utilizado para sistemas pequenos, com poucos dutos e no máximo cinco bocas, (CREDER - 1990).

Cada duto de retorno está ligado ao duto de exaustão. Isto permite que, dependendo do teor de umidade do ar na saída do secador, seja reaproveitado parcialmente deste, uma certa quantidade.

A justificativa para tal procedimento está baseada nos esclarecimentos expostos anteriormente por MELONI e QUEIROZ (1991), já comentados neste trabalho no item 5.5.

O aquecedor de ar, será formado por resistências elétricas tubulares em "U", lisa, o qual deverá ser conectado ao duto de insuflamento de ar por intermédio de parafusos, conforme informações fornecidas pela DENNEX- Equipamentos Industriais Ltda. - São Paulo-SP. Os desenhos dos aquecedor de ar são fornecidos no Apêndice E.

O secador de casulos proposto é muito versátil e com as devidas modificações pode ser adaptado para secagem de outros produtos agrícolas.

A Tabela a seguir mostra informações referentes ao aquecedor utilizado.

TABELA 21

Características dos aquecedores de ar

ESPECIFICAÇÃO	CÂMARAS		
	01	02	03
Temp. do ar na saída do aquecedor (° C)	120	95	63
Potência dissipada (kw)	21	15	09
Tensão elétrica (V)	380	380	380
Número de resistências elétricas	21	15	09
Perda de carga do ar ao passar pelo aquecedor (mm H <sub>2</sub> O)*	< 400	< 400	< 400
Temperatura da superfície de blindagem das resistências (° C)	< 500	< 500	< 500
Dimensões do aquecedor de ar (mm <sup>3</sup> )	900x500x400	900x500x400	650x500x350

Fonte: DENNEX- Equipamentos Industriais Ltda. - São Paulo-SP.

\* 1mmCA = 98,09N/m<sup>2</sup>

### 5.5.3. - Comparação entre o secador proposto e o secador de fluxos cruzados utilizados nos experimentos

#### 5.5.3.1. - Cinética de secagem

Pelo fato de que, a secagem em fluxos cruzados, com o produto se deslocando a baixa velocidade se comportar como secagem em leito fixo, (QUEIROZ et alii-1982), procurou-se simular a cinética de secagem dos casulos no secador proposto.

Para isto, com a vazão e as temperaturas do ar de secagem proposta, e uma espessura de 4cm de casulos, estimou-se o valor do parâmetro  $k$ , a partir do uso da EQ.63, para cada câmara de secagem, dando como resultado os valores tabelados abaixo:

**TABELA 22**

**Valores do parâmetro  $k$**

Câmara	T (° C)	Q (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> )	k (min <sup>-1</sup> )
01	105	1080,0	0,011390883
02	90	1080,0	0,007708698
03	60	1080,0	0,000344329

Admitindo-se que o parâmetro  $k$ , não varia com o teor de umidade inicial do produto para cada condição de secagem, desprezando-se o efeito da temperatura sobre o fluxo de ar, e utilizando o valor do teor de umidade inicial (b.s.) do produto adotado neste trabalho, determinou-se a equação de  $U = f_1(t)$  para a primeira câmara de secagem. De posse do teor de umidade do produto na entrada da segunda câmara de secagem ( $t = 2h$ ) obtido a partir da equação anterior e com o valor do parâmetro  $k$ , para as novas condições de secagem, ajustou-se uma nova função,  $U = f_2(t)$ , aplicada à segunda câmara. Conhecido o valor do teor de umidade do produto na entrada da terceira câmara de secagem ( $t = 4h$ ), utilizando a segunda equação determinada, e com o novo valor de  $k$ , determinou-se a função,  $U = f_3(t)$ , válida para a terceira câmara. Os resultados do ajuste estão na tabela abaixo

TABELA 23

Resultado do ajuste da equação 62, aplicada à secagem de casulos, no secador de fluxos cruzados proposto

Câmara	A	Equação	Intervalo de validade
01	2,1250000	$U = 2,1250000 e^{-0,011390883 t}$	$0 \leq t \leq 2h$
02	1,3766172	$U = 1,3660310 e^{-0,007708698 t}$	$2 \leq t \leq 4h$
03	0,2424544	$U = 0,2332745 e^{-0,000344329 t}$	$4 \leq t \leq 6h$

A seguir, apresenta-se um quadro comparativo das cinéticas de secagem de casulos do bicho-da-seda determinadas experimentalmente e proposta. Percebe-se, após análise da Tabela 24 que o secador proposto, nas condições operacionais preestabelecidas, atende as necessidades do produto quando de sua secagem, apresentando um erro no teor de umidade final de -0,66%, quando comparado com o teor de umidade final do produto, nos experimentos realizados em Maringá-PR e um erro de +7,4%, quando comparado com o experimento realizado em Canguaretama-RN. Os resultados obtidos nesta última cidade referem-se apenas a um experimento realizado, portanto passível de não corresponder à realidade do processo de secagem. Verifica-se que o material perde em média 61% de sua massa inicial, pela evaporação da água contida no mesmo, assumindo como uniforme a distribuição do teor de umidade na massa de casulos.

No Gráfico 14 pode-se observar uma comparação entre os dados experimentais e os obtidos a partir das equações que constam na TAB.23.

Observa-se ainda que os teores de umidade estão muito próximos, no final da secagem, constatando-se uma validade bem maior dos métodos utilizados e resultados obtidos, ambos contidos neste trabalho.

Supõe-se que as discrepâncias existentes, nos pontos do gráfico, referente principalmente à primeira fase de secagem ( $0 \leq t \leq 120$  min), seja devido às diferenças de umidade relativa do ar de secagem, nas 3 situações do gráfico, caracterizando, como esperado, que o aumento desta propriedade psicrométrica retarda o processo, validando, assim, o estudo da influência da umidade relativa do ar no processo de secagem.

**TABELA 24**

**Comparação da cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda em secadores de fluxos cruzados, obtida experimentalmente e proposta**

Tempo (min)	SECADOR								
	CANGUARETAMA			MARINGÁ			PROPOSTO		
	$U_{b,s}$ (decimal)	massa perdida (%)	massa perdida acumulada (%)	$U_{b,s}$ (decimal)	massa perdida (%)	massa perdida acumulada (%)	$U_{b,s}$ (decimal)	massa perdida (%)	massa perdida acumulada (%)
0	2,125	0,00	0,00	2,125	0,00	0,00	2,125	0,00	0,00
47	—	—	—	1,426	22,41	22,41	1,244	28,19	28,19
60	1,410	22,90	22,90	—	—	—	1,073	5,48	33,67
94	—	—	—	0,886	17,14	39,55	0,728	11,02	44,69
120	0,866	17,40	40,30	—	—	—	0,542	5,97	50,66
141	—	—	—	0,543	11,02	50,57	0,461	2,59	53,25
180	0,572	9,40	49,70	—	—	—	0,341	3,84	57,03
188	—	—	—	0,378	5,28	55,85	0,321	0,65	57,73
235	—	—	—	0,246	4,22	60,07	0,223	3,12	60,85
240	0,412	5,08	54,78	—	—	—	0,215	0,27	61,12
282	—	—	—	0,201	1,44	61,57	0,2117	0,10	61,22
300	0,344	2,22	57,00	—	—	—	0,210	0,04	61,26
329	—	—	—	0,196	0,15	61,66	0,208	0,07	61,33
360	0,339	0,16	57,16	—	—	—	0,206	0,07	61,40
376	—	—	—	0,191	0,15	61,81	—	—	—

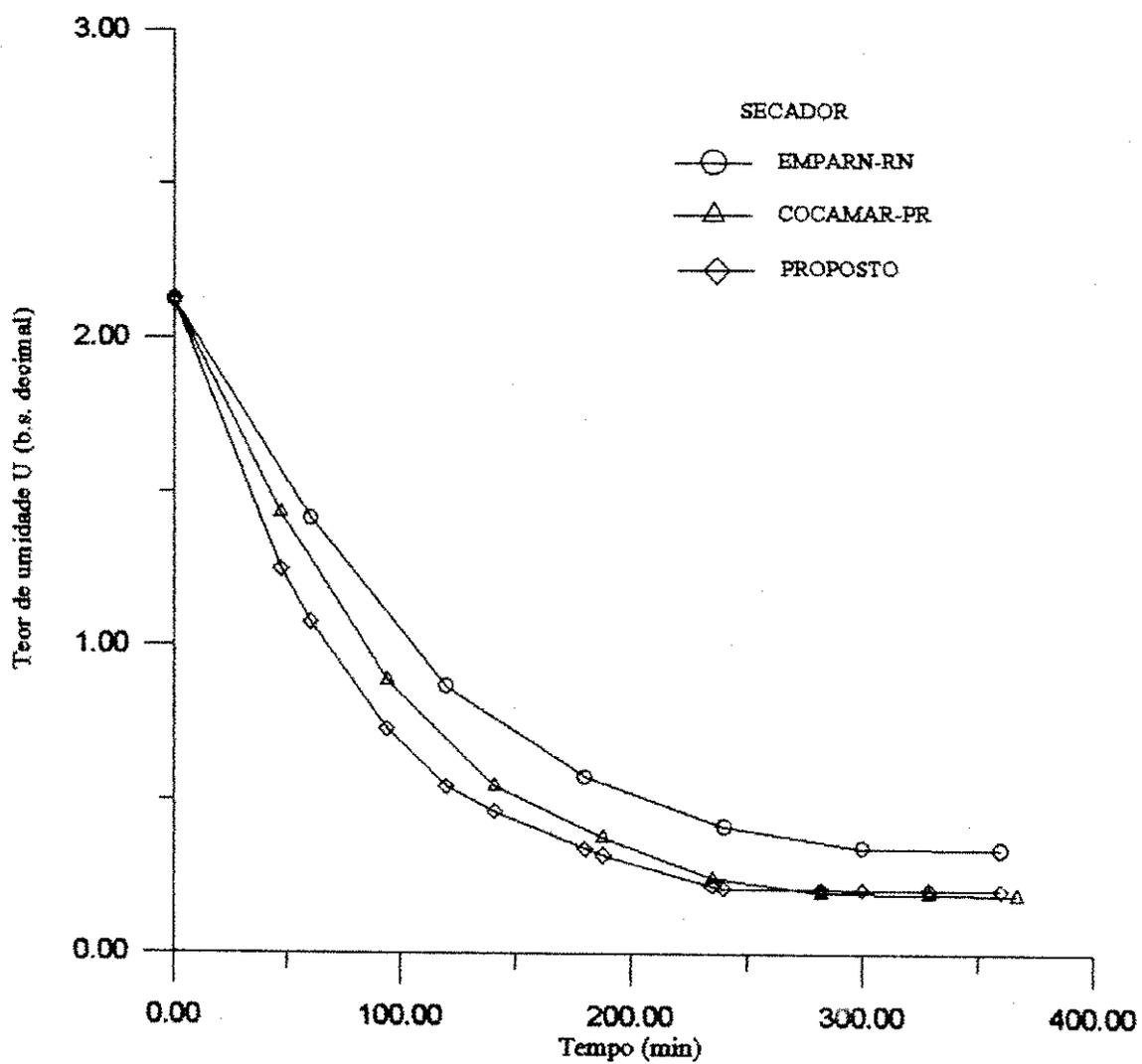


GRÁFICO 14 - Comparação dos teores de umidade de casulos do bicho-da-seda, obtidos experimentalmente e proposto, em secadores de operação contínua e fluxos cruzados

Combinando-se as propriedades psicrométricas temperatura e umidade relativa, tem-se qualidade de casulos diferentes, após serem submetidos à secagem.

#### 5.5.3.2. - Aspectos técnico e econômico

- **Secagem uniforme**

O equipamento terá uma construção tal que sopra ar quente uniformemente, de cima para baixo, para os carregadores de casulos através de dutos localizados em ambas as margens superiores externas de cada câmara de secagem. Após a passagem através das camadas de casulos o ar com uma umidade absoluta mais elevada, uma temperatura mais baixa e situado na parte inferior da câmara de secagem é descarregado através de dutos para fora do secador, sendo parcialmente reaproveitado. Assim o fluxo uniforme de ar quente com teor de umidade adequado para executar o processo de secagem pode ser assegurado. Observa-se que a mistura de fluxo de ar quente das 3 câmaras de aquecimento, praticamente inexistente, uma vez que as mesmas estão separadas por chapas metálicas, possibilitando manter-se as três faixas de temperaturas citadas dentro de variações aceitáveis. Este sistema difere do existente em Maringá-PR, já comentado neste trabalho. Observa-se ainda que devido a secagem ser realizada em camada delgada, reduz-se sensivelmente os gradientes de temperatura e do teor de umidade da camada de casulos, o que proporcionará casulos de qualidade uniforme.

- **Baixa vibração durante o transporte dos casulos.**

O problema operacional na construção da esteira transportadora é frequentemente atribuído as viagens defeituosas da mesma (NIPPON KANSOKI CO., LTD. - 1993). O equipamento será provido com tambores e roletes de carga e retorno definidamente espaçados, onde a esteira é estendida.

Portanto, o peso dos casulos pode ser distribuído entre eles, eliminando assim o excessivo peso na esteira, de modo que as vibrações durante o transporte de casulos, podem ser sensivelmente reduzidas.

A esteira, que deverá ser resistente à temperatura até 300°C, terá sua construção em forma de tela, produzidas com espiras, com passo a direita e a esquerda, intercalada entre si por um eixo ondulado, possuindo nas suas bordas laterais correntes de rolos, o que evita deslizamento lateral, possibilita um transporte seguro dos casulos e fácil passagem de ar quente através dos mesmos.

A tensão na esteira será regulada através de parafusos tensores e sua velocidade teórica será de 8cm/min, como já mencionado. A baixa velocidade e a regulagem de tensão são necessárias para permitir que a esteira torne-se rígida o suficiente e possibilitar a menor vibração possível durante o transporte dos casulos, assegurando que a qualidade das propriedades físicas e químicas, dos mesmos praticamente não irão se alterar em função dos seus deslocamentos dentro do secador, isto é, do seu tempo de residência dentro do secador. A baixa velocidade aumenta sensivelmente a vida útil da esteira, o que consiste numa melhoria no secador, quando comparado com o secador industrial existente em Maringá-PR.

#### • Custo inicial de investimento

Estimou-se que o valor do secador proposto, após consulta ao mercado comercial, do valor de seus componentes, está em torno de US\$ 112.000,00, e quando comparado com um secador de operação contínua de fluxos cruzados, com produção de 4,5ton/24h e velocidade da esteira de 45cm/min cujo preço está avaliado em US\$ 591.921,51, de fabricação da ITOCHU CORPORATION, Osaka-Japão, representa um valor de 81% inferior. Verificou-se também que o secador é aproximadamente 50% abaixo do preço de mercado, quando comparado com um secador em leito fixo, manual, com produção de 1000Kg/24h de operação contínua, avaliado em US\$ 222.879,03, de fabricação da mesma Empresa. Vê-se assim, que o secador proposto é viável economicamente.

#### • Espaço físico

As dimensões padrão do secador proposto é de 11,0 x 3,3 x 3,5m<sup>3</sup>, enquanto que o produzido pela ITOCHU CORPORATION, Osaka-Japão é de 19,5 x 6,0 x 3,2m<sup>3</sup>.

Isto representa uma redução de espaço físico de 77,23% em relação ao seu comprimento e de 81,82% em relação a sua largura, caracterizando uma grande economia quando da construção da instalação predial, para acomodação deste secador.

• **Manutenção e transporte**

A estrutura externa do secador proposto é totalmente aparafusada, facilitando a sua remoção, quando necessário para eventuais limpeza ou manutenção. Para isto basta, retirar as porcas que estão presas aos parafusos pelo lado externo do secador, retirar a(s) chapa(s) de aço galvanizado que recobre(em) o mesmo. Por sua vez retirar o painel rígido de lã de vidro que isola o mesmo, seguido da retirada das chapas de aço galvanizado, que reveste o secador.

A estrutura metálica é também totalmente aparafusada, favorecendo desta maneira o seu transporte, montagem e desmontagem.

O secador existente em Maringá-PR, como também o de Canguaretama-RN, não apresentam esta característica, uma vez que todas as junções da estrutura são soldadas, o que dificulta a sua remoção, quando necessário, e a estrutura externa é totalmente rebitada conforme informou-se anteriormente.

# CAPÍTULO 6

---

---

## CONCLUSÃO

A partir das informações obtidas da literatura consultada, dos secadores existentes, dos experimentos realizados e do secador proposto, pode-se concluir que:

- o teor de umidade dos casulos, durante o processo de secagem, decresce com o aumento do tempo, com uma curva de secagem apresentando de início um pequeno período a taxa constante, com todo o restante da secagem, dando-se a uma velocidade decrescente;
- a secagem de casulos do bicho-da-seda independe da vazão do ar em toda a secagem e depende fracamente da espessura da camada de casulos, para pequenas espessuras e tempos curtos, dentro das condições operacionais deste trabalho;
- a velocidade de secagem de casulos aumenta sensivelmente com o acréscimo de temperatura, caracterizando a forte dependência desta variável com a mesma;
- a secagem realizada em altas temperatura e por tempo prolongado reduzem a fiabilidade e afetam parcialmente a resistência à ruptura dos casulos, alterando suas características físicas e químicas;
- a umidade do ar modifica as propriedades físicas e químicas dos casulos durante a secagem e, conseqüentemente, o processo de secagem deve ser realizado com umidade controlada;
- a velocidade de secagem diminui com o aumento da altura do leito, para tempos longos de secagem;

- a espessura da camada de casulos durante a secagem deve ser fina, para reduzir o gradiente de temperatura ao longo da camada e possibilitar uma secagem uniforme dentro dos padrões aceitáveis, isto é, dentro da variação permitida comercialmente;
- a temperatura altera as dimensões dos casulos viabilizando o estudo da variação volumar da massa granular;
- a equação 63 descreve o comportamento da constante de secagem, como função da temperatura, fluxo de ar e espessura do leito, com ajuste satisfatório, apresentando dentro da faixa operacional utilizada neste trabalho um erro médio de 1,28%, para um teor de umidade inicial do produto de 68% (b. u.);
- a evolução do teor de umidade do produto com o tempo é bem representada pela equação 62, apresentando coeficiente de determinação maior que 0,99 para todos os experimentos realizados;
- os desvios entre os valores do teor de umidade na saída do secador, preditos pelo modelo, e os resultados experimentais obtidos na EMPARN-RN são de 7,4% e de -0,66%, para os obtidos na COCAMAR-PR. Valores estes satisfatórios, devido ao elevado número de variáveis envolvidas;
- O secador de leito fixo não é o mais indicado para a secagem de casulos do bicho-da-seda, o que reforça a utilização dos secadores de fluxo contínuo, em particular o de fluxos cruzados para a secagem do referido produto,
- foi dimensionado um secador em escala industrial, que atende às necessidades de secagem do produto e é técnica e economicamente viável, quando comparado com os secadores utilizados atualmente na indústria;
- é possível secar toda a massa de casulo com teor de umidade inicial de 2,125 (b.s. decimal) até o nível de 0,210(b.s. decimal), necessitando, para isto, uma área de secagem por esteira, de  $4,7 \times 1,0\text{m}^2$  e uma velocidade do ar através da massa de casulos de 0,30m/s, para as três câmaras de secagem;
- o secador projetado apresenta facilidade de operação, baixo custo e reduzidas dimensões.

# CAPÍTULO 7

---

---

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de dar continuidade ao estudo da secagem de casulos do bicho da seda *Bombix mori* L., pode-se sugerir os seguintes trabalhos:

- determinação das propriedades físicas calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica dos casulos e teor de umidade de equilíbrio;
- verificação da influência da umidade relativa do ar no processo de secagem;
- verificação da qualidade dos casulos durante o processo de secagem em função da temperatura, umidade relativa e vazão do ar;
- determinação da porosidade do produto como função do teor de umidade, durante o processo de secagem;
- verificação da influência da vazão do ar, na cinética de secagem, para vazões inferiores às utilizadas nos experimentos;
- simulação do processo de secagem, levando em consideração o decréscimo do teor de umidade do produto e seu efeito sobre a velocidade de secagem, bem como as variações de temperatura do mesmo durante a sua estada no interior do secador;
- análise energética do secador proposto, a fim de propor alternativas energéticas para o mesmo;
- construir o secador proposto, estudá-lo detalhadamente e propor modificações estruturais no mesmo, visando o seu aprimoramento;
- adaptação do secador proposto à secagem de outros produtos agrícolas;
- validação do modelo da Universidade Estadual de Michigan, para descrever o processo de secagem de casulos, no secador proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - ALVARENGA, Luis Carlos de et al. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. Revista Brasileira de Armazenamento, Belo Horizonte, v.5, n.1, p. 5-18, Jun. 1980.
- 02 - A EVOLUÇÃO da indústria têxtil nacional nos últimos anos. Revista Têxtil. São Paulo, p. 56-60, Fev. 1992.
- 03 - BACK, Nelson. Metodologia de projeto de produtos industriais. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1983.
- 04 - BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. Grain drier simulation. Research report. Michigan, n.224, p. 2-23. 1974.
- 05 - BAKKER-ARKEMA, F. W.; ROSENAU, J. R.; CLIFFORD, W. H. The effect of grain surface area on the heat and mass transfer rates in fixed and moving beds of biological products. Transactions of the ASAE. v. 14, n. 5, p. 864-867. Set/Out 1971.
- 06 - BANSAL, N. K.; GARG, H. P. Solar crop drying. Advances in drying. Montreal: Arun S. Mujundar, 1987. v. 4. p. 293-294.
- 07 - BERNAUER, Willi; ROCHA, Mauro Alves da. Secadores: dos clássicos aos não convencionais. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n.223, p. 20-24, Abr. 1984.

- 08 - BHAT, N. V.; NADIGER, G. S.; PARALIKAR, K. M. et al. Electron diffraction studies on Indian silk. Journal Applied Polymer Science, v. 25, n. 4, p. 635-640, Abr.1980.
- 09 - BIANCHI, C. Dante. Fibras têxteis. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico, 1945. p. 175-196.
- 10 - BICHO-DA-SEDA tecendo fios de dólares. Revista Globo Rural Especial: Como Criar. n.101, p. 53-63, Mar. 1994.
- 11 - BLACKADDER, D. A. ; NEDDERMAN, R. M. Manual de operações unitárias. São Paulo: Hemus, 1982. p. 202 - 205.
- 12 - BRISO, Diamantino Luiz Pereira. Secagem com bomba de calor. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n.223, p. 6-7, Abr. 1984.
- 13 - BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred w.; HALL, Carl W. Drying cereal grains Connecticut: AVI publishing Co., 1974. p 185-221.
- 14 - CORBMAN, Bernard P. Textiles: fiber to fabric. 5.ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1975. p. 317-332.
- 15 - CHEN, C. S.. Equilibrium moisture curves for biological materials. Transactions of the ASAE. v. 14, n. 5, p. 924-926. Set/Out 1971.
- 16 - CREDER, Hélio. Instalações de ar condicionado. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1990. p. 35-49.
- 17 - DANTAS, Inácio Batista. Anais do VI Encontro Nacional de Sericicultura. Natal: EMPARN, Jul. 1987, p. 88-91.
- 18 - DONZELES, Sérgio Mauricio Lopes; FILHO, José Borges Pinheiro; FORTES, Mauri. Curvas de quebra e de secagem de milho, em camadas finas, na faixa

- de temperatura de 45 à 150 ° C. Revista Brasileira de Armazenamento. Belo Horizonte. v. 8, n. 1 e 2, p. 11-17 Jun/Dez, 1983.
- 19 - ERHARDT, Theodor et al. Curso técnico têxtil: fibras vegetais, polímeros naturais, fibras de animais. São Paulo: Pedagógica e Universitária Ltda., 1976. V.2, p. 76-87.
- 20 - FIAÇÃO DE SEDA BRATAC S.A. Instruções sobre funcionamento do secador de casulos. São Paulo. 198-. 11p.
- 21 - FILHO, Fenelon Coutinho. A Sericicultura: técnica da cultura da amoreira e da criação do bicho-da-seda. Brasília: DAMPE, 1973. p. 69-73.
- 22 - FONSECA, Antônio da Silveira; FONSECA, Tamara Canto. Cultura da amoreira e criação do bicho-da-seda: sericicultura. 2.ed. São Paulo: Nobel, 1988. 246p.
- 23 - FOUST, Alan S.; WENZEL, Leonard A.; CLUMP, Eurtis W.; MAUS, Louis; ANDERSEN, L. Bryce. Principles of unit operations. New York: John Wiley & Sons; 1960. p. 296-299.
- 24 - FOX, ROBERT W.; McDONALD, ALAN T. Introduction to fluid mechanics. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1985. p.104-105.
- 25 - GARNER, W. Textile laboratory manual: additional methods. New Jersey: Textile Book Service, 1949. V.6, p. 1-16.
- 26 - GUIMARÃES, Adriana Correia; QUEIROZ, Daniel Marçal de; DONZELES, Sérgio M. L. Secagem de café em secador de leito fixo. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Londrina: SBEA, Jul. 1991. V.2, p. 1476-1495.

- 27 - GUSTAFSON, Robert J.; HALL, Glenn E. Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155° F. Transactions of the ASAE. v. 17, n. 1, p. 120-124, Jan/Fev 1974.
- 28 - HALL, A. J. The standard handbook of textiles. 8. ed. London: Newnes-Butterworths, 1975a. p. 25.
- 29 - —. The standard handbook of textiles. 8. ed. London: Newnes Butterworths, 1975b. p. 105.
- 30 - HALL, Carl W. Drying and storage of agricultural crops. connecticut: AVI Publishing Company, 1980a. p. 48
- 31 - —. Drying and storage of agricultural crops. connecticut: AVI Publishing Company, 1980b. p. 120-150.
- 32 - HANADA, Yukimitsu; WATANABE, Jorge K. Manual de criação do bicho-da-seda. Curitiba: COCAMAR, 1986. 224p.
- 33 - HARPER, H. Introduction to textile chemistry. London: Macmillan and Co., Limited., 1921. p. 69-77.
- 34 - HESS, Katharine Paddock. Textile fibers and their use. Chicago: J.B. Lippincott Company, 1941. p. 231-260.
- 35 - HOLLEN, Norma; SADDLER, Jane; LANGFORD, Anna L. Textiles. 5.ed. New York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1979a. p. 5-16.
- 36 - —. Textiles. 5.ed. New York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1979b. p. 31-34.
- 37 - HOLMAN, Jack Philip. Transferência de calor. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1993. p. 556-559.

- 38 - INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1992. p. 161-162.
- 39 - KOSOSKI, Adilson Reinaldo. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. Revista Brasileira de Armazenamento, Belo Horizonte. n.2, p. 31-43. Dez. 1977.
- 40 - LANERES, M. J. Economia de energia na secagem e termofixação. Revista Têxtil, p. 58-68, Jul./Ago.
- 41 - LASSERAN, Jean-Claude. Princípios gerais de secagem. Revista Brasileira de Armazenamento, Belo Horizonte. n.3, p. 17-46, Jul. 1978.
- 42 - MARIZ, Thompson Fernandes. Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1986. 139p.
- 43 - MARTINS, J. H. Simulação de secagem de milho em camada estacionária. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1982. 97p.
- 44 - MARSH, J. T. Textile science: an introductory manual. London: Chapman & Hall Ltd., 1948. p. 15-33.
- 45 - MATA, Mário Eduardo R. M. Cavalcanti; MARTINS, José Helvécio. Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos. UFPB/CCT - Núcleo de Tecnologia e Armazenagem. Campina Grande, 1984. 104p.
- 46 - MATA, Sandoval Farias da. Estudo do dimensionamento de coletor solar e secador. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas. Campinas, 1985. 252p.

- 47 - MAUERSBERGER, Herbert R. Textile fibers: their physical, microscopical and chemical properties. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1947. p. 679-737.
- 48 - MELONI, Pedro Luis Santos; QUEIROZ, Daniel Marçal de. Secagem de milho em secador de fluxos cruzados com reversão de fluxo de ar e reaproveitamento do ar de exaustão. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Londrina: SBEA, Jul. 1991. V.2, p. 1541-1560.
- 49 - MOLNÁR, I.; BABOS, L.; GUBICZA, A.; LUKACSOVICS, F. Investigation into the killing of cocoons by radioactive methods. Magyar Textil Tech., v.14, n.5, p. 196-199, 1962.42 - NADIGER, G. S.; BHAT, N. V. Effect of plasma treatment on the structure and allied textile properties of mulberry silk. Journal of Applied Polymer Science. v.30, n.10, p. 4127-4136, Oct. 1985.
- 50 - NADIGER, G. S.; BHAT, N. V. Effect of plasma treatment on the structure and allied textile properties of mulberry silk. Journal of Applied Polymer Science, v.30, n.10, p. 4127-4136, Oct. 1985.
- 51 - NADIGER, G. S.; BHAT, N. V.; PADHYE, M. R. Investigation of aminoacid composition in the crystalline region of silk fibroin. Journal of Applied Polymer Science, v.30, n.1, p. 221-225, Jan. 1985.
- 52 - NASH, William A.. Resistência dos materiais. 2.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1982.
- 53 - NEVES, Maria J. B. ; FORTES, Mauri; MOREIRA, Sandra M. C.; FILHO, José B. Pinheiro. Simulação físico-matemática do processo de seca-aeração. Revista

- Brasileira de Armazenamento. Belo Horizonte, v.8, n.1 e 2, p. 3-10, Jun/Dez. 1983.
- 54 - NIPPON KANSOKI, LTD. Cocoon dryer. Tokyo. 199-. 4p.
- 55 - NOGUEIRA, R. I.; PARK, K. J.. Drying parameters to obtain "banana-passa".  
Drying '92. Montreal: Arun S. Mujumdar. 2v. Part. A. 1992, p. 874-883.
- 56 - OLNEY, Louis A. Tecnologia química de fibras textiles 9.ed. Florida: El Ateneo, 1947. p. 31.
- 57 - OLNEY, Louis A. Textile chemistry & dyeing: chemical thechnology of the fibers. 9.ed. Boston: Lowell Textile Associates, 1945. v.1, p.18.
- 58 - PARAÍBA - SAIA/INTERPA. Programa Estadual de Sericicultura. Cabedelo. Nov. 1991. 93p.
- 59 - PAULSEN, M. R.; THOMPSON, T. L.. Effects of reversing airflow in a crossflow grain dryer. Transactions of the ASAE. v. 16. n. 3, p. 541-545. Mai/Jun 1973.
- 60 - PEREIRA, José Tomaz Vieira. Sistema autônomo de secagem. Tese(Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Campinas, 1985. 169 p.
- 61 - PETERS, R. H., Textile chemistry. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1967. V.2, p. 323-327.
- 62 - PRADO, Edson Pires. Secagem de cacau, em camadas finas, a sessenta e oitenta graus celsius e variação da porosidade durante o processo. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1978. 31p.
- 63 - QUEIROZ, Daniel Marçal; GUIMARÃES, Adriana Correia; DONZELES, Sérgio, Otimização do secador de leito fixo para secagem de café. Anais do XX

- Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Londrina: SBEA, Jul. 1991, V.2, p. 1496-1508.
- 64 - QUEIROZ, Daniel Marçal de; SILVA, Juarez de Sousa e; MELO, Evandro de castro. Práticas de simulação de secagem em calculadoras programáveis. Centreinar, Viçosa, n.3, 1982. 84p.
- 65 - ROMERO, Joaquim Ernesto Rosa. Projeto, construção e estudo do desempenho de um secador de esteira de fluxos cruzados, para bagaço de cana. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1988. 113p.
- 66 - ROSSI, Sílvio José. Psicrometria. João Pessoa: FUNAPE, 1987. 60p.
- 67 - ROSSI, Sílvio José; ROA, Gonzalo. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295p.
- 68 - ROBERTS, D. E.; BROOKER, D. B.. Grain drying with a recirculator. Transactions of the ASAE. v. 18, n. 1, p. 181-184, Jan/Fev 1975.
- 69 - SHIRUO, Chen. Studies on drying of silkworm cocoons. Drying of solids Recent International Developments. Montreal: Arun S. Mujumdar. 2.v. V.2, 1986. p. 240-244.
- 70 - SILVA, Ody. Manual prático e técnico de agricultura. 2. ed. São Paulo: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1982. p. 239.
- 71 - TAKAHASHI, Julio Noborn. Agroindústria sericícola. Anais do VI Encontro Nacional de Sericicultura. Natal: EMPARN. Jul. 1987 p.57-60.

- 72 - TSUKADA, Masuhiro. Thermal decomposition behavior of sericin cocoon. Journal of Applied Polymer Science. v.22, n.2, p. 543-554, Feb. 1978.
- 73 - UÇKAN, G.; ULKÜ, S.. Drying of corn grains in a batch fluidized bed dryer. Drying of solids. Recent International Developments. Montreal: Arum S. Mujumdar. 2 v. V. 1, 1982. p. 91-96.
- 74 - VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J.; MORGAN, A. J. Jr. Food dehydration. 2.ed. Connecticut: AVI Publishing Company, 1973.
- 75 - VASCONCELOS, L. G. S.; ALSINA, O. L. Sánchez. Drying simulation of "carioca" beans in cross-flow. Drying '92. Montreal: Arum S. Mujumdar. Part. B. 1992. p. 1501-1507.
- 76 - VERMA, LALIT R.; NOOMHORM, A.. Rice drying simulation. Drying '86. Montreal: Arum S. Mujumdar. V. 2. 1986. p. 461-469.
- 77 - WOOLMAN, Mary Schenck; MCGOWAN, Ellen Beers. Textiles: a handbook for the student and the consumer. 3.ed. New York: Macmillan Company, 1943. p. 157-178.
- 78 - YAMATO SANKO MFG. CO., LTD. "Yamato" cocoon drying machine. Tokyo. 1994. 9p.

## **APÊNDICE - A**

**(Resultados dos experimentos para determinação da porosidade dos casulos  
do bicho-da-seda)**

**TABELA A1**

**Porosidade do casulo, nas condições iniciais de secagem, com teor de umidade em base úmida de 68% e temperatura ambiente de 27 °C**

Ensaio	Massa da amostra (g)	H <sub>1</sub> (mm)	H <sub>2</sub> (mm)	P <sub>r1</sub> (kPa)	P <sub>r2</sub> (kPa)	Nº. de casulos	Massa por casulo (g)	Porosidade (ε)
01	262,74	315	170	137,9	118,7	172	1,53	0,163
02	253,73	270	148	131,9	115,7	166	1,53	0,141
03	255,23	270	144	131,9	115,1	170	1,50	0,146
04	251,36	262	139	130,8	114,5	163	1,54	0,143
05	262,71	253	130	129,7	113,3	172	1,53	0,145
06	251,21	266	137	131,5	114,3	169	1,48	0,151
07	253,30	270	147	131,9	115,6	165	1,53	0,142
Média	255,75					Média	1,52	0,147

## **APÊNDICE - B**

(Resultados dos experimentos realizados para determinar a cinética de secagem de casulos do bicho-da-seda, em leito fixo)

**TABELA B1**

ENSAIO 01

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 73,6 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 26,4 °C

MASSA DO SUPORTE: 138,56 g

VAZÃO DE AR: 8345,3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>, ALTURA DO LEITO: 5,5 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 155,06 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 90 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	26,6	80,7	3,34	2,45	155,06
5	26,6	80,6	3,33	2,44	150,52
10	26,7	80,3	3,34	3,01	148,95
15	26,5	81,4	3,36	2,89	145,85
20	26,6	80,5	3,16	3,19	142,31
25	26,6	78,6	3,36	3,13	138,93
30	26,6	75,4	3,37	3,23	135,76
35	26,7	73,7	3,30	3,17	132,24
40	26,9	70,6	3,31	3,13	128,66
45	26,4	70,2	3,34	3,19	125,99
50	26,3	70,6	3,33	3,14	122,60
55	26,2	70,1	3,35	3,19	119,48
60	26,2	70,1	3,34	3,14	116,57
65	26,2	69,9	3,31	2,89	113,77
70	26,2	69,3	3,34	3,25	110,84
75	26,4	70,2	3,32	3,16	109,36
80	26,1	70,1	3,33	3,14	107,62
85	25,9	71,2	3,36	3,13	106,13
90	26,0	71,6	3,34	3,17	105,42
95	26,3	70,4	3,34	3,18	104,12
100	26,2	69,6	3,35	3,16	103,02
105					
110					
115					
120					
125					
130					
135					

**TABELA B2**

ENSAIO 02

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 78,5 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 26,6 °C

MASSA DO SUPORTE: 132,55 g

VAZÃO DE AR: 8345,3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LEITO: 4,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 97,75 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 90 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	26,6	77,5	3,34	3,12	97,75
5	26,5	77,4	3,30	3,01	93,76
10	26,5	77,8	3,32	3,11	92,03
15	26,4	78,6	3,38	3,17	89,89
20	26,4	78,8	3,40	3,12	87,81
25	26,5	77,5	3,30	3,14	85,67
30	26,4	79,1	3,33	3,17	83,49
35	26,5	78,9	3,30	3,14	82,15
40	26,5	79,8	3,44	2,95	79,41
45	26,8	78,6	3,27	3,11	77,56
50	26,8	78,8	3,32	3,15	76,04
55	26,7	79,5	3,34	3,16	73,67
60	26,6	79,7	3,34	3,16	72,08
65	26,6	79,1	3,34	3,11	70,33
70	26,8	76,5	3,35	2,85	68,44
75	26,7	77,2	3,36	3,17	66,73
80	26,6	77,6	3,34	3,12	65,04
85	26,5	78,4	3,34	3,16	63,52
90	26,6	77,8	3,35	3,23	62,03
95	26,5	78,7	3,37	2,93	60,37
100	26,3	80,7	3,37	2,92	59,16
105					
110					
115					
120					
125					
130					
135					

### TABELA B3

ENSAIO 03

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 78,0 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 28,1 °C

MASSA DO SUPORTE: 119,95 g

VAZÃO DE AR: 8345,3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LETTO: 2,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 52,35 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 90 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	28,0	78,2	3,26	3,02	52,35
5	28,0	79,0	3,33	3,25	50,38
10	27,8	79,6	3,05	3,02	49,53
15	27,9	78,9	3,36	3,19	48,44
20	27,8	79,3	3,23	3,15	47,28
25	27,8	79,2	3,25	3,16	46,24
30	27,8	79,4	3,34	3,27	45,16
35	27,8	78,6	3,28	3,21	44,16
40	27,9	78,7	3,29	3,15	43,13
45	28,0	78,2	3,21	3,07	42,19
50	28,0	77,1	3,20	3,09	41,20
55	28,1	77,4	3,25	3,17	40,29
60	28,0	78,8	3,25	3,15	39,28
65	28,1	78,9	3,26	3,16	38,47
70	28,0	79,3	3,31	3,20	37,58
75	28,2	78,8	3,30	3,19	36,63
80	28,7	76,9	3,24	3,13	35,76
85	28,6	77,4	3,25	3,15	34,98
90	28,7	76,4	3,20	2,79	34,19
95	28,7	76,6	3,26	3,06	33,48
100	28,7	76,5	3,13	2,59	32,71
105	28,1	75,8	3,26	3,05	32,13
110	28,5	75,7	3,13	2,62	31,24
115					
120					
125					
130					
135					

**TABELA B4**

ENSAIO 04

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 53,7 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 28,1 °C

MASSA DO SUPORTE: 119,95 g

VAZÃO DE AR: 8345,3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LEITO: 2,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 53,21 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 70 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	27,7	56,2	2,24	2,17	53,21
5	27,9	54,6	2,30	2,21	51,05
10	27,9	54,5	2,22	2,14	50,60
15	27,8	53,9	2,23	2,18	50,18
20	27,8	53,2	2,21	2,18	49,66
25	27,8	53,7	2,21	2,19	49,18
30	27,9	53,4	2,21	2,16	48,71
35	27,9	53,7	2,21	2,18	48,25
40	28,0	53,8	2,21	2,18	47,81
45	28,0	53,9	2,21	2,18	47,34
50	28,0	54,4	2,21	2,15	46,95
55	28,1	52,9	2,21	2,14	46,46
60	28,0	52,3	2,20	2,14	46,02
65	28,0	52,6	2,23	2,18	45,63
70	28,0	52,7	2,22	2,16	45,12
75	28,3	53,0	2,20	2,11	44,75
80	28,4	52,8	2,22	2,14	44,36
85	28,3	53,0	2,20	2,15	43,98
90	28,2	53,4	2,23	2,15	43,55
95	28,3	53,7	2,21	2,17	43,14
100	28,3	53,8	2,22	2,16	42,84
105	28,2	53,9	2,23	2,18	42,35
110	28,5	54,4	2,21	2,13	42,01
115	28,6	54,7	2,22	2,17	41,62
120	28,5	54,2	2,20	2,15	41,18
125					
130					
135					

### TABELA B5

ENSAIO 05

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 59,6 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 27,8 °C

MASSA DO SUPORTE: 119,95 g

VAZÃO DE AR: 8345,3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LEITO: 2,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 57,23 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 83 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	27,2	63,2	2,98	2,40	57,23
5	27,3	62,6	2,83	2,56	55,14
10	27,4	62,8	2,94	2,79	54,14
15	27,5	61,6	3,07	2,97	52,91
20	27,5	61,8	3,11	2,93	51,85
25	27,2	62,2	2,86	2,52	51,33
30	27,2	61,6	2,72	2,58	50,62
35	27,7	61,3	2,95	2,70	49,82
40	27,8	61,2	2,95	2,76	48,88
45	27,8	61,3	2,94	2,78	48,20
50	28,0	60,4	2,94	2,86	47,33
55	28,0	60,7	2,94	2,85	46,53
60	28,2	61,0	2,94	2,85	45,61
65	28,2	59,1	2,95	2,86	44,89
70	28,4	59,1	2,95	2,84	44,08
75	28,3	58,9	2,94	2,85	43,35
80	28,3	58,0	2,94	2,84	42,61
85	28,5	57,7	2,94	2,77	41,83
90	28,0	57,5	2,94	2,84	41,06
95	27,8	58,3	2,92	2,86	40,38
100	27,8	58,0	2,94	2,87	39,72
105	27,7	57,4	2,96	2,82	38,99
110	28,0	57,5	2,93	2,87	38,32
115	28,0	56,4	2,95	2,84	37,70
120	27,8	56,5	2,95	2,88	37,00
125	27,7	57,1	2,92	2,84	36,32
130	27,4	58,1	2,94	2,89	35,77
135	27,4	57,6	2,94	2,84	35,07

**TABELA B6**

ENSAIO 06

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 58,3 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 28,2 °C

MASSA DO SUPORTE: 119,95 g

VAZÃO DE AR: 4768,7 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LEITO: 2,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 55,33 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 83 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	28,1	58,1	2,95	2,25	55,33
5	28,1	59,0	2,90	2,25	53,41
10	28,2	58,9	2,95	2,55	52,96
15	28,2	58,4	2,94	2,66	51,98
20	28,2	58,0	2,94	2,65	51,04
25	28,5	56,7	2,96	2,72	50,14
30	28,5	56,9	2,92	2,65	49,21
35	28,4	57,6	2,97	2,68	48,36
40	28,5	57,6	2,94	2,70	47,41
45	28,4	58,1	2,94	2,71	46,54
50	28,5	58,4	2,94	2,75	45,66
55	28,6	58,1	2,96	2,81	44,82
60	28,4	58,1	2,90	2,69	43,96
65	28,3	58,0	2,96	2,77	43,18
70	28,2	58,2	2,94	2,80	42,39
75	28,1	58,6	2,95	2,84	41,62
80	28,1	58,8	2,97	2,86	40,85
85	28,0	59,3	2,85	2,73	40,08
90	28,0	59,1	2,98	2,52	39,28
95	28,1	58,7	2,93	2,75	38,54
100	28,0	59,1	2,94	2,80	37,55
105	27,9	59,5	3,01	2,49	37,08
110					
115					
120					
125					
130					
135					

**TABELA B7**

ENSAIO 07

UMIDADE RELATIVA MÉDIA: 73,2 %

TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA: 26,6 °C

MASSA DO SUPORTE: 119,95 g

VAZÃO DE AR: 1986,9 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>; ALTURA DO LEITO: 2,0 cm

MASSA INICIAL DA AMOSTRA: 57,13 g

TEMPERATURA DE BULBO SECO MÉDIA DO AR NA ENTRADA: 83 °C

Tempo (min)	Temperatura Ambiente. (°C)	Umidade relativa (%)	Temperatura de bulbo seco na entrada (mV)	Temperatura de bulbo seco na saída (mV)	Massa da amostra (g)
0	26,3	69,8	2,96	2,52	57,13
5	26,2	70,3	2,85	2,28	55,18
10	26,3	70,1	3,03	1,98	54,62
15	26,4	70,4	2,87	2,17	53,78
20	26,5	70,4	2,97	2,29	52,80
25	26,4	70,6	2,91	2,35	51,76
30	26,3	71,4	2,95	2,56	50,77
35	26,4	71,4	2,92	2,53	49,77
40	26,4	72,1	2,90	2,44	48,79
45	26,5	71,8	2,94	2,40	47,93
50	26,5	71,9	3,02	2,28	47,08
55	26,7	71,8	2,88	2,15	46,20
60	26,7	71,3	2,94	2,09	45,42
65	26,7	71,8	2,99	2,08	44,55
70	26,7	73,4	2,92	2,17	43,68
75	26,8	74,1	2,99	2,52	42,85
80	27,1	72,8	2,92	2,21	42,17
85	26,8	75,1	2,94	2,52	41,28
90	26,7	76,0	2,94	2,43	40,59
95	26,8	75,3	2,94	2,46	39,82
100	26,9	75,7	2,93	2,43	39,04
105	26,8	76,8	2,94	2,40	38,31
110	26,7	77,3	2,93	2,44	37,60
115	26,5	79,1	2,95	2,49	36,85
120	26,6	78,8	2,93	2,43	36,17
125					
130					
135					

## **APÊNDICE - C**

(Comparação do teor de umidade obtido nos experimentos de secagem em leito fixo e o dado pela equação proposta)

## TABELA C1

## ENSAIO 01

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1249	2,1304
5	2,0274	2,0542
10	2,0018	1,9808
15	1,9393	1,9100
20	1,8680	1,8417
25	1,7999	1,7759
30	1,7360	1,7124
35	1,6650	1,6551
40	1,5929	1,5922
45	1,5391	1,5352
50	1,4708	1,4804
55	1,4079	1,4274
60	1,3493	1,3764
65	1,2928	1,3272
70	1,2338	1,2798
75	1,2039	1,2340
80	1,1689	1,1899
85	1,1388	1,1474
90	1,1245	1,1064
95	1,0983	1,0668
100	1,0762	1,0287
105		
110		
115		
120		
125		
130		
135		

TABELA C2

ENSAIO 02

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1250	2,1478
5	1,9974	2,0577
10	1,9421	1,9714
15	1,8737	1,8886
20	1,8072	1,8094
25	1,7388	1,7335
30	1,6691	1,6608
35	1,6263	1,5911
40	1,5387	1,5243
45	1,4795	1,4604
50	1,4309	1,3991
55	1,3552	1,3404
60	1,3043	1,2842
65	1,2484	1,2303
70	1,1880	1,1787
75	1,1331	1,1292
80	1,0793	1,0818
85	1,0307	1,0364
90	0,9831	0,9929
95	0,9300	0,9513
100	0,8913	0,9114
105		
110		
115		
120		
125		
130		
135		

## TABELA C3

## ENSAIO 03

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1253	2,1477
5	2,0078	2,0634
10	1,9570	1,9825
15	1,8919	1,9047
20	1,8227	1,8299
25	1,7606	1,7582
30	1,6961	1,6892
35	1,6364	1,6229
40	1,5749	1,5592
45	1,5188	1,4981
50	1,4597	1,4393
55	1,4054	1,3828
60	1,3451	1,3286
65	1,2967	1,2764
70	1,2436	1,2264
75	1,1869	1,1782
80	1,1349	1,1320
85	1,0884	1,0876
90	1,0412	1,0449
95	0,9988	1,0039
100	0,9528	0,9645
105	0,9182	0,9267
110	0,8651	0,8904
115		
120		
125		
130		
135		

TABELA C4

ENSAIO 04

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1245	2,0465
5	1,9976	2,0156
10	1,9712	1,9853
15	1,9466	1,9553
20	1,9160	1,9259
25	1,8878	1,8968
30	1,8602	1,8683
35	1,8332	1,8401
40	1,8074	1,8124
45	1,7798	1,7850
50	1,7569	1,7581
55	1,7281	1,7316
60	1,7023	1,7055
65	1,6794	1,6798
70	1,6494	1,6545
75	1,6277	1,6296
80	1,6048	1,6050
85	1,5825	1,5808
90	1,5572	1,5570
95	1,5532	1,5335
100	1,5156	1,5104
105	1,4868	1,4876
110	1,4668	1,4652
115	1,4439	1,4431
120	1,4181	1,4214
125		
130		
135		

## TABELA C5

## ENSAIO 05

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1256	2,1118
5	2,0115	2,0495
10	1,9568	1,9891
15	1,8897	1,9305
20	1,8318	1,8735
25	1,8034	1,8183
30	1,7646	1,7647
35	1,7209	1,7127
40	1,6696	1,6622
45	1,6324	1,6132
50	1,5849	1,5656
55	1,5412	1,5194
60	1,4910	1,4746
65	1,4517	1,4312
70	1,4074	1,3889
75	1,3676	1,3480
80	1,3271	1,3083
85	1,2845	1,2697
90	1,2425	1,2323
95	1,2053	1,1959
100	1,1693	1,1607
105	1,1294	1,1264
110	1,0928	1,0932
115	1,0590	1,0610
120	1,0208	1,0297
125	0,9836	0,9994
130	0,9536	0,9699
135	0,9153	0,9413

## TABELA C6

## ENSAIO 06

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1242	2,1337
5	2,0158	2,0685
10	1,9904	2,0053
15	1,9351	1,9440
20	1,8820	1,8846
25	1,8312	1,8270
30	1,7787	1,7712
35	1,7307	1,7170
40	1,6770	1,6646
45	1,6279	1,6137
50	1,5782	1,5644
55	1,5308	1,5166
60	1,4822	1,4702
65	1,4382	1,4253
70	1,3936	1,3818
75	1,3501	1,3395
80	1,3066	1,2986
85	1,2631	1,2589
90	1,2179	1,2204
95	1,1762	1,1831
100	1,1203	1,1470
105	1,0937	1,1119
110		
115		
120		
125		
130		
135		

TABELA C7

ENSAIO 07

Tempo (min)	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Experimental )	Teor de umidade em base seca $U_{bs}$ ( Simulado )
0	2,1253	2,1426
5	2,0186	2,0759
10	1,9879	2,0112
15	1,9421	1,9485
20	1,8884	1,8877
25	1,8315	1,8289
30	1,7773	1,7719
35	1,7226	1,7167
40	1,6690	1,6632
45	1,6220	1,6113
50	1,5755	1,5611
55	1,5273	1,5124
60	1,4847	1,4653
65	1,4371	1,4196
70	1,3895	1,3754
75	1,3430	1,3325
80	1,3069	1,2910
85	1,2582	1,2507
90	1,2205	1,2118
95	1,1783	1,1740
100	1,1357	1,1374
105	1,0957	1,1019
110	1,0569	1,0676
115	1,0159	1,0343
120	0,9787	1,0021
125		
130		
135		

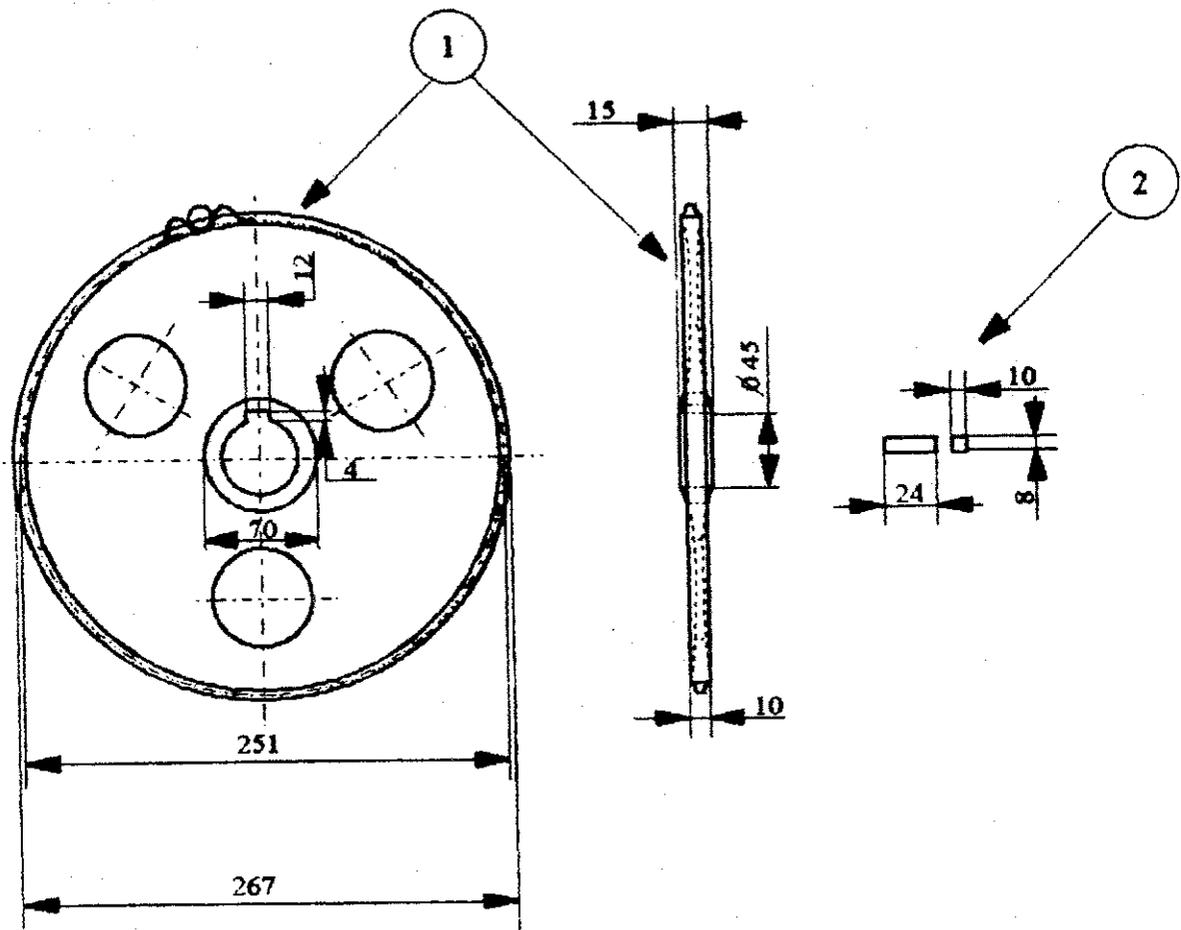
## **APÊNDICE - D**

(Programa em linguagem FORTRAN, utilizado para extrapolar os resultados do parâmetro "k", para várias condições de secagem)

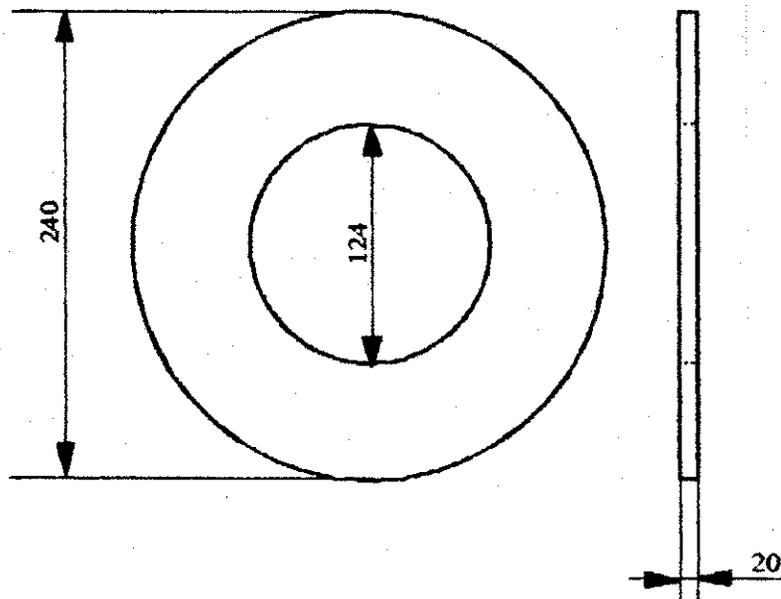
```
35      PROGRAM EXTRAPOLACAO K
      DOUBLE PRECISION K(75),T(75),Q(75),C(75), E(75)
      INTEGER I,N,M
      CHARACTER*8 ARQINT,AROSAI
      OPEN(UNIT=1,FILE='EXP2.DAT')
      READ(1,10)ARQINT
      READ(1,10)AROSAI
10     FORMAT(4A10)
      OPEN(UNIT=2,FILE=ARQINT,STATUS='OLD')
      OPEN(UNIT=3,FILE=AROSAI,STATUS='OLD')
      N=7
      M=4
      DO 15 I=1,N
          READ(2,*) T(I), Q(I), E(I)
15     CONTINUE
          READ(2,*)(C(I),I=1,M)
      DO 20 I=1,N
          K(I) = C(1)+ C(2)*Q(I)+C(3)*T(I) + C(4)*E(I)
20     CONTINUE
      DO 25 I=1,N
          WRITE(3,40) K(I),Q(I),T(I),E(I)
25     CONTINUE
40     FORMAT(F16.9,5X,F9.5,5X,F16.9,5X,F16.9)
      STOP
      END
```

## **APÊNDICE - E**

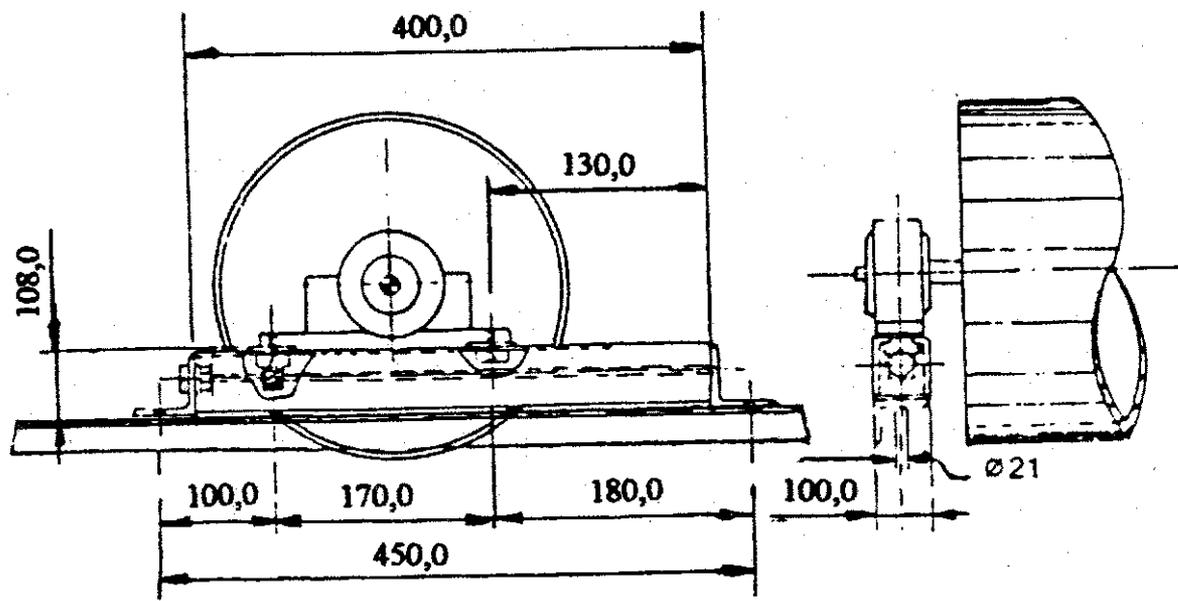
**(Desenhos do secador de operação contínua e fluxos cruzados proposto)**



2	Chaveta	Aço SAE 1045	VV	24 x 10
1	Roda dentada	Aço SAE 1045	VVV	φ 267 x 15
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
ESCALA: 1 : 4	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA			DESENHO E 18
	TÍTULO DA PEÇA: RODA DENTADA			

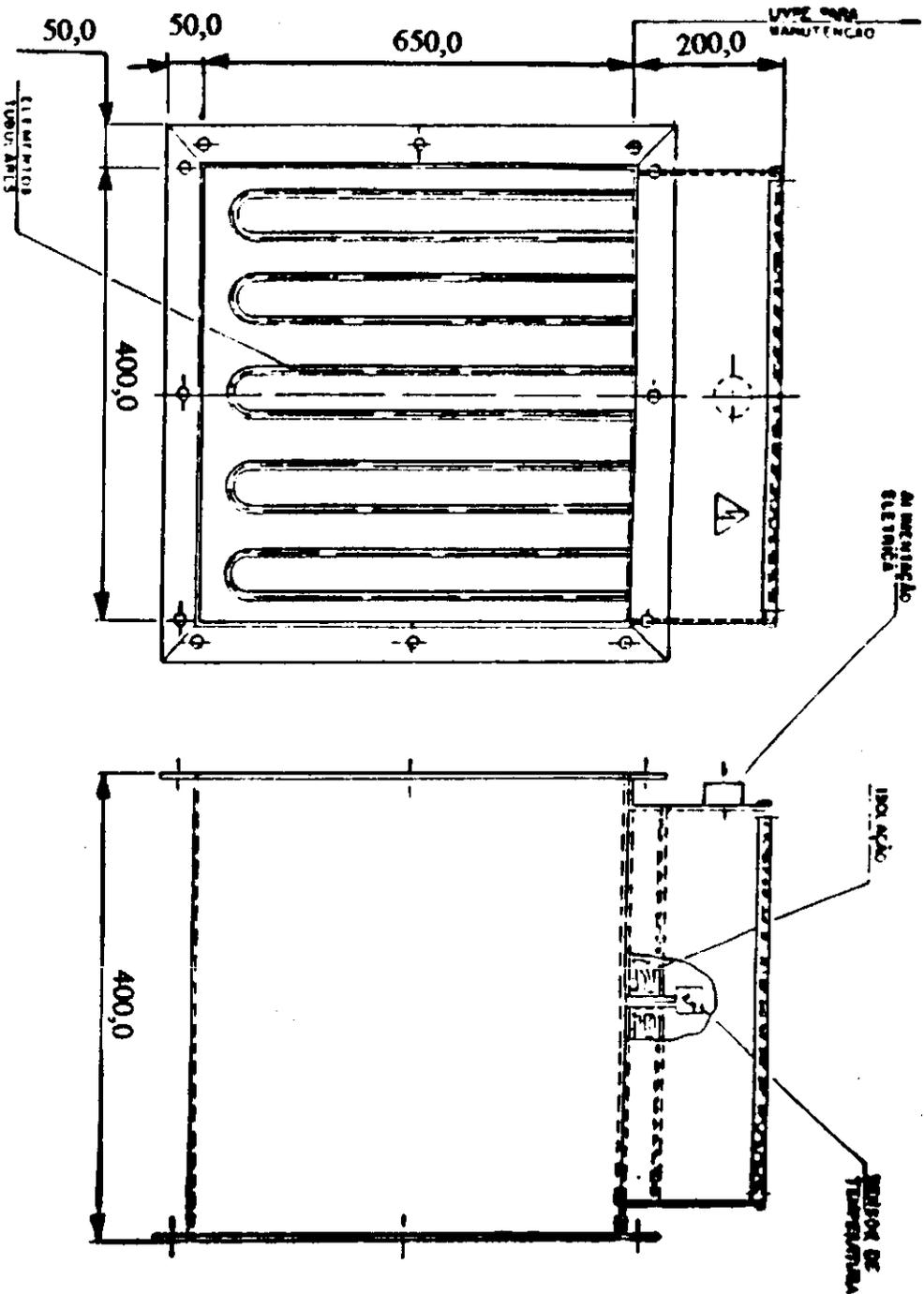


Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
1	Disco lateral	Aço SAE 1020	VV	φ 240 x 20
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
ESCALA: 1 : 4	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA			DESENHO E 19
	TÍTULO DA PEÇA: DISCO LATERAL			

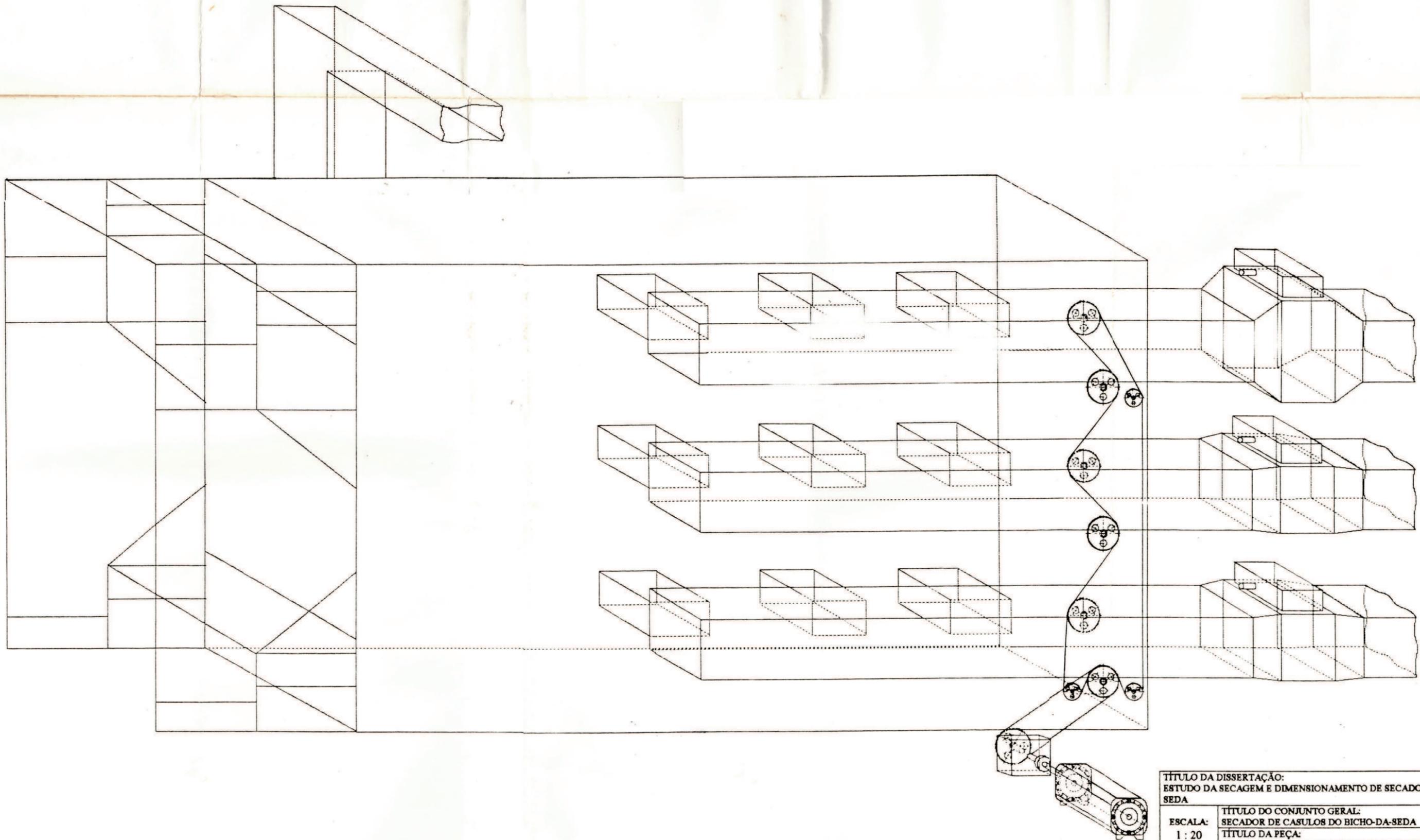


**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**  
**ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

<b>ESCALA:</b> —	<b>TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:</b> <b>SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA</b>	<b>DESENHO</b> <b>E 21</b>
	<b>TÍTULO DA PEÇA:</b> <b>PARAFUSO REGULADOR DE TENSÃO</b>	

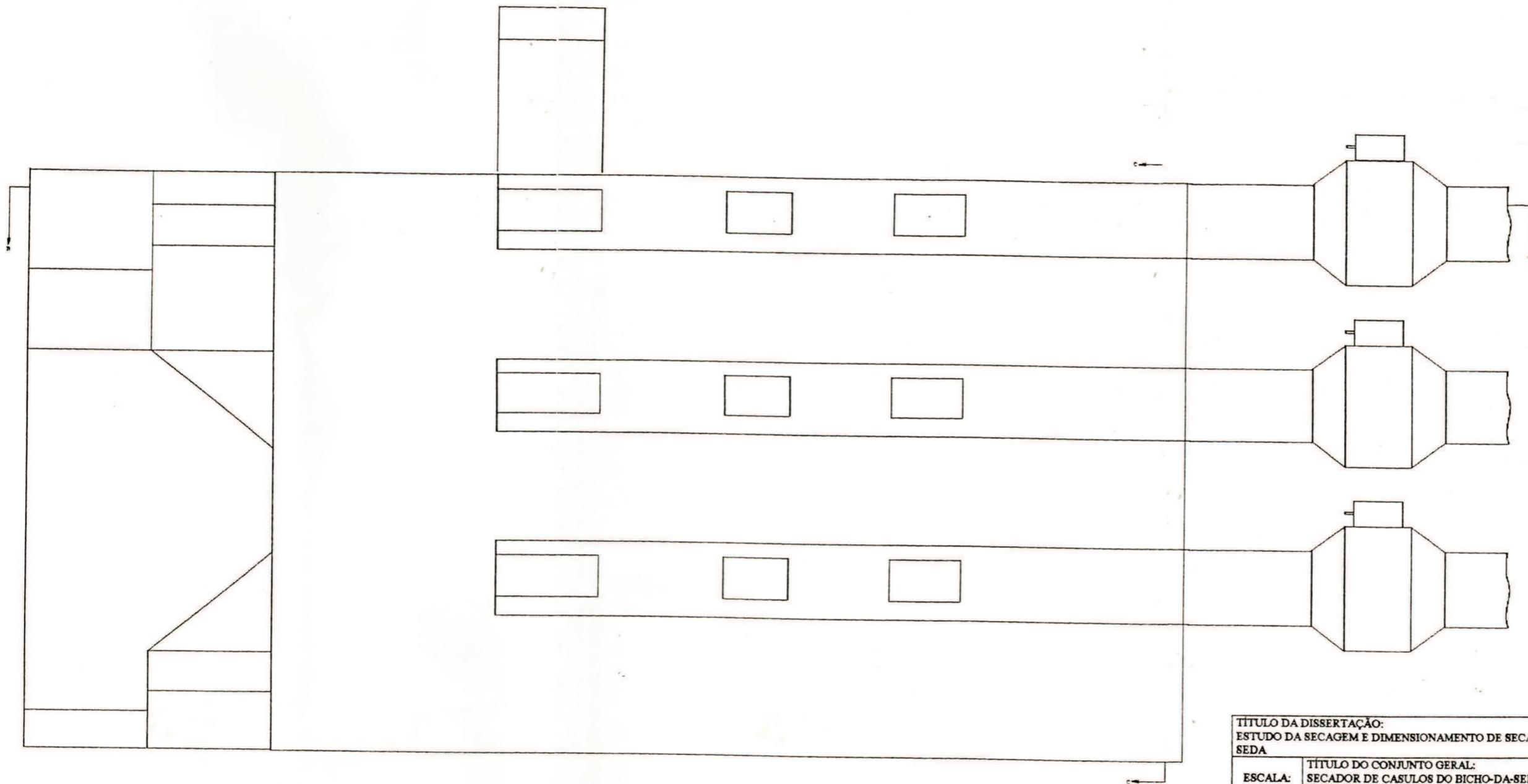


<b>TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:</b> ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CABUÇOS DO RICO-DA-SEDA	
<b>TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:</b> SECADOR DE CABUÇOS DO RICO-DA-SEDA	
<b>ESCALA:</b> —	<b>DESENHO</b> E 22
<b>TÍTULO DA PEÇA:</b> AQUECEDOR DE AR ELÉTRICO	

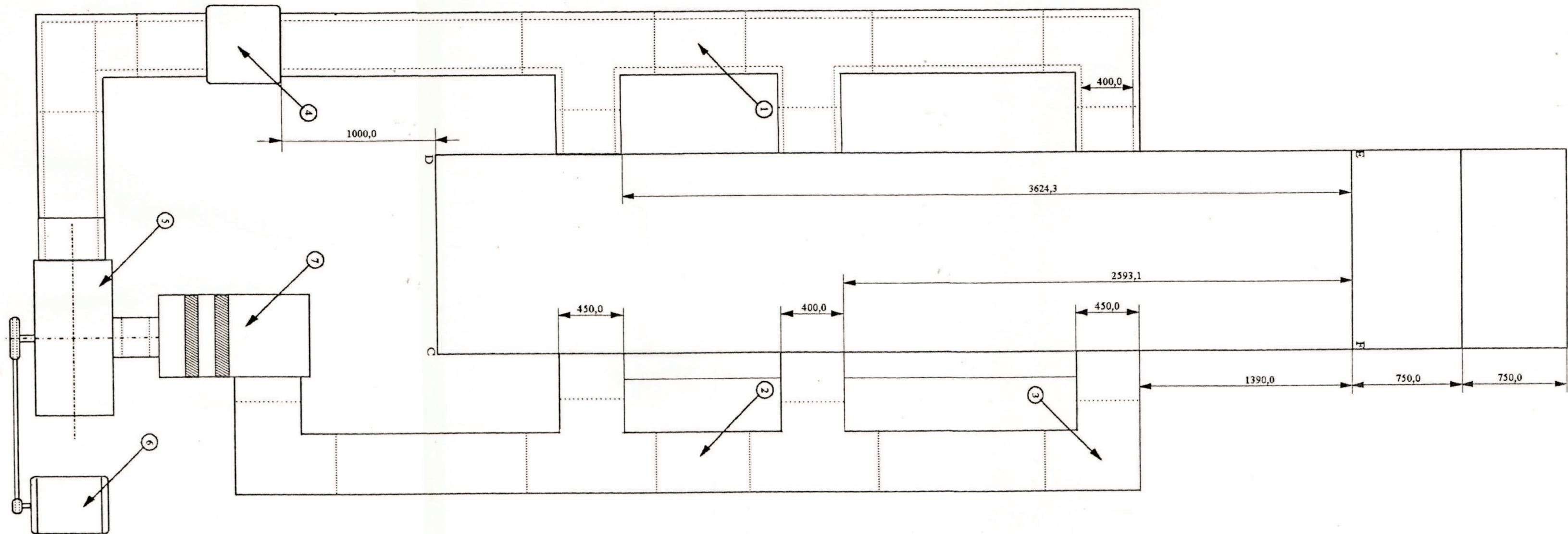


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA		DESENHO E 1
ESCALA: 1 : 20	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA TÍTULO DA PEÇA: VISTA DO SECADOR EM PERSPECTIVA CAVALEIRA	

ARCE-F-7



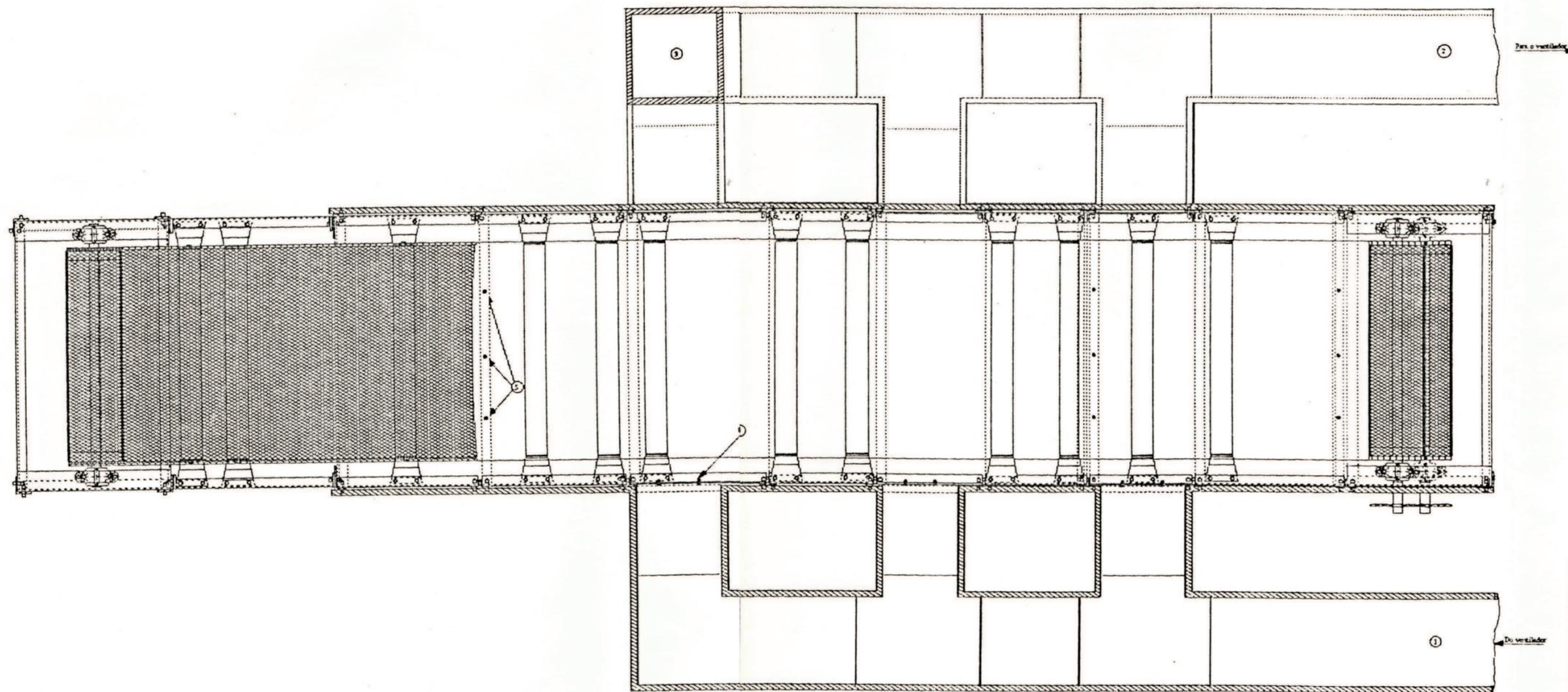
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA- SEDA		DESENHO E 2
ESCALA: 1 : 20	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA TÍTULO DA PEÇA: VISTA LATERAL DO SECADOR	



7	Entrada de ar exterior
6	Motor elétrico
5	Ventilador centrífugo
4	Aquecedor de ar
3	Duto para exaustão de ar
2	Duto para retorno de ar
1	Duto para entrada de ar
Nº	DENOMINAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
 ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

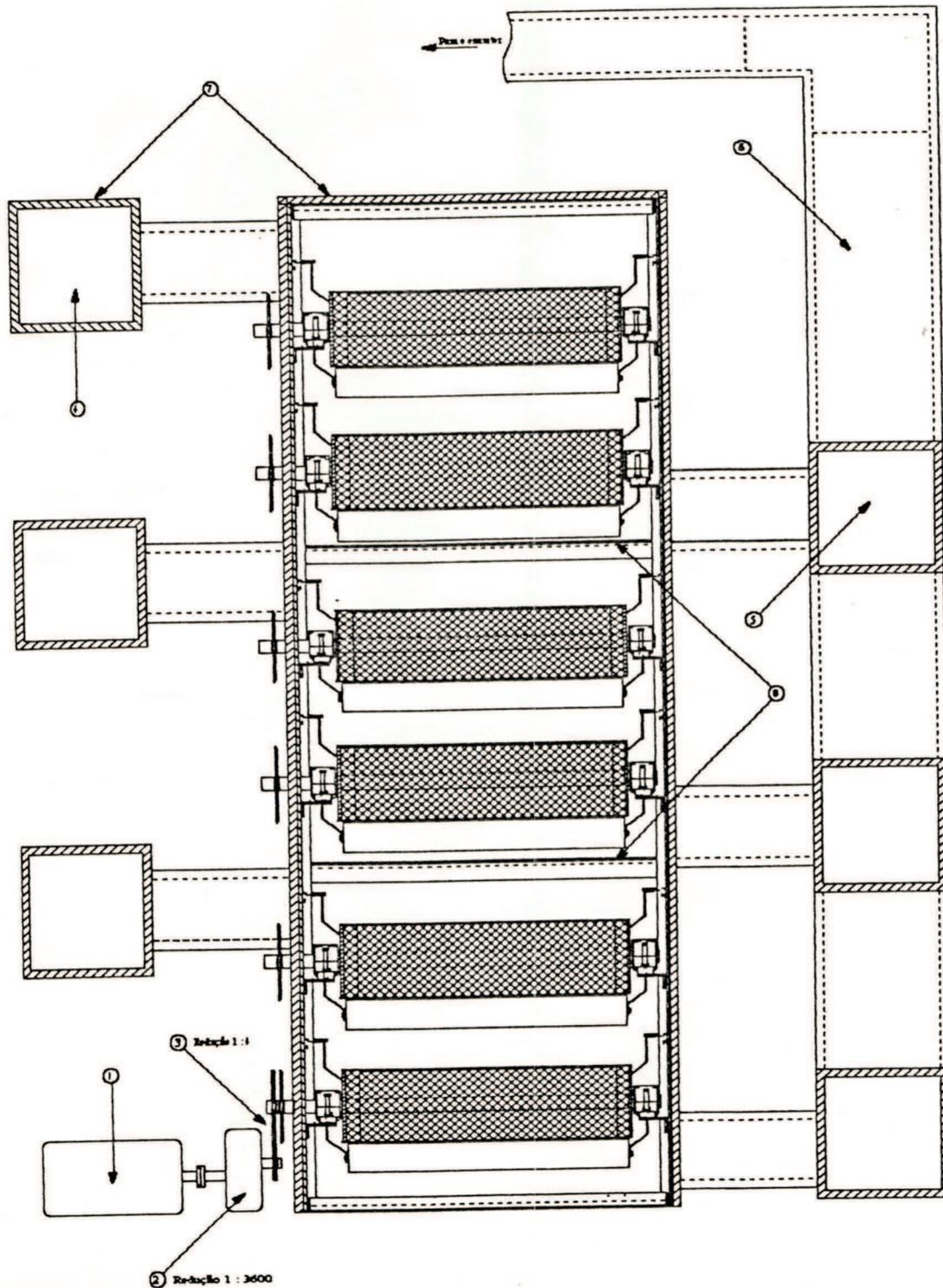
ESCALA: 1 : 20	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 3
	TÍTULO DA PEÇA: VISTA SUPERIOR DO SECADOR	



5	Parafuso sextavado com porca e arruela para fixação da chapa de zinco	Aço SAE 1020	VV	M 5 x 16 P-PB-41
4	Parafuso sextavado com porca e arruela	Aço SAE 1020	VV	M 5 x 16 P-PB-41
3	Duto para exaustão de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola N° 26
2	Duto para retorno de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola N° 26
1	Duto para entrada de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola N° 26
N°	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

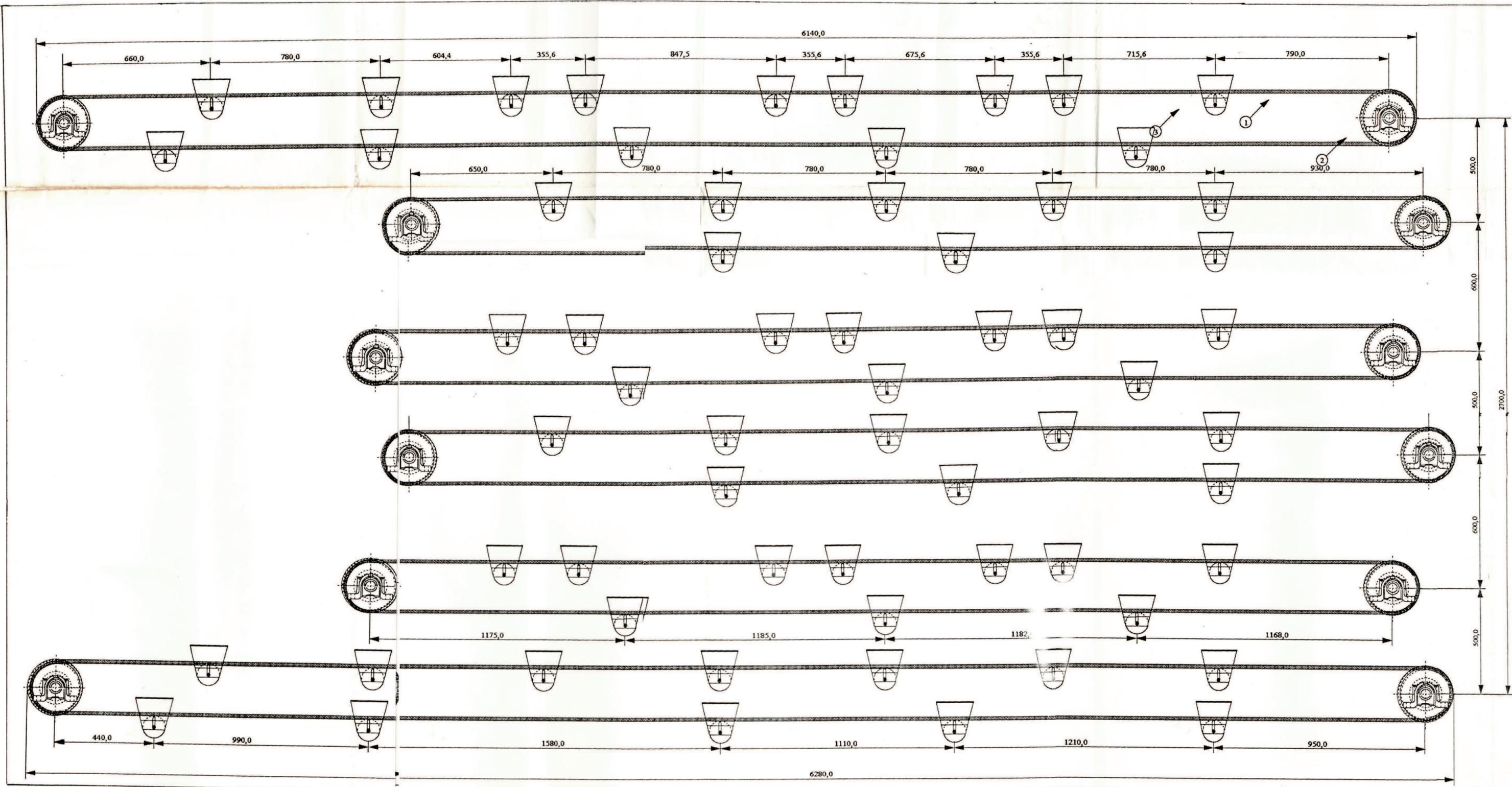
ESCALA: 1 : 20	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 4
	TÍTULO DA PEÇA: CORTE BB DO SECADOR	



8	Chapa metálica	Zinco	—	USSG bitola Nº 20
7	Isolamento térmico PSI-30	LA de vidro	—	25
6	Duto para exaustão de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola Nº 26
5	Duto para retorno de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola Nº 26
4	Duto para entrada de ar	Aço galvanizado	—	USSG bitola Nº 26
3	Corrente de precisão de rolos ANSI 40-1"	—	—	—
2	Redutor de velocidade a coroa e rosca sem fim Duplex ED-50/87	—	—	240 x 190
1	Motor elétrico IP 54-trifásico 5CV-900RPM-60HZ-380V	—	—	483 x 270
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 20	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 5
	TÍTULO DA PEÇA: CORTE LONGITUDINAL DO TAMBOR DE RETORNO	



3	Rolete 2024 A/CEMA B4	Aço carbono	VVV	1214 x 160
2	Rolamento auto compensador de esferas 2209 EK com bucha de fixação H 309	—	—	φ 40
1	Esteira transportadora de tela tipo DMB/R = 4,5 x 9,8 - 2,11 com correntes laterais tipo ASA 40-1/2" em aço carbono	Aço inoxidável AISI 304	—	6280
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

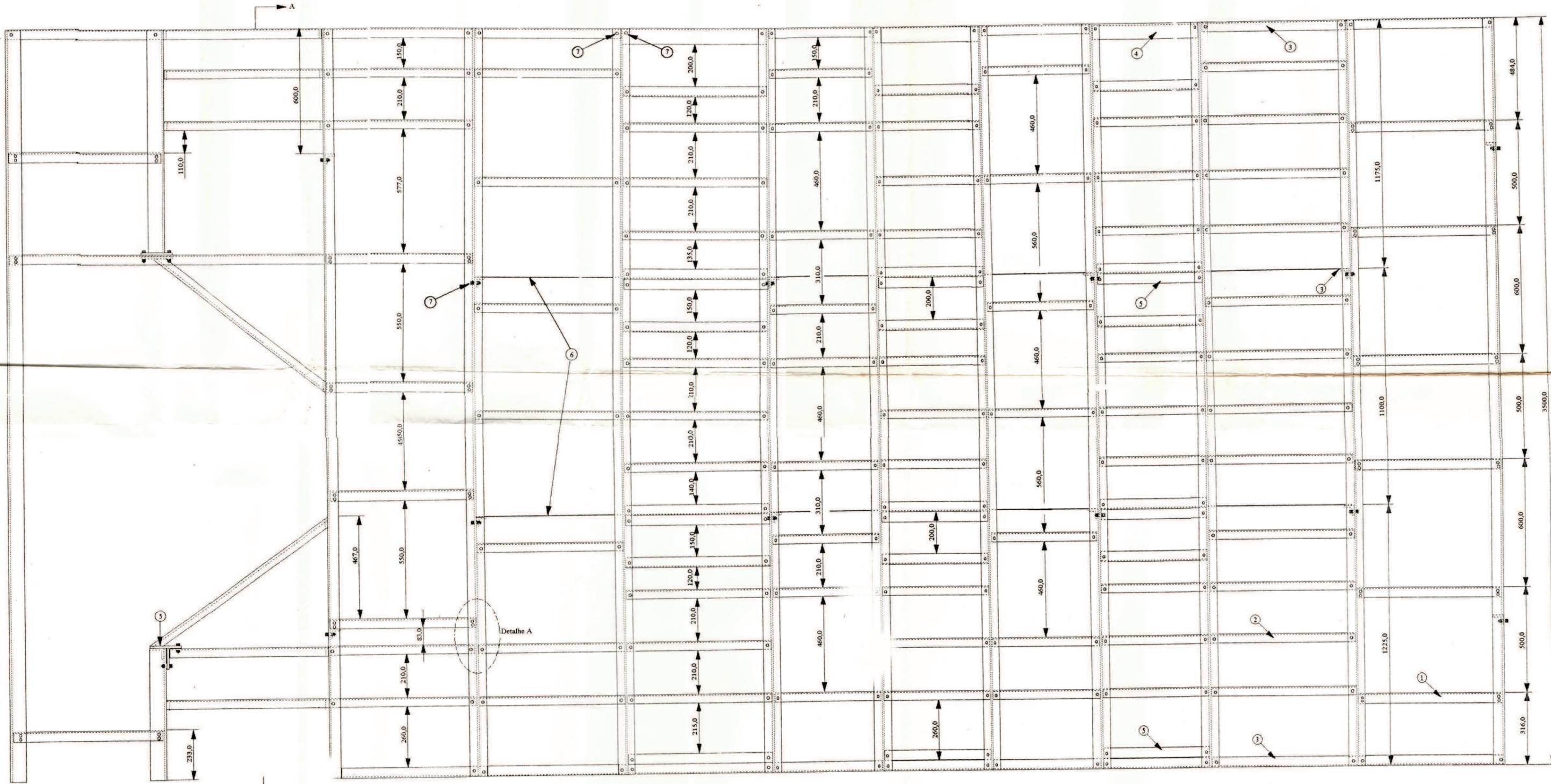
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 10

TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:  
SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

TÍTULO DA PEÇA:  
VISTA EM SEPARADO DAS ESTEIRAS TRANSPORTADORAS

DESENHO  
E 6



7	Parafuso sextavado, rosca grossa com porca e arruela	Aço SAE 1020	VV	M 8 x 45
6	Chapa metálica	Zinco	—	USSG bitola N° 20
5	Barra chata	Aço inoxidável AISI 304	~	1/2" x 2"
4	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 80 x 40 x 8
3	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 50 x 50 x 7
2	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 80 x 80 x 8
1	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 100 x 50 x 8
N°	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

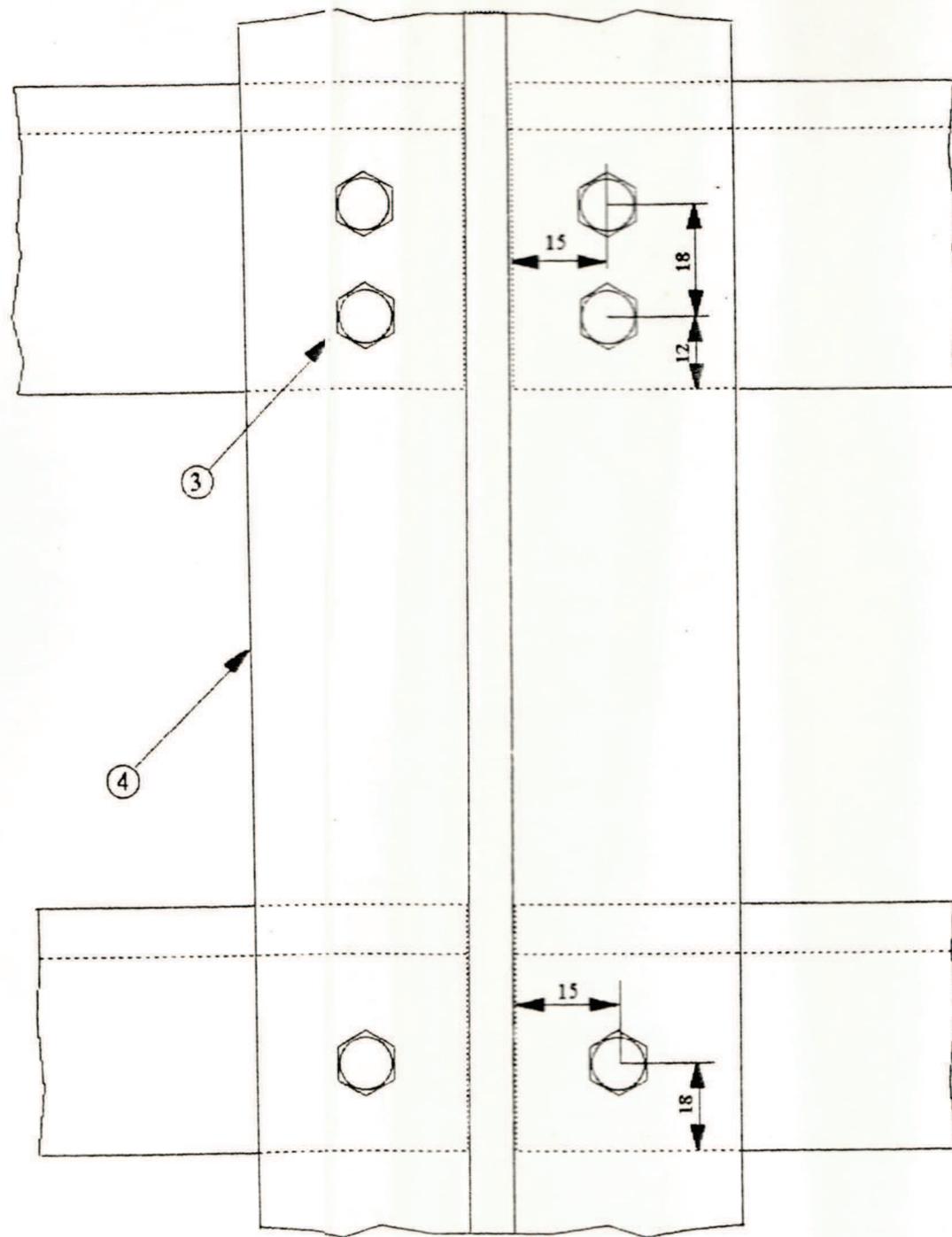
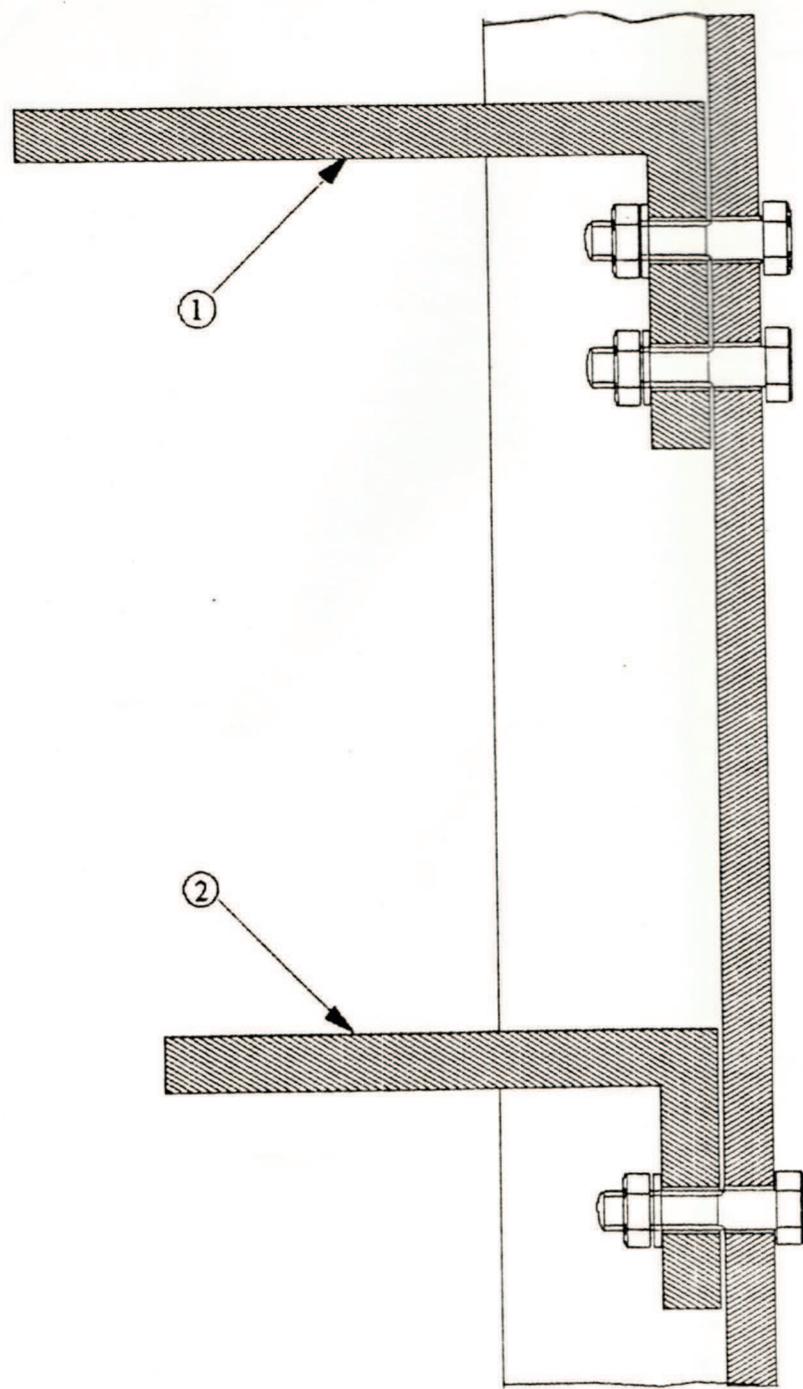
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 10

TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:  
SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

TÍTULO DA PEÇA:  
VISTA LATERAL DA ESTRUTURA METÁLICA

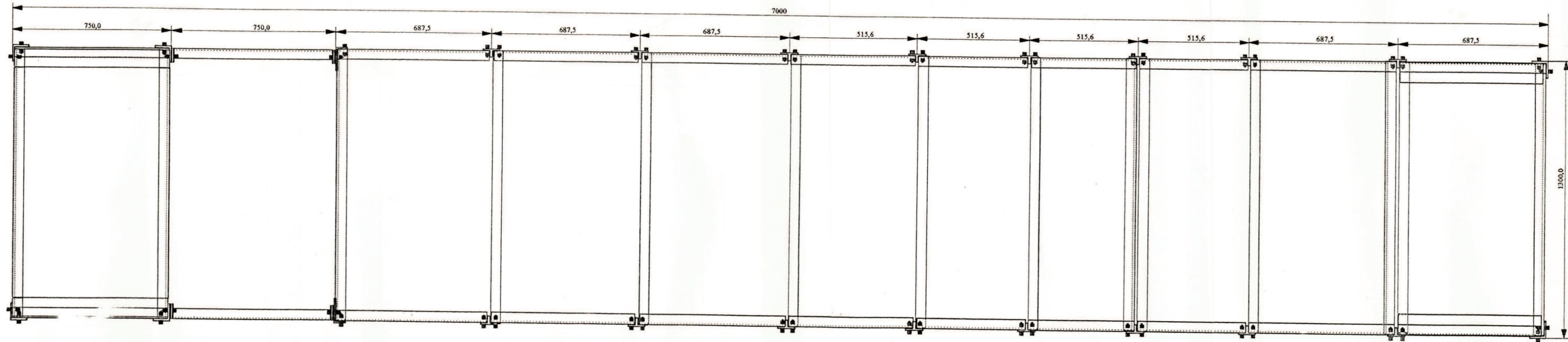
DESENHO  
E 7



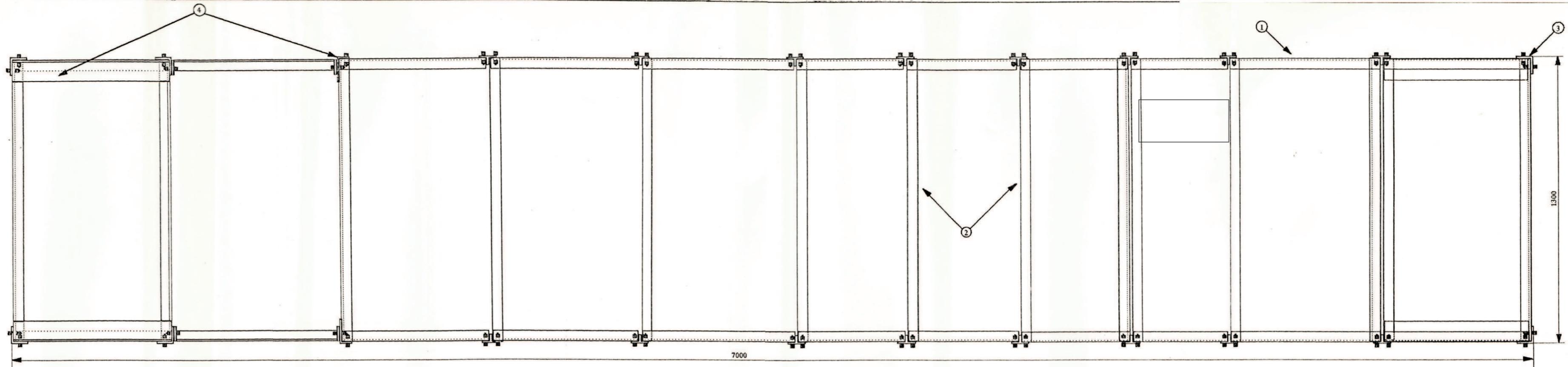
4	Perfil T	Aço inoxidável AISI 304	~	T 80 x 40 x 7
3	Parafuso sextavado, rosca grossa com porca e arruela	Aço SAE 4140	∇∇	M 5 x 25
2	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 80 x 40 x 8
1	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 100 x 50 x 8
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 1	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 8
	TÍTULO DA PEÇA: DETALHE DA VISTA LATERAL DA ESTRUTURA METÁLICA	



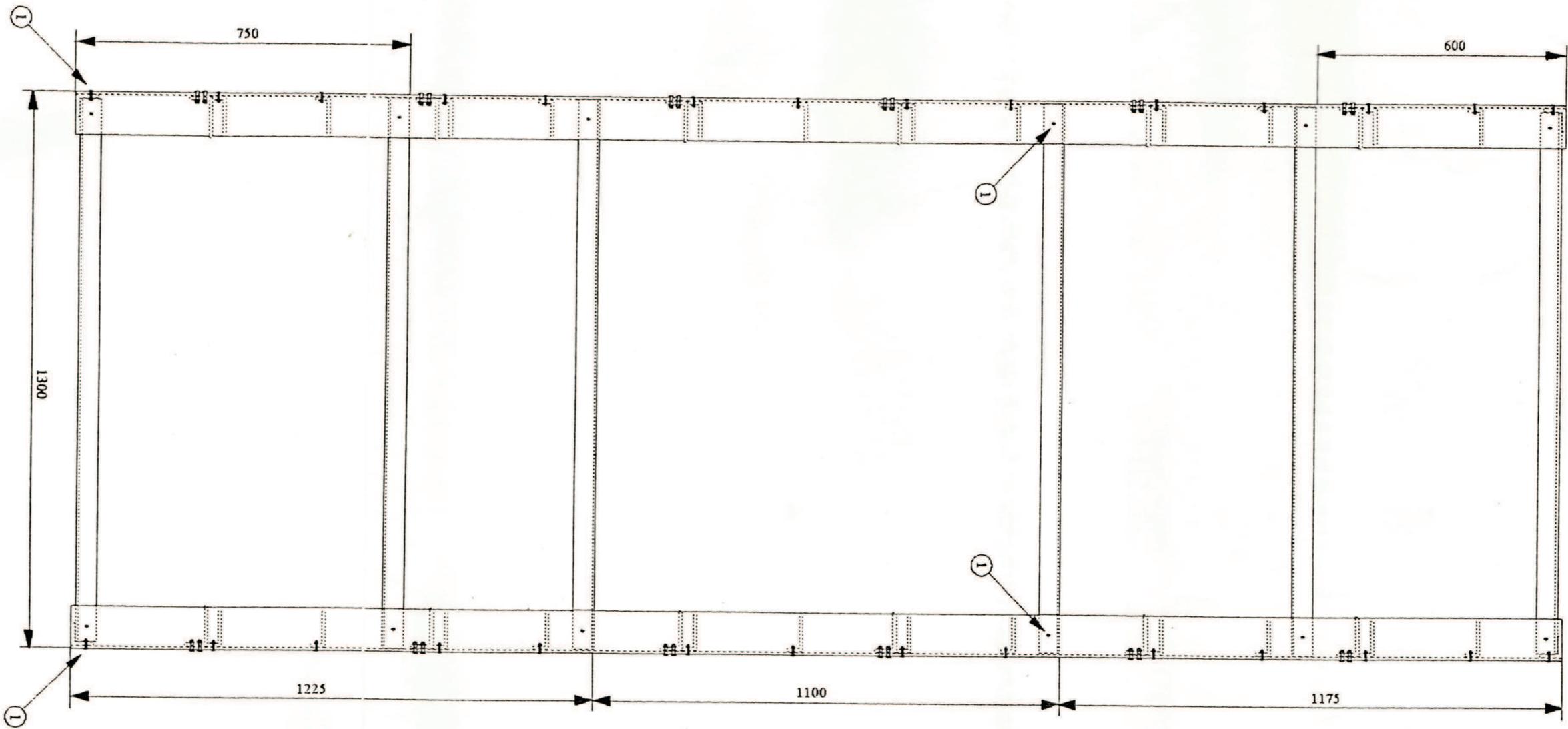
1	Perfil T	Aço inoxidável AISI 304	~	T 80 x 40 x 7
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA- SEDA				
ESCALA: 1 : 10	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA TÍTULO DA PEÇA: VISTA SUPERIOR DA ESTRUTURA METÁLICA			DESENHO E 9



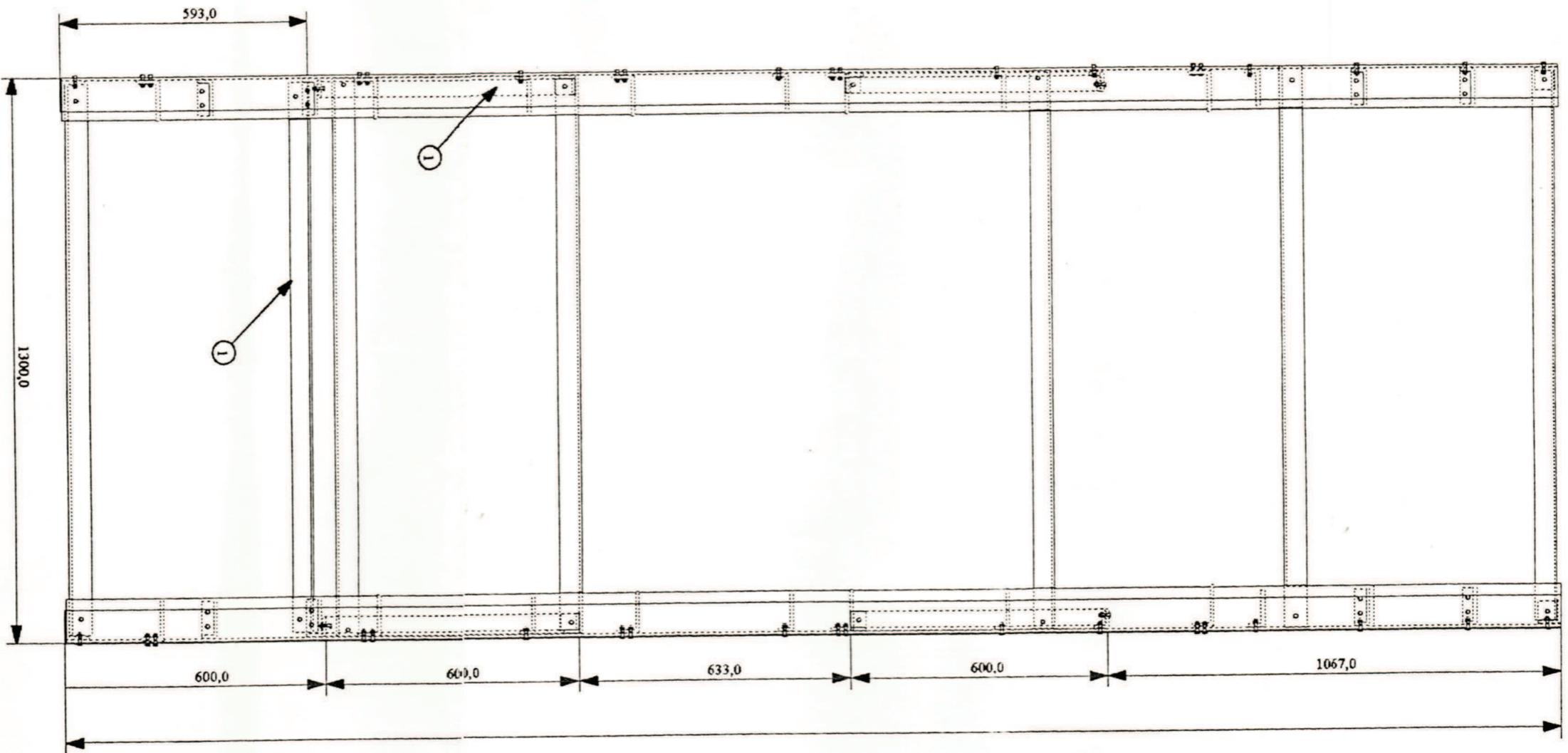
4	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 100 x 50 x 8
3	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 80 x 80 x 8
2	Barra chata	Aço inoxidável AISI 304	~	1/4" x 2"
1	Perfil L	Aço inoxidável AISI 304	~	L 50 x 50 x 7
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

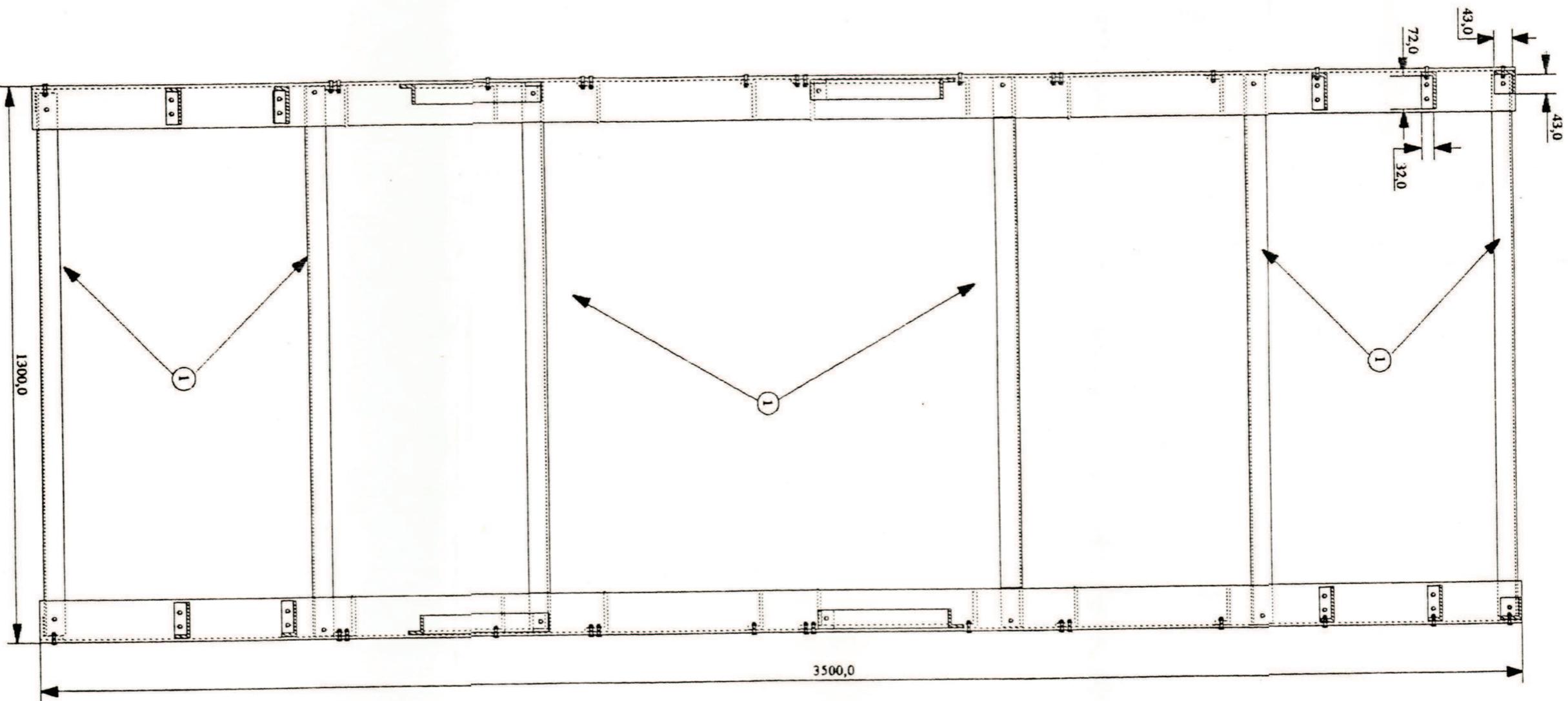
ESCALA: 1 : 10	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 10
	TÍTULO DA PEÇA: VISTA INFERIOR DA ESTRUTURA METÁLICA	



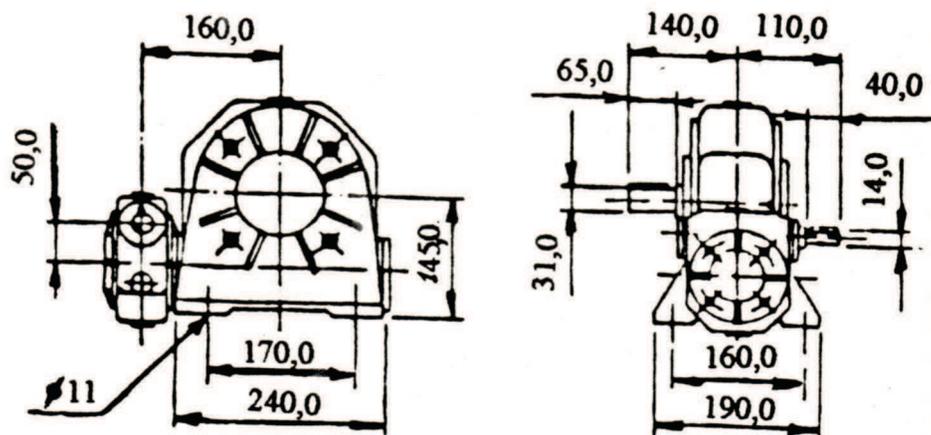
1	Parafuso sextavado, rosca grossa com porca e arruela	Aço SAE 1020	VV	M 8 x 45
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
TÍTULO DA PEÇA: VISTA DE PERFIL DIREITA DA ESTRUTURA METÁLICA				
ESCALA: 1 : 10				DESENHO E 11



1	Perfil L	Aço inoxidável		L 50 x 50 x 7
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:				
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
SEDA				
TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:				
SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
TÍTULO DA PEÇA:				
VISTA DE PERFIL ESQUERDA DA ESTRUTURA METÁLICA				
ESCALA: 1 : 10				DESENHO E 12



1	Perfil L	Aço inoxidável		L 50 x 50 x 7
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
TÍTULO DA PEÇA: CORTE AA DA ESTRUTURA METÁLICA				
ESCALA: 1 : 10				DESENHO E 13



**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**  
**ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

**ESCALA:**

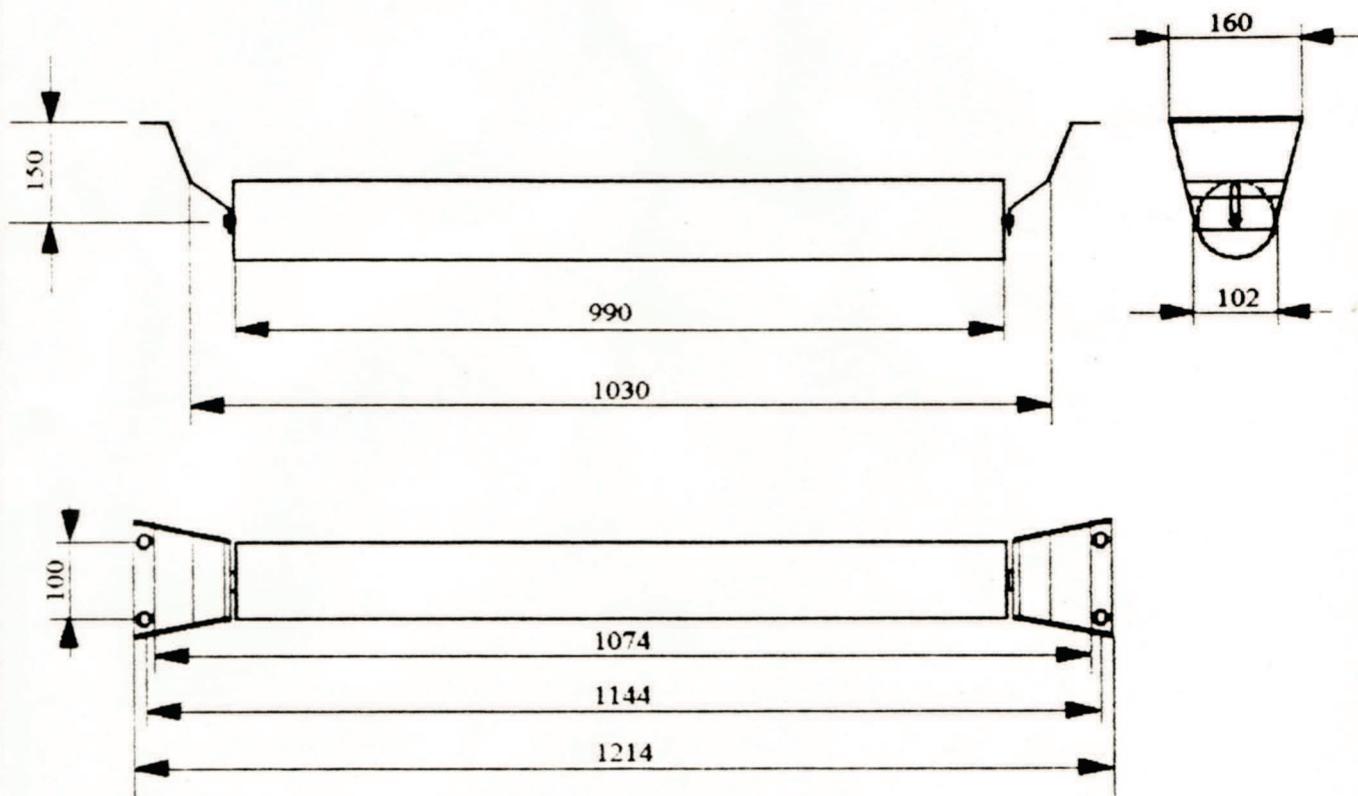
**TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:**  
**SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA**

**TÍTULO DA PEÇA:**

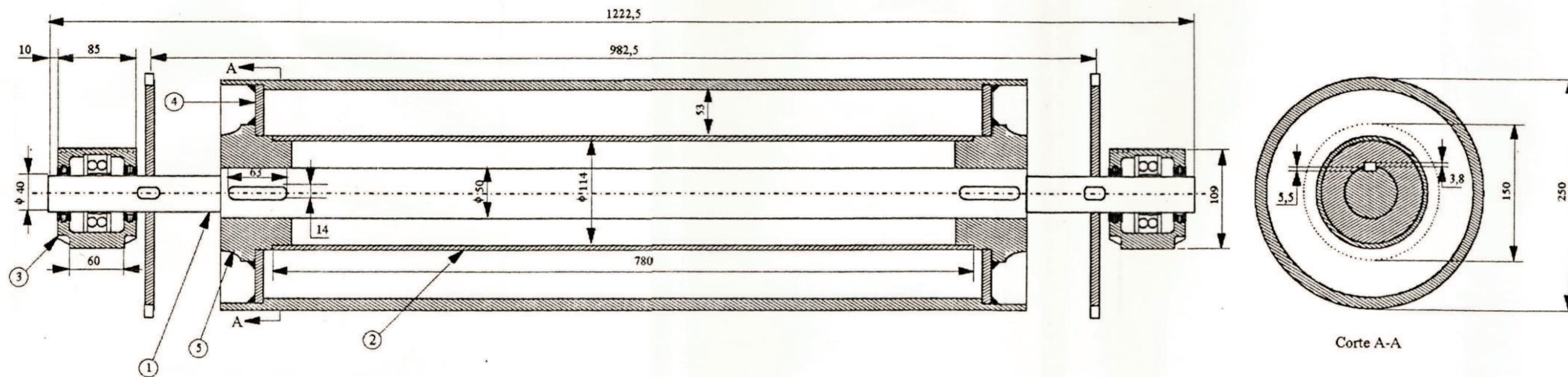
**REDUTOR DE VELOCIDADE A COROA E ROSCA SEM FIM (Duplex)**

**DESENHO**

**E 14**



Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO
1	Rolete 2024 A/CEMA B4	Aço carbono	VVV	1214 x 160
<b>TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:</b> ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA				
ESCALA: 1 : 10	<b>TÍTULO DO CONJUNTO GERAL:</b> SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA			DESENHO E 15
	<b>TÍTULO DA PEÇA:</b> ROLETE DE CARGA E RETORNO			

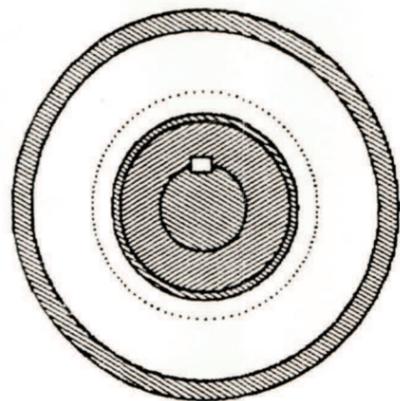
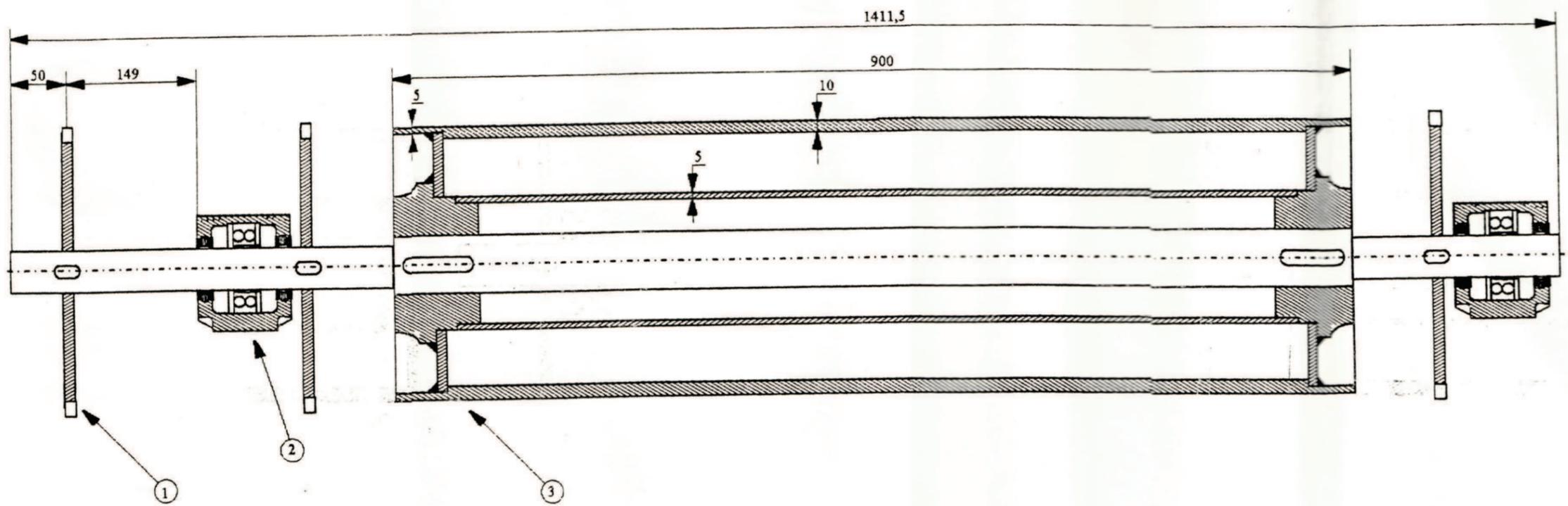


Corte A-A

5	Cubo	Aço SAE 1045	VV	∅ 150 x 80
4	Disco lateral	Aço SAE 1020	VV	∅ 240 x 20
3	Caixa para rolamento SNH 509	Ferro fundido	~	109 x 85
2	Tubo	Aço galvanizado (DIN) 2441	VV	∅ 124 x 780
1	Eixo	Aço SAE 4340	VVV	∅ 50 x 1222,5
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 4	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 16
	TÍTULO DA PEÇA: CORTE LONGITUDINAL DO TAMBOR DE RETORNO	



3	Roda dentada	Aço SAE 1045	VVV	φ 261 x 15
2	Rolamento auto compensador de esferas 2209 EK com bucha de fixação H 309	—	—	φ 40
1	Tambor	Aço SAE 1020	VV	φ 250 x 900
Nº	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	ACABAMENTO	DIMENSÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:  
ESTUDO DA SECAGEM E DIMENSIONAMENTO DE SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA

ESCALA: 1 : 4	TÍTULO DO CONJUNTO GERAL: SECADOR DE CASULOS DO BICHO-DA-SEDA	DESENHO E 17
	TÍTULO DA PEÇA: CORTE LONGITUDINAL DO TAMBOR DE ACIONAMENTO	