



UNICAMP

PREVISÃO DA DETERIORAÇÃO DO CAFÉ DURANTE A PRÉ-SECAGEM EM BARCAÇAS POR CONVECÇÃO FORÇADA COM AUXÍLIO DE COLETORES SOLARES

ANTONIO RENE ITURRA QUILAQUEO

(Engenheiro Agrônomo)

Prof. Orientador :

Dr. LUIS GABRIEL VILLA

TESE APRESENTADA PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MAGISTER SCIENTIAE EM
ENGENHARIA DE ALIMENTOS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

- 1979 -

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

A Erica, a grande amiga e companheira de minha vida

A Rodrigo Antonio e Taysa Renatte, meus filhos

A meus queridos pais e irmãos

DEDICO COM AMOR

AGRADECIMENTOS

Faço-me um sentido dever agradecer sinceramente:

Ao Prof.Dr. LUIS GABRIEL VILLA pela sua eficiente orientação, amizade e estímulo na execução deste trabalho;

A Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP e de modo especial aos Departamentos de Engenharia Agrícola e de Alimentos pelas facilidades oferecidas para a execução do presente trabalho;

A Divisão de Cooperação Intelectual do Ministério das Relações Exteriores do Brasil, na pessoa do Sr. Carlos Alberto Leite Barbosa, pela oportunidade que me deu para vir a este grande país;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido;

A Prof.Dra. Ruth Garrutti e sua equipe do Laboratório de Análise Sensorial de Alimentos pela colaboração dispensada; e a Dra. Jara Tosello pela sua assistência na análise dos resultados estatísticos da prova de "xícaras";

Aos amigos Angelo Bacchi e Ricardo Dahab pela sua colaboração desinteressada no manejo do terminal de computador;

Ao Eng^o Denis Cantú pela sua colaboração na execução dos gráficos;

Aos colegas de Pós-Graduação da FEAA/UNICAMP pela oportunidade de ter-lhes conhecido;

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do presente trabalho.

CONTEÚDO

ÍNDICE DE QUADROS	I
ÍNDICE DE ESQUEMAS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE GRÁFICOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	V
SIMBOLOGIA	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 Características do fruto do cafeeiro	6
3.2 Matéria prima para a secagem	7
3.3 Secagem do Café	8
3.3.1 Secagem Solar por Convecção Natural	9
3.3.2 Secagem Artificial	11
3.3.2.1 Secagem em Camadas Espessas por Convecção Forçada e Ar Aquecido com Auxílio de Coletores Solares	13
3.4 Simulação Matemática da Secagem	16
3.4.1 Parâmetros de Secagem do Café	19
3.4.1.1 Equilíbrio de Umidade	19
3.4.1.2 Curvas de Secagem em Camada Delgada	20
3.4.1.3 Calor Latente de Vaporização	20
3.4.1.4 Calor Específico	21
3.4.2 Prova do Modelo de Secagem	21

3.5	Qualidade do Café	22
3.5.1	Fatores que afetam a qualidade antes da Colheita .	24
3.5.2	Fatores que afetam a Qualidade co Café pós-colheita	25
3.5.2.1	Efeito da Microflora	26
3.6	Simulação Matemática de Deterioração	29
3.7	Otimização do Processo de Secagem	30
4.	MATERIAL E MÉTODO	32
4.1	Materiais	32
4.1.1	Matéria Prima	32
4.1.2	Equipamentos	32
4.2	Método	36
4.2.1	Desenvolvimento dos Modelos Matemáticos de Deterio- ração	36
4.2.1.1	Testes de Deterioração baseados na qualidade da be- bida	36
4.2.1.2	Testes de Deterioração baseados na Aparição de Fun- gos	40
4.2.2	Prova do Modelo Matemático de Deterioração	43
4.2.3	Determinação de Vazões Ótimas	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	Modelo Matemático de Deterioração	48
5.1.1	Deterioração da Qualidade da Bebida	48
5.1.2	Deterioração do Café pela Atividade Fúngica . . .	50
5.2	Comprovação do Modelo Matemático	62
5.3	Determinação de Vazões Ótimas	65
5.4	Análise de Custo de um Sistema de Pré-secagem em Barcaça	76

6.	CONCLUSÕES	79
7.	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	81
	BIBLIOGRAFIA	82
	ANEXO 1	88

I ÍNDICE DE QUADROS

- Quadro nº 1 - Grau de contaminação do café em fruto.
- Quadro nº 2 - Tempo de permanência do café no chão, nº de microorganismos no interior dos grãos e sua influência na qualidade da bebida.
- Quadro nº 3 - Cronograma de retirada das amostras de café dos baldes (hr).
- Quadro nº 4 - Tempo necessário para mudar a qualidade da bebida do café a diferentes condições de temperatura e umidade dos grãos.
- Quadro nº 5 - Comparação de resultados experimentais e simulados do ID nas camadas inferior, média e superior, durante a pré-secagem de café em barcaça.
- Quadro nº 6 - Análise de custo de uma barcaça pré-secadora de café na região de Campinas, quando se utiliza alta vazão e baixa temperatura (alternativa 1) e quando se utiliza uma baixa vazão e alta temperatura (alternativa 2).

II ÍNDICE DE ESQUEMAS

- Esquema 1 - Esquema de secagem de uma camada delgada, segundo - Thompson et al (35).

III ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 - Anatomia do grão cereja.
- Figura 2 - Resultados comparativos de secagem experimental de café e de simulação matemática obtidos por Villa et al (43).
- Figura 3 - Secagem de café num sistema barcaça-silo armazenador segundo Dorfman et al (14).
- Figura 4 - Esquema de balde usado nos testes de deterioração da qualidade da bebida.
- Figura 5 - Caixa e peneira de controle de umidade.
- Figura 6 - Esquema de disposição dos elementos da barcaça solar.
- Figura 7 - Corte transversal da barcaça.

IV ÍNDICE DE GRÁFICOS

- Gráfico nº 1 - Temperaturas ambientais e de saída do coletor solar durante a secagem de café em barcaça.
- Gráfico nº 2 - Umidade relativa ambiental e de saída do coletor solar durante a secagem de café em barcaça.
- Gráfico nº 3 - Crescimento de fungos em café cereja mantido a diversos teores de umidade e diversas temperaturas.
- Gráfico nº 4 - Crescimento de fungos na condição padrão (46.42% de umidade e 35°C).
- Gráfico nº 5 - Previsão do Multiplicador de temperatura (M_t).
- Gráfico nº 6 - Previsão do Multiplicador de umidade (M_u).

- Gráfico nº 7 - Crescimento de fungos em café mantido a 34.18% de umidade e à 25, 35 e 40°C.
- Gráfico nº 8 - Crescimento de fungos em café mantido a 46.42% de umidade e à 25, 35 e 40°C.
- Gráfico nº 9 - Crescimento de fungos em café mantido a 71.89% de umidade e à 25, 35 e 40°C.
- Gráfico nº10 - Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº11 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 50% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº12 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 100% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº13 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº14 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 50% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº15 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 100% de crescimento de fungos.
- Gráfico nº16 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de - café com umidade inicial de 70% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.

Gráfico nº17 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de café com umidade inicial de 70% e critérios de deterioração de 50% de crescimento de fungos.

Gráfico nº18 - Vazões ótimas necessárias para a pré-secagem de café com umidade inicial de 70% e critérios de deterioração de 100% de crescimento de fungos.

V RESUMO

A pré-secagem de café relaciona-se estreitamente com a qualidade do produto final, devido principalmente a que a alta umidade ao momento da colheita (60 a 70%, bu) é motivo de uma deterioração acelerada da qualidade.

Neste trabalho determinou-se quantitativamente o efeito das variáveis da secagem: temperatura e umidade dos grãos e tempo de secagem, sobre o desenvolvimento dos fungos e sobre a qualidade da bebida do café, tipo cereja, variedade Mundo Novo. Na base de dados experimentais elaborou-se um modelo matemático para simular a deterioração que os grãos de café possam experimentar durante a secagem nas faixas de umidade do grão entre 70 e 35%; determinou-se também as vazões mínimas para a pré-secagem de café em barcaça solar, sob diferentes condições, na faixa de temperaturas entre 35 e 45°C.

O modelo matemático obtido constitui-se das seguintes equações de natureza empírica:

$$ID = 0.609531291 + T_{eq} (0.03377596711 + T_{eq} (-7.864053089 \times 10^{-4} + 3.689236118 \times 10^{-6} T_{eq})) \quad \text{para } 33 < T_{eq} < 88$$

sendo que

$$ID = 1.0 \quad \text{para} \quad T_{eq} \leq 33$$
$$ID = 0.0 \quad \text{para} \quad T_{eq} > 88$$

onde:

ID = Índice de Deterioração (1.0 significa ausência total de fungos).

T_{eq} = Tempo equivalente, em hr = $T/M_u M_t$

$$M_u = \frac{1}{-1.4508 + 0.053 U} \quad \text{quando } U \geq 35\%$$

$$M_u = \frac{1}{0.01157 U^{0.5}} \quad \text{quando } U \leq 35\%$$

$$M_t = 1 + (0.161338 - 0.0471542 \ln U + 0.0000707818 U^{1.59736}) (35 - t) \\ \text{quando } t < 35^\circ\text{C}$$

$$M_t = 1 + (0.70415 - 0.151624 \ln U - 0.00754948 U^{0.00342189}) (t - 35) \\ \text{quando } t > 35^\circ\text{C}$$

Este modelo foi testado na pré-secagem de 33 kg de café fresco numa barcaça provida de um coletor solar para o aquecimento do ar, e de um ventilador centrífugo para movimentar o ar de secagem através do produto. Durante a pré-secagem determinou-se por simulação, a cada hora, as condições de umidade e temperatura do produto, empregando-se uma adaptação do modelo de Thompson et al (1968); e o grau de deterioração do produto durante a secagem foi medido experimentalmente e calculado com o modelo desenvolvido. Boa previsão dos resultados experimentais pelo modelo foi observada.

Com o modelo obtido determinou-se também as vazões mínimas de ar a serem utilizadas na pré-secagem de café, com teores de umidade iniciais de 70, 60 e 50%, para diferentes condições de ar de secagem. Três critérios de deteriora-

ção destes fenômenos.

A secagem de café no Brasil é feita em terreiros de cimento, tijolo ou chão batido, mediante sua exposição direta ao sol e, porém, utilizando as condições naturais; ou por meio de secadores mecânicos que criam condições artificiais, aquecendo o ar por queima de lenha ou de combustíveis fósseis.

A escolha do método de secagem depende de uma série de fatores, como são: 1) o nível tecnológico do agricultor; 2) disponibilidade de mão-de-obra; 3) volume de produção; 4) área para a construção do secador; 5) clima da região, etc.

Na secagem em terreiro o produto fica exposto às condições ambientais, as que podem se apresentar desfavoráveis na época de colheita, demorando excessivamente o tempo de secagem e causando a diminuição da qualidade original dos grãos; e apresenta altos custos devido a sua grande demanda de mão-de-obra e a necessidade de se dispor de uma extensa área para sua construção.

Na secagem artificial de café se observa que os secadores mecânicos atualmente utilizados, não foram projetados para as características desses grãos, uma vez que a maioria são adaptações de protótipos desenvolvidos inicialmente para a secagem de cereais e oleaginosas de baixa umidade inicial (18 a 25%). Estes secadores, de alto custo de investimento e grande consumo de combustíveis fósseis, apresentam um rendimento térmico (definido como a relação de energia real utilizada para evaporar a água com relação a energia fornecida pelo combustível) de no máximo 30% (14).

ABSTRACT

Drying of coffee beans in a two stage system is been considered to have a lot of potential. During the first stage the moisture content of the bean is reduced from 60-70% to 35%. In the second stage the product is dried to 12%.

The time and drying conditions during the first stage are closely related with the quality of the final product, due to the rapid deterioration met occurs at high bean moisture contents.

In the present research work the effect on quality of temperature, moisture content of the coffee and time during the first stage of drying was studied. A mathematical model was developed to predict the mold growth as a function of the drying variables.

The model obtained, of empirical nature, was the following:

$$ID = 0.609531291 + T_{eq} (0.03377596711 + T_{eq} (-7.864053089 \times 10^{-4} + 3.689236118 \times 10^{-6} T_{eq})) \quad \text{for } 33 \text{ hrs} < T_{eq} < 88 \text{ hrs.}$$

$$ID = 1.0 \quad \text{for } T_{eq} < 33 \text{ hr.}$$

$$ID = 0.0 \quad \text{for } T_{eq} > 88 \text{ hr.}$$

where:

ID = Model Index

ID = 1.0 means no mold growth

ID = 0.0 means 100% of the beams with mold growth

T_{eq} = Equivalent drying time, hr = $\frac{T}{M_u M_t}$

M_u = $\frac{1}{-1.4508+0.053 U}$ when $U \geq 35\%$

M_u = $\frac{11}{0.01157 U^{0.5}}$ when $U \geq 35\%$

M_t = $1+(0.161338-0.0471542 \ln U+0.0000707818 U^{1.59736})(35-t)$
when $t < 35^\circ\text{C}$

M_t = $1+(0.70415-0.151624 \ln U-0.00754948 U^{0.00342189})(t-35)$
when $t > 35^\circ\text{C}$

The model was tested comparing simulated and experimental mold index results. 33 kilograms were dried in a "barcaça" solar drying system in order to get the experimental data. Good agreement between predicted and experimental values was observed.

Using those results a set of graphs for predicting minimum airflows during the first stage of "barcaça" drying were developed by simulation. With those graphs it is possible to study the influence of each drying variable during the process and also to develop economical analysis in order to optimize the cost of the different elements of the system.

SIMBOLOGIA

a	Área específica do produto, m ² /m ³
c	Calor Específico, kcal/kg °C
G _a	Vazão de Ar Seco, kg/hr m ²
H	Umidade Absoluta do Ar, kg de vapor/kg de ar seco
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção, kcal/m ² °C
H _{fg}	Calor Latente de Vaporização, kcal/kg
M	Teor de Umidade Média do Grão, base seca, decimal
M _e	Teor de Umidade de Equilíbrio, base seca, decimal
M _o	Teor de Umidade Inicial, base seca, decimal
m, n, q	Parâmetros da Equação de Camada Delgada
p ₁ a p ₉	Parâmetros da Equação de Umidade de Equilíbrio
P _v	Pressão de vapor da água, kg/m ²
P _{vs}	Pressão de saturação do vapor da água, kg/m ²
R	Umidade Relativa, %
t	Tempo de Secagem, hr
Δt	Intervalo de Tempo, hr
T	Temperatura de Bulbo Seco, °C
T _g	Temperatura do Produto, °C
L	Calor Latente de Vaporização, kcal/kg
C _p	Calor Específico, kcal/kg °C

1. INTRODUÇÃO

Brasil é o maior produtor e exportador de café no mundo. Na safra de 1976, segundo estimações do Instituto Brasileiro do Café, se colheram 21.0 milhões de sacas, de uma produção mundial estimada em 52.6 milhões de sacas (9).

O café teve participação em 34.7% das exportações brasileiras no primeiro semestre de 1977, correspondendo a US\$ 2.148.732 (FOB), mantendo-se na primeira posição das exportações (16). Esta participação se prevê ainda maior em razão da existência de planos governamentais para aumentar a produção, os que contemplam renovar e revigorar os cafezais, para atingir, até 1980, um parque de 3 milhões de pés e uma produção de 28 milhões de sacas (15).

A qualidade do café é de grande importância no mercado exportador, e essa qualidade está, sem dúvida, relacionada estreitamente à eficiência do processo da secagem do produto. Para o café este é um assunto de particular importância, devido a sua alta umidade ao momento da colheita (60 a 70%, bu)⁽¹⁾, fato que facilita o desenvolvimento de mofo na superfície dos grãos, o aumento do índice de respiração da temperatura e posteriormente a fermentação da massa de grãos. A rápida perda de água provocada por uma rápida secagem, não permite a manifesta-

(1) As umidades são dadas em base úmida, salvo especificação em contrário.

ção destes fenômenos.

A secagem de café no Brasil é feita em terreiros de cimento, tijolo ou chão batido, mediante sua exposição direta ao sol e, porém, utilizando as condições naturais; ou por meio de secadores mecânicos que criam condições artificiais, aquecendo o ar por queima de lenha ou de combustíveis fósseis.

A escolha do método de secagem depende de uma série de fatores, como são: 1) o nível tecnológico do agricultor; 2) disponibilidade de mão-de-obra; 3) volume de produção; 4) área para a construção do secador; 5) clima da região, etc.

Na secagem em terreiro o produto fica exposto às condições ambientais, as que podem se apresentar desfavoráveis na época de colheita, demorando excessivamente o tempo de secagem e causando a diminuição da qualidade original dos grãos; e apresenta altos custos devido a sua grande demanda de mão-de-obra e a necessidade de se dispor de uma extensa área para sua construção.

Na secagem artificial de café se observa que os secadores mecânicos atualmente utilizados, não foram projetados para as características desses grãos, uma vez que a maioria são adaptações de protótipos desenvolvidos inicialmente para a secagem de cereais e oleaginosas de baixa umidade inicial (18 a 25%). Estes secadores, de alto custo de investimento e grande consumo de combustíveis fósseis, apresentam um rendimento térmico (definido como a relação de energia real utilizada para evaporar a água com relação a energia fornecida pelo combustível) de no máximo 30% (14).

Consequentemente, as pesquisas mais recentes desenvolvidas na UNICAMP, têm objetivado a procura de outras alternativas de secagem que combinem a economia em energia e a redução da área do terreiro. Nesta base, o melhor aproveitamento da energia solar, junto com o uso da ventilação forçada, torna-se uma boa alternativa para a secagem de grãos de café, quer a nível industrial como a nível de fazenda.

Além das vantagens enunciadas, a considerável maior deterioração que o café sofre ao início da secagem por estar o produto a alta umidade, levam a pensar que um sistema de secagem em dois estágios, barcaça e silo, pode ser economicamente interessante. Durante o primeiro estágio (barcaça) o café é seco mais rapidamente (usando alta vazão e temperatura relativamente alta). No estágio final (silo) o produto termina sua secagem lentamente e é armazenado.

No desenvolvimento das pesquisas sobre a utilização do sistema de barcaça-silo na secagem de café, tem-se achado que por cada $5m^2$ de terreiro precisa-se de $1m^2$ de área para o sistema barcaça-coletor solar e, no aspecto econômico, usando-se o complexo barcaça-silo, estima-se uma poupança de 480 litros de óleo por tonelada de café beneficiado (30). Assumindo que o 50% da produção brasileira fosse secada mecanicamente e desta só o 50% em barcaça-silo, poupar-se-ia ao redor de 150.000.000 de litros de óleo por ano.

Para otimizar o tamanho do ventilador, coletor solar e espessura da camada na barcaça e no silo, deve-se conhecer o efeito das variáveis da secagem: temperatura, umidade dos

grãos e tempo de secagem, sobre o desenvolvimento da microflora e sobre a qualidade da bebida; informação não obtida até o presente. Este desconhecimento vem limitando o uso das pesquisas que sobre a quantificação da secagem foram desenvolvidas (14, 40, 42 e 43), o que justifica a necessidade de estudos sobre estes aspectos.

No presente trabalho visa-se quantificar a deterioração sofrida pelo café durante a secagem nas faixas de umidade dos grãos entre 70 e 35%, e sua aplicação na otimização da barcaça, ventilador e coletor solar, usados como um sistema de pré-secagem.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho resumem-se em:

1. Desenvolver um modelo matemático de previsão da deteriora
ção da qualidade do café durante sua pré-secagem, na faixa
de umidades do grão entre 70 e 35%.
2. Provar o modelo matemático de deterioração sob condições
de pré-secagem solar de café em barçaça, com convecção for-
çada do ar.
3. Determinar as vazões mínimas para a pré-secagem de café em
barçaça solar, sob diferentes condições, na faixa de tempe-
raturas entre 35 e 45°C.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Características dos frutos do cafeeiro

Café é o fruto das plantas do gênero Coffea. As espécies C. arabica e C. canephora são as de maior interesse econômico, constituindo, respectivamente, 70% e 30% da produção mundial exportável do café (21).

Os frutos de café na árvore amadurecem desuniformemente, devido a floradas em épocas diferentes, o que as vezes é fator decisivo na escolha do método de colheita (19 e 21).

A colheita dos grãos no Brasil é feita normalmente por "derrixa manual", já seja no chão ou em paradores de pano e bambu, de tal sorte que a colheita se constitui de uma mistura de tipos diferentes, que recebem as seguintes denominações, por ordem de desenvolvimento fisiológico e de seca na árvore (11):

- a. Verde: é o grão imaturo, com 55 a 70% de umidade
- b. Cereja: grão imaturo, com 55 a 70% de umidade
- c. Passa: grão semi-seco, com 35 a 55% de umidade
- d. Boia: grão semi-seco, com 25 a 35% de umidade
- e. Coquinho: grão semi-seco, com 25% ou menos de umidade.

A porcentagem de cada tipo de grãos nos lotes colhidos varia a medida que os grãos verdes vão se tornando maduros (cereja) e os cerejas se tornando semi-secos (passa). Assim, o produto e seu teor de umidade inicial médio variam durante o

período de colheita (21 e 36).

Segundo Carvalho (11) o fruto do cafeeiro apresenta a seguinte constituição (Fig. 1):

1. Casca (epicarpo)
2. Polpa, mucilagem ou mel de café (mesocarpo)
3. Pergaminho
4. Semente - endosperma e embrião

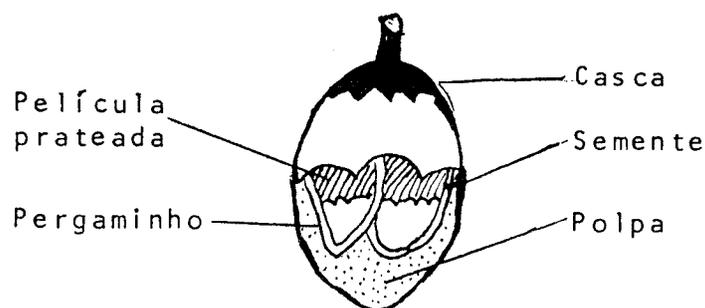


FIG. 1 Anatomia do grão cereja

Dentro do grão maduro a água se distribue com bastante desuniformidade. Segundo Barbosa et al (5), a distribuição de água no grão é aproximadamente a seguinte: Casca: 20 a 25%; mucilagem: 76 a 90% e grão com pergaminho e película prateada: 48 a 49%.

3.2. Matéria prima para a secagem

No Brasil e no Continente Americano em geral, cultivava-se principalmente a espécie C. arabica. No contexto nacional a espécie C. canephora, conhecida como "café robusta", é

cultivada em pequena escala, apresentando interesse a indústria do café solúvel (21).

De maior significação econômica, por produzirem café de aroma e valor mais apreciados no mundo inteiro, recomendam-se as variedades de C. Arabica "mundo novo" e "catuaí amarelo e vermelho" (21).

De maneira geral, dois tipos de matéria prima podem ser utilizados para a secagem (40):

a) Café preparado por "via úmida", no qual o café cereja é despulpado e lavado, retirando-se a casca e a polpa, e a semente é seca envolta apenas no pergaminho, Sua denominação se deve a grande utilização de água para sua preparação.

b) Café preparado por "via seca". Neste processo os grãos colhidos vão diretamente para a secagem, com todas as suas partes constituintes.

A maior parte dos produtores brasileiros seca o café como fruto integral (por via seca), pelo qual o nosso trabalho foi conduzido com este tipo de matéria prima.

3.3. Secagem do café

A secagem é uma das fases de maior importância na obtenção de um produto de boa qualidade. Ela pode ser natural, quando feita em terreiro, ou artificial, quando realizada em secadores com calor proveniente de madeira, óleo diesel ou gás liquefeito (3,6,11,19,21,36 e 42); e por convecção forçada de ar aquecido por coletores solares (34,35,37,39,41 e 43).

A secagem do café é, comparativamente, mais difícil que a de outros grãos, porque a umidade inicial é bastante alta (50 a 70%) e, conseqüentemente, a velocidade de deterioração em sua primeira fase é maior (40,42 e 43).

Qualquer que seja o método de secagem a utilizar, a CATI (19) sublinha a necessidade de observar alguns pontos importantes para se obter êxito:

- a) Evitar fermentação durante a secagem;
- b. Evitar excesso de temperatura. O café, segundo Sivetz e Foote, citado em (40), tolera ao redor de 40°C por um ou dois dias, 50°C por poucas horas e 60°C por menos de uma hora sem se danificar;
- c. Secar os grãos no menor tempo possível até 18-20% de umidade;
- d. Procurar obter um produto que, após o beneficiamento, se apresente uniforme quanto a cor.

3.3.1. Secagem solar por convecção natural

É o processo onde o café é colocado em terreiros, e a secagem é feita pela ação de calor do sol e do vento, associada com movimentação constante dos frutos a fim de que a secagem seja uniforme e perfeita (3,6,19 e 36).

No Brasil a secagem natural de café consiste em esparramar os grãos integrais em terreiros de tijolos, cimento ou chão batido, onde é submetido a reviragem periódicas para uniformizar a exposição dos grãos aos raios solares (19). É um método rústico e o produto fica muitas vezes exposto a condi

ções desfavoráveis que depreciam sua qualidade, por favorecer o desenvolvimento de fungos e fermentações microbiológicas (42).

A secagem em terreiros é o método tradicional, de uso generalizado por grande parcela de produtores brasileiros, baseado no uso da energia solar gratuita, mas que apresenta graves limitações, como uso excessivo de mão-de-obra e secagem demorada (14,19,21,23 e 27), grande necessidade de espaço e elevados custos de construção (6,36,39 e 40).

O tempo de secagem em terreiro varia de 10 a 20 dias, até os grãos atingirem um teor final de umidade entre 11 e 13%. Esta variação está em função da umidade inicial média dos grãos e da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, e intensidade da radiação solar (11 e 39). Assim, a eficiência da secagem depende do clima da região, sendo que em lugares de alta pluviosidade e pouca radiação solar, a secagem é prejudicada, resultando num produto de má qualidade (14).

O terreiro tem apresentado grande eficiência em lugares de clima seco e de alta radiação solar, na secagem de café, devido a pouca espessura da camada (3 a 5 cm) (18). Segundo Carvalho (11), a remoção dos lotes deve ser feita 4 vezes por dia nos 4 primeiros dias de secagem. A partir do 7º dia o café pode ser amontoado à tarde e coberto com encerado a noite toda, a fim de manter alguma quantidade de calor nos grãos, protegê-los contra a condensação da umidade e das chuvas e equalizar a umidade entre eles.

Por muito tempo se pensou que a secagem direta ao sol prejudicava ao produto (18,27). Mas, em trabalho mais recente

te, Bachi (3) demonstrou que os raios solares não tem influência específica sobre a qualidade da bebida e capacidade germinativa da semente despulpada de café.

Uma vez que os grãos atingem a unidade final são recolhidos e guardados em tulhas. Estas são unidades armazenadoras, de madeira ou alvenaria, onde o café é armazenado a granel, sem ventilação, podendo aí ser completada a uniformização de umidade entre os grãos (3,11,19 e 36).

Na realidade, a secagem de café em terreiro tem sido usada por muitos anos, e continua sendo utilizada amplamente no país, não por ser a mais adequada e econômica, como no passado, mas por ser a técnica empírica mais conhecida até hoje (14).

3.3.2. Secagem Artificial

Consistem em submeter uma camada espessa do produto a uma corrente de ar aquecido pela queima de um combustível fósil ou de lenha e insuflado na massa de grãos por meio de um ventilador (6 e 21), sendo que o produto pode estar estático ou em movimento (8 e 39).

Os secadores mecânicos, que atualmente são utilizados para a secagem de café no Brasil, não se apresentam específicos para as características desses grãos, uma vez que foram projetados e construídos para a secagem de cereais e oleaginosas (39). Estes secadores não podem receber o produto com umidades superiores a 50%, pois ele se aglomera e não permite que o ar aquecido passe uniformemente por todos os grãos; dificuldade que

se agrava quando o café apresenta avarias em sua polpa. Nestes casos é obrigatória uma pré-secagem inicial para se obter uma massa mais rígida (perda de umidade de 70% até 50%) A operação de pré-secagem é atualmente realizada no terreiro (14).

Os secadores mecânicos para café utilizam energia artificial para movimentar o produto e aquecer o ar, o que encarece o custo operacional da secagem (21), especialmente si se considera que sua eficiência térmica raramente atinge 30% (14). A má operação dos secadores pode colocar em risco a qualidade do produto - pelo qual o seu uso só recomenda-se para regiões de clima úmido ou para zonas onde há grande porcentagem de café cereja (39 e 40).

Para se obter café de boa qualidade é aconselhável - colocar no secador partidas homogêneas e proceder a sua secagem - lenta, com temperaturas não superiores a 45°C (21).

Existe uma grande quantidade de tipos de secadores - de grãos que hoje se comercializam, e que se classificam em quatro categorias principais, segundo a movimentação do produto e do ar (8):

- a. Secador estacionário, sem movimentação do produto;
- b. Secador com fluxo de ar perpendicular ao fluxo do produto;
- c. Fluxo de ar paralelo ao fluxo do produto; e
- d. Fluxo de ar em contra corrente ao fluxo do produto.

A secagem pode ainda ser classificada em dois tipos quanto a forma de atuação do calor:

1. Secagem contínua: O produto que está sendo seco fica

constantemente sob a ação do ar quente, até o teor de umidade desejado.

2. Secagem parcelada ou intermitente: O produto é submetido a determinadas períodos de secagem e de repousos sucessivos.

Os secadores mais utilizados no Brasil, segundo Vilela (39), são dos tipos de fluxos contra-correntes (secador Moreira) e fluxos perpendiculares (secador D'Andrea). Em ambos, os grãos de café circulam continuamente durante toda a secagem.

3.3.2.1 Secagem em camadas espessas por convecção forçada e ar aquecido com auxílio de coletores solares

A secagem em camadas espessas por convecção forçada e ar aquecido com auxílio de coletores solares têm sido recentemente pesquisada na UNICAMP (39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45). O sistema consiste em uma camada estática de café colocada sobre uma chapa furada. Ar aquecido com auxílio de coletores solares é movimentado por um ventilador através da chapa e do produto, e transporta a umidade do grão (41, 42, e 43).

Usando um coletor solar plano simples, Vilela (39) seco 313 kg de café em camada espessa de 73.5 cm, com uma umidade inicial de 44.44%, até 13.9%, (bu), utilizando uma vazão de $8.13 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ e ar aquecido a 30.8°C . O tempo de secagem foi de 65 horas e a qualidade original do produto não foi comprometida.

Villa et al (42), trabalhando com ar forçado aquecido com auxílio de coletores solares conseguiram secar 800 kg de café em camadas espessas, em uma barcaça solar. O produto tinha uma umidade inicial de 45.6% e foi secado até 12% utilizando uma vazão de $30.8 \text{ m}^3/\text{min-ton}$, sendo que o ar ambiental (23º e 59.5% - UR) foi aquecido até uma média de 30.8°C . O tempo de secagem foi de 106 horas ininterruptas e a qualidade do produto final foi mantida. Suas conclusões indicam que a secagem de café em camadas espessas, sem movimentação do produto, é perfeitamente viável sempre que se movimentem quantidades adequadas de ar entre os grãos e se usem condições de secagem que permitam secar toda a massa do produto, antes que ocorra sua deterioração.

Num estudo recente, Dorfman et al (14), trabalhando com uma barcaça solar de 15 m^2 de superfície e capacidade de máxima de 6 ton de café recém colhido, secaram 2, 3 e 5 ton, em camadas de 20, 30 e 50 cm, desde uma umidade inicial de 52%, 66% - até 15.5% , 37.5% e 18% 0%, respectivamente. O ar foi aquecido - por coletor solar de 60 m^2 mais energia elétrica, e energia solar mais silo metálico para os dois tratamentos primeiros e 3º respectivamente, sendo insuflado no "plenum" da barcaça por um ventilador centrífugo de 7.5 HP, com uma vazão de $60 \text{ m}^3/\text{min-ton}$. O tempo de secagem na barcaça foi de 52, 120 e 89 horas, respectivamente, e o produto não sofreu alterações na sua qualidade original.

Na experiência que utilizou a barcaça e o silo secador-armazenador (Fig. nº 3), o produto foi secado desde 66% até 37.5% na barcaça e até 12% num silo metálico aquecido a óleo. Se obteve grãos de ótima qualidade após um tempo de secagem de 5 dias em barcaça e 7 dias no silo armazenador.

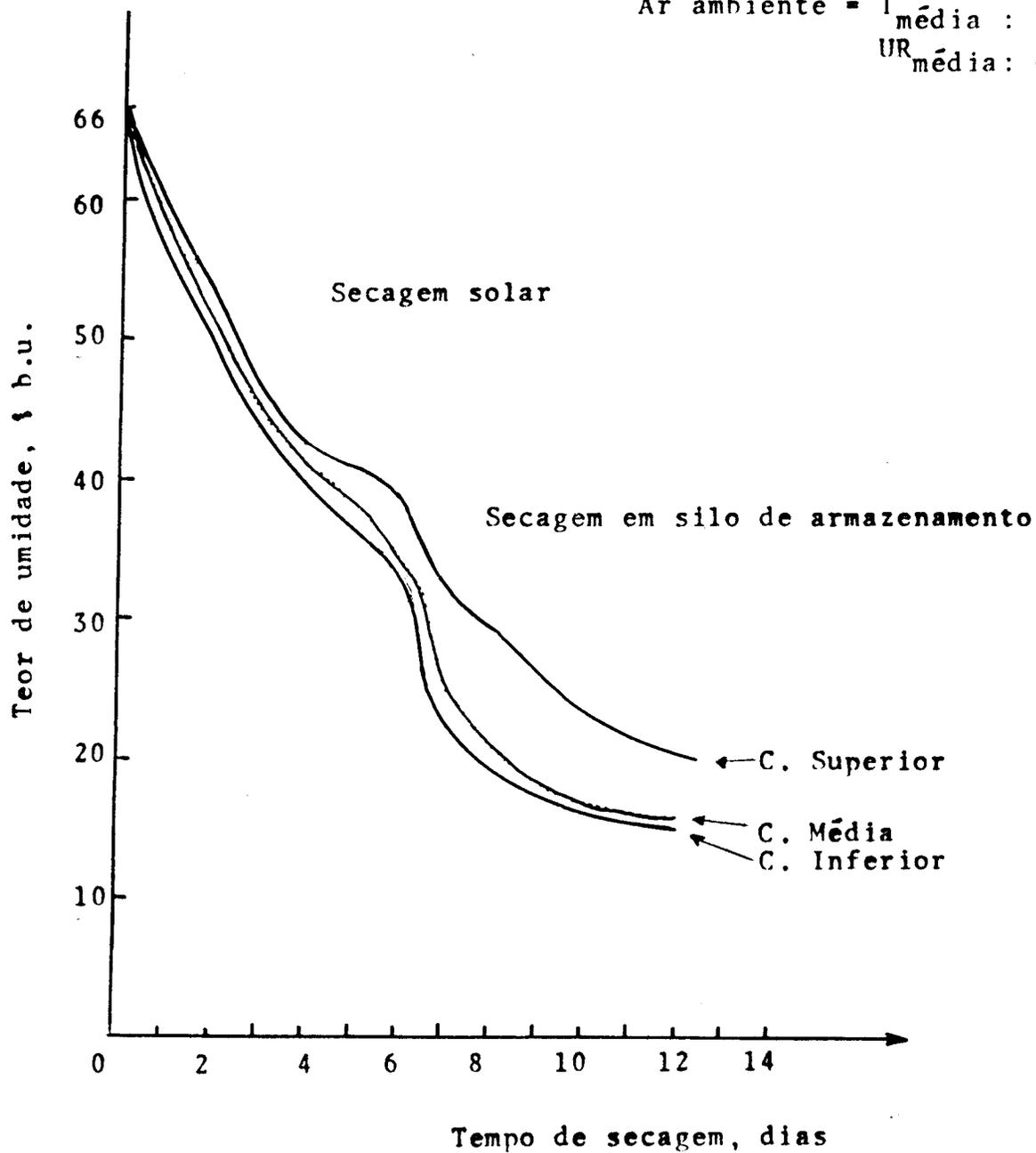
Vazão = $60 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ Ar ambiente = $T_{\text{média}} : 18^\circ\text{C}$ $UR_{\text{média}} : 64.5\%$ 

FIGURA Nº 3 Secagem de café num sistema barcaça - silo armazenador segundo Dorfman et al (14).

Nesta pesquisa demonstrou-se o seguinte:

- a. É possível secar café em camadas com alturas máximas de 50 cm, sem movimentação do produto, com vazões da ordem de $60 \text{ m}^3/\text{min-ton}$, quando o ar é aquecido só pelo coletor solar, e de $36 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ quando a secagem solar se complementa com energia elétrica durante a noite. Ambas as experiências chegaram a valores a cerca de 17% de umidade final dos grãos, sendo que os tempos de secagem foram de 288 horas e 90 horas, respectivamente.
- b. A barcaça pode ser usada com café vindo diretamente da roça, com alto teor de umidade, sem necessidade da pré-secagem dos grãos.
- c. A secagem de café em barcaça solar pode ser feita a baixa temperatura e permite continuar utilizando a radiação solar, com coletores solares planos, simples, e também usar eficientemente outras energias convencionais.
- d. A secagem de camadas de 50 cm de café, dezessete vezes mais que num terreiro (3 cm), proporciona uma grande redução na área utilizada para a secagem.

3.4. Simulação Matemática da Secagem

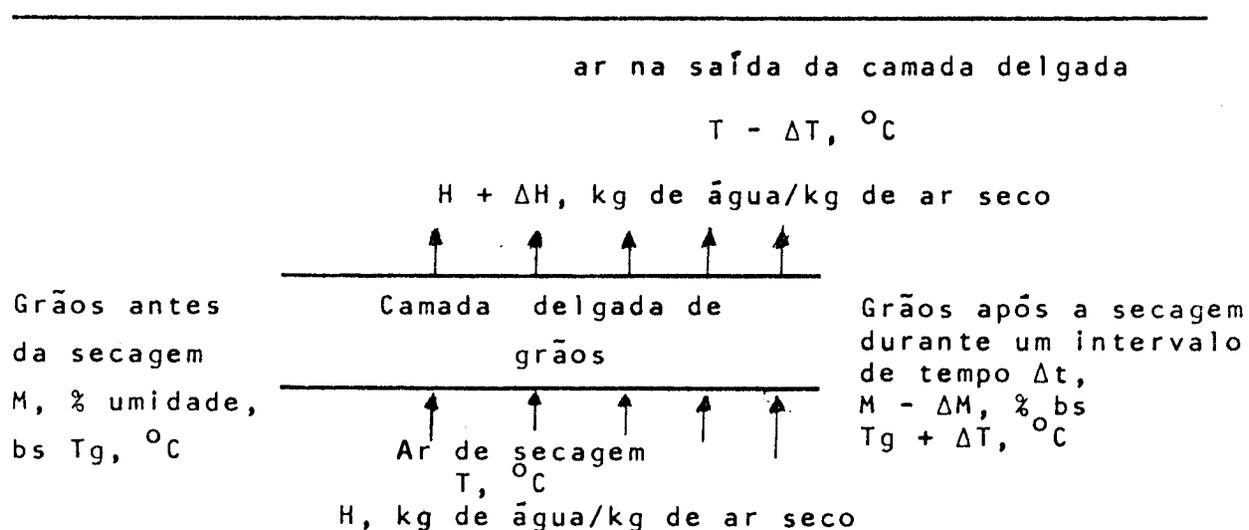
Progressos recentes na quantificação da secagem e deterioração permitem usar uma sistemática de análise de alternativas para selecionar a ótima; conjunto de técnicas conhecidas como simulação matemática.

O desenvolvimento do computador eletrônico tem permitido a simulação de processos de grande complexidade de análise, obtendo-se soluções que seriam difíceis e dispendiosas de se fazer experimentalmente (4 e 37).

Thompson et al (35) desenvolveram um modelo matemático que pode-se usar para simular a secagem de qualquer grão, sendo que para aplicá-lo a grãos como café deve se conhecer algumas propriedades do produto que caracterizem seu comportamento em relação com a secagem (29, 40 e 43).

O modelo considera a massa de grãos de uma camada espessa como constituída de camadas delgadas, de um grão de espessura, colocadas uma em cima da outra. Determinando a secagem de uma camada delgada, através de balanços de energia e massa, pode-se estudar por meio de um processo iterativo a secagem de camadas espessas (34).

A secagem de uma camada delgada pode ser simulada, considerando as trocas de temperatura e umidade do grão e do ar, de acordo com o esquema a seguir:



Esquema 1 - Esquema da secagem de uma camada delgada, segundo Thompson et al (35).

O esquema representa a passagem do ar quente, a uma certa temperatura (T , °C) e umidade absoluta (H , kg de água por kg de ar seco), por uma camada delgada de grãos a uma umidade (M , %bs) e a uma temperatura (T_g , °C), durante um intervalo de tempo Δt . Neste intervalo de tempo certa quantidade de umidade (ΔM , %bs) evapora-se dos grãos, sendo levada pelo ar que passa a ter uma maior umidade absoluta ($H + \Delta H$). Ao mesmo tempo, o ar diminui sua temperatura ($T - \Delta T$, °C) em forma proporcional ao aumento da temperatura do grão, que vai subir para $T_g + \Delta T_g$ (°C), e ao resfriamento de evaporação na mudança de fase.

A previsão da secagem de uma camada grossa (massa de grãos do silo ou barcaça) é feita considerando a secagem da camada delgada, onde as condições finais de cada camada são usadas como iniciais da próxima, e assim por diante até completar a simulação de toda a massa (34 e 44).

Villa e Dahab (43) adaptaram o modelo de Thompson para simular a secagem de camadas espessas estáticas de café. Para esta adaptação foi preciso colocar os seguintes parâmetros ou propriedades do café na rotina de Thompson et al (35). Curvas de secagem em camada delgada, curvas de equilíbrio de umidade, calor latente de vaporização e calor específico. Na seguinte secção descreve-se as equações usadas por estes autores para representar os parâmetros de secagem do café.

3.4.1. Parâmetros de Secagem do Café

3.4.1.1. Equilíbrio de Umidade

A seguinte equação foi desenvolvida por Vilela e Roa (40), a partir de dados experimentais, para representar o equilíbrio de umidade do café:

$$M_e = (P_1 R + P_2 R^2 + P_3 R^3) \exp ((P_4 + P_5 R + P_6 R^2 + P_7 R^3 + P_8 R^4) (T + P_9)) \quad (1)$$

onde:

M_e = Equilíbrio de umidade, decimal

R = Umidade relativa, %, decimal

P_1 = 15272

P_2 = - 32478

P_3 = 33341

P_4 = - 0,029458

P_5 = - 0,0016309

P_6 = - 0,013695

P_7 = 0,132050

P_8 = 0,0

P_9 = 273

3.4.1.2. Curvas de secagem em camada delgada

A seguinte equação foi obtida por Vilela e Roa (40) para representar a secagem de café em camada delgada, sendo que as constantes foram achadas a partir de dados experimentais:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = - m q (P_{vs} - P_v)^n (M - M_{eq}) t^{q-1} \quad (2)$$

onde:

M = Teor de umidade do grão, no tempo t, decimal, bs

P_{vs} = Pressão de vapor saturado à temperatura de secagem, kg/m²

P_v = Pressão de vapor do ar de secagem, kg/m²

M_{eq} = Teor de umidade de equilíbrio, decimal

t = Tempo de secagem, horas

m = 0.00537

n = 0.4614

q = 0.7683

3.4.1.3. Calor Latente de Vaporização

Baseado nas equações de umidade de equilíbrio e seguindo o método de Othmer (25), Villa e Dahab (43) determinaram a seguinte equação para representar o calor latente de vaporização do café:

$$L = 0.55555 (1075.76 - 1026 T) (1 + 0.9036 e^{-6.032M}) \quad (3)$$

onde:

L = Calor Latente de Vaporização, kcal/kg

T = Temperatura, °C

M = Teor de umidade do grão, decimal, bs

3.4.1.4. Calor Específico

A seguinte equação foi usada por Villa e Dahab (43) para representar o calor específico do café, como função da umidade do produto:

$$C_p = 0.4 + 0.6 M_u \quad (4)$$

onde:

C_p = Calor específico, kcal/kg °C

M_u = Teor de umidade do grão, decimal, b.u.

3.4.2. Prova do Modelo de Secagem

Para provar a adaptação do modelo de Thompson et al (35) na secagem de café, Villa et al (43) compararam resultados experimentais de secagem de café em camadas espessas, obtidos

por Vilela (39), com resultados de simulação matemática. A rotina desenvolvida foi "alimentada" com as condições iniciais do grão e com as condições experimentais do ar de secagem, a intervalos de 30 minutos. Na figura nº 2 apresenta-se a comparação efetuada, onde se observa a boa previsão dos resultados experimentais.

3.5. Qualidade do Café

Na classificação do café brasileiro, a determinação da qualidade compreende duas fases distintas (19 e 24):

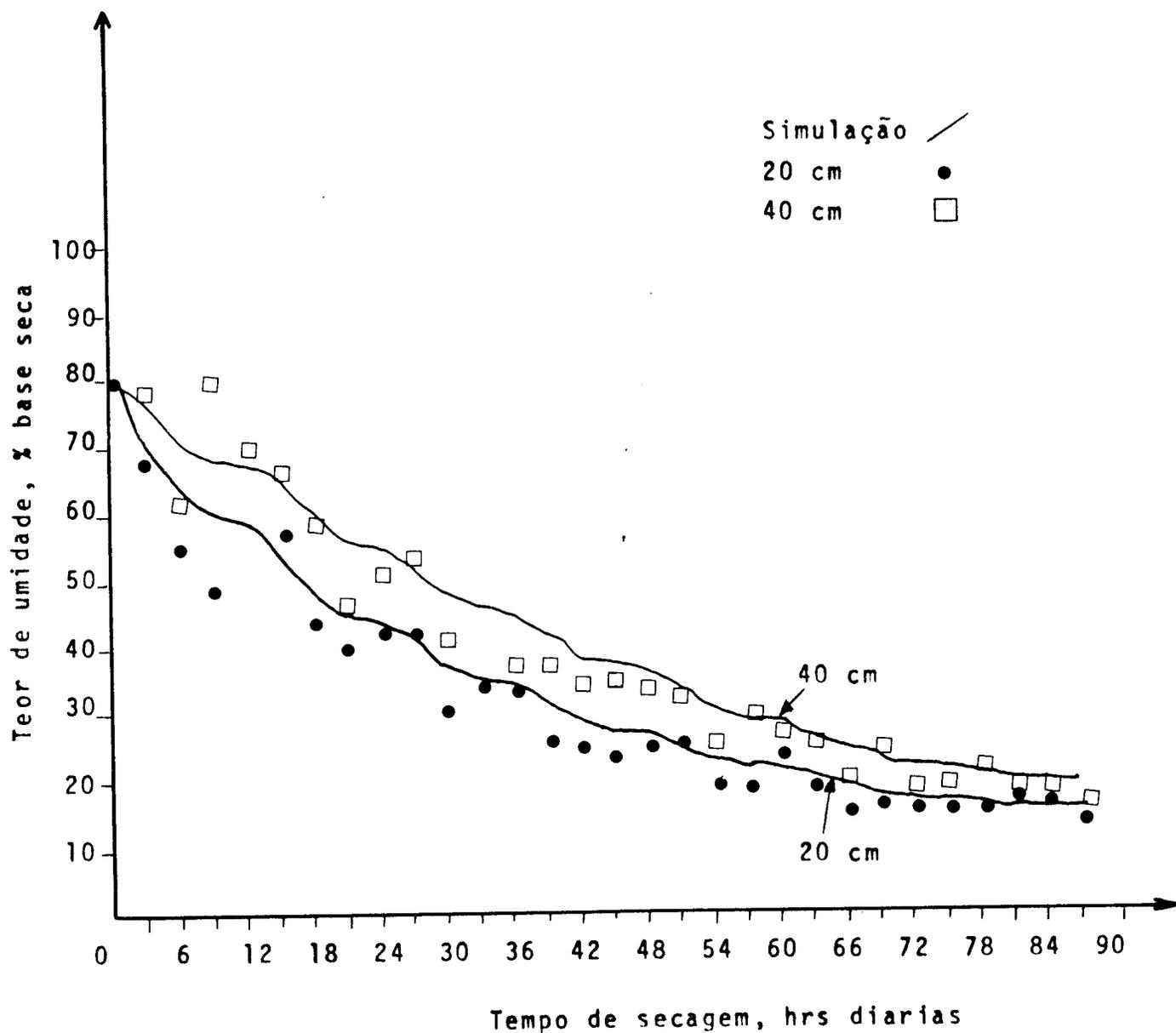
- a. Classificação por tipos ou defeitos; e
- b. Classificação pela qualidade.

A classificação por tipos, adotada no Brasil, admite sete tipos de valores decrescentes de 2 a 8 e resultantes da apreciação de uma amostra de 300 gramas de café beneficiado, segundo normas estabelecidas na "Tabela Oficial Brasileira de Classificação" (24).

A classificação por qualidade do café é determinada pela análise de cinco aspectos principais: cor, peneira, torção, bebida e características gerais. Destes fatores, a determinação da qualidade da bebida é o mais importante (19).

A avaliação da bebida é realizada por meio da "prova de xícara" e é feita por provadores especialmente treinados, capazes de diferenciar os cafés segundo as suas propriedades organolépticas. Dessa maneira os cafés são classificados, de me-

FIFURA 2. Resultados comparativos de secagem experimental de café e de simulação matemática obtidos por Villa et al (43).



lhor a pior, como "estritamente mole", "mole", "duro", "riado" e "rio" (31).

A classificação quanto a bebida, no entanto, deixa dúvidas na sua precisão, uma vez que envolve qualidades subjetivas tais como gosto, aroma e acidez; o que têm motivado pesquisas tendentes a encontrar uma relação entre as propriedades organolépticas e as análises químicas, sem se chegar, contudo, a resultados conclusivos (2).

Segundo Miya et al (24), a qualidade da bebida de uma amostra depende da proporção de grãos deteriorados e do grau de deterioração desses grãos. Assim por exemplo, a acidez aumenta a medida que aumenta a proporção de grãos pretos. A torração ocasiona também modificações na bebida do café; durante a torração ocorre uma ligeira diminuição do pH e do ácido clorogênico e um aumento da acidez e do teor de cafeína.

A qualidade da bebida apresenta respostas diferentes aos fatores deteriorativos. A bebida "mole" revela mais facilmente qualquer alteração do que a bebida "dura", pois 5% de defeito verde altera a bebida "mole", ao passo que são necessários 40% de verde para alterar a bebida "dura" (24).

3.5.1. Fatores que afetam a qualidade antes da colheita

Segundo o Instituto Brasileiro do Café (21), a qualidade do café depende em primeiro lugar da espécie plantada. O C. arabica apresenta aroma e sabor mais apreciado que o

C. canephora. A CATI (19) agrega que as características ecológicas (clima e solo), as práticas culturais (adubação, irrigação, capinas e uso de pesticidas), densidade de plantio e processamento pós-colheita, são os principais responsáveis da qualidade do café beneficiado.

As doenças do cafeeiro e dos grãos, segundo Heinrich e Abrahão (20), tem também uma responsabilidade importante na qualidade do café, especialmente as pragas que atacam os frutos: A broca do café (Hypothenemus hampei F.) e o caruncho das tulhas (Araecerus fasciculatus G.), besouros que, ao se alimentarem, destroem parcial ou totalmente os grãos de café integrais.

A proporção de grãos cereja na mistura de grãos colhidos por derriça manual é também de grande efeito na qualidade do café. A presença de 15% da mistura faz variar a denominação, de "bebida superior" a "bebida menos aceitável"; e a partir de 60% a bebida qualifica-se como muito ruim (24).

3.5.2. Fatores que afetam a qualidade do café pós-colheita

Entre os fatores que afetam a qualidade do café colhido, a CATI (19) sobrealienta as fermentações, o excesso de temperatura no secador e o tempo de secagem.

Segundo Abdul e Anderson (1 e 12), fatores de natureza biológica atuam no processo deteriorativo, envolvendo a participação de microorganismos, particularmente fungos, bactérias e leveduras.

rias e leveduras.

3.5.2.1. Efeito da microflora

A microflora natural encontrada nos frutos de café é extremamente vasta e variada. Quando o café atinge sua maturidade é possível o início de um processo de fermentação, graças a presença de microorganismos que se acham na polpa (epicarpio), e que encontram meio de cultura favorável ao seu desenvolvimento na mucilagem (mesocarpo), que se constitui, principalmente, de substâncias pecticas e açúcares (17).

A multiplicação dos microorganismos é, as vezes tão rápida que os frutos se cobrem de mofos em poucas horas. Porém, a fermentação não se inicia a não ser depois de 6 horas de colheita, quando a massa de café adquiriu uma determinada temperatura. As três horas seguintes são mais prejudiciais e a partir desse momento as alterações são mais sensíveis de hora em hora (17).

Estudos realizados por De Freitas (12), compreendendo a contagem de microorganismos existentes na mistura de frutos em diversos estados de maturação, revelaram o seguinte grau de contaminação dos grãos:

QUADRO Nº 1 - Grau de Contaminação do Café em Fruto

Procedência	nº bactérias por grama	nº de fungos por grama	nº de leveduras por grama
Taubaté (V. do Paraíba)	$1.78.10^6$	$2.59.10^5$	$1.95.10^5$
Piracicaba	$3.50.10^4$	$1.52.10^5$	$2.61.10^3$

Krug (22) procurou relacionar o tempo de permanência do café no chão e o número de microorganismos encontrados no interior da semente, bem como a influência na qualidade da bebida. Os resultados obtidos se apresentam no quadro a seguir:

QUADRO Nº 2 - Tempo de permanência do café no chão, nº de microorganismos no interior dos grãos e sua influência na qualidade da bebida.

Data de colheita	Início da secagem	Fungos (%)	Prova de xícara
28/04/1940	28/04/40	0	Estritamente Mole
28/04/1940	13/05/40	23	Estritamente Mole
28/04/1940	28/05/40	36	Estritamente Mole
28/04/1940	13/06/40	56	Dura
28/04/1940	28/06/40	68	Dura, levemente riada
28/04/1940	13/07/40	81	Dura
28/04/1940	28/07/40	51	Rio

Os resultados evidenciam, segundo o autor, que a porcentagem de fungos no interior do café aumenta com a permanência dos frutos no chão, além de demonstrar a existência de uma relação entre a maior ou menor infestação dos grãos com a qualidade da bebida.

Entre os vários microorganismos presentes nos grãos, Krug (22) dá especial destaque a fungos do gênero *Fusarium*, e particularmente à espécie *F. concolor*. Além deste gênero, Bittancourt (7), constatou a presença dos gêneros *Colletotrichum*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Rhizopus*, *Phomopsis*, entre outros.

Independente da procedência da infestação, de acordo com o tipo de café, Bittancourt (7), obteve as contagens seguintes:

QUADRO Nº 3 - Contaminação dos grãos de café

Tipo de café	nº grãos examinados	nº de grãos contaminados	Grau de contam. (%)	Presença de <i>Fusarium</i> nos grãos contam.
Cereja	665	60	9.0	44.4
Passa	314	34	10.8	20.6
Bóia	415	195	46.9	45.6
Seco no pē	140	129	92.1	68.2
Seco no pano	100	94	94.0	63.8

Com base nestes resultados, o autor chegou às seguintes conclusões:

- a. O café seco no pé apresenta maior porcentagem de ataque de fungos.
- b. Os cafês cereja e passa apresentam porcentagem reduzida de ataque de fungos.
- c. O fungo encontrado com maior frequência pertence ao gênero Fusarium.

Vaughn (38) isolaram também bactérias coliformes (Escherichia e Aerobacter) e Bacillus. A presença de leveduras também foi observada, particularmente dos gêneros Saccharomyces e Torula.

De Freitas (12) conclue que é fora de dúvida que os microorganismos desempenham um papel de destaque na obtenção de bebidas de boa qualidade e que a duração do período de secagem relaciona-se diretamente ao maior ou menor grau de contaminação dos grãos e, conseqüentemente, com a qualidade da bebida.

3.6. Simulação matemática de deterioração

A deterioração é uma função da respiração e oxidação dos grãos, e depende da temperatura e do teor de umidade deles. Steele et al (33) realizaram uma série de estudos sobre a respiração e seus efeitos na deterioração do milho durante a secagem, e determinaram experimentalmente a produção de CO₂, sob diferentes condições ambientais, e relacionaram esta produção com a matéria decomposta devida a respiração e oxidação. Encontraram que a deterioração do milho, medida em base a produção de CO₂ não é linear com o tempo.

Sobre a base de dados experimentais, Steele et al (33) obtiveram um modelo matemático empírico que relaciona as condições de temperatura, umidade, dano mecânico e tempo de secagem ou armazenamento do milho. Desta maneira o modelo serve para predizer o grau de deterioração deste grão, sob diferentes condições de secagem ou armazenamento, em qualquer ponto da massa do grão durante todo o processo.

Villalobos e Villa (45) em pesquisa mais recente estudaram a relação das características fisiológicas da semente de soja com sua deterioração da qualidade. Encontraram que a deterioração da germinação e do vigor da semente de soja depende também da temperatura e da umidade dos grãos. Na base de dados experimentais, desenvolveram igualmente um modelo matemático empírico, que relaciona a germinação e o vigor da semente de soja com as variáveis da secagem, permitindo predizer o grau de deterioração que teriam estas sementes em função das condições de secagem, altura da camada e tempo.

Informações relativas a quantificação matemática da deterioração de café durante a secagem e/ou armazenamento não foi possível encontrar na literatura consultada.

3.7. Otimização do processo de secagem

Uma vez quantificados os fenômenos da secagem e deterioração é possível realizar estudos de otimização dos diferentes elementos que fazem parte do sistema.

Pierce e Thompson (1967), fizeram uma análise das condições meteorológicas em diferentes regiões nos Estados Unidos, e determinaram as vazões mínimas necessárias para a secagem com ar ambiente e aquecido por coletores solares, de milho em silo. Para este estudo foram usados o modelo de simulação de secagem de Thompson et al (35) e o modelo de deterioração de Steele et al (33).

Villalobos e Villa (45) analisaram diferentes condições de secagem com energia solar e ambiental e recomendaram vazões ótimas para a secagem de sementes de soja em silos, na faixa de 20 a 35°C. Usaram-se para este estudo o modelo de simulação da secagem desenvolvido por Villa et al (41) e o modelo da deterioração da qualidade fisiológica desenvolvido por Villalobos e Villa (45). Um estudo semelhante pode-se fazer em café, uma vez conhecida em forma quântica a deterioração como função da secagem.

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Matéria Prima

Se trabalho com grãos de Coffea arábica variedade - "mundo novo", tipo cereja, cultivado na Fazenda Santa Maria, que se encontra no quilômetro 118 da rodovia SP-340.

4.1.2 Equipamentos

4.1.2.1. Informação sobre deterioração do café

1. Qualidade da bebida

- 12 baldes plásticos de 15 litros de capacidade (FIG. 4)
- 24 tiras de borracha grossa
- 12 unidades de filme de polietileno de 35 u
- 3 câmaras com aquecedor elétrico e controle termostático da temperatura na faixa de -10 a 50 C.
- 1 balança de pratos (2 kg), com divisões cada 20 gr.
- 1 beneficiador de café
- vidraria para prova de "xícara"

2. Atividade Microbiana:

- 3 câmaras com controle termostático da temperatura na faixa de -10 a 50 C

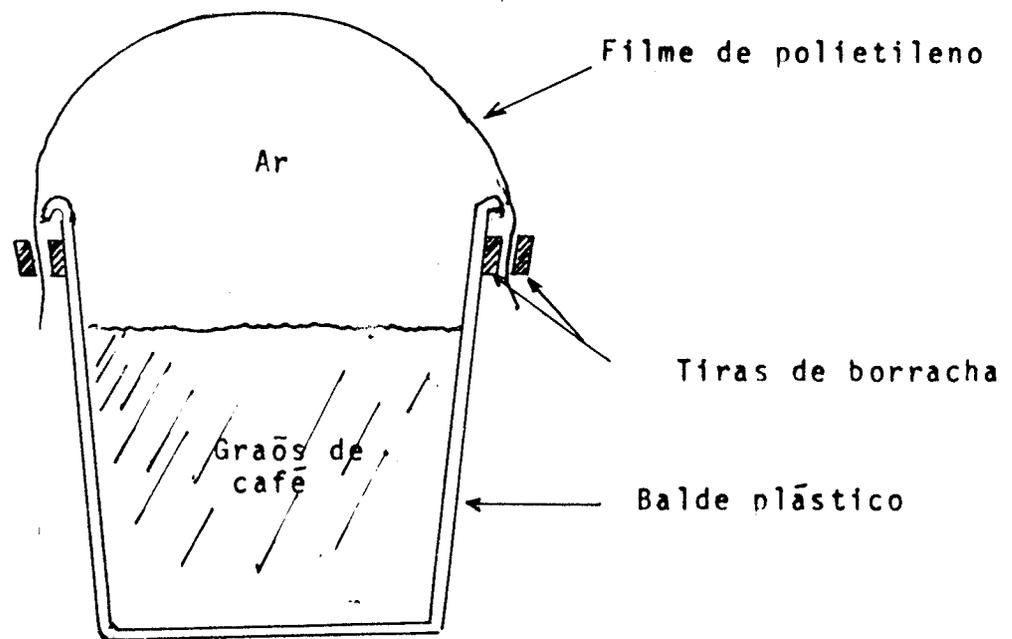


FIGURA 4. Esquema do balde usado nos testes de deterioraço da qualidade da bebida.

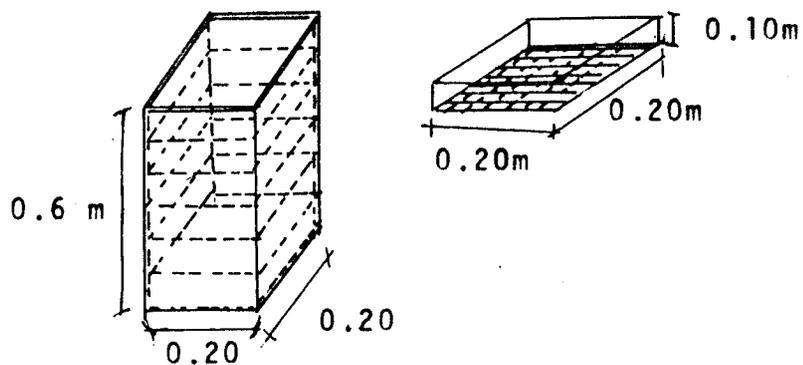


FIGURA 5. Caixa e peneira de controle de umidade.

- 27 frascos, com tampa hermética, de 1650 ml de capacidade
- 3 chaves de termopares, de 10 saídas cada.
- 1 potenciometro

3. Secagem das Porções:

- 1 secador de fluxo transversal, com resistência elétrica e ventilador centrífugo
- 20 bandejas para secagem
- 1 balança de pratos (2 kg), com divisões cada 20 gr.

4. Determinação de umidade

- 1 estufa com circulação forçada de ar e controle termostático da temperatura
- 25 cadinhos de alumínio
- 3 resfriadores
- 1 balança analítica

4.2.1.2 Prova do Modelo de Deterioração

- 1 barcaça de madeira, com fundo perfurado (2%), de 5x3 x 0.6 m., com capacidade máxima para 6 ton de café fresco (FIG. 7).
- 1 coletor solar plano de 60 m² (FIG. 6).
- 1 ventilador centrífugo de 7.5 HP com control de vazão
- 1 termohigrografo Hewlett-Packard
- 6 termômetros de mercúrio com graduação de 0 a 60 C
- 2 caixas com 6 peneiras de 0.20 x 0.30 x 0.10 m., cada-uma (FIG. 5).

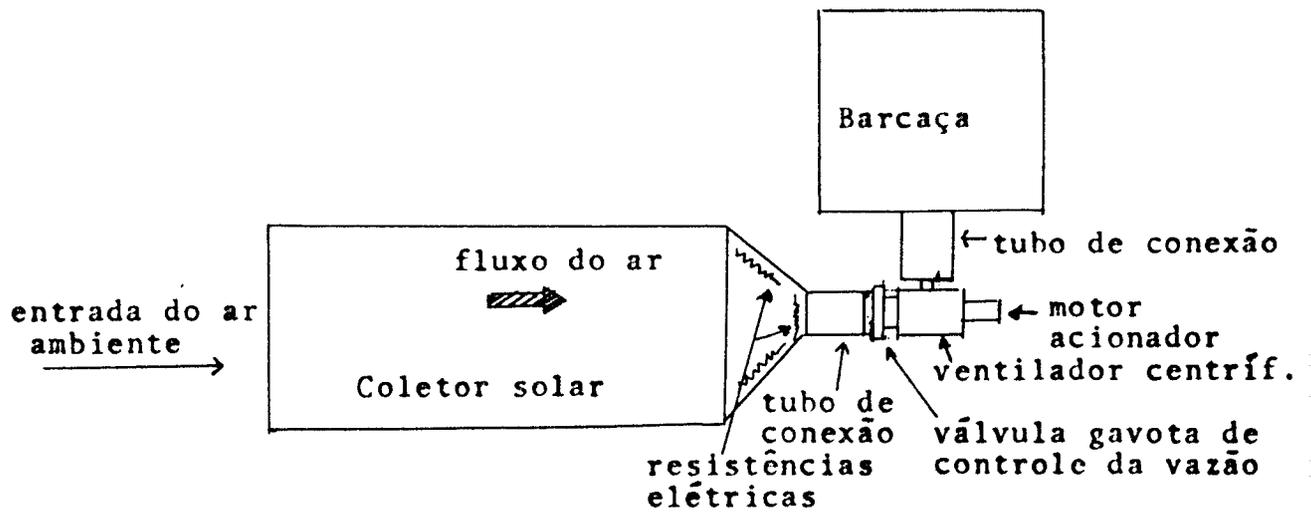


FIGURA nº 6 Esquema de disposição dos elementos da barcaça solar

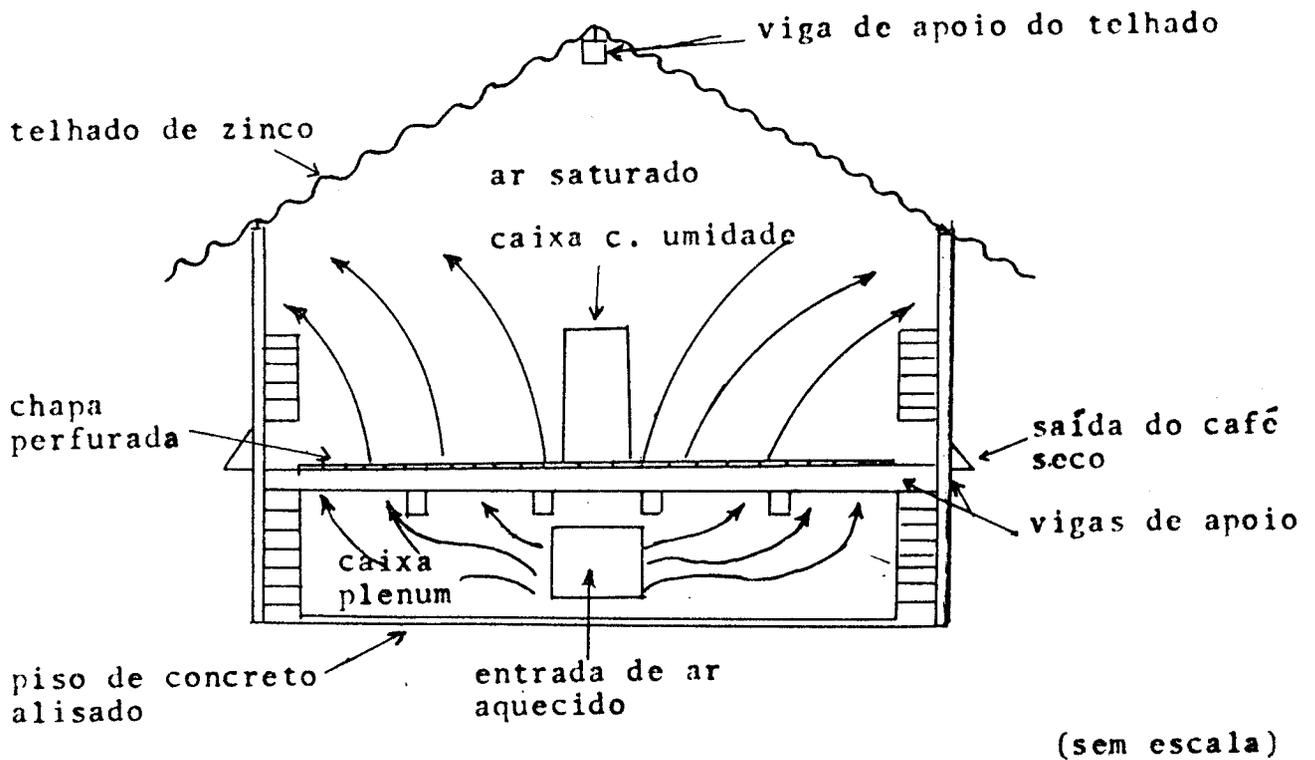


FIGURA nº 7 Corte transversal da barcaça

- 4 peneiras para amostragem da umidade,
- 1 anemômetro de asas rotacionais
- 1 balança de pratos (25 kg), precisão até 10 gr.
- 1 estufa com circulação forçada do ar e controle termoss-tático da temperatura
- 1 computador digital PDP-10
- 1 computador Packard HP - 97

4.2.1.3 Determinação de Vazões Mínicas

- computador digital PDP-10

4.2 MÉTODO

4.2.1 Desenvolvimento dos Modelos Matemáticos de Deterioração

4.2.1.1 Testes de Deterioração baseados na Qualidade da Bebida

Nos testes de deterioração baseados na qualidade da bebida de café se utilizaram amostras de quatro umidades: 74.75% (umidade inicial), 51.25% e 29.96% e para cada umidade foram testadas três temperaturas : 40°, 35° e 25 °C, perfazendo-se assim 12 tratamentos.

De maneira geral, o seguinte foi o procedimento seguido nos testes de deterioração baseados na qualidade da bebida:

1. Recepção da matéria prima
2. Determinação da umidade inicial do café
3. Secagem até os teores de umidade propostos
4. Armazenamento do produto, nos baldes fechados hermeticamente, as temperaturas e umidades desejadas
5. Amostragem das porções e avaliação do crescimento de fungos
6. Secagem das porções
7. Beneficiamento do café
8. Torração, moagem e prova de "xícara"
9. Análise estatístico dos resultados

Os grãos de café, recém colhidos, foram transportados ao laboratório de Materias Primas da FEAA/UNICAMP, onde, - pelo método de estufa (110 C por 30hr) determinou-se seu teor de - umidade inicial e procediu-se a se atirar 3 amostras de café; - com as que se constituiu os três primeiros tratamentos.

O produto foi secado até os teores de umidade propostos, sendo que a temperatura empregada foi inferior a 45 C e alta vazão (ao redor de 40 m³/min-ton), garantindo-se a sua - qualidade original. As amostras foram retiradas do secador nas - umidades desejadas sendo que o control desta determinou-se através de pesagens de peneiras, e imediatamente colocadas em baldes plásticos de 15 litros e cobertos com filme de polietileno preso ao balde com tiras de borracha (FIG 4); o que possibilitou a - sua vedação hermética.

O fechamento hermético permite que o produto não-

altere a umidade, e não seja necessário utilizar soluções de sais ou ácidos, o que seria impraticável devido a necessidade de grande superfície da solução (esta deve ser igual a área dos grãos).

A eliminação do CO₂ produzido pela respiração dos grãos e da microflora desenvolvida durante a experiência, se fez arejando o produto uma vez por dia durante 1 minuto. Esta é uma operação obrigada devido a que sua não execução acarretaria a respiração anaeróbica e conseqüentemente a deterioração do café (1). No entanto, o recurso empregado para evitar grande concentração de CO₂ foi o uso de polietileno de pequena espessura na cobertura e com grande área envolvida, o que aumentou o volume de ar contido nos baldes (FIG 4).

A quantidade de café para cada tratamento foi calculada para possibilitar a retirada de 6 amostras ou porções de 150 a 200 gramas de café beneficiado e com 12% de umidade; quantidade mínima requerida para o análise sensorial.

Os grãos mantidos nos baldes foram colocados em câmaras de temperatura controlada e as amostras atiradas periodicamente, a intervalos variáveis segundo a umidade e a temperatura de cada tratamento. A periodicidade de retirada das amostras foi diferente para cada balde pois o tempo para deterioração varia com a umidade e com a temperatura: Grãos com alta temperatura deterioram-se mais rapidamente que os expostos a condições de baixa umidade e baixa temperatura. O cronograma de retirada das amostras se apresenta no Quadro a seguir

QUADRO Nº 3 - Cronograma de retirada das amostras (hr) de café dos baldes

AMOSTRAS	SQ	ST	SV	CQ	CT	CV	TQ	TT	TV	VQ	VT	VV
A1	67.5	71.0	76.0	89.0	97.0	97.0	104.0	112.5	128.0	128.0	143.0	166.0
A2	134.0	140.0	158.0	136.5	209.5	191.0	153.0	203.0	256.5	264.0	266.0	266.0
A3	182.0	214.0	236.0	190.5	235.5	284.5	278.0	305.0	360.0	348.0	382.0	388.0
A4	231.0	278.0	308.0	256.5	311.0	367.5	360.0	400.0	469.0	457.0	502.0	509.5
A5	278.0	350.0	357.0	311.0	390.5	455.0	448.5	498.5	587.5	575.0	622.0	630.0
A6	332.0	403.0	411.5	401.0	455.0	545.0	535.0	588.0	686.5	674.0	746.0	746.0
TOTAL (Dias)	13.83	16.79	17.15	16.71	18.96	22.71	22.42	24.5	28.6	28.08	31.08	31.08

onde:

Umidade (%)	74.45			51.25			39.82			29.96		
Temper. (°C)	40	30	25	40	30	25	40	30	25	40	30	25
Denominação	SQ	ST	SV	CQ	CT	CV	TQ	TT	TV	VQ	VT	VV

Tão logo as amostras foram retiradas dos baldes foram colocadas em peneiras e postas a secar em secador de fluxo transversal, com ar aquecido eletricamente a 45°C. O controle de secagem foi feito através de pesagens consecutivos das peneiras e o final da secagem se obteve quando os grãos atingiram ao redor de 12% de umidade.

Completada a secagem o café foi beneficiado (extração mecânica de casca e do pergaminho) e posteriormente torrado, moido e submetido a prova de "xícara", no Laboratório de Análise Sensorial de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP.

O análise sensorial comparou as amostras com um padrão de bebida "mole" conhecido e com grãos do mesmo café usado na

experiência de deterioração, secado em camada delgada e a temperatura inferior a 45 C, calificado também como de bebida "mole". Os parâmetros analisados foram acidez, gosto e aroma da bebida.

Os resultados numéricos da prova de "xícara" foram analisados estatisticamente pela prova de χ^2 e teste de Tuckey, - sendo que o produto considerou-se deteriorado a primeira mudança- (P \leq .05) na qualidade da bebida, nos três parâmetros estudados, em relação aos padrões. Assim, o tempo de deterioração se obteve considerando a amostra deteriorada e a imediatamente anterior não deteriorada.

4.2.1.2 Testes de deterioração baseados na aparição de fungos

A. Metodologia Experimental

Com a finalidade de quantificar o crescimento de fungos na superfície dos grãos de café, se mantiveram amostras de café cereja a 71,89%, 46.42% e 34.18% de umidade, e a temperaturas de 25°C, 35°C e 40°C. Assim, obtiveram-se 9 tratamentos, cada um com três repetições de ao redor de 50 gramas cada.

Para manter a temperatura desejada, se utilizaram três câmaras de temperatura controlada e em cada uma se colocaram três grupos de frascos hermeticamente fechados, em três repetições. Em consequência, em cada câmara mantiveram-se as três condições de umidade, em 12 frascos.

As umidades foram inicialmente estimadas a partir das pesagens consecutivas das peneiras com grãos de peso e umida

de inicial conhecidas, e finalmente determinadas em estufa (110°C por 30 horas). Até atingir a umidade estimada, os grãos permanecem em camada delgada, expostos a uma secagem uniforme, a temperaturas inferiores a 45°C.

Para manter constante a umidade, os grãos foram colocados em frascos de 1650 cc, fechados hermeticamente. Para evitar o excessivo acúmulo de CO₂, produzido pela respiração dos grãos e dos microorganismos, foram abertos durante um minuto por dia, com o propósito de retirar o CO₂ produzido e renovar o O₂ do interior, permitindo assim a normal respiração dos grãos. A perda de umidade do ar dos frascos ao se realizar a operação de aeração, estima-se prontamente corrigida pelo aporte dos próprios grãos (o produto em umidade de equilíbrio apresenta ao redor de 10.000 vezes mais água que ar), de forma que a umidade de equilíbrio não resultou grandemente afetada por esta operação.

Para avaliar o crescimento das colônias de fungos-se fez uma escala de "0" a "10", na qual "0" equivale a 100% de crescimento (todos os grãos sendo afetados) e "10" equivale a ausência de crescimento: em determinação feita a olho nu. Assim, por exemplo, a avaliação "5" significa crescimento de fungos em 50% dos grãos. Os frascos foram mantidos até 100% de presença de fungos, sendo que as observações foram feitas duas vezes por dia.

B. Metodologia Analítica

Os valores obtidos nos testes de deterioração foram convertidos a Índices de Deterioração (ID), na simples expressão decimal deles.

Procurou-se uma equação empírica de deterioração que representa a tendência de pontos para uma condição padrão. A condição padrão adotada foi a de 46.42% de umidade dos grãos e 35°C de temperatura, por ser uma condição média nas faixas de umidade e temperatura estudadas. Esta equação expressa a tendência do crescimento de fungos em função do tempo (T) de permanência dos grãos nessa condição padrão.

Para que a equação de deterioração possa indicar a tendência de deterioração das outras condições estudadas, colocou-se a variável tempo (T) em função de dois multiplicadores: um de umidade (Mu) e outro de temperatura (Mt), obtendo-se assim "tempos equivalentes", calculados a partir da relação seguinte:

$$T_{eq} = \frac{T}{MuMt}$$

O multiplicador de umidade foi achado na temperatura de 35°C, relacionando, com a condição padrão, as tendências de queda dos pontos das outras condições de umidade. Determinou-se igualmente, para essa condição de umidade, o "tempo equivalente" que dentro da equação padrão deverá se empregar para manifestar essa mesma deterioração, conforme a seguinte expressão.

Se adaptou como multiplicador de umidade a média das relações de seus pontos com os tempos equivalentes correspondentes na curva padrão. Este valor de M_u foi equacionado de forma que expressara o valor em função da umidade (U) dos grãos por meio de uma relação empírica adequada.

De forma similar, o multiplicador de temperatura (M_t) foi achado determinando o "tempo equivalente" que as condições de umidade iguais a padrão, nas temperaturas de 25°C e 40°C, tenham empregado para minifestar a mesma deterioração na curva padrão.

As constantes das equações do modelo empírico desenvolvido foram achadas por regressão linear quer usando um programa da Packard HP-97 com a rotina do computador (kinet), desenvolvida originalmente por Dye e Nicely (13).

O modelo matemático, assim elaborado, calcula a queda da qualidade dos grãos pela atividade microbiana, em função do tempo, para qualquer condição de temperatura e conteúdo de umidade nas faixas estudadas.

4.2.2 Prova do Modelo Matemático de Deterioração

Para provar o modelo matemático de deterioração, se procediu a efetuar uma secagem de café cereja recém colhido (71.89% de umidade inicial), em uma barcaça solar. Com este objetivo se dispuso um jogo de 12 peneiras de 0.20 x 0.20x0.10 m, com capacidade de 2750 gramas de café cada uma e ordenadas verti

calmente dentro de duas caixas de madeira (Fig. 5).

O ar de secagem era movimentado através do grão por meio de um ventilador, e aquecido durante o dia com auxílio de um coletor solar, que produziu um aumento médio da temperatura do ar de 12°C e uma redução da umidade relativa de 23% (GRAF.1 e 2). Durante a noite o ventilador continuava funcionando, movimentando ar ambiente. A vazão, mantida constante durante toda a experiência, foi de 8.57 m³/min-ton.

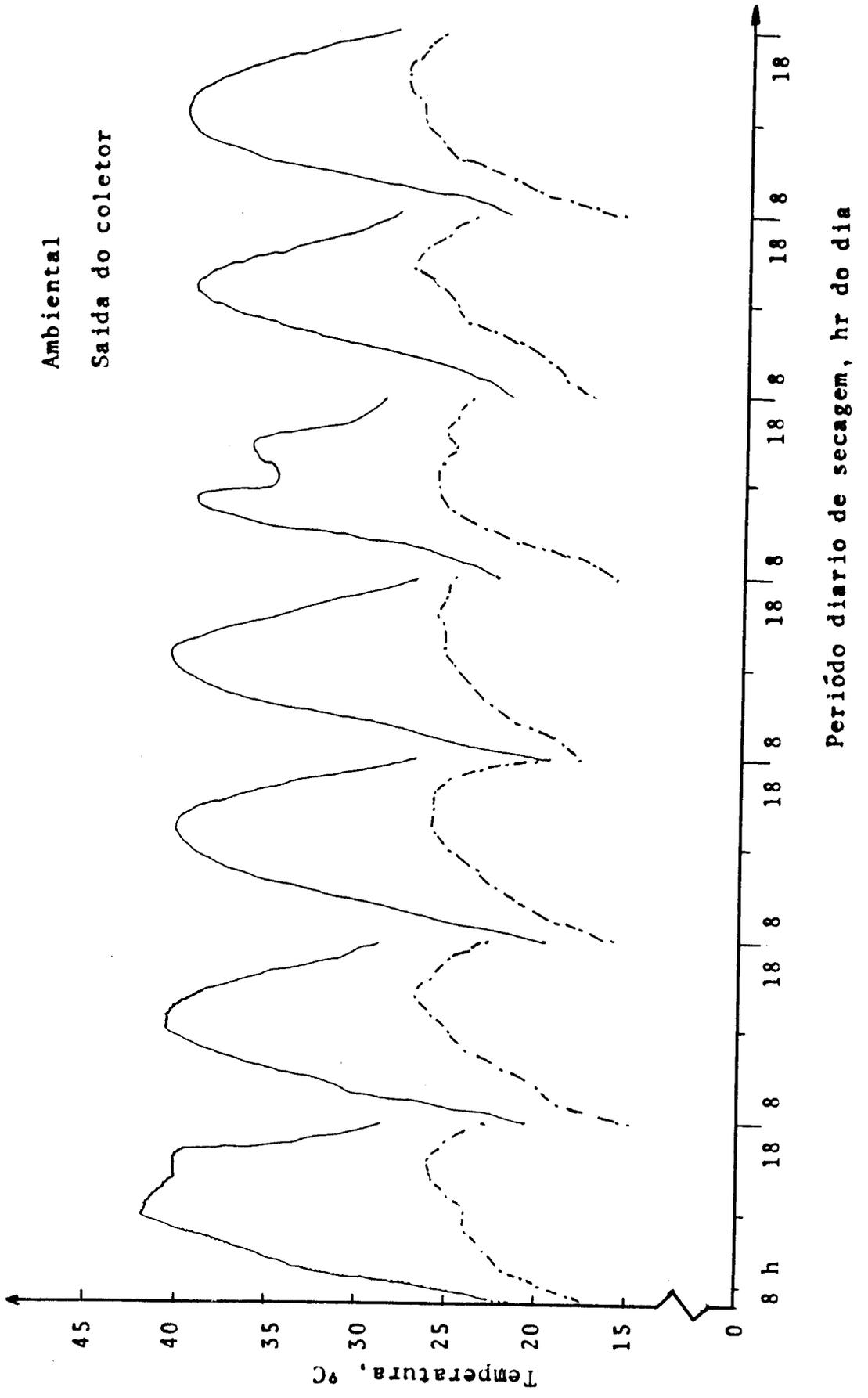
Os seguintes parâmetros foram determinados durante a secagem: temperatura e umidade relativa do ar de secagem, e a vazão. Os valores da temperatura do ar de entrada na barcaça se obtiveram através de termopares e registrado automaticamente em forma contínua. A temperatura ambiente e a umidade relativa se obtiveram das leituras de um termohigrógrafo; a vazão foi determinada por meio de um anemometro de aspas rotacionais, mediante leituras tomadas na saída do ar através das peneiras.

A determinação da qualidade da bebida se fez pela prova de "xícara" de 4 amostras atiradas a intervalos de 1.5 dias. A avaliação do crescimento de fungos se fez igualmente na base da escala de "0" a "10", anteriormente explicada; duas vezes por dia.

4.2.3. Determinação de Vazões Ótimas

Para determinar vazões mínimas necessárias para a pré-secagem de café em barcaça solar, foi feita uma série de simulações, nas quais se usaram os modelos de secagem de Thompson

GRAFICO nº 1 Temperaturas ambientais e de saída do coletor solar durante a secagem de café em barcaça



et al (35) adaptado por Villa e Dahab (43) e de deterioração por presença de fungos; a diversas condições de secagem dos grãos.

Se fizeram simulações a 50, 60 e 70% de umidade inicial dos grãos. As condições de secagem utilizadas foram: temperaturas de 35, 40 e 45°C e umidades relativas de 20, 30 e 40%.

Os critérios de deterioração testados, em relação ao crescimento de fungos, foram de 0% (ID = 1.0), 50% (ID = 0.5) e 100% (ID = 0.0), na camada superior.

Uma vazão ótima para uma condição de pré-secagem dada, por exemplo: 60% de umidade inicial do grão, temperatura de 40°C e umidade relativa de 30% do ar de secagem, era obtida quando ao variar a vazão se estabelecia por simulação qual era a quantidade de m³/min-ton necessários para que a deterioração da camada superior atingisse um valor de ID = 0.5. Este procedimento foi repetido para todas as condições estudadas. Gráficos de recomendações de vazão ótima foram preparados a partir destes resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelo Matemático de Deterioração

5.1.1. Deterioração da Qualidade da Bebida

No quadro nº 4 apresenta-se os resultados de deterioração da qualidade de bebida como função da temperatura e umidade do café. Na segunda coluna aparecem os tempos necessários para que a bebida de café, avaliada através da prova de "xícara", apresente uma mudança na deterioração do gosto, quando se compara com sua qualidade original, após de que os grãos foram submetidos as diferentes condições de temperatura e umidade (tratamentos).

Observou-se que não existe correlação definida entre o tratamento e o tempo necessário para variação da qualidade. Por exemplo, a mudança de qualidade do gosto a 25°C e 29,96% de umidade do grão aconteceu em tempo aproximadamente igual que a 40°C e 74.75% de umidade. Em média esta mudança de qualidade aconteceu - após 347.6 horas, com variação de 209 (tratamento mais crítico) até 576 horas.

Na terceira coluna indica-se que nos parâmetros acidez e aroma não se detectou mudança significativa ($P \leq .05$) para os mesmos tratamentos.

No quadro também aparece o tempo de deterioração, ou seja, o tempo que demorou o grão para se cobrir 100% de fungos. Na última coluna apresenta-se a diferença entre o tempo necessário pa

ra variar a qualidade e o tempo de deterioração, isto é, o tempo que o grão permaneceu com 100% de fungos. Observou-se que o tempo necessário para a mudança de qualidade da bebida é superior ou igual ao tempo de crescimento de fungos em todos os casos. *De onde*, o crescimento de 100% de fungos na superfície dos grãos não indica necessariamente deterioração da qualidade da bebida feita com esses grãos.

QUADRO Nº 4 - Tempo necessário para mudar a qualidade da bebida do café a diferentes condições de temperatura e e umidade dos grãos.

Tratamento	Tempo necessário para variação do Gosto	Tempo necessário para variação da Acidez e Aroma	Tempo de deterioração (ID=1.0 a 0.0)	Tempo com 100% de fungos (hrs)
SQ (74.75%-40°C)	278.0	n.s.	134.0	144.0
ST (74.75%-35°C)	350.0	n.s.	140.0	210.0
SV (74.75%-25°C)	411.5	n.s.	158.0	253.5
CQ (51.25%-40°C)	256.5	n.s.	136.5	120.0
CT (51.25%-35°C)	209.5	n.s.	209.5	0.0
CV (51.25%-25°C)	284.5	n.s.	191.0	93.5
TQ (39.82%-40°C)	278.0	n.s.	278.0	0.0
TT (39.82%-35°C)	400.0	n.s.	305.0	95.0
TV (39.82%-25°C)	360.0	n.s.	360.0	0.0
VQ (29.96%-40°C)	575.0	n.s.	264.0	311.0
VT (29.96%-35°C)	502.0	n.s.	266.0	236.0
VV (29.96%-25°C)	266.0	n.s.	266.0	0.0
Média	347.58	-	-	-

5.1.2. Deterioração do café pela atividade fúngica

No gráfico nº 3 apresentam-se as observações de crescimento de fungos, expressada como índice de deterioração dos grãos, em função do tempo, nas diversas condições de temperatura e umidades estudadas.

Observa-se que o crescimento fúngico é mais rápido na medida que aumenta o teor de umidade dos grãos (71.89% > 46.42% > 34.18%). A temperatura, porém, se apresenta exercendo uma ação mais favorável a 35°C, logo a 25°C e a pior a 40°C, nos três teores de umidade estudados.

No gráfico nº 4 se apresenta novamente a informação de crescimento de fungos a 46.42% de umidade e 35°C, escolhida como condição padrão. Quando esta informação foi usada para obter um polinômio que se aproxima-se, a seguinte equação foi obtida:

$$ID = A_0 + T_{eq} (A_1 + T_{eq} (A_2 + A_3 T_{eq})) \quad \text{quando } 33 \leq T_{eq} \leq 88 \quad (5)$$

onde:

$$A_0 = 0.609531291$$

$$A_1 = 0.03377596711$$

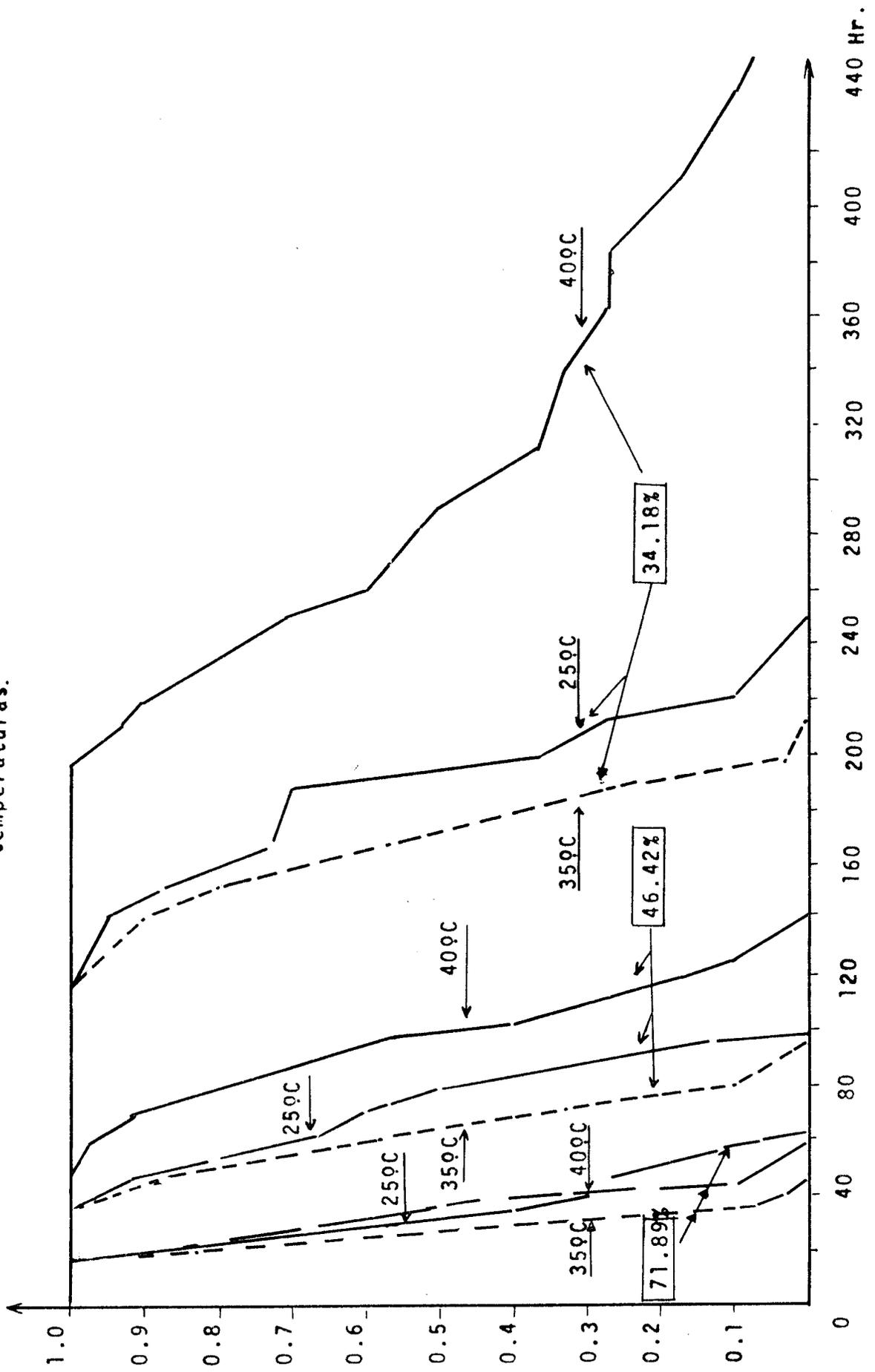
$$A_2 = -7.864053089 \times 10^{-4}$$

$$A_3 = 3.689236118 \times 10^{-6}$$

$$ID = 1.0 \quad ; \quad \text{quando } T_{eq} < 33 \text{ horas, e}$$

$$ID = 0.0 \quad ; \quad \text{quando } T_{eq} > 88 \text{ horas.}$$

GRAFICO nº 3 Crescimento de fungos em café cerejea mantido a diversos teores de umidade e diversas temperaturas.



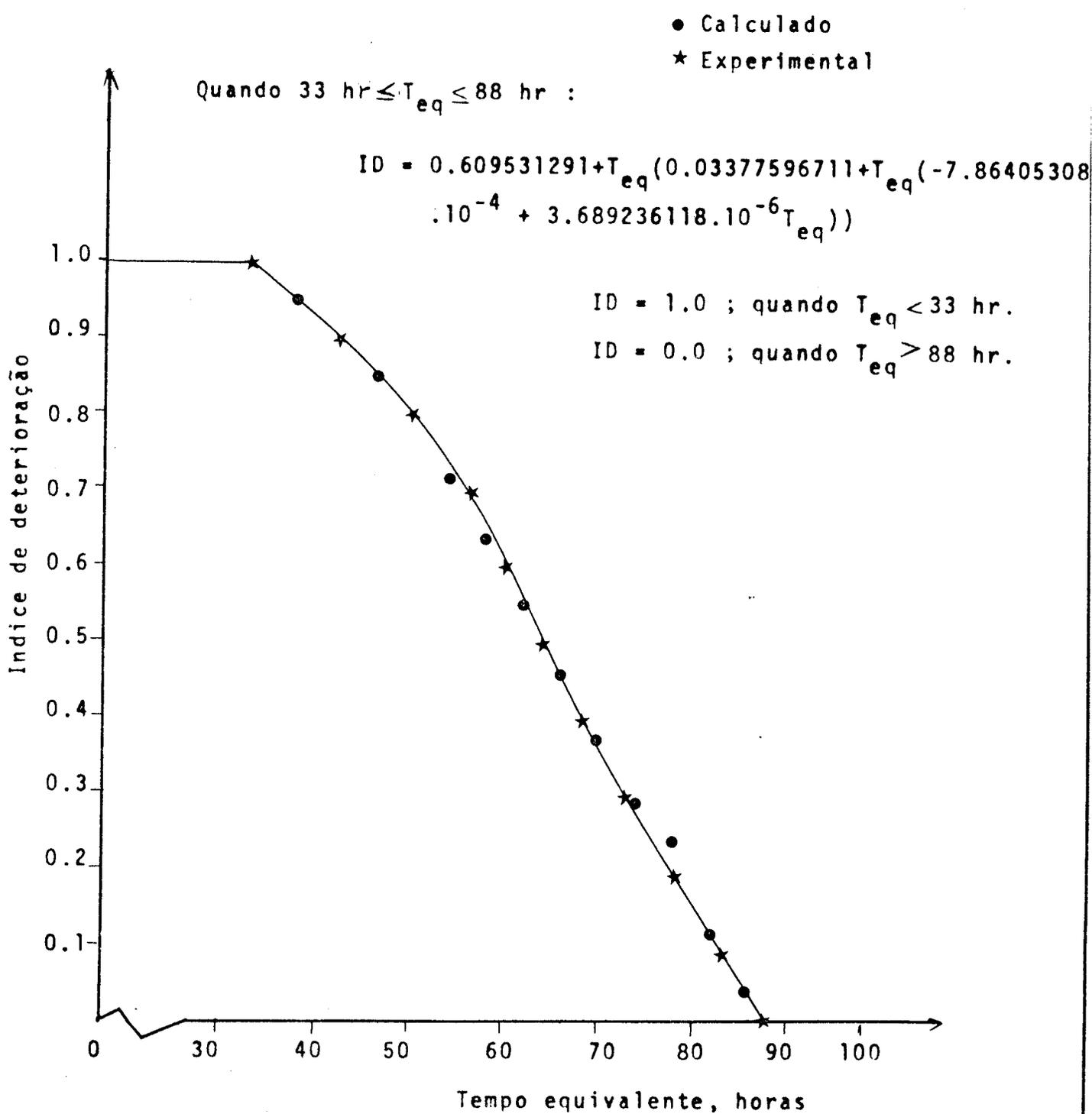


GRAFICO nº 4 Crescimento de fungos na condição padrão
(46.42% de umidade e 35°C)

onde:

ID = Índice de deterioração (0.0 = 100% de fungos e
1.0 = 0% de fungos).

T_{eq} = Tempo equivalente, hr.

No gráfico 4 pode-se observar a boa aproximação atingida com o polinômio usado.

Para prever a deterioração em condições diferentes de temperatura e umidade do grão a condição padrão, usa-se a equação anteriormente anotada com a relação seguinte:

$$T_{eq} = \frac{T}{M_t M_u} \quad (6)$$

onde:

T = Tempo no qual os fungos estiveram em qualquer condição de temperatura e umidade estudadas.

M_t = Multiplicador de temperatura

M_u = Multiplicador de umidade

No Gráfico nº 5 se mostra o multiplicador de temperatura (M_t) na base da informação obtida, as condições de temperatura diferentes a padrão, e a boa aproximação conseguida usando-se as equações que se anotam a seguir:

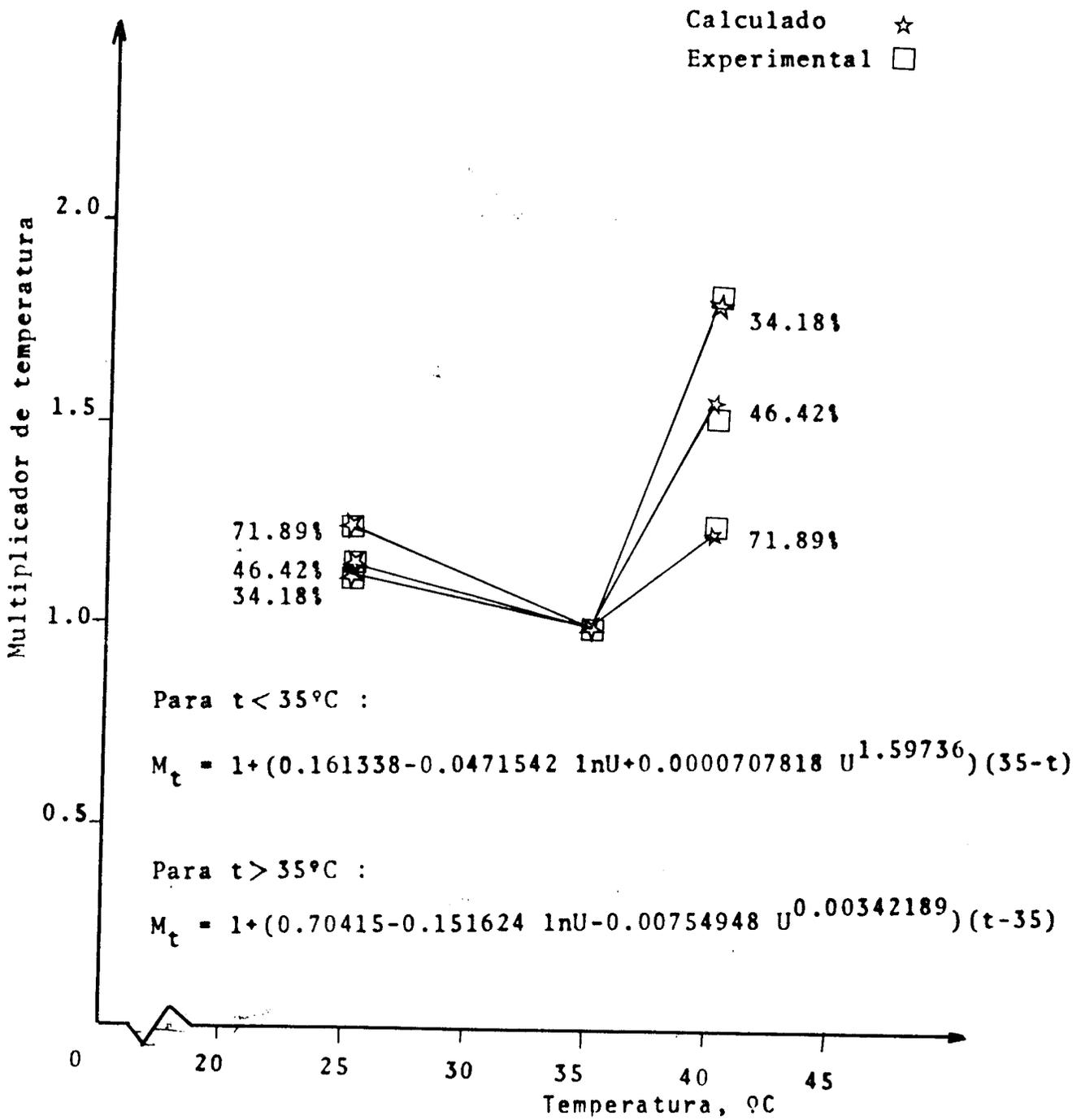


GRAFICO nº 5. Previsão do Multiplicador de Temperatura (M_t)

$$M_t = 1 + (B_0 - B_1 \ln U + B_2 U^{B_3}) (35 - t) \quad (7)$$

Quando se dá a condição de $t < 35^\circ\text{C}$.

Onde:

$$B_0 = 0.161338$$

$$B_1 = 0.0471542$$

$$B_2 = 0.0000707818$$

$$B_3 = 1.59736$$

e

$$M_t = 1 + (B_0 - B_1 \ln U + B_2 U^{B_3}) (t - 35^\circ\text{C}) \quad (8)$$

Ao se dar a condição de $t > 35^\circ\text{C}$.

Onde:

$$B_0 = 0.70415$$

$$B_1 = 0.151624$$

$$B_2 = 0.00754948$$

$$B_3 = 0.00342189$$

O Multiplicador de umidade (M_u) calculado e sua boa previsão pelo modelo obtido, se apresentam no gráfico nº 6, sendo que as equações que o representam são as seguintes:

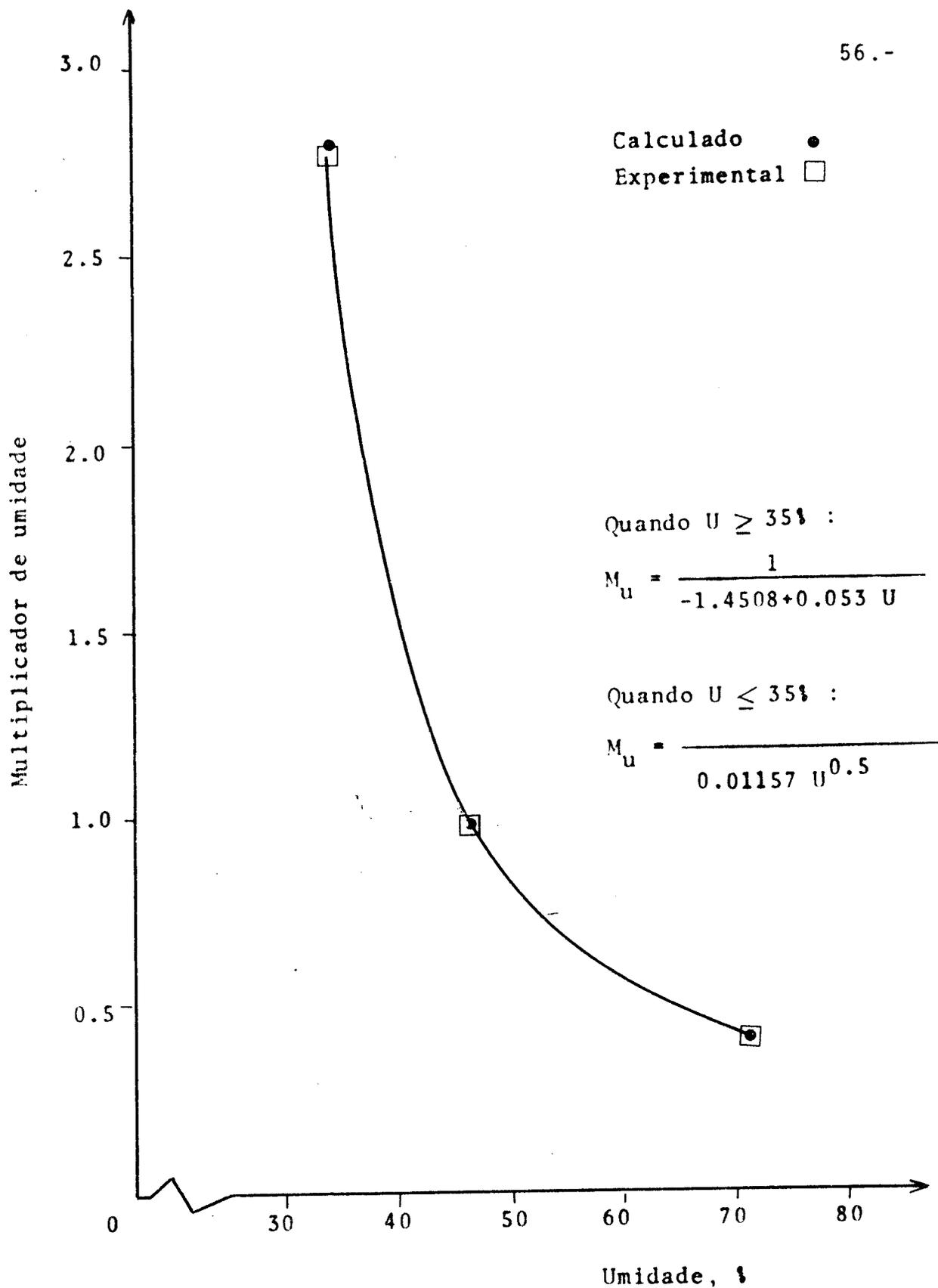


GRAFICO nº 6 Previsão do Multiplicador de umidade (M_u)

$$M_u = \frac{T}{T_{eq}} = \frac{1}{a-b(U)} \quad \text{quando } U \geq 35^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

sendo que:

$$a = - 1.4508$$

$$b = 0.053$$

$$U = \% \text{ umidade, bu}$$

e

$$M_u = \frac{1}{a U^b} \quad \text{quando } U \leq 35^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

onde:

$$a = 0.01157$$

$$b = 0.50$$

$$U = \% \text{ umidade, bu}$$

Sumarizando, o modelo matemático desenvolvido, o qual representa a tendência de crescimento dos fungos em função do tempo de permanência a temperatura e umidade dos grãos nas faixas de 35 a 45°C e 71.89 e 36.42%, respectivamente, expressado em forma de índice de deterioração, é o seguinte:

$$ID = A_0 + T_{eq} (A_1 + T_{eq} (A_2 + A_3 T_{eq}))$$

$$\begin{aligned} A_0 &= 0.609531291 \\ A_1 &= 0.03377596711 \\ A_2 &= -7.864053089 \cdot 10^{-4} \\ A_3 &= 3.689236118 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

(5)

Quando $33 \leq T_{eq} \leq 88$ hr;

$$\begin{aligned} ID &= 1.0 && \text{; quando } T_{eq} < 33 \text{ hr; e} \\ ID &= 0.0 && \text{; quando } T_{eq} < 88 \text{ hr.} \end{aligned}$$

onde:

ID = Índice de deterioração (0.0 = 100% de fungos e
1.0 = 0% de fungos).

$$(6) \quad T_{eq} = \text{Tempo equivalente} = \frac{T}{M_t M_u} \quad ; \quad T = \text{tempo, hr}$$

$$(7) \quad M_t = 1 + (B_0 - B_1 \ln U + B_2 U^{B_3}) (35 - t) \quad \begin{aligned} B_0 &= 0.161338 \\ B_1 &= 0.0471542 \\ B_2 &= 0.0000707818 \\ B_3 &= 1.59736 \end{aligned}$$

Para a condição de $t \leq 35^\circ\text{C}$; e

$$(8) \quad M_t = 1 + (B_0 - B_1 \ln U + B_2 U^{B_3}) (t - 35) \quad \begin{aligned} B_0 &= 0.70415 \\ B_1 &= 0.151624 \\ B_2 &= 0.00754948 \\ B_3 &= 0.00342189 \end{aligned}$$

Na condição de $t \geq 35^\circ\text{C}$

$$(9) \quad M_u = \frac{T}{T_{eq}} = \frac{1}{a - b(U)} \quad \begin{aligned} a &= -1.4508 \\ b &= 0.053 \end{aligned} \quad ; \quad U = \% \text{ umidade}$$

quando $U \geq 35^\circ\text{C}$; e

GRAFICO nº 7 Crescimento de fungos em café mantido a 34.18% de umidade e à 25, 35 e 40°C.

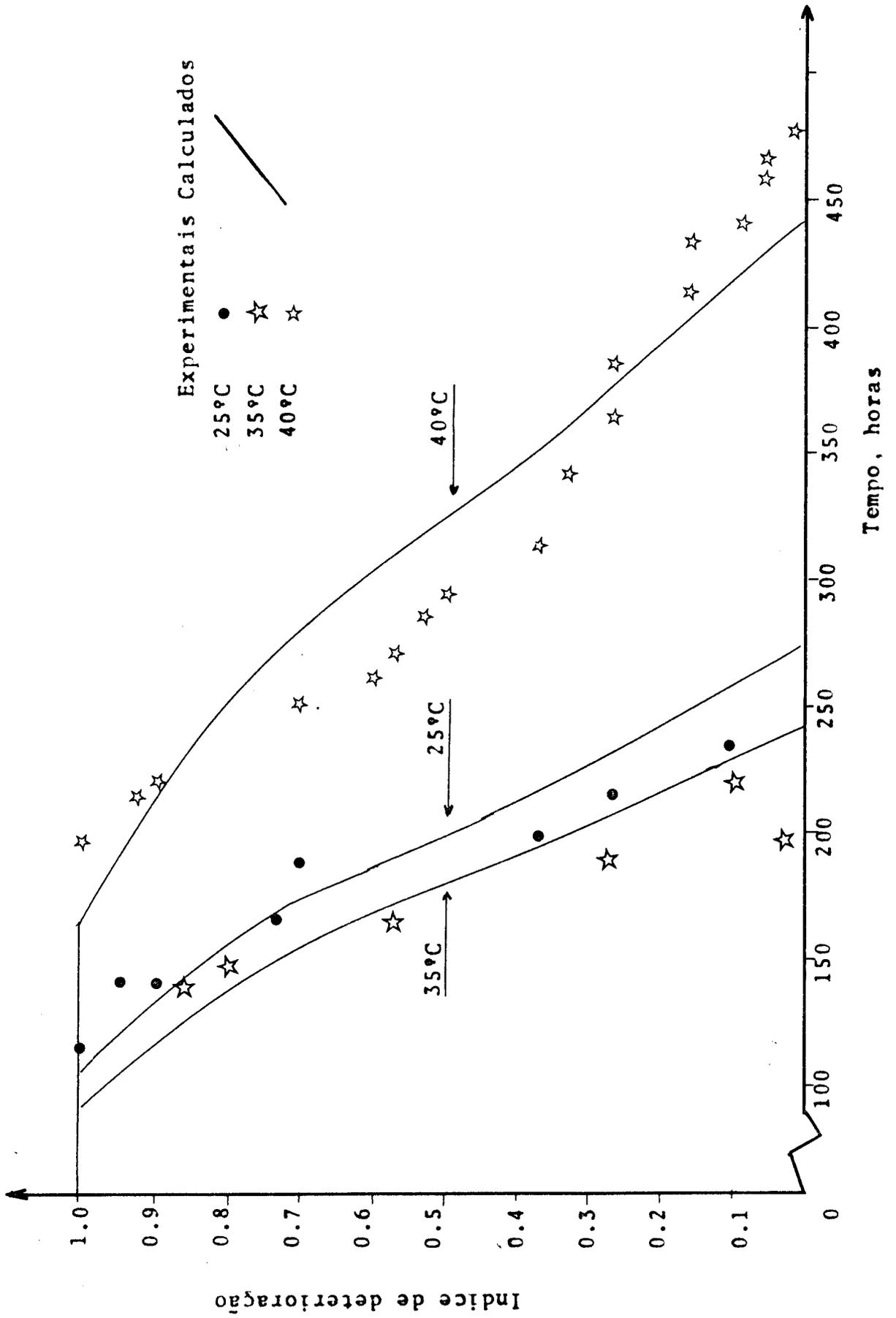


GRAFICO n°8 Crescimento de fungos em café mantido a 46.42% de umidade e a 25, 35 e 40°C.

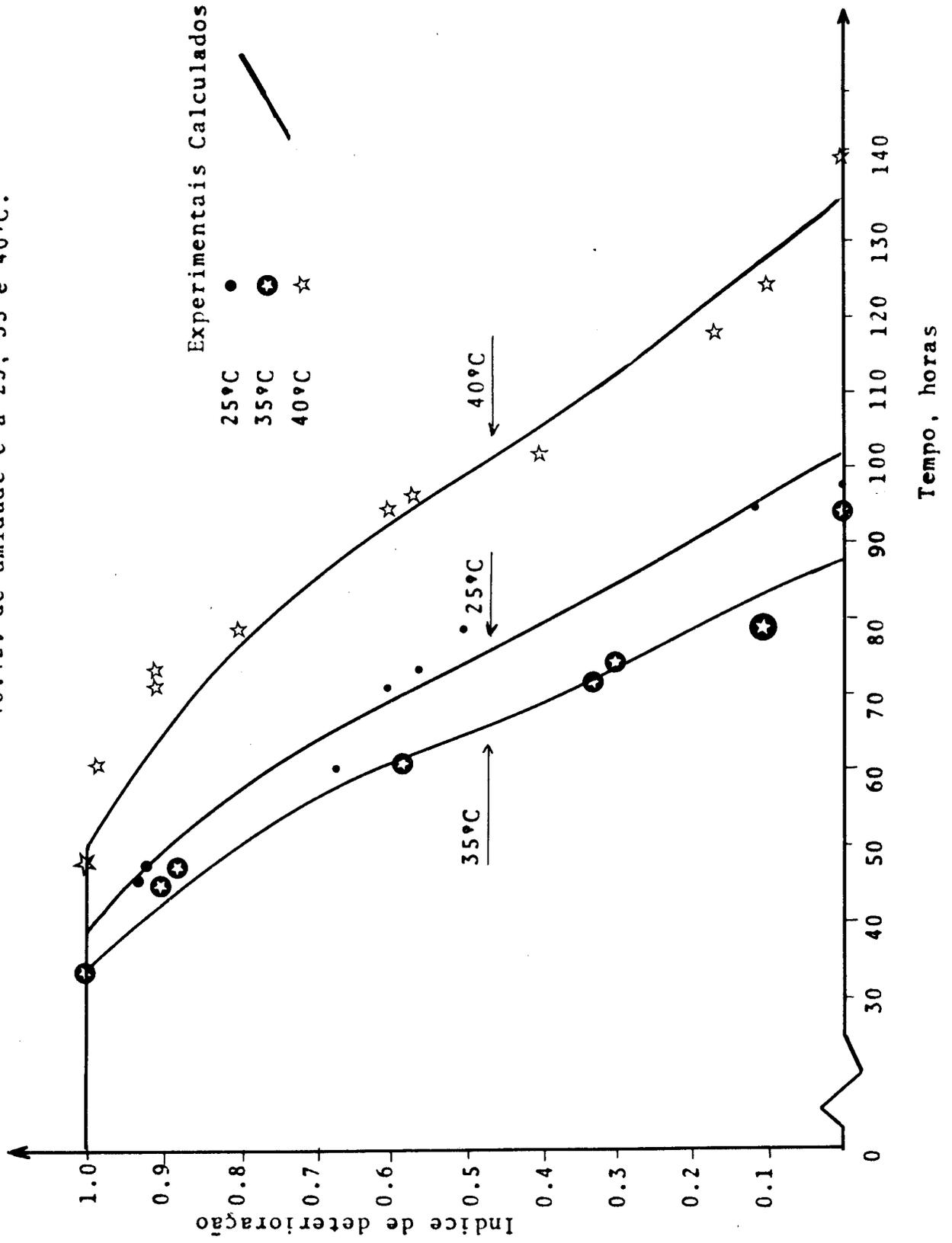
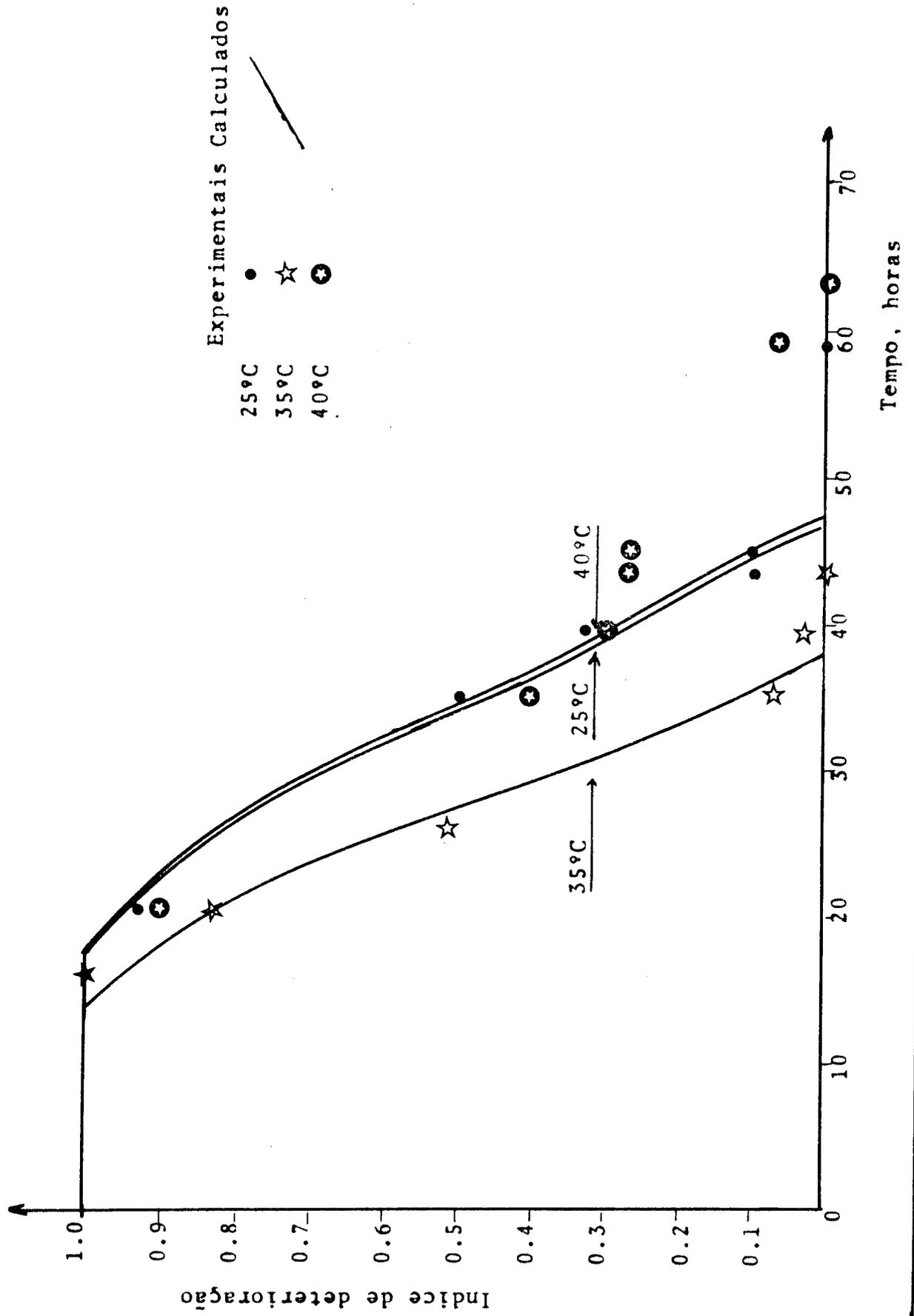


GRAFICO n°9 Crescimento de fungos em café mantido a 71.89% de umidade e a 25, 35 e 40°C



$$M_u = \frac{T}{T_{eq}} = \frac{1}{a U^b} \quad \begin{array}{l} a = 0.01157 \\ b = 0.50 \end{array} ; U = \% \text{ umidade}$$

quando $U \leq 35^\circ\text{C}$.

Finalmente, nos gráficos nº 7, 8 e 9 se apresenta a confrontação do modelo matemático desenvolvido com o crescimento de fungos avaliado experimentalmente. Observa-se a boa predição, especialmente se considera-se a natureza ainda subjetiva do critério de deterioração utilizado.

5.2. Comprovação do modelo matemático

No quadro nº 5 se apresenta as condições de secagem, de umidade do grão e o resultado comparativo de deterioração experimental e simulado nas camadas inferior (0 a 10 cm), média (60 a 70 cm) e superior (110 a 120 cm), durante a pré-secagem de café, com convecção forçada do ar, na barcaça que serviu para a prova do modelo matemático de deterioração. Observa-se que o crescimento de fungos atingiu 100% às 69 e às 61 horas, na camada superior e média, respectivamente, sem se apresentar crescimento total na camada inferior; durante o período de pré-secagem. Na simulação, o crescimento total de fungos foi atingido as 61 horas na camada superior e média, e também não chegou-se a predizer um índice de 0.0 (100% de fungos) na camada inferior, para umidades acima de 35% (é importante notar que o modelo desenvolvido só tem aplicação na faixa de temperaturas e umidades do grão estudadas, sendo que a extrapolações dão resultados completamente errados).

Considerando-se a natureza ainda subjetiva do critério de avaliação baseado no crescimento de fungos, pode dizer-se que existe uma boa correlação entre o ID experimental e o obtido por simulação.

Quando foi feita a amostragem periódica nas diferentes camadas e a intervalos de 1.5 dias, na experiência anterior, para determinar a qualidade da bebida se fez a prova de "xícaras". Não observou-se mudança de qualidade em nenhuma das camadas, confirmando mais uma vez que o crescimento de 100% de fungos não significa necessariamente uma mudança de qualidade organoléptica da bebida.

QUADRO Nº 5 - Comparação de resultados experimentais e simulados do ID nas camadas inferior, média e superior, durante a pré-secagem de café em barcaça.

TEMPO SECAGEM (hrs)	UMIDADE DOS GRÃOS (% bu)			ÍNDICE DE DETERIORAÇÃO					
	C. Super	C. Média	C. Infer.	Experimental			Simulado		
	C. Super	C. Média	C. Infer.	C. Super	C. Média	C. Inf.	C. Sup.	C. Média	C. Inf.
-	71.89	71.89	71.89	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22	71.14	70.72	54.45	0.80	0.60	0.90	0.97	0.97	0.98
37	69.82	70.36	51.77	0.40	0.15	0.70	0.59	0.59	0.69
46	68.67	69.93	44.09	0.35	0.10	0.40	0.26	0.26	0.44
61	67.85	68.86	41.44	0.25	0.00	0.40	0.00	0.00	0.12
69	66.54	68.06	36.11	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	-
83	65.60	62.86	35.27	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	-
109	65.11	60.96	29.73	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
117	63.56	57.59	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
133	61.26	52.24	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
139	57.22	47.10	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
157	53.15	36.93	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
164	50.31	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-
170	42.46	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-
188	36.11	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-

5.3. Determinação de Vazões Ótimas

Nos gráficos nº 10 a 18 se apresentam as vazões de ar e os tempos correspondentes, obtidos por simulação, para pré-secar grãos de café com umidades iniciais de 50, 60 e 70% , até 35% de umidade final, quando se usou ar a temperaturas de 35, 40 e 45°C e umidades relativas de 20, 30 e 40%. Três critérios de deterioração, baseados no crescimento máximo de fungos na camada superior, de 0, 50 e 100% foram empregados. Por exemplo, no gráfico nº 14 observa-se que a vazão mínima necessária para pré-secar café com umidade inicial de 60%, considerando um critério de deterioração máximo de 50% na camada superior, e secagem com ar a 40°C e 30% de umidade relativa, é de 27 m³/min-ton. O tempo de secagem para reduzir o teor de umidade de 60% até 35%, nessas condições de secagem, é de 63 horas.

Os gráficos desenvolvidos permitem analisar o efeito de cada variável: teor inicial do grão, e umidade e temperatura do ar de secagem sobre a vazão de ar necessária na pré-secagem, para se obter uma deterioração dada. Por exemplo:

- a. Se o teor de umidade inicial do café considera-se variável, mantendo as outras características constantes, observa-se que as vazões ótimas se incrementam grandemente na medida que aumenta o teor de umidade. Assim por exemplo: Quando para um critério de ausência total de fungos, a vazão ótima necessária para secar grãos com 50% de umidade inicial e

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 49.5 hr.

50% umid. inicial
0% cresc. fungos

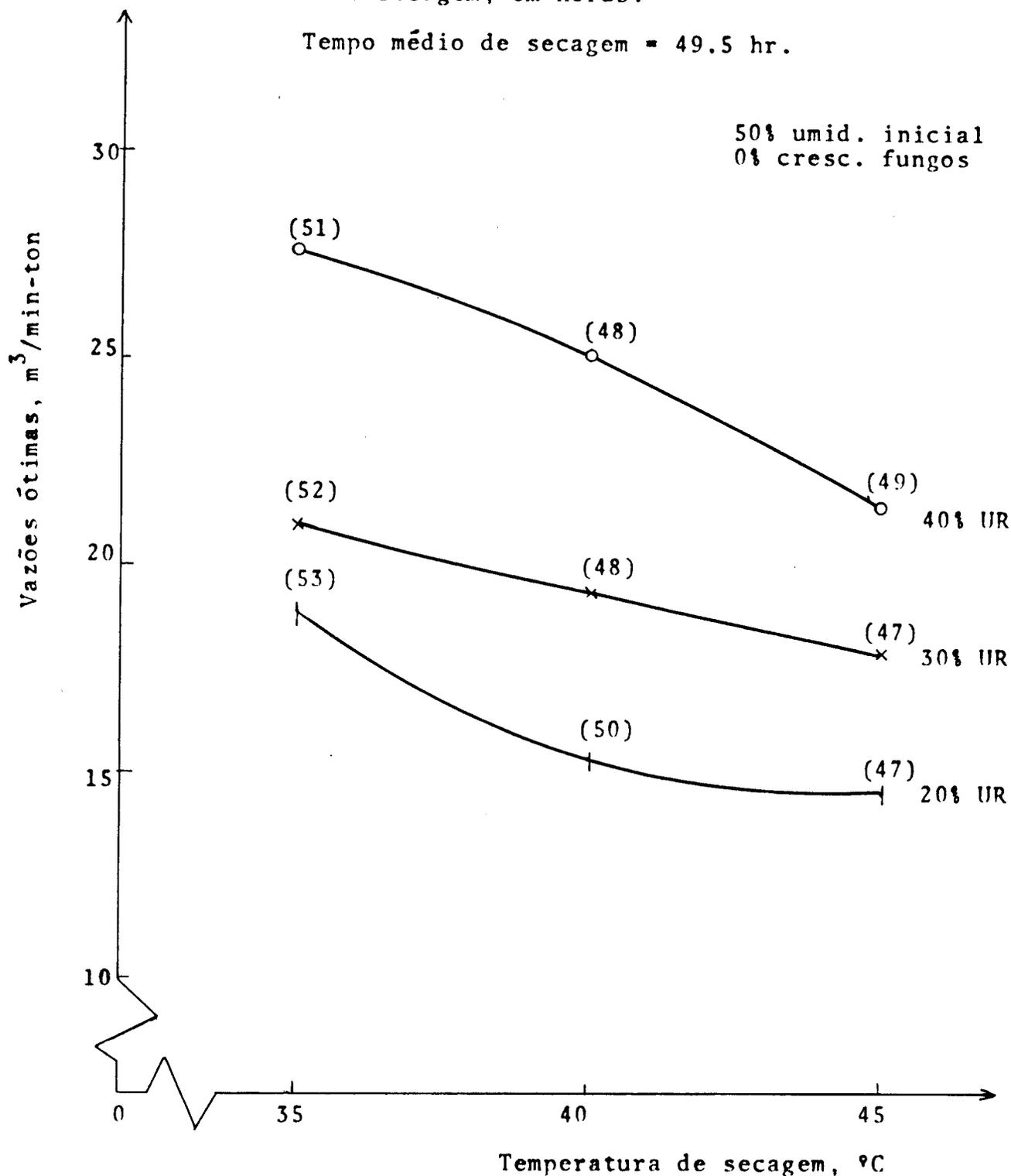


GRAFICO nº 10. Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 77 hr

50% umid. inicial
50% cresc. fungos

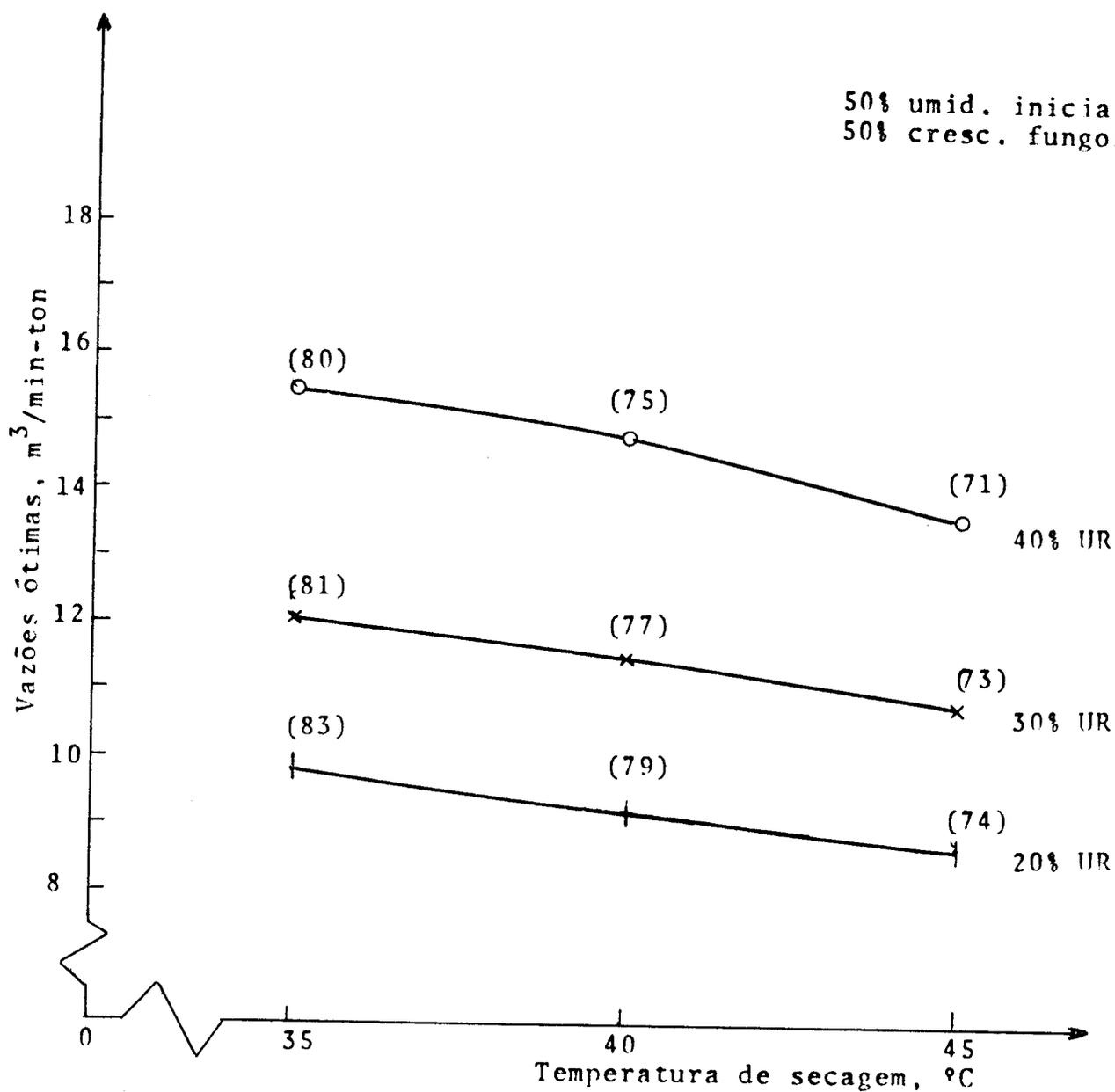


GRAFICO nº 11. Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 50% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 101 hr.

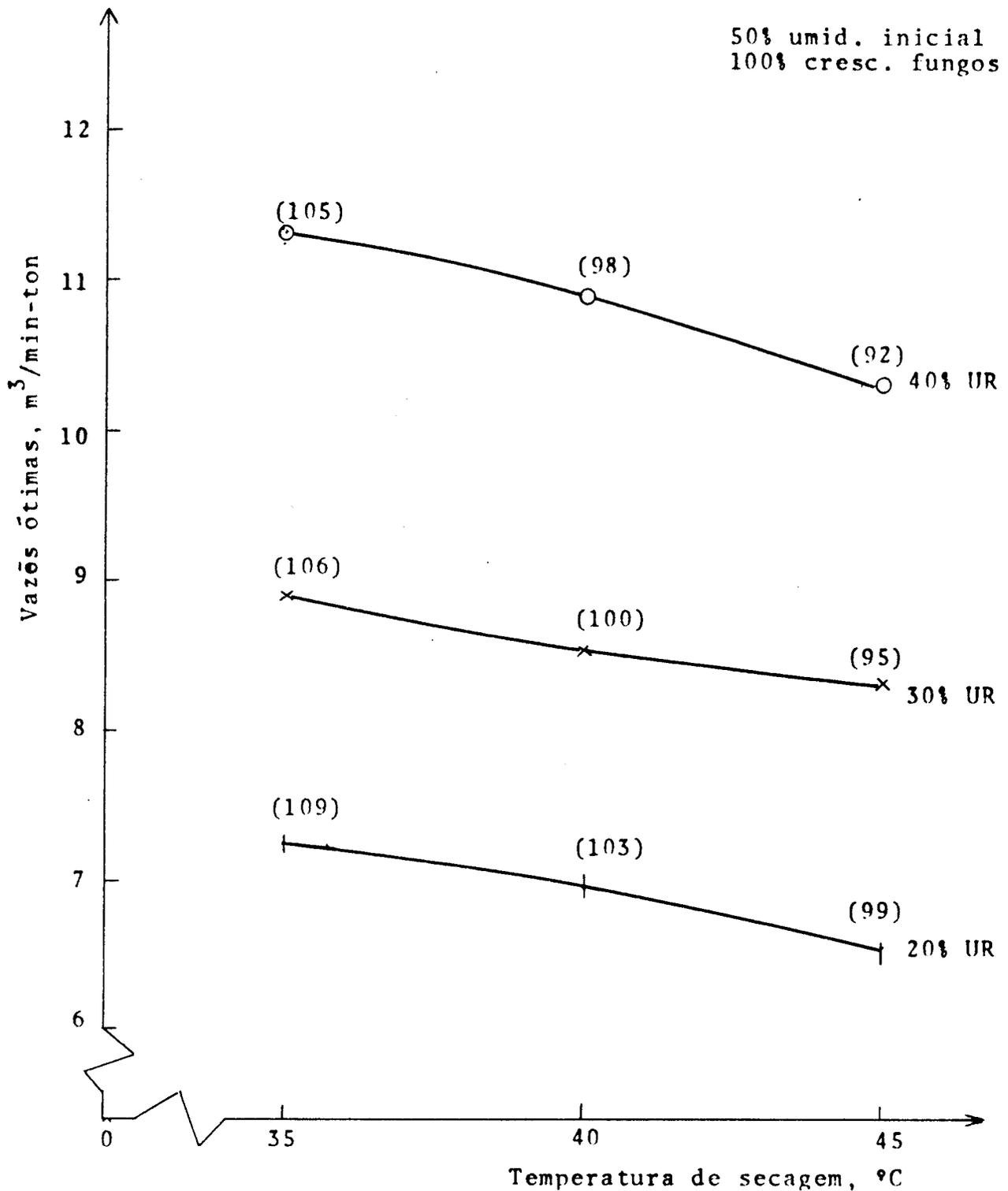


GRAFICO nº12. Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 50% e critério de deterioração de 100% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 43 hr.

60% umid. inicial
0% cresc. fungos

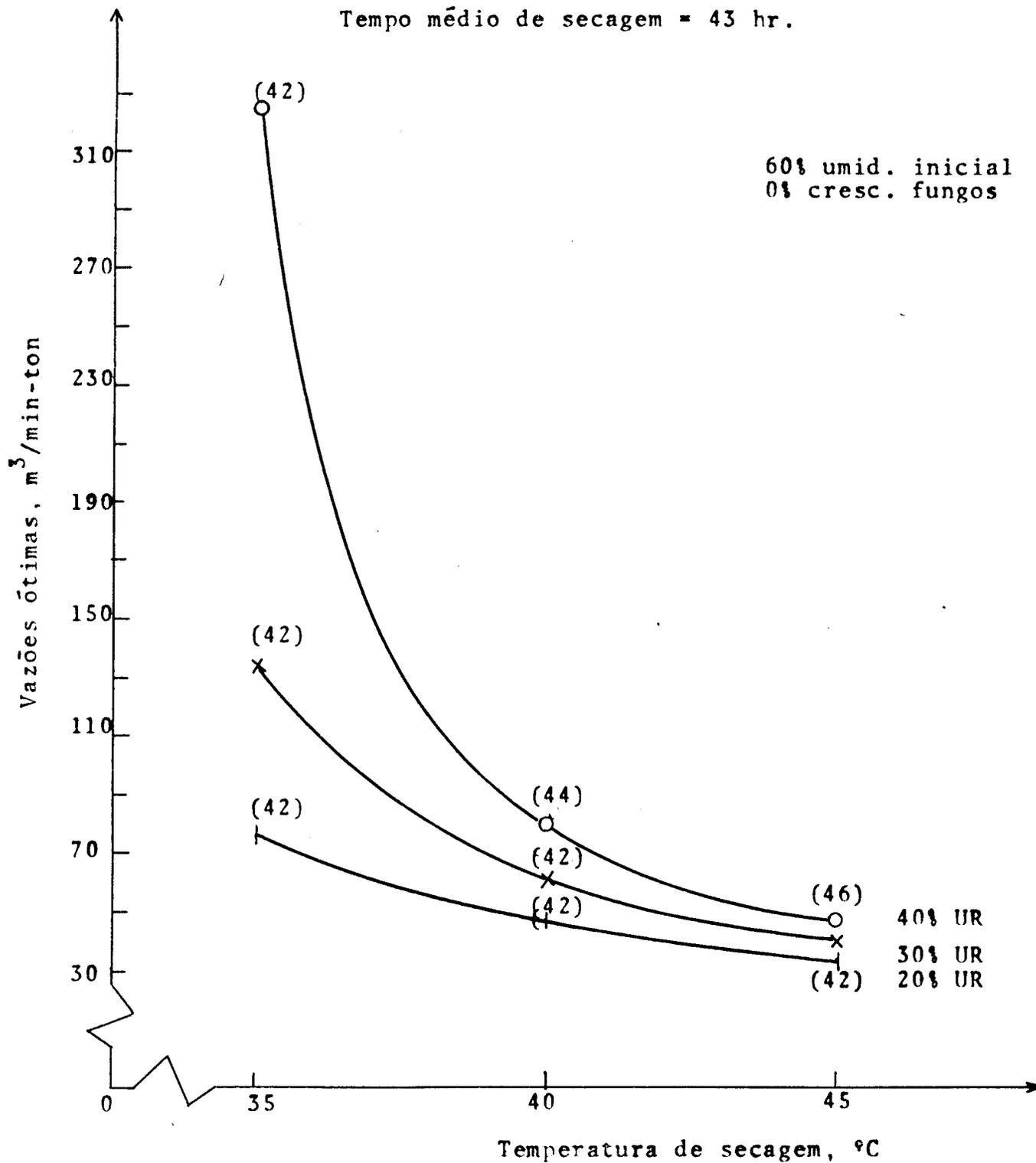


GRAFICO nº 13. Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 64 hr.

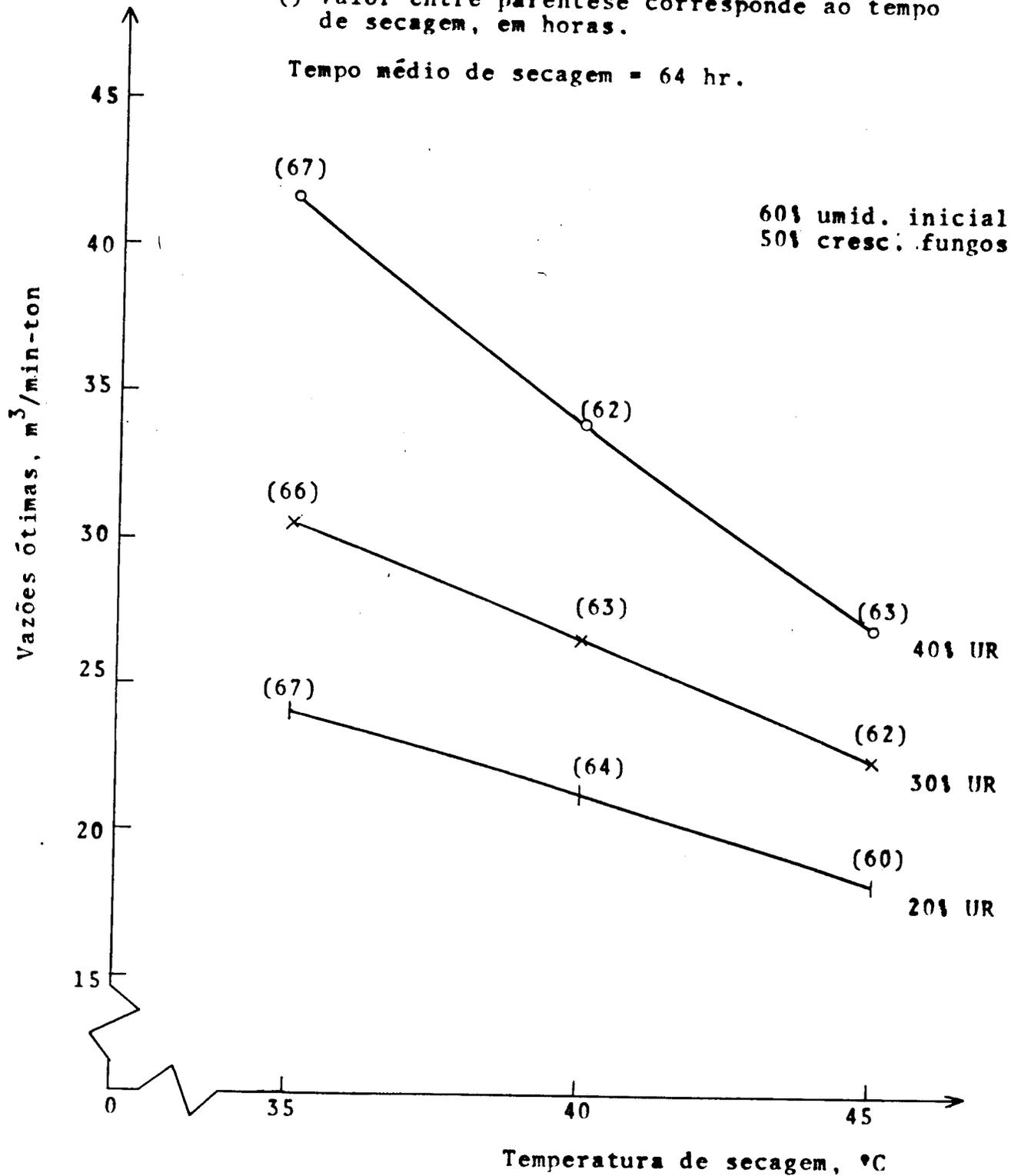


GRAFICO nº14. Vazoes ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 50% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 82 hr.

60% umid. inicial
100% cresc. fungos

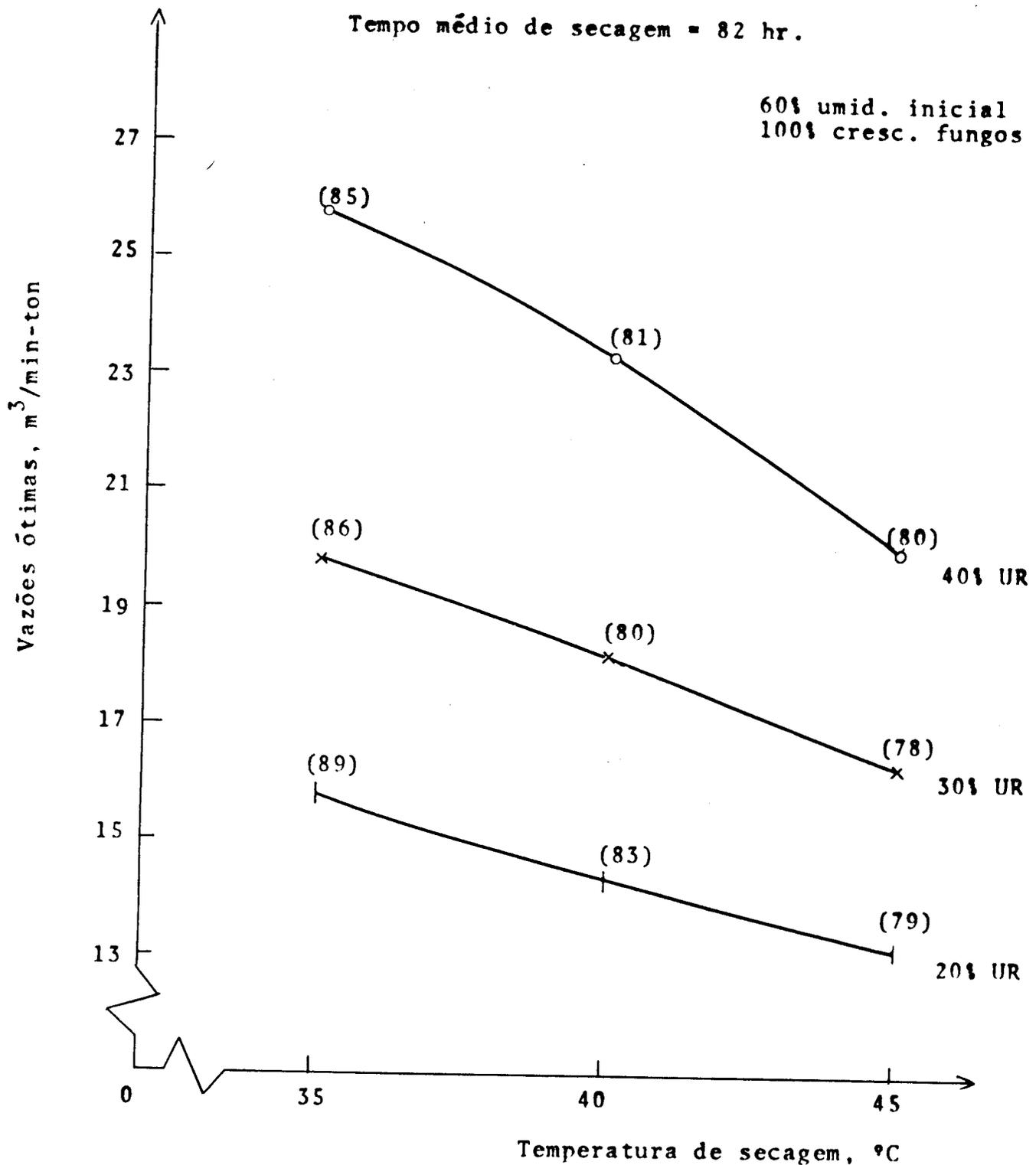


GRAFICO n°15 Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 60% e critério de deterioração de 100% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 45 hr.

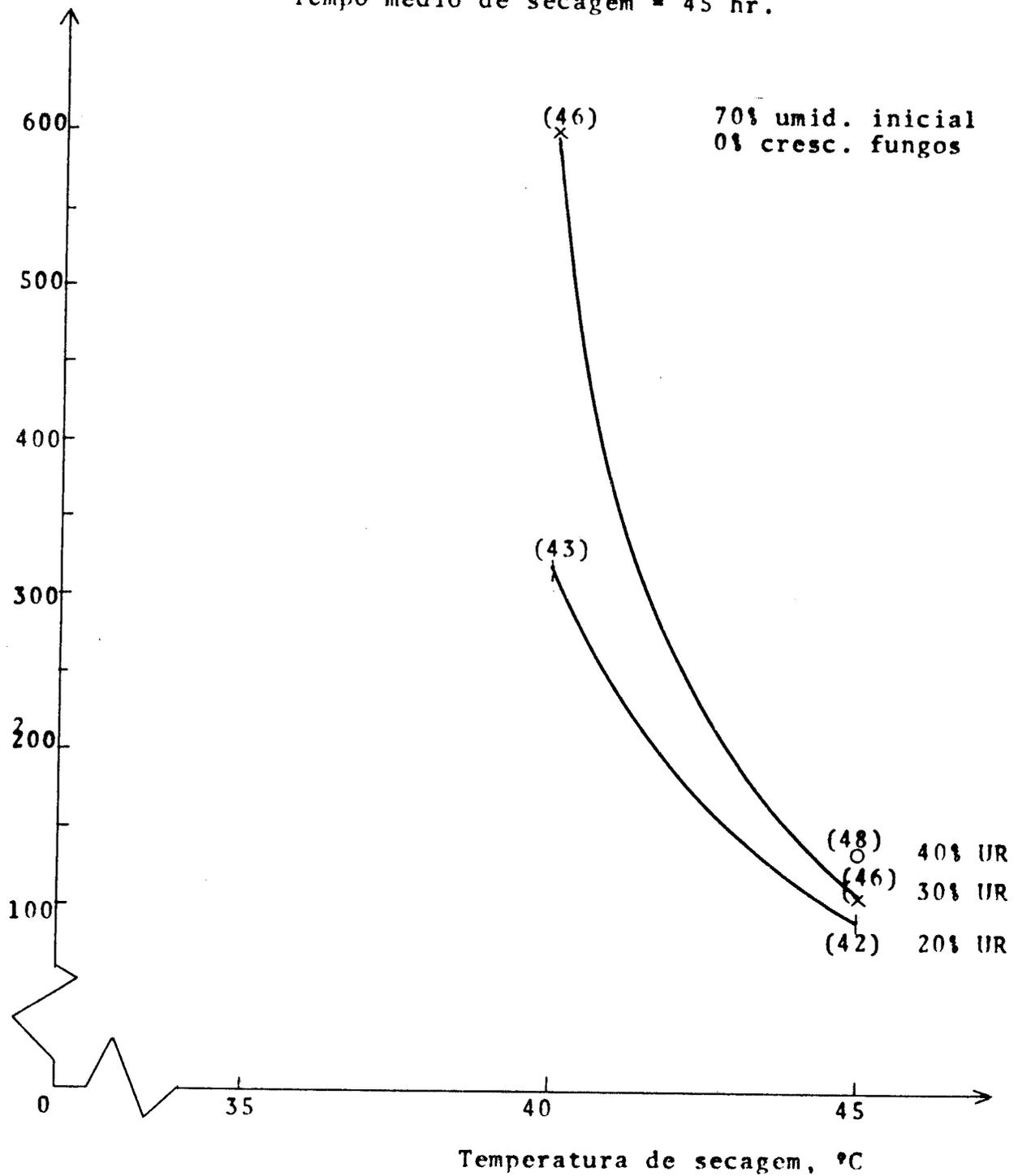


GRAFICO n° 16 Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 70% e critério de deterioração de 0% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 59 hr.

70% umid. inicial
50% cresc. fungos

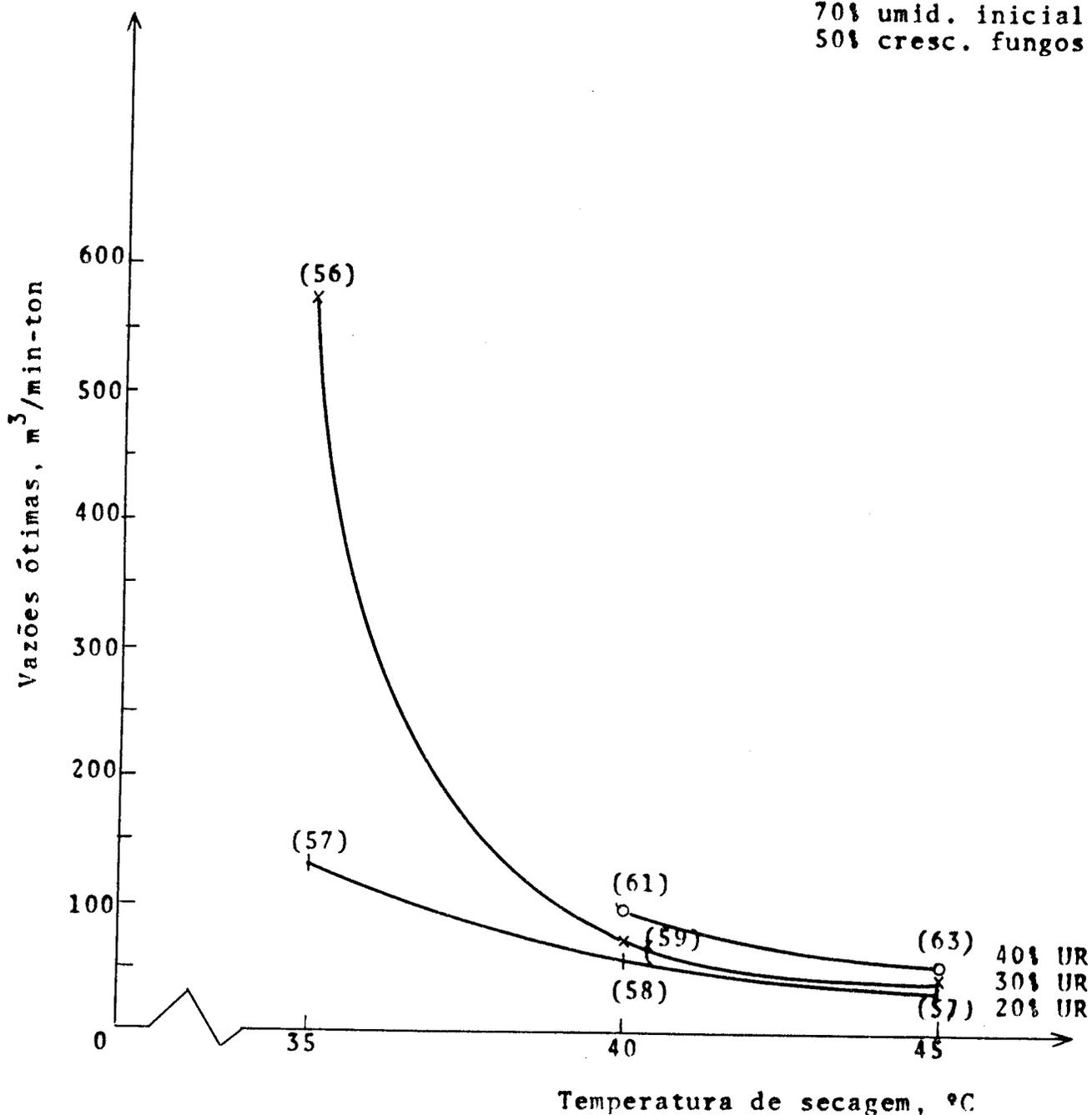


GRAFICO nº17 Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 70% e critério de deterioração de 50% de crescimento de fungos.

() Valor entre parêntese corresponde ao tempo de secagem, em horas.

Tempo médio de secagem = 74 hr.

70% umid. inicial
100% cresc. fungos

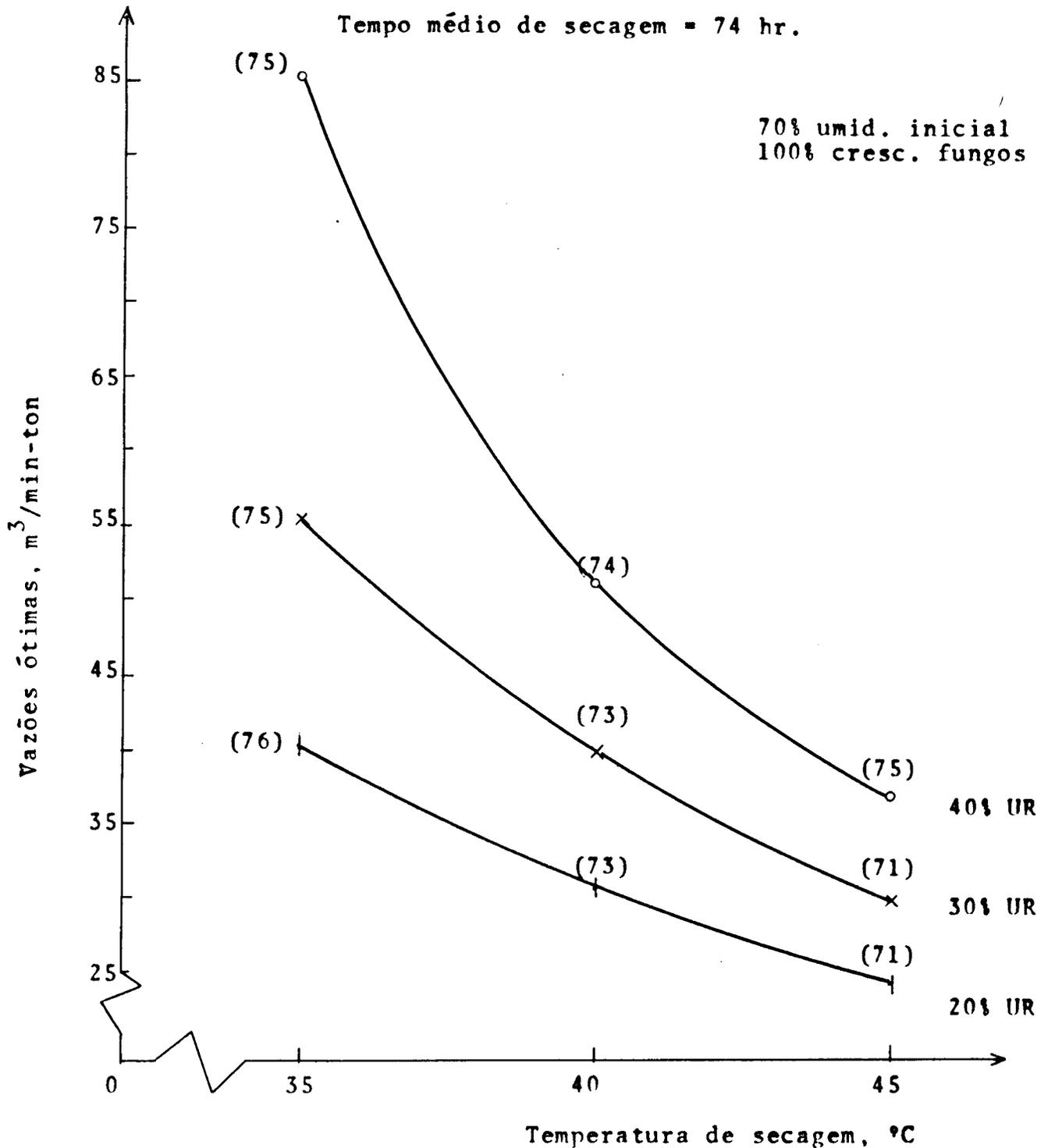


GRAFICO nº 18 Vazões ótimas necessárias para a secagem de café com umidade inicial de 70% e critério de deterioração de 100% de crescimento de fungos.

- condições de ar de secagem de 40°C e 30% de umidade relativa, é de $19.4 \text{ m}^3/\text{min-ton}$, para grãos com 60% é de $60.5 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ e para grãos com 70% de umidade inicial, a vazão ótima aumenta a $600 \text{ m}^3/\text{min-ton}$.
- b. Se deseja-se estudar o efeito isolado da temperatura do ar de secagem, a vazão ótima diminui na medida que se aumenta a temperatura. Assim por exemplo: no gráfico nº 14 observa-se que para ar com umidade relativa de 30% e temperatura de 35°C se necessita uma vazão de $30.6 \text{ m}^3/\text{min-ton}$, para 40°C precisa-se de $26.7 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ e para 45°C a vazão ótima é de $22.3 \text{ m}^3/\text{min-ton}$.
- c. Variando a UR do ar de secagem, a uma mesma temperatura, observa-se que na medida que esta aumenta, se incrementa significativamente a vazão ótima para uma mesma condição de secagem. Por exemplo: nas condições indicadas no gráfico nº 14, observa-se que, a temperatura de 35°C , a vazão ótima para secar grãos com um teor de umidade inicial de 60%, $ID = 0.5$ e a 20% de UR do ar, é de $24.0 \text{ m}^3/\text{min-ton}$; a 30% é de $30.6 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ e a 40% de UR é de $41.6 \text{ m}^3/\text{min-ton}$.
- d. Variando o critério de deterioração, para as mesmas condições do ar de secagem e teor de umidade do grão, observa-se um marcado incremento da vazão ótima na medida que se faz mais exigente o critério

de deterioração, desde $ID = 0.0$ até $ID = 1.0$.

A maneira de exemplo, observa-se nos gráficos nº 13, 14 e 15, para temperatura do ar de 40°C e 30% de umidade relativa e grão com 60% de umidade inicial, que se precisam vazões mínimas de $60.5 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ para o critério de ausência de fungos na camada superior. Considerando-se um critério de deterioração máximo de 50% de crescimento de fungos na camada superior, precisam-se $26.7 \text{ m}^3/\text{min-ton}$ e para se ter 100% de crescimento de fungos, se precisam $18.2 \text{ m}^3/\text{min-ton}$.

Os gráficos desenvolvidos servem também para decidir sobre a melhor alternativa econômica da secagem, quer na base de uso de alta vazão e baixa temperatura ou de baixa vazão e temperatura alta.

5.4. Análise de Custo de um Sistema de pré-secagem em barcaça

Nesta seção apresenta-se a forma de usar a informação obtida na otimização de vazões mínimas, no análise econômico de um projeto de barcaça pré-secadora, em uma situação específica.

Por exemplo, deseja-se projetar uma barcaça para pré-secar 4 toneladas de café recém colhido, com 60% de umidade inicial, usando um critério de 50% de crescimento de fungos, no mês de Junho, em Campinas.

No gráfico nº 14 se observa que para dar solução a questão apresentada se têm duas alternativas extremas: a alterna

tiva 1 requiere uma vazão de $168 \text{ m}^3/\text{min}$ ($42 \text{ m}^3/\text{min-ton}$) com ar a 35°C e 40% de umidade relativa. A alternativa 2 precisa uma vazão de $76 \text{ m}^3/\text{min}$ ($19 \text{ m}^3/\text{min-ton}$) e ar de secagem a 45°C e 20% de umidade relativa. isto é, a alternativa 1 requiere alta vazão e baixa temperatura e a alternativa 2 precisa baixa vazão e alta temperatura do ar.

A confrontação do efeito da temperatura sobre a vazão pode ser feita em termos econômicos, analisando os constituintes da barçaça susceptíveis de se variar em tamanho ou potência, como são o coletor solar e o ventilador, respectivamente. Esta informação permite ao interessado tomar a decisão de sua conveniência, sobre si usar alta vazão e baixa temperatura, ou vice-versa.

Para as condições tipificadas em nosso exemplo, se estima que para a alternativa 1 precisa-se de um ventilador de 5 HP e um coletor solar plano de 130 m^2 ; e para a alternativa 2 requiere-se de um ventilador de 1 HP de potência e um coletor solar de 160 m^2 .

No quadro que segue se apresenta a estimacão econômica da barçaça solar projetada nas condições exemplificadas anteriormente:

QUADRO Nº 6 - Análise de custo de uma barcaça pré-secadora de café na região de Campinas, quando se utiliza alta vazão e baixa temperatura (alternativa 1) e quando se utiliza uma baixa vazão e alta temperatura (alternativa 2).

ITEM	Custo (*)	Alternativa 1	Custo (*)	Alternativa 2
Barcaça	Cr\$	23.000,00	Cr\$	23.000,00
Coletor Solar		<u>64.800,00</u>		<u>91.000,00</u>
Ventilador		15.500,00		10.500,00
TOTAL		103.500,00		124.500,00

(*) Valores de Fevereiro de 1979.

A confrontação econômica apresentada no quadro anterior dá um valor de Cr\$ 103.500,00 a barcaça projetada para trabalhar com a vazão maior e de Cr\$ 124.500,00 para a barcaça que utiliza uma vazão menor. Assim, em nosso exemplo, recomenda-se a compra de ventilador maior (5 HP) e a construção de um coletor solar plano de 130 m².

6. CONCLUSÕES

Nas condições de execução deste trabalho se obtiveram as conclusões seguintes:

1. Quando foi estudado o efeito das condições de pré-secagem de café: temperatura, umidade dos grãos e tempo sobre a qualidade da bebida do produto, avaliado pela prova de "xícara", observou-se mudança na qualidade original do gosto, sem se obter variações detetáveis nos parâmetros acidez e aroma da bebida. Concluiu-se também que não existe correlação definida entre as condições de temperatura, umidade do grão e o tempo necessário para variação da qualidade.
2. No estudo do efeito das condições de pré-secagem de café sobre o desenvolvimento de fungos, observou-se uma resposta de tendência proporcional ao aumento da umidade do grão. A temperatura, porém, teve uma resposta, com melhor crescimento dos fungos a 35°C, logo a 25°C e à pior a 40°C.
3. Na confrontação dos critérios de deterioração avaliados pela prova de "xícara" e pelo desenvolvimento dos fungos, respectivamente, observa-se que o 100% de crescimento fúngico não corresponde necessariamente a deterioração da qualidade da bebida de café, de onde se conclue que o critério de deterioração baseado no crescimento de fungos é mais estrito que a prova sensorial.

4. O modelo matemático desenvolvido serve para predizer a deterioração do café na base do crescimento fúngico; e pode ser utilizado nas faixas de umidade de 72% até 35% e temperatura entre 25°C e 40°C. Extrapolações podem levar a resultados completamente errados.
5. Na prova do modelo matemático se observou boa correlação entre o índice de deterioração experimental e o obtido por simulação, especialmente ao se considerar a subjetividade do critério de avaliação do crescimento de fungos.
6. O modelo desenvolvido foi utilizado junto a adaptação do modelo empírico de Thompson et al (1968) para determinar as vazões ótimas requeridas na pré-secagem de café em barçaça, a diversos teores de umidade inicial do grão, a diferentes condições de temperatura e umidade do ar de secagem e diferentes critérios de deterioração. Os Gráficos com os resultados das vazões mínimas requeridas servem para estudar a influência de cada variável de secagem e também permite o análise econômica do sistema.

7. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De maneira geral, todo trabalho científico esclarece uma parte do conhecimento, de acordo aos objetivos propostos, e gera outras inquietudes: é a natureza do Homem. Em nosso caso, o presente trabalho cumpriu com os seus objetivos e gerou também novas inquietudes. Sumariamente as recomendações para pesquisas futuras, relacionadas com o tema desta tese, são as seguintes:

1. Obter um modelo matemático para predizer o crescimento de fungos nas temperaturas de 25 a 40°C e teores de umidade do grão de 15 a 35%. Informação de grande utilidade na medida que poder-se-ia ampliar a faixa de simulação do modelo de deterioração, a toda a faixa de secagem, desde a umidade de colheita dos grãos até 12% de umidade final.
2. Obter as vazões mínimas necessárias para a secagem no segundo estágio (de 35% a 12%), em silos.
3. Testar o sistema de dois estágios em protótipos de laboratório e a nível industrial, e estudar sua viabilidade econômica.
4. Pesquisar novos critérios de deterioração do café.

BIBLIOGRAFIA

1. ABDUL-BAKI, A.A. e J.D. ANDERSON. 1972. Physiological and Biochemical Deterioration of Seeds. In: SEED BIOLOGY; T. Kozlowsky. Academic Press, vol. 2, ps. 283-309.
2. AMORIM, H.V. e V.L. AMORIM. 1977. Coffee Enzymes and Coffee Quality. Acs. Symposium Series, nº 47. In: ENZIMES IN FOOD AND BEVERAGE PROCESSING.
3. BACCHI, O. 1955. Seca da Semente de Café ao Sol. Bragantia, Boletim Técnico do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo. 14 (22): 225-236.
4. BAKKER-ARKEMA, F.W. et al, 1974. Grain Drier Simulation. MSU, East Lansing, Agricultural Experiment Station. (Technical Bulletin 224). 79 p.
5. BARBOSA, L.F.; TEIXEIRA, A.A. e A. CASTILHO. 1962. Um novo Desmucilinizador do Café Despolpado. São Paulo, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, DDV. 42 p.
6. BARROS, F.M. e V.A. ARRUDA. 1954. Secagem Racional de Café. Boletim da Superintendência dos Serviços do Café. 29 (325): 5-16.
7. BITANCOURT, A.A. 1956. As Fermentações e Podridões da Cereja do Café. O Biológico. 22: 205-214.
8. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. and C.W. HALL. 1974. Drying Cereal Grains. Westport, Connecticut. The AVI Publishing Company, Inc. Cap. 8, p. 185-221.

9. CAFÉ O ANO DE GEADA. Conjuntura Econômica. Rio de Janeiro, 30 (2): 88-90, Fevereiro de 1976.
10. CAFÉ FIRME EM MARÇO. Conjuntura Econômica. Rio de Janeiro, 30 (4): 6-7, Abril de 1976.
11. CARVALHO, A. 1956. Secagem de Café em Terreiro. Boletim da Superintendência dos Serviços de Café, São Paulo, 31 (353): 34-35.
12. DE FREITAS, M.F. 1968. Microbiologia do Café. Curso de Especialização para Classificador-Provador de Café. 13 pp. mimeografado.
13. DYE, J.L. and U.A. NICELY. 1971. A General Purpose Curvetyng Program for Class and Research Use. In: Journal of Chemical Education. 48: 443-448.
14. DORFMAN, E.; ROA, G.; VILLA, L.G.; TEIXEIRA, A.A. e R.S. GARRUTTI. 1978. Utilização da Energia Solar Complementada com Energia Elétrica na Secagem do Café em Barcas com Circulação Forçada de Ar. In: Resumos do 6º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. IBC-GERCA. Realizado em Ribeirão Preto - SP, de 24 a 27 de Outubro de 1978.
15. ESTADO DE SÃO PAULO. 27 de Julho de 1977. pp. 1 e 32.
16. FOLHA DE SÃO PAULO. 24 de Julho de 1977. p. 42.
17. FRANCO, L.M. 1960. A Eliminação da Substância Pécica do Café Despulpado é Causada por Microorganismos. Bragantia 19: 621-626.

18. GIBSON, A. 1972. Aspectos Fotoquímicos da Secagem de Cafês Arábicas da África Oriental. In: Colloque International Sur la Chimie des Cafes, 5^o Paris, (Lisbonne, 14-19 de Jun. 1971), ASIC.
19. GOVÊRNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Cultura do Café. Boletim Técnico da Secretaria de Agricultura. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI). São Paulo. 90 p.
20. HEINRICH, W.D. e J. ABRAHÃO. 1966. Pragas e Doenças do Cafeeiro. Boletim Técnico do Instituto Biológico de São Paulo - SP. 44 p.
21. INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. 1974. Cultura do Café no Brasil. Manual de Recomendações. Rio de Janeiro. 261 p.
22. KRUG, H.P. 1940. Cafês Duros. Um Estudo sobre a Qualidade dos Cafês de Varrição. Rev. Inst. Café. 27: 1827-1831.
23. MONACO, L.C. 1958. Progressos na Secagem de Café. Boletim da Superintendência dos Serviços do Café. São Paulo. 33 (380): 40-41.
24. MIYA, E.E.; GARRUTTI, R.S.; CHAIB, M.A.; ANGELUCCI, E.; FIGUEIREDO, I. e I. SHIROSE. Defeitos do Café e Qualidade da Bebida. Coletânea do Instituto Tecnológico de Alimentos. Campinas - SP. 5: 417-432. 1973-74.
25. OTHMER, D.F. 1940. Correlating Vapor Pressure and Latent Heat Data. Industrial and Engineering Chemistry.
26. PHILLIPS, A.L. 1963. A Solar Energy Method for Reducing Coffee Drying Cost. In: Journal of Agriculture of University of Puerto Rico, Rio Pedras - P.R. 47 (4): 226-235.

27. RIBEIRO, O. 1944. Efeito das Radiações Ultravioleta e Infravermelha sobre as Sementes de Café. Rev. Dep. Café. Rio de Janeiro. 22: 201-204.
28. ROA, G. 1974. Natural Drying of Cassava. Tese de Ph.D. Agricultural Engineering Department. Michigan State University. East Lansing, Michigan E.S.A.
29. ROA, G. e I.C. MACEDO. 1976. Drying of "Carioca" Dry Beans with Solar Energy in a Stationary Bin. ASAE Paper n^o 76-302. St. Joseph, Michigan, USA.
30. ROA, G. e L.G. VILLA. 1977. Secagem e Armazenamento de Grãos e Sementes em Silos mediante a utilização de ar ambiente e com auxílio de coletores solares. Grupo de Energia. Universidade Estadual de Campinas. 51 p.
31. SANTOS, I. e D. CARATTI. 1976. Isolamento e Caracterização das Polifenoloxídases do Café. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas - SP. 7: 13-28.
32. STEELE, J.L. 1967. Deterioration of Damaged Shelled Corn as Measured by Carbon Dioxide Production. Unpublished Ph.D. Thesis. Iowa State University of Science and Technology. USA.
33. STEELE, J.L.; R.A. SAUL and W.V. HUKILL. 1969. Deterioration of Shelled Corn as Measured by Carbon Dioxide Production. Transaction of the ASAE 12 (5): 685-689.
34. THOMPSON, T.L. 1970. Purdue Drying Model: Thin Layer Calculations. Lecture n^os 11 e 12. Institute for Simulation of Cooling and drying of Agricultural Products.

Department of Agricultural Engineering. Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.

35. THOMPSON, T.L.; PEART, R.M. and G.H. FASTER. 1968. Mathematical Simulation of Corn Drying a New Model. Transactions of the American Society of Agriculture Engineers. p. 582-586.
36. TOSELO, A. et al. 1964. Influência do Parcelamento na Secagem do Café. Bragantia. Campinas - SP 23(24): 299-322.
37. VALLDERUTEN, R.; ROA, G. e L.G. VILLA. 1978. Cálculo de Vazões Mínicas de Ar para Secagem de Milho baseado nos Registros Meteorológicos. Departamento de Engenharia Agrícola da FEAA/UNICAMP, Campinas - SP.
38. VAUGHN, R.H., R. CAMARGO; H. FALANGHE; G. AYRES e A. SERZEDILLO. 1958. Observations on the Microbiology of the Coffee Fermentation in Brasil. Food Techn. 12: 4.
39. VILELA, E.R. 1977. Secagem de Café em Terreiro e Silo com Energia Solar. Tese de Mestrado. FEAA/UNICAMP. Campinas-SP.
40. VILELA, E.R. e G. ROA. 1976. Utilização da Energia Solar para Secagem de Café em Terreiro e Silo. Artigo apresentado no VI Congresso da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Sorocaba - SP.
41. VILLA, L.G.; ROA, G. e J. MACEDO. 1976. Simulação da Secagem Natural e com Auxílio de Coletores Solares de Soja em Silos. 2º Seminário Nacional de Armazenagem. Ministério da Agricultura. CIBRAZEM. Brasília - DF, 17 p.

42. VILLA, L.G.; RODRIGUES, N.S.; BRAUEMBECK, O.; ROA, G. e J.M. BORGES. 1977. Secagem de cacau e café em barcas com ar aquecido com Energia Solar. Rev. Brasileira de Armazenamento. 2(2): 4-10.
43. VILLA, L.G.; ROA, G. e R. DAHAB. 1978. Simulação Matemática da Secagem de Café e Cacau. Trabalho apresentado no VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Botucatu - SP.
44. VILLALOBOS, S.G. 1977. Determinação do Efeito das Variáveis da Secagem em Silos sobre a Qualidade Fisiológica das Sementes de Soja. Tese de Mestrado, FEAA/UNICAMP, Campinas - SP.
45. VILLALOBOS, S.G. and L.G. VILLA. 1978. Previsão da Perda da Qualidade Fisiológica das Sementes de Soja durante a Secagem e Armazenamento em Silos. Rev. Brasileira de Armazenamento 3(3): 4-9.

A N E X O 1

Modelo matemático de secagem de café
(adaptação do modelo de Thompson et al)
e de deterioração baseado no crescimen
to de fungos.

```

C*****
C   PARA EFEITO DE ENTRADA/SAIDA *
C *
C   VOLUME EM METROS CUBICOS *
C   TEMPERATURA EM GRAUS CENTIGRADOS *
C   AREA EM METROS QUADRADOS *
C   MASSA EM QUILOGRAMAS *
C   COMPRIMENTO EM METROS *
C   UNIDADE ABSOLUTA EM KG AGUA/KG DE AR SECO *
C   TEMPO EM MINUTOS *
C   VAZAO EM KG AR SECO/HORA/METROS QUADRADOS *
C *
C*****
C
C   DIMENSÃO DB(21),UB(21),B(21),DF(21),G(21),FM(21),RH(21),DPV(21),
*ID(21),DIB(21),FNU(21),TOAIR(999),PI(999),HU(999),CFM(999),TEQ(21)
REAL INTERVALO, ID, LARG
LOGICAL IMPRES
INTEGER OPTEMPO, OPCOND, OPFORMATO, OPEQUACAO
C
C--- INICIALIZAÇÃO DE TEMPO TOTAL DE SECAGEM, INTERVALO DE SECAGEM,
C PRESSAO ATMOSFERICA E SUA CONVERSAO RESPECTIVAMENTE.
C
C   TIME = 999999.
C   DELT = 60.
C   PATS = 8732.41
C   PATB = PATM/703.2
C   IMPRES = .TRUE.
C
C--- PEDE CONDIÇÕES DO AR DE ENTRADA - FIXAS=0 - VARIÁVEIS =1
C
C   WRITE(5,1000)
C 1000 FORMAT (' CONDIÇÕES DO AR DE ENTRADA FIXAS OU VARIÁVEIS ?',
C *          /, ' FIXAS = 0 , VARIÁVEIS = 1 ', //)
C   READ(2,2000) OPCOND
C 2000 FORMAT (I)
C
C--- PEDE OPCAO DE FORMATO DO SILO OU BARCACA E DIMENSÕES
C
C   WRITE (5,1001)
C 1001 FORMAT (' SILO(BARCACA) REDONDO OU RETANGULAR/QUADRADO ?',
C *          /, ' REDONDO = 0 RETANGULAR/QUADRADO = 1 ', //)
C   READ (2,2000) OPFORMATO
C   IF (OPFORMATO.GT.0) GO TO 1
C   WRITE (5,1002)
C 1002 FORMAT (' DIAMETRO = ?', //)
C   READ (2,2001) DIAM
C 2001 FORMAT (G)
C   GO TO 2
C   1 WRITE (5,1003)
C 1003 FORMAT (' ENTRE COM COMPRIMENTO E LARGURA' //)
C   1 READ (2,2002) COMP,LARG
C 2002 FORMAT (2F)
C
C--- PEDE INFORMACAO SOBRE HORAS DE SECAGEM, SE AS CONDIÇÕES FOREM FIXAS
C
C   2 IF (OPCOND.GT.0) GO TO 3
C   WRITE (5,1004)
C   READ(2,2001)NHDRAG
C 1004 FORMAT (' ENTRE COM N.º DE HORAS DE SECAGEM', //)

```

TSRC = HORAS*60.

C
C--- DE DO ARG. DE ENTRADA AS CONDIÇÕES FIXAS DO AR DE ENTRADA
C

READ (2,2003) VAZAO,UMABS,TEMPER
2003 FORMAT (3G)
VAZAOAUX = VAZAO
VAZAO = (VAZAO * 3.28)/60.
TAUX = 9.* TEMPER/5. + 32.
CALL R01 (UMABS,TAUX,PATH,UMREL)

C
C--- LEITURA DO INTERVALO DE TEMPO PARA IMPRESSAO, PESO POR VOLUME,
C ALTURA TOTAL DA CAMADA ,ESPESSURA DE CADA SUBCAMADA , TEMPERATURA
C E UNIDADE INICIAL DO GRAO
C

3 READ (2,2004) INTERVALO,OPEQUACAO,PVOLUM,DEP,ESPESS,GOAUX,W
2004 FORMAT (7G)

C
GO TO (4,5) OPEQUACAO
4 WRITE (3,1005)
1005 FORMAT (////,10X,'TEMPO CALCULADO PELA EQUACAO DE ROA',//)
GO TO 6
5 WRITE (3,1006)
1006 FORMAT (////,10X,'TEMPO CALCULADO PELA EQUACAO DE TROEGER
*E HUKILD',//)

C
C--- CALCULO DA AREA DA SECAO TRANVERSAL DO SILO/BARCACA DE ACORDO COM
C O FORMATO
C

6 IF (OPEQUACAO.GT.0) GO TO 7
C SILO REDONDO
AREA = (3.141592/4.) * (DIAM**2)
GO TO 8
C SILO QUADRADO
7 AREA = COMP * LARG

C
C--- CONVERSÃO DE DADOS
C

8 VC = AREA * ESPESS
PV = VC * PVOLUM
PS = PV * (1. -(W/100.))
DMN = PS/AREA
DE = DMN * 2.2/ 10.75
ND = DEP / ESPESS
GO = GOAUX * 1.5 + 32.

C
TINC = DELT /60.
FRO(1) = W/(100.-W)
WB (1) = W*.01

C
C--- INICIALIZAÇÃO DE TODAS AS SUBCAMADAS
C

DO 9 J=1,30
OB(J) = FRO(1)
WB(J) = WB(1)
G(J) = GO
9 CONTINUE

C
C--- INICIO DA SECAGEM

```

C
TIME = 0.0
TIM = 0.0
NCT = 0
NMTT = 2

C
C--- IMPRESSAO DAS CONDICAOES INICIAIS
C
WRITE (3,1007) TTIME,GOAUX,SH,WB(1),DEP
1007 FORMAT (4(/),10X,'TEMPO LIMITE DE SECAGEM = ',2X,E11.5,
*' MINUTOS',//,10X,'TEMP INICIAL DO GRAD = ',2X,E11.5,
*' GRAUS CENTIGRADUS',//,10X,'QTD. MATERIA SECA POR AREA = ',
*2X,E11.5,' KILOGRAMAS',//,10X,'UNIDADE INICIAL DO GRAD = ',
*2X,E11.5,' % BASE UMIDA',//,
*10X,'PROFUNDIDADE DO SILO = ',10X,E11.5,' METROS',//)

C
10 TIME = TIME + DELT
TIM = TIM + DELT
NCT = NCT + 1
IF (TIME.GT.TTIME) STOP

C
C--- LE CONDICOES DO AR DE ENTRADA SE ESTAS FOREM VARIAVEIS, SENAO,FAZ
C AS NOVAS CONDICOES IGUAIS AS VELHAS
C
IF (GPCOND.GT.0) GO TO 11
IF (TIME.GT.TSEC) STOP

CFR(NCT) = VAZAO
HU(NCT) = UMARS
RI(NCT) = UMREL * 100.
TC = TEMPER
GO TO 19

11 READ (2,2005) TC,HU(NCT),CFR(NCT),NNN
2005 FORMAT (4E)
IF (NNN.EQ.9999) STOP
VAZAOAUX = CFR(NCT)
CFR(NCT) = (CFR(NCT)*3.28)/60.
TAUX = TC * 1.8 + 32.
CALL DB1(HU(NCT),TAUX,PATR,RI(NCT))
RI(NCT) = 100 * RI(NCT)

C
C--- SE NUNQUA O DIA ENTAO CALCULA A DETERIORACAO HAVIDA DURANTE A NOITE
C
GO TO 18
TIM = DELT
DO 12 J=1,NO
12 FRU(J) = DB(J)
17 IAUX1 = NMTT - 1
IAUX2 = NMTT
NMTT = NMTT + 1
WRITE (3,1008) IAUX1,IAUX2
1008 FORMAT (/,' DETERIORACAO DA NOITE DO DIA',I3,' PARA O DIA',I3,/,
*' J',2X,'ID(J)',16X,'TEQ(J)',//)
CSHD = 24. - SHD
DO 16 J=1,NO
CALL DBD(TCENT,WB,CS,HD,ID,TEQ,J)
SHD = 0
WRITE (3,1009) J,ID(J),TEQ(J)
1009 FORMAT (1X,I2,2X,F12.7,2X,F12.7)
GO TO (13,13,13,14,14,14,15,15) J

```

```

13 AMED1 = AMED1 + DIN(J)
   GO TO 16
14 AMED2 = AMED2 + DIN(J)
   GO TO 16
15 AMED3 = AMED3 + DIN(J)
16 CONTINUE
   BMED1 = AMED1/3
   BMED2 = AMED2/3
   BMED3 = AMED3/3
C   WRITE (3,1015) BMED1,BMED2,BMED3
   AMED1 = 0
   AMED2 = 0
   AMED3 = 0
   IF (MNR.GE.MNTT) GO TO 17
C
C--- CONTINUACAO DA SECAGEM
C
18 TDAIR (NCT) = TAUX
   SHD = SHD + DELT/60.
C
C--- IMPRIME RESULTADOS APOS 'INTERVALO' MINUTOS
C
   IQ = TIME/INTERVALO
   IMESTO = TIME-INTERVALO * IQ
   IF (IMESTO.NE.0) GO TO 20
C
C--- SE AS CONDICICOES FOREM FIXAS IMPRIME-AS APENAS NO PRIMEIRO INTERVALO
C   DE SECAGEM
C
   IF (OPCOND.EQ.0.AND.IMPRES.NE..TRUE.) GO TO 19
   IMPRES = .FALSE.
   WRITE (3,1010) TIME,TC,RI(NCT),HU(NCT),VAZADAUX
1010 FORMAT (3(/),10X,'TEMPO = ',2X,F12.5,/,10X,'TEMPERATURA = ',2X,
*         F12.5,/,10X,'UM.RELAT = ',2X,F12.5,/,10X,'UM.ABS = ',2X,
*         F12.5,/,10X,'VAZAO = ',2X,F12.5,/)
   IF (OPCOND.EQ.0) GO TO 27
   WRITE (3,1011) SHD
1011 FORMAT (30X,'DTA = ',T50,I12)
   GO TO 27
C
C--- IMPRIME CARACTERISICO DAS CONDICICOES DO PRODUTO
C
19 WRITE(3,1017)TIME
1017 FORMAT(3(/),30X,'TEMPO = ',T50,F12.5)
27 WRITE (3,1012)
1012 FORMAT (///,6X,'CAM',5X,'TEMP(C)',5X,'UM
*(BU)',5X,'UM.REL',5X,'RH',9X,'ID',9X,'TEQ',/)
C
C--- CHAMA A SUBROTINA QUE CALCULA A SECAGEM APOS 'DELT' DE TEMPO
C
20 Q=CFM(NCT) * 1.5
   DF(1) = TDAIR (NCT)
   RH(1) = RI(NCT) * 0.01
   H(1) = HU(NCT)
   DO 26 J= 1,80
   CALL DRY (PATN,DB,NB,H,DF,G,FM,RH,FMO,TINC,DM,Q,J,TIM,CHAVE,
*         TDAIR,NCT)
   TCENT=(DF(J)-32)/1.8
   CALL OMD(TCENT,NB,TINC,IG,TEQ,J)
C

```

C--- ACUMULO GERAL DAS CONDIÇÕES DO PRODUTO

C
SRG = SRG + G(J)
SRWB = SRWB + WB(J)
SRDS = SRDS + DS(J)
C SSPMSD = SSPMSD + SPMSD(J)
SDIN = SDIN + DIH(J)

C--- ACUMULA CONDIÇÕES POR GRUPO DE CAMADAS

C
GO TO (21,21,21,22,22,22,23,23) J
21 ANED1 = ANED1 + WB(J)
GO TO 24
22 ANED2 = ANED2 + WB(J)
GO TO 24
23 ANED3 = ANED3 + WB(J)

C--- IMPRESSÃO DAS CONDIÇÕES POR CAMADAS

C
24 IF (IRESTD.NE.0) GO TO 25
WRITE (3,1013) J,TCENT,WB(J),RH(J),FM(J),
* ID(J),TEO(J)
1013 FORMAT (5X,I3,2X,9(F11.2))
25 L = J+1
DF(L) = DF(J)
H(L) = H(J)
26 CONTINUE

C--- CALCULA MEDIA GERAL DAS CONDIÇÕES

C
RG = SRG/NO
RWB = SRWB/NO
RDS = SRDS/NO
C SMS = SSPMSD/NO
SDIN = SDIN/NO
SPG = 0
SRWB = 0
SRDS = 0
SSPMSD = 0
SDIN = 0

C--- CALCULA MEDIA DAS CONDIÇÕES GRUPO DE CAMADAS

C
BNED1 = ANED1/3
BNED2 = ANED2/3
BNED3 = ANED3/2
ANED1 = 0
ANED2 = 0
ANED3 = 0

C
IF (IRESTD.NE.0) GO TO 10

C--- IMPRESSÃO DAS MEDIAS GERAIS

C
WRITE (3,1014)
1014 FORMAT (/,19X,'VALORES MEDIOS',/,21X,'TEMP(F)',6X,'UM(RS)',6X,
* 'UM(BU)',6X,'SMS',7X,'SDIN',/)
C WRITE (3,1015) RG,RWB,RDS,SMS,SDIN
1015 FORMAT (16X,5(F12.5),/)

C

C--- IMPRESSAO DAS MEDIAS POR GRUPOS DE CAMADAS

C
C

```
      WRITS (3,1916) RDED1,BMED2,BMED3
1016 FORMAT (/,19X,34('*'),/,19X,'* MEDIA(1,2,3)= ',F16.4,' *',/,19X,
*          '* MEDIA(4,5,6)= ',F16.4,' *',/,19X,'* MEDIA(7,8, )= ',
*          F16.4,' *',/,19X,34('*'))
      GO TO 10
      END
      SUBROUTINE R01 (H,DF,PATN,RHS)
      TABS = DF + 459.69
      ARG = 54.63 - ( 12301.69/TABS ) - ( 5.17*ALOG(TABS))
      SATVP = EXP (ARG)
      WVP = (PATN*1.605*H)/(1.605*H +1.)
      RHS=WVP/SATVP
      RETURN
      END
      SUBROUTINE A11(Y0,X,Y,XN,FM,DEL,M,N,AIP)
      DIMENSION YN(10),XM(10,10),DELY(10)
      N=1
      IF ( ABS(Y-Y0+DEL)-0.001)2,4,4
4      IF ( Y-Y0+DEL)3,3,1
1      IF(Y-Y0-DEL)2,2,3
2      M=2
      AIP=X
      RETURN
3      N=N+1
      IF(L-1)10,10,20
10     YN(1)=Y
      XM(1,1)=X
      N=1
      AIP=X+2.0
      RETURN
20     YN(0)=Y
      XM(0,1)=X
      DO 40 J=1,N
      DO 40 K=J,N
      IF(YN(J)-YN(K))10,40,30
30     T=YN(J)
      YN(J)=YN(K)
      YN(K)=T
      T=XM(J,1)
      XM(J,1)=XM(K,1)
      XM(K,1)=T
40     CONTINUE
      DO 50 J=1,N
50     DELY(J)=YN(J)-Y0
      DO 60 J=2,N
      DO 60 K=J,N
60     XM(K,J)=(XM(J-1,J-1)*DELY(K)-XM(K,J-1)*DELY(J-1))
      -/(YN(K)-YN(J-1))
      AIP=XM(0,1)
      IF(Q-10)100,70,70
70     IF(Y0-YN(5))90,90,75
75     DO 80 J=1,9
      L=J+1
      YN(J)=YN(L)
80     XM(J,1)=XM(L,1)
90     N=9
100    RETURN
      END
```

SUBROUTINE DRY (PAPM, DB, WB, H, DF, G, FM, RH, FMO, TINC, DM, Q, J, TIM, CHAVE
*, TDAIR, NCF)

DIMENSION DB(21), WB(21), H(21), DF(21), G(21), FM(21), RH(21)

DIMENSION Y8(10), DPV(21), XM(10,10), FMO(21), TDAIR(999)

INTEGER CHAVE

DEFINICION DE LA FUNCION FME QUE CALCULA HUMEDAD EN EQUILIBRIO

CALCULO DEL CALOR ESPECIFICO DEL VAIZ EN BTU/LB DE AIRE SECO

$C = (0.4 + 0.5 * WB(J)) * DM / ((0 * TINC) * (1. - WB(J)))$

Q=RATA DE FLUJO DEL AIRE EN LBS AIRE/HR-PIE CUADRADO

TINC=INCREMENTO EN EL TIEMPO DE SECADO EN HORAS

DF=LIBRAS DE MATERIAL SECO/PIE CUADRADO EN UNA CAPA DETERMINADA

BALANCE DE CALOR ANTES DEL SECADO

$HA = .24 + .45 * H(J)$

$T = (HA * DF(J) + C * G(J)) / (HA + C)$

HL=H(J)

H0=HL

SE LLAMA EL SUBPROGRAMA FUNCION RNS

RN1 ES UTILIZADO PARA CALCULAR LAS HUMEDADES RELATIVAS

CALL RN1 (HL, T, PAPM, RNS)

R=RNS

IF(R-1.0)10,50,50

P1=15272.

P2=-32478.

P3=33341.

P4=-0.029458

P5=-0.0016309

P6=-0.013645

P7=0.013205

P8=0.0

P9=273.

$TC = (T - 32.) * 5.79$

$FM(J) = R * (P1 + R * (P2 + P3 * R)) * EXP((P4 + R * (P5 + R * (P6 + R * (P7 + P8 * R))))$

$1 * (TC + P9)$

IF(DB(J)-FM(J))100,90,20

IF(FMO(J)-FM(J))90,90,111

DF(J)=T

G(J)=T

RH(J)=R

TFMO=FMO(J)

IF(DB(J)-FM(J))42,42,32

TFMO=DF(J)

DELTA=TFMO-FM(J)

TABS=T+459.69

ARG=51.5329-(12391.688/TABS)-(5.16923*ALOG(TABS))

PVSI=EXP(ARG)

PVSN=PVSI*703.008

DPV=PVSN*(1-R)

DPV(J)=DPVM

CALL RER(DPV, DB, FM, TIM, TINC, DM, J, DM, Q)

GO TO 16

20 DF(J)=T

G(J)=T

RH(J)=R

TFMO=FMO(J)

IF(DB(J)-FM(J))11,11,31

31 TFMO=DF(J)

```

41 DELM=FM0-F0(J)
   TABS=T +459.69
   ARG =54.6329-(12301.698/TABS)-(5.16320*ALOG(TABS ))
   PYSI=EXP(ARG)
   PYSM=PYSI*703.008
   DPVM=PVSM*(1-K)
   DPV(J)=DPVM
   GO TO (16,17)CHAVE
16 CALL RER(DPV,DB,FM,TIM,TINC,DM,J,DM,0)
   GO TO 18
17 AUX=FM(J)
   CALL RETH(DB,AUX,FM,DELM,RH,TDAIR,TINC,J,DM,DM,0,UCT)
C
C   CALOR DE VAPORIZACION
C
18 DL=(1994.-.57*DF(J))*0.9036*EXP(-6.032*DB(J))
C
C   BALANCE DE CALOR DESPUES DEL SECADO
C
   T=(HA*T-DM*(1060.8+DL+32.0-G(J))+C*G(J))/(HA+DM*.45+C)
   HU=g(J)+DM
   DH=0.
C   SE LLAMA EL SUBPROGRAMA FUNCTION RHS
C
   CALL RH1 (HO,T,PAFM,RHS)
   R=RHS
   IF(R=1.0)90,90,5)
90 DF(J)=T
   N=0
   M=1
C   SE LLAMA EL SUBPROGRAMA FUNCTION AIP
C   AIP SE UTILIZA PARA HALLAR LAS RAICES DE CURVA DESCONOCIDA
   CALL AI1(0.995,T,R,XM,YM,0.005,M,N,AIP)
   X=AIP
   T=T+2)
90 BESTH=(((.24+C)*(DF(J)-T)+HO*(1092.8-.55*DF(J)))
-/(1092.8+.45*T-DF(J)))
   DH=BESTH-30
C   SE LLAMA EL SUBPROGRAMA FUNCTION RHS
   CALL RH1 (BESTH,T,PAFM,RHS)
   R=RHS
C
C   SE LLAMA EL SUBPROGRAMA FUNCTION AIP
C
   CALL AI1(0.995,T,R,XM,YM,0.005,M,N,AIP)
   T = AIP
   GO TO (90,80),M
90 DB(J)=DB(J)-DH*M*TINC/DH
90 RH(J)=R
   DF(J)=T
   G(J)=T
   H(J)=RH+DH
   W(J)=DB(J)/(1.0+DB(J))
   RETURN
END
SUBROUTINE RER(DPV,DB,FM,TIM,TINC,DM,J,DM,0)
DIMENSION DPV(21),DB(21),FM(21)
X0=0.7583
X1=0.1814
TIM0=TIM/60

```

```

PB=0.00537
DBDI=- (P**X0)*(DPV(J)**X0)*(DB(J)-FM(J))*(TIMH**(X0-1))
DBT=DB(J)+DBDI*TINC
DH=(DB(J)-DBT)*DM/(TINC*Q)
DB(J)=DBT
RETURN
END
SUBROUTINE BETH(DB,CM0,FM,RANGM,RH,TDAIR,TINC,J,DH,DM,Q,NCT)
DIMENSION DB(21),FM(21),RH(21),TDAIR(99)
CM=DB(J)
CME=FM(J)
HR=RH(J)
TF=TDAIR(NCT)
VPM=13.25
Q3=-1.0
Q2=-EXP(0.810-3.11*HR)
Q1=-3.98+2.87*CM0-(0.010/(HR+0.015))+0.016*TF
P2=EXP(2.82+7.49*((HR+0.01)**0.67)-0.0179*TF)
P3=0.17*(RANGM**Q2-Q3)*(P2*Q2/Q3)
P1=EXP(-2.45+5.42*(CM0**1.25)-3.15*HR +9.62*CM0*(HR**0.5)+0.030*TF
0-0.072*VPM )
CMX1=0.40*RANGM+CME
CMX2=0.12*RANGM+CME
IF(CM-CMX1)60,50,50
50 TIMH=P1*((CM-CME)**Q1)-P1*(RANGM**Q1)
TIMH=TIMH/60
TI=TIMH+TINC
TI=TI*60.
PG=P1
QG=Q1
CHR=CM0
GO TO 100
60 IF(CM-CMX2)80,70,70
70 TIMH=P2*((CM-CME)**Q2)-P2*((CMX1-CME)**Q2)
TIMH=TIMH/60
TI=TIMH+TINC
TI=TI*60.
PG=P2
QG=Q2
CHR=CMX1
GO TO 100
80 IF(CM-CMX2)95,95,90
90 TIMH=P3*((CM-CME)**Q3)-P3*((CMX2-CME)**Q3)
TIMH=TIMH/60
TI=TIMH+TINC
TI=TI*60.
PG=P3
QG=Q3
CHR=CMX2
GO TO 100
95 WRITE(3,97)
97 FORMAT(//,'* ERROR QUE SEU',/)
100 CM=(CHR-CME)*(TI/(PG*((CHR-CME)**QG))+1)**(1/QG)+CME
DH=(DB(J)-CM)*DM/(TINC*Q)
DB(J)=CM
RETURN
END
SUBROUTINE TMD(TCENT,DB,TINC,TD,TEQ,J)
DIMENSION DB(21),DB(21),TD(21),TEQ(21)
REAL TD,CM,IT

```

```

      IF(WB(J).GT..35)GO TO 8
      B0=1/(-1.4508+0.053*WB(J)*100)
      GO TO 9
8     B0=1/(0.91157*(100*WB(J)**0.5))
9     IF(TCENT.LT.35.)GO TO 11
      B0=0.704150
      B1=0.151624
      B2=-0.00754943
      B3=0.00342189
      FAT=TCENT-35
      GO TO 12
11    B0=).161338
      B1=0.0471542
      B2=0.0000707818
      B3=1.59736
      FAT=35-TCENT
12    AT=1+(B0-B1*ALOG(WB(J)*100.))+B2*((WB(J)*100.)**B3)*FAT
      TE0(J)=TIOC/(40*AT)+TE0(J)
      IF(TE0(J).GE.33.)GO TO 10
      TD(J)=1.
      RETURN
10    IF(TE0(J).GE.88.) GO TO 13
      TD(J)=0.699531291+TE0(J)*(0.03377595711+TE0(J)*(-7.864053089E-4
      +3.689236119E-6*TE0(J)))
      RETURN
13    TD(J)=0.
      RETURN
      END

```