

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

SECAGEM DE CAFÉ EM TERREIRO
E SILO COM ENERGIA SOLAR

EVÓDIO RIBEIRO VILELA

ORIENTADOR:
PROF. DR. GONZALO ROA MEJIA

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNI-
VERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MES-
TRE EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS.

- 1977 -

1977
DIRETORIA DE BIBLIOTECA

DEDICO A:

minha esposa: Maria Lúcia

meu filho: Evandro

AGRADECIMENTOS

O autor agradece sinceramente ao Dr. Gonzalo Roa Mejia, pela dedicada orientação prestada a este trabalho.

A Dagoberto Favoreto Jr., pelo auxílio na condução dos experimentos.

Ao Grupo de Energia Solar da UNICAMP, nas pessoas do Dr. João A. Meyer e Isafas C. Macedo, pela colaboração prestada na montagem dos experimentos.

Ao Dr. Ferdinando R. Pupo de Moraes e Dr. Hilton Silveira Pinto do Instituto Agronômico de Campinas, pelo fornecimento de café e permissão para instalação de experimentos nas dependências deste Instituto.

SIMBOLOGIA

- a - área específica do produto, m^2/m^3
 c - calor específico, $kcal/kg \cdot ^\circ C$
 G_a - vazão do ar seco, $kg/hr \cdot m^2$
 H - umidade absoluta, kg de vapor/ kg de ar seco
 h - coeficiente de transferência de calor por convecção, $kcal/hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C$
 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, p_2, p_3 - parâmetros da equação de umidade de equilíbrio
 q_0, q_1, q_2, q_3 - parâmetros da equação de umidade de equilíbrio
 p_v - pressão de vapor de água, kg/m^2
 $p_{v,s}$ - pressão de saturação do vapor de água, kg/m^2
 RH - umidade relativa, %
 S - secção do secador, m^2
 t - tempo de secagem, hr
 x - posição acima da base do secador
 ρ_p - densidade aparente do produto seco, kg/m^3
 T - temperatura de bulbo seco, $^\circ C$
 θ - temperatura do produto, $^\circ C$

Sub-Índices

- a - ar
 p - produto
 w - água
 v - vapor

CONTÉUDO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Características dos Frutos do Cafeeiro.....	3
2.3. Matéria-Prima para a Secagem.....	4
2.4. Secagem Natural de Café.....	5
2.5. Secagem Artificial do Café.....	8
2.6. Umidade de Equilíbrio.....	9
2.7. Teoria de Secagem.....	13
2.7.1. Secagem Natural.....	13
2.7.2. Secagem em Camada Delgada.....	16
2.7.3. Secagem em Camada Espessa.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1. Secagem Natural em Terreiros.....	26
3.2. Secagem em Silo com Coletor Solar.....	29
3.3. Experimentos de Laboratório.....	29
3.3.1. Secagem em Silo-Piloto.....	32
3.3.2. Secagem em Camada Delgada.....	33
3.3.3. Umidade de Equilíbrio.....	33
3.3.4. Análise Sensorial.....	36
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS, ANÁLISE MATEMÁTICA E DISCUSSÃO.....	37
4.1. Secagem Natural em Terreiros.....	37
4.2. Experimentos de Laboratório.....	48
4.2.1. Secagem em Silo-Piloto.....	48
4.2.2. Propriedades Físicas.....	52
4.2.3. Umidade de Equilíbrio.....	56
4.2.4. Secagem em Camada Delgada.....	57
4.3. Secagem Natural de Café em Silo Estacionário com Coletor Solar.....	65

5. CONCLUSÕES.....	80
6. RESUMO.....	83
7. SUMMARY.....	86
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE A - Dados de Secagem em Silo-Piloto.....	94
APÊNDICE B - Dados de Secagem em Silo com Coletor So lar.....	97

1. INTRODUÇÃO

A secagem de café no Brasil é feita por dois métodos que são extremos dentro da escala de evolução tecnológica desse tipo de operação de produtos agrícolas: a) esparramando-se o produto em terreiros de cimento, tijolo ou chão batido e utilizando-se as condições naturais para a secagem e b) em secadores, fazendo circular, através de ventiladores, ar aquecido por queima de lenha ou de combustíveis. Em alguns secadores, o produto e ar circulam em contra-corrente, e em outros o ar penetra perpendicularmente à direção de fluxo dos grãos. A secagem em terreiros é um método rústico, e o produto fica exposto muitas vezes à condições desfavoráveis que depreciam sua qualidade por favorecer o desenvolvimento de fungos e fermentações microbiológicas. O tempo de secagem é longo (10-20 dias) e há necessidade de grandes áreas para construção de terreiros. O segundo método é sofisticado. A energia utilizada para movimentar o produto e aquecer o ar eleva o custo operacional da secagem. A má operação dos secadores coloca em risco a qualidade do produto. A eficiência térmica dos secadores (quantidade de energia utilizada para evaporar umidade por quantidade de energia gerada pela queima do combustível) raramente atinge 50%.

A escolha do método depende de fatores como nível tecnológico do produtor, disponibilidade de mão de obra, volume de produção, área para construção de terreiro, etc. Um diagnóstico técnico-econômico destes problemas seria útil para orientar os técnicos empenhados em encontrar uma melhor solução, considerando que as informações são escassas e que o café constitui uma das principais culturas brasileiras.

A colheita de café no Brasil é realizada durante os meses secos do inverno, normalmente de maio a agosto. As condições climáticas da maior parte das regiões produtoras possibi

litam, nesta época, a secagem em terreiros, sem afetar a qualidade do café, principalmente porque a umidade relativa do ar é baixa, há boa radiação solar e pouca ocorrência de chuvas. Em regiões de clima úmido, entretanto, o café seco naturalmente correrá o risco de contaminação microbiológica, em vista da umidade inicial alta (60-70%, base úmida) e secagem lenta.

O fornecimento de calor para a secagem artificial de produtos agrícolas no Brasil se faz pela queima de lenha ou de combustíveis fósseis. A primeira fonte, que se constitui na realidade de uma utilização indireta da energia solar, requer um sistema de produção que encarece o seu custo. A segunda fonte, em virtude da crise mundial do petróleo, teve seu preço bastante elevado nos últimos anos. As reservas mundiais de petróleo, estimadas em 21 bilhões de toneladas, serão totalmente consumidas em 25 a 50 anos, se for mantido o seu consumo dentro dos padrões atuais (18).

Os pesquisadores, em vista disso, iniciaram a busca de outras alternativas como fontes de energia que possam ser aplicadas com vantagens econômicas. O melhor aproveitamento da energia solar, inteiramente gratuita, tornou-se hoje em dia de maior interesse em pesquisas de secagem e armazenamento de grãos (02, 08, 28, 33).

Os objetivos deste estudo são:

- a. Verificar a influencia das variáveis ambientais na secagem de grãos naturais de café;
- b. Estudar o melhor aproveitamento da energia solar;
- c. Quantificar parâmetros e testar modelos matemáticos que descrevam o processo de secagem;
- d. Utilizar a teoria de secagem para explicar os fenômenos físicos da secagem de café em silos;
- e. Simular condições de secagem de café em silos, a fim de apresentar sugestões que possam aumentar a eficiência dos sistemas de secagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Apesar da produção de café ter se declinado substancialmente nos últimos 10 anos, vindo de uma safra de 37,0 milhões de sacas de 60 Kg no biênio 65/66 para 26,4 milhões em 1974/75, o Brasil ainda é o maior produtor e exportador de café, tendo participado com 29,8% no consumo mundial em 1974(10). O Instituto Brasileiro de Café (IBC), estima para o biênio 75/76, uma produção de 21,0 milhões de sacas (11), enquanto que o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos estimou para este mesmo biênio uma produção mundial de 52,6 milhões de sacas (11).

As espécies de café mais cultivadas no mundo são Coffea arábica, comumente denominada café arábica, e Coffea canephora, denominada comumente de café robusta. Este último é mais difundido nos países africanos, enquanto que o café arábica, tem quase que a totalidade de sua produção no continente americano, ocupando 70% do mercado internacional. No Brasil cultivava-se somente a espécie Coffea arábica, dentro da qual recomendava-se as seguintes variedades: Mundo Novo, Catuaí, Bourbon Vermelho, Bourbon Amarelo, Acaiã.

2.2. Características dos Frutos do Cafeeiro

Os frutos na árvore amadurecem desuniformemente, devido a floradas em épocas diferentes. Sendo a colheita no Brasil feita normalmente por "derrixa", os grãos derrubados manualmente no chão ou em paradores (de pano ou bambú), se constituem de uma mistura de tipos diferentes que recebem na prática as seguintes denominações por ordem de desenvolvimento fisiológico e

de seca na árvore, segundo CARVALHO (13): (a) verde - grão imaturo, com 55-70% de umidade (base úmida); (b) cereja - grão maduro, com 55-70%; (c) passa - grão semi-seco, com 35-55%; (d) bôia - grão semi-seco, com 25-35%; (e) coquinho - grão seco, com 25% ou menos. A porcentagem de cada tipo de grão nos lotes colhidos varia a medida que os grãos verdes vão se tornando maduros (cereja) e os cerejas se tornando semi-secos (passas ou bôias). Assim, o produto e seu teor de umidade inicial médio variam durante a colheita.

O fruto maduro do cafeeiro, que denominamos cereja, é formado pelas seguintes partes (FIG. 1):

- a. casca (epicarpo);
- b. polpa, mucilagem ou mel do café (mesocarpo);
- c. pergaminho;
- d. semente - endosperma e embrião.

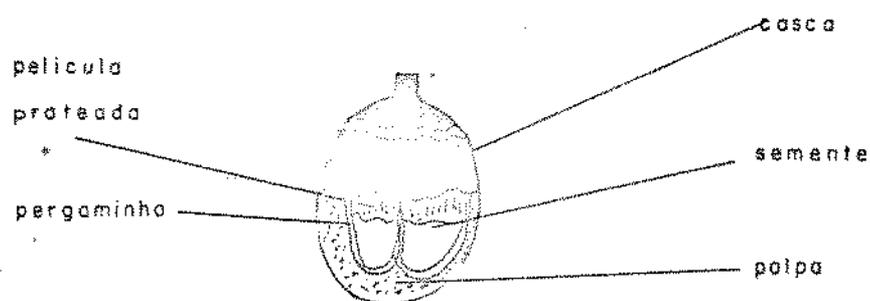


FIG. 1 - Anatomia do grão cereja.

A água se distribui com bastante desuniformidade dentro do grão cereja. Segundo BARBOSA et alii (13) a distribuição da água nas diferentes partes do grão é aproximadamente a seguinte (porcentagens em base úmida): Casca - 20-25%; mucilagem - 76-90%; grão com pergaminho e película prateada - 48-49%.

2.3. Matéria-Prima para a Secagem

Dois tipos diferentes de matéria-prima podem ser

utilizados para a secagem:

a) O fruto de café é despulpado e lavado, retirando-se a casca e a polpa, e a semente é seca envolta apenas no pergaminho. Neste processo utiliza-se somente o grão cereja, porque nos outros grãos a casca e a polpa resistem a operação do despulpador. Devido a grande utilização de água para despulpamento, lavagem e transporte dos grãos, este método é denominado na prática de preparo por "via úmida". O produto assim preparado recebe na prática as denominações de café despulpado ou café lavado.

b) No segundo processo os grãos colhidos vão diretamente para a secagem, com todas as suas partes constituintes. Contrariamente ao método anterior, denomina-se de preparo por "via seca". Os grãos que se destinam à secagem são denominados comumente de "café em fruto" ou "grãos naturais", e o produto seco recebe a denominação de "café em coco".

A maior parte dos produtores brasileiros seca o café como fruto integral (grão natural). Em vista disso nossos trabalhos foram conduzidos com este tipo de matéria-prima.

2.4. Secagem Natural de Café

A secagem natural utiliza a energia solar expondo-se os grãos diretamente aos raios solares ou indiretamente por circulação de ar natural ou forçada através do produto. No Brasil a secagem natural de café consiste em esparramar os grãos naturais em terreiros de tijolos, cimentos ou chão batido. Revisagens periódicas devem ser feitas para uniformizar a exposição dos grãos aos raios solares. Segundo CARVALHO (13), os lotes de café com muitos grãos cerejas devem ser removidos 4 vezes por dia nos 4 primeiros dias de secagem. A partir do 7º dia de secagem o café pode ser amontoado à tarde, coberto com encerado, e assim permanecendo durante a noite. Esta operação é realizada na prática afim de manter alguma quantidade de calor nos grãos, protegê-los contra condensação de umidade e chuvas, e equalizar a umidade entre os grãos, em vista da heterogeneidade que existe entre eles.

O tempo de secagem em terreiros varia de 10 a 20 dias, até os grãos atingirem um teor final de umidade entre 11 e 13% (b.u.). Esta variação está em função da umidade inicial média dos grãos e condições ambientais: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, e intensidade de radiação solar.

Estudo realizado por FOOTE (16) revela que a perda de água no grão cereja (65%, base úmida) é cerca de 100 vezes mais rápida do que quando este se aproxima ao final da secagem (13%, base úmida). No mesmo experimento foi verificado que a movimentação a cada hora diminui o tempo total de secagem em cerca de 14%.

Assim que os grãos de café atingem a unidade final são recolhidos e guardados em tulhas. As tulhas 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.

De acordo com MÓNACO (26) a luz solar tem efeito na qualidade da bebida do café. A secagem conduzida somente em secadores, prejudica o produto. Deve-se combinar a seca natural com a artificial. O café deve ser colocado em terreiros onde ficará até o estado de meia seca (35 a 40%). A secagem deverá ser continuada em secador até que a umidade caia para 20% e completada em silos ventilados ou o café ensacado será deixado em tulhas ventiladas, com ventilação forçada, até que a umidade atinja a 11 ou 12% (base úmida). A temperatura no secador nunca deve ser superior a 50°C.

GIBSON (17) relata em seu trabalho que para os grãos naturais de cafés arábicos atingirem o máximo de qualidade é indispensável expô-los ao sol durante a secagem, tendo-se verificado que apenas uma estreita faixa do espectro visível é benéfica, e que outras são prejudiciais à qualidade. Infere-se que os pigmentos verdes presentes no tegumento entre a casca e a superfície do grão filtram a luz solar incidente, reduzindo-a à faixa desejada de radiação visível.

Ainda com relação a secagem natural, GOMES et alii (19) estudaram a secagem de café em tulhas, com ventila-

ção natural, com objetivo de reduzir a mão de obra, área do terreiro, e solucionar o problema da armazenagem do café em coco (seco não beneficiado) para o pequeno cafeicultor. As telhas são compartimentos de madeira com dimensões de 1,90 m de altura, 1,00 m de comprimento, com espaço útil de 69% do seu volume. Em seu interior circula ar, por convecção natural, conduzindo por inúmeras canaletas de madeira, abertas para o exterior. O autor comparou a secagem na telha com a secagem em terreiro. O café antes de ser levado para a telha, foi submetido ao que se chama na prática de 1/2 seca, reduzindo sua umidade inicial para 45% no terreiro. Com a secagem em telha, conseguiu-se reduzir a mão de obra em 36,4%; a área em 60,0% e o tempo de utilização do terreiro em 40%. Houve, entretanto, um aumento de 106% no tempo total de seca.

Outro processo, utilizando energia solar para reduzir o custo da secagem de café despulpado, foi empregado por PHILLIPS (28). O sistema, segundo o autor, fornece as vantagens de redução da quantidade de mão de obra, baixo custo inicial de equipamento, simplicidade de operação e produção de café despulpado de alta qualidade. Foi utilizado um coletor solar para aquecimento do ar (FIG. 2). O sistema trabalha com uma área de 0,93 metros quadrados para cada 100 Kg de café produzido anual-

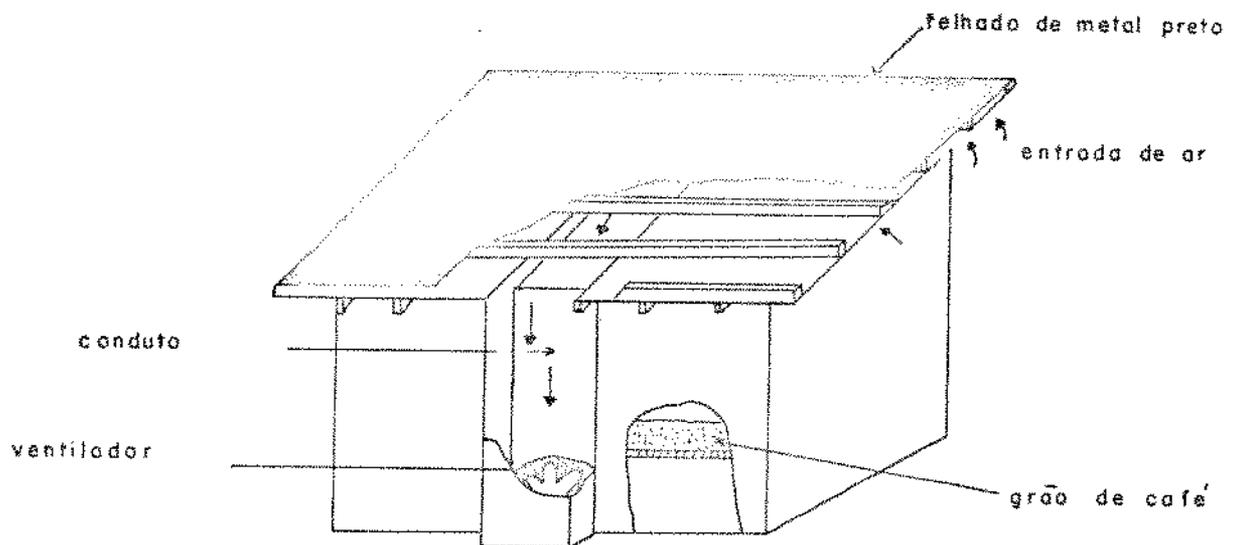


FIG. 2 - Construção para secar café utilizando o telhado como coletor solar.

mente e um ventilador que fornece 1,827 metros cúbicos por hora por metro quadrado de área do secador contra uma pressão estática de 0,0254 m de água.

Não foi encontrado, na pesquisa bibliográfica, nenhum trabalho que fizesse uma análise básica dos fenômenos físicos que ocorrem na secagem ou utilizasse um modelo matemático que pudesse prever os resultados experimentais.

2.5. Secagem Artificial do Café

A secagem artificial consiste em submeter uma camada espessa do produto a uma corrente de ar aquecido pela queima de um combustível fóssil ou de lenha e insuflado na massa de grãos por meio de um ventilador. O produto pode estar em movimento ou paralizado. Existem muitos tipos de secadores comercializados hoje em dia. Basicamente, eles estão dentro de quatro categorias principais, com relação a movimentação do produto e do ar: (a) secador estacionário - sem movimentação do produto; (b) secador com fluxo de ar perpendicular ao fluxo do produto; (c) fluxo do ar paralelo ao fluxo do produto; e (d) fluxo do ar em contra-corrente ao fluxo do produto. A secagem pode ainda ser classificada em dois tipos quanto a forma de atuação do calor: (a) secagem contínua - o produto que está sendo seco fica constantemente sob a ação do ar quente até o teor final de umidade; (b) secagem parcelada ou intermitente - o produto é submetido a determinados períodos de secagem e de repousos sucessivos até o final.

TOSELLO et alii (39) verificaram a influência do parcelamento na secagem de café. Realizaram um trabalho com cerejas despulpadas e não despulpadas às temperaturas de 70, 60 e 45°C, utilizando um secador experimental com aquecimento elétrico. O produto foi submetido a períodos de secagem de 1, 2, 3 e 4 horas, sendo retirado do secador após cada período e colocado em tulhas de descanso até atingir a temperatura de 30°C. Os intervalos de descanso foram muito variáveis, não sendo registrados no trabalho. Verificaram que o parcelamento da secagem aumenta o rendimento do secador por redução do tempo de operação

do mesmo. O processo foi mais vantajoso para cereja não despulpada à temperatura mais baixa (45°C) e maiores parcelamentos (secagens de 1 em 1 hora). Houve neste caso uma redução de 50% no tempo de secagem, o que significa duplicar a capacidade do secador.

SIVETZ & FOOTE (35) descrevem alguns tipos de secadores utilizados para café despulpado e não despulpado. O desenho destes secadores foi feito baseado em secadores dos outros grãos e informações práticas, visto não existir pesquisas ou subsídios para tal finalidade. Possuem custo operacional alto, devido ao consumo de energia para aquecimento do ar e movimentação do produto. A eficiência térmica é geralmente menor que 50%. A falta de controle na operação pode, às vezes, danificar a qualidade do café, uma vez que a temperatura é um fator mais crítico do que para outros grãos por serem substâncias voláteis responsáveis pela qualidade da bebida. Com relação à temperatura, o café tolera aproximadamente 40°C por 1 ou 2 dias, 50°C por poucas horas e 60°C por menos de 1 hora sem se danificar.

Os secadores mais utilizados no Brasil são dos tipos de fluxos contra-correntes (secador Moreira) e fluxos perpendiculares (secador D'Andrea) cujos esquemas podem ser vistos na FIG. 3. Em ambos os grãos de café são descarregados vagarosamente no fundo do secador, em uma esteira horizontal que o conduz até um elevador, sendo jogado novamente na parte superior do secador. Desta forma, o café circula continuamente durante toda a secagem.

2.6. Umidade de Equilíbrio

A secagem geralmente é efetuada colocando o produto em condições tais que sua umidade seja removida por vaporização. Para que este fenômeno aconteça, é necessário que a pressão de vapor que se forma na superfície do produto seja maior que a pressão de vapor do ar ao seu redor. A pressão de vapor na superfície do produto depende de sua composição, teor de umidade e temperatura. A pressão de vapor do ar depende de sua umi

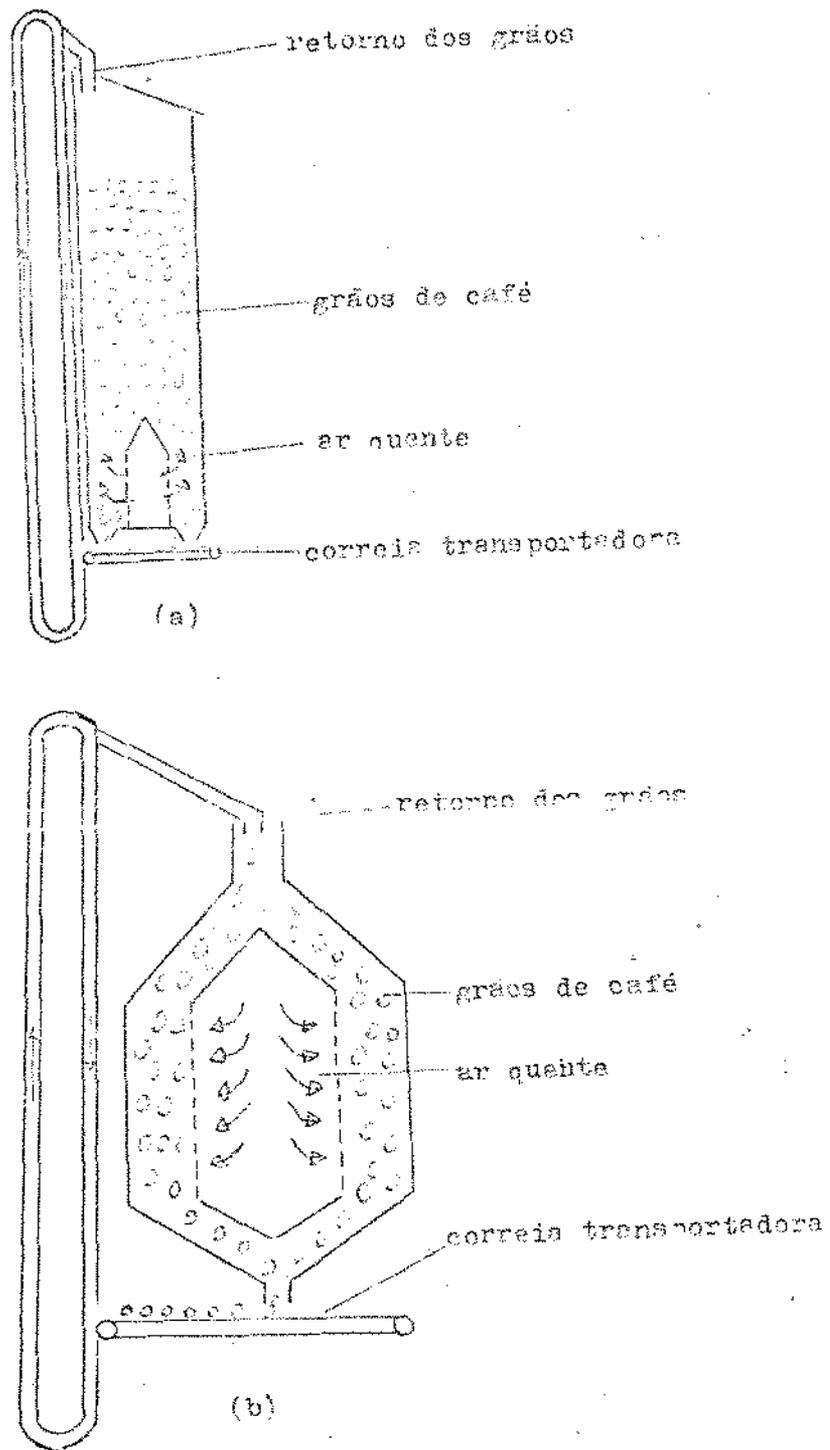


FIG. 3 - Esquemas de secadores utilizados no Brasil para secagem de café: (a) Fluxos em contra corrente; (b) Fluxos perpendiculares.

dade e temperatura. Quando estas duas pressões são iguais não há secagem ou absorção de vapor d'água pelo produto, e o teor de umidade do produto é denominado teor de umidade de equilíbrio. Dado que a pressão de vapor do ar é função de sua temperatura e umidade relativa, que são variáveis mais práticas de se medir, é costume referir-se aos valores de umidade de equilíbrio como função destas variáveis. A expressão gráfica que relaciona a umidade do produto e a umidade relativa do ar nas condições de equilíbrio é denominada comumente de curva de umidade de equilíbrio (FIG. 4) ou isoterma de desorção ou adsorção segundo o grão perca ou ganhe umidade durante a experiência de de terminação desta variável.

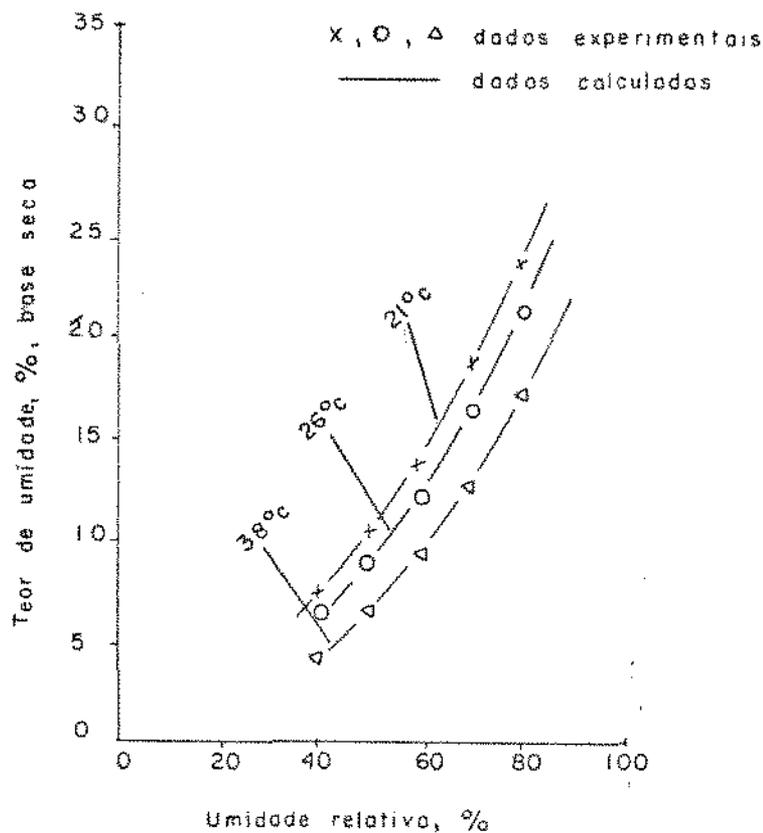


FIG. 4 - Curvas de umidade de equilíbrio-café despulpado, segundo RDA (31).

O teor de umidade de equilíbrio é importante por causa de suas relações diretas com o armazenamento, manuseio e secagem. É particularmente importante em secagem, porque representa o valor final potencial para uma dada condição de umidade e temperatura do ar. Como o estado do ar varia continuamente na secagem de uma camada espessa de grãos, a umidade de equilíbrio tem que ser calculada em função da posição dentro do secador e do tempo de secagem.

A determinação experimental do teor de umidade de equilíbrio se faz colocando o produto em atmosfera com condições constantes de temperatura e umidade relativa, e efetuando-se pesagens até o peso do produto se tornar constante. Há 2 métodos de determinação, segundo HALL (20), estático e dinâmico, sendo o ar movimentado ou não. O método estático é demorado, podendo levar várias semanas para atingir o equilíbrio. A um tempo de exposição grande sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa o produto pode mofoar. O método dinâmico é mais rápido, podendo atingir o equilíbrio em dois dias, porém exige equipamento mais caro.

A temperatura do ar pode ser controlada termostaticamente, enquanto que soluções de ácido sulfúrico ou soluções saturadas de diferentes sais podem ser utilizadas para controlar a umidade relativa do ar, conforme HALL (20). Ácido sulfúrico corrói metal facilmente, enquanto que uma solução saturada de sal é mais estável, menos corrosiva, segundo este mesmo autor.

Vários modelos teóricos e semi-teóricos tem sido propostos para calcular o teor de umidade de equilíbrio dos grãos, segundo BROOKER et alii (20), todos eles fundamentados na teoria de adsorção. Apesar dos esforços dos pesquisadores nenhuma destas equações foi capaz de prever com precisão o teor de umidade de equilíbrio dos grãos para todas as variações de temperatura e umidade relativa encontradas na prática.

ROA (31,32) utilizou a seguinte equação empírica geral para umidade de equilíbrio:

$$M_e = (p_1 RH + p_2 RH^2 + p_3 RH^3) \text{ Exp } [(q_0 + q_1 RH + q_2 RH^2 + q_3 RH^3) T_{abs}] \quad |1|$$

Onde: M_e é o teor de umidade de equilíbrio, dado em porcentagem (base seca); RH é a umidade relativa em decimal; T_{abs} é a temperatura do ar em $^{\circ}K$, p_1 , p_2 , p_3 e q_0 , q_1 , q_2 e q_3 são coeficientes. A mesma equação foi testada, pelo autor, para café despulpado, milho e arroz, com boa precisão (33). A comparação entre dados experimentais e calculados, pode ser vista na FIG. 4, para café despulpado.

2.7. Teoria de Secagem

Conforme definimos anteriormente (itens 2.4. e 2.5.) a secagem natural refere-se aos sistemas que utilizam a energia solar com convecção natural (secagem de café em terreiros) ou forçada (uso de ventiladores). A eficiência da utilização da radiação solar na secagem pode ser aumentada naturalmente com o uso de coletores (FIG. 2). Por outro lado a secagem artificial consiste em aquecer o ar pela queima de um combustível (fóssil ou lenha) e fazê-lo atravessar a camada do produto impulsionado por um ventilador.

2.7.1. Secagem Natural

Quando um produto é exposto às condições naturais para secagem, a transmissão do calor se dá por radiação solar e por convecção.

As seguintes equações gerais de transferência de calor e massa por convecção medem as velocidades de troca de calor e umidade entre uma dada superfície úmida e o ar que a circunda:

$$q = hA (T_s - T_a) \quad |2|$$

$$e \quad m = h_d A (C_s - C_a) \quad |3|$$

Onde: q é o fluxo de calor; A a área; h o coeficiente de transferência de calor por convecção; m o fluxo de umidade; h_d o coe

ficiente de transferência de massa por convecção; T_s a temperatura da superfície; T_a a temperatura do ar ambiental; C_s a concentração de vapor d'água na superfície e C_a a concentração do vapor d'água do ar ambiental.

O comportamento da temperatura, concentração e velocidade do ar (T, C, v) dentro de um filme delgado de ar adjacente a uma superfície vertical com injeção de vapor de água é mostrado no esquema da FIG. 5. O ar desenvolve um fluxo laminar ascendente sobre uma placa vertical, pelo efeito simultâneo dos fenômenos de convecção natural de calor e massa. Os valores δC , δv e δT são as espessuras das camadas de película fina, isto é, as distâncias máximas da parede em que se forma gradientes de concentração, velocidade e temperatura.

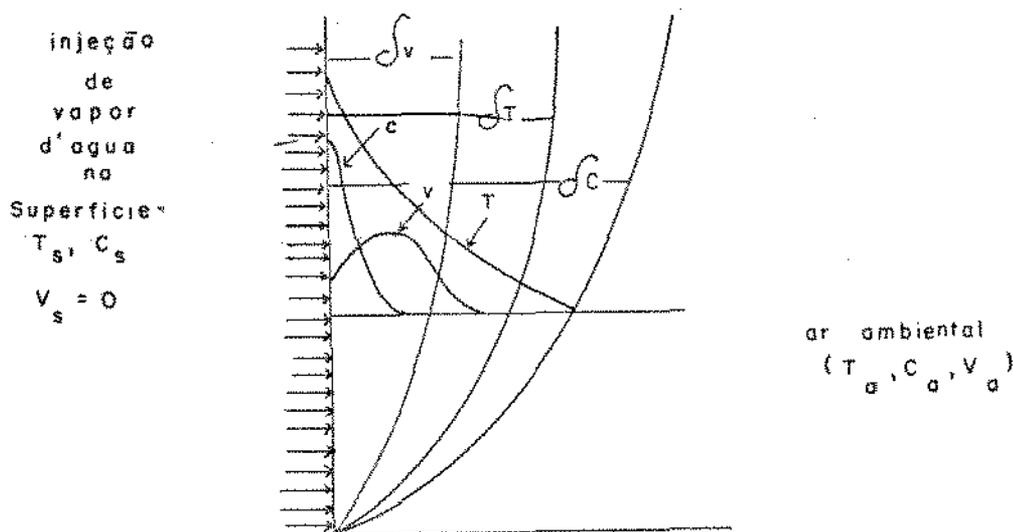


FIG. 5 - Camada de contorno em convecção natural.

Para solucionar problemas de transferências de calor e massa, através do fenômeno de convecção sobre superfícies, expressões matemáticas devem ser determinadas para os coeficientes de convecção h e h_d . As distribuições de temperatura e concentração, são obtidas pela solução simultânea de equações diferenciais de transferência de momento, calor e massa com condições de contorno apropriadas. Segundo ROA (21), a solução des

tas equações, para resolver problemas práticos de secagem natural, torna-se muito difícil, devido as variáveis ambientais não controladas. Uma alternativa é utilizar os conhecimentos sobre as equações diferenciais mais importantes no fenômeno de secagem natural e derivar formulações empíricas. O autor desenvolveu um modelo matemático empírico para secagem de mandioca, cortada, exposta às condições naturais em peneiras horizontais e verticais

$$\frac{dM}{dt} = - |M - M_e| \times |a_0 + a_1 v + a_2 (p_{v,s} - p_v) + a_3 (p_{v,s} - p_v) M| \times |a_4 + a_5 D| \times |a_6 + a_7 P + a_8 S| \quad |4|$$

Onde: M - teor de umidade médio de uma partícula, base seca, decimal.

M_e - teor de umidade de equilíbrio, base seca, decimal.

v - velocidade do vento, m/s.

p_v - pressão de vapor do ar, mmHg

p_{v,s} - pressão de vapor saturado, mmHg

D - densidade ou quantidade do produto por unidade de área.

P - porosidade, decimal.

S - propriedade geométrica das barras retangulares.

Os coeficientes das equações, a_i (i = 1,8) foram determinados com dados experimentais. Com o modelo, o autor pode constatar maior eficiência na secagem e um produto de melhor qualidade com a utilização de um sistema de peneiras verticais em substituição ao processo tradicional em que o produto é esparramado em pisos de concreto.

A radiação solar pode ser aproveitada em secagem de produtos agrícolas por exposição direta ou aumentando a temperatura do ar em coletores solares. Neste último caso, o ar aquecido é forçado através de camadas espessas de grãos (Fig.8). Um silo secador solar consiste de: (a) um coletor; (b) um venti

lador; (c) um conduto de ar; e (d) um silo. Para modelar matematicamente e simular processos de secagem como este, temos que utilizar conhecimentos de: (a) Secagem em camada delgada; (b) Condições de contorno e entrada no silo (estão em função das variáveis atmosféricas); (c) Balanços de calor de massa; (d) Unidades de equilíbrio do produto; e (e) Propriedades físicas dos grãos; (f) Relações psicrométricas.

2.7.2. Secagem em Camada Delgada

A perda de umidade de um produto biológico, durante a secagem, pode ser considerada como resultado de dois fenômenos sucessivos: (a) migração de água do interior do produto para a superfície e (b) retirada do vapor d'água da superfície do produto para o meio que o envolve. A estrutura e composição química são fatores que influenciam a velocidade de movimentação da umidade no interior do produto. Por outro lado a velocidade de saída de vapor de água da superfície será influenciada pelas condições do meio: temperatura, umidade absoluta e velocidade do ar. O estudo do comportamento de uma unidade durante a secagem, em relação as variações do meio, tem sido o primeiro trabalho necessário para análise de um sistema de secagem em camada espessa de grãos. Para este estudo uma camada de grãos é posta a secar em fluxos de ar a diferentes temperaturas.

A velocidade de secagem de uma camada de grãos é função principalmente da temperatura, umidade absoluta do ar e umidade dos grãos. O efeito da velocidade do ar para grãos com teor de umidade menor de 70% pode ser desprezado devido as resistências externas à secagem serem desprezíveis em relação as resistências internas, para este tipo de produto.

Produtos com alto teor de umidade, acima de 70 a 75%, apresentam 2 períodos de velocidade, conforme HALL (21): (1) período de velocidade constante e (2) período de velocidade decrescente. No período constante a secagem é igual a evaporação da umidade de uma superfície de água livre. BROOKER et alii (09) apresentam um cálculo aproximado desta velocidade com uso de análise do termômetro de bulbo úmido. A velocidade pela qual

a umidade é evaporada é determinada largamente pelas condições do ar de secagem, havendo pouca influência do material. Estes parâmetros externos são: temperatura, umidade e velocidade do ar. Esse período é observado em produtos nos quais a resistência interna ao transporte de umidade é menor que a resistência externa à remoção de água da superfície do produto. O ponto final do período constante ocorre quando a velocidade de difusão de umidade no interior diminui abaixo daquela que é necessária para repor continuamente a água que está sendo evaporada da superfície do produto.

O teor de umidade ao qual a velocidade de secagem de um produto muda de velocidade constante para decrescente é chamado teor de umidade crítico do produto que está sendo seco, HALL (21). Os cereais são colhidos com um teor de umidade geralmente menor do que o teor de umidade crítico de tal modo que todo o processo de secagem ocorre no período decrescente. Os cereais não possuem, portanto, período constante de secagem, a menos que sejam colhidos em estado imaturos ou tenham água condensada em sua superfície. Outros produtos porém, como batata, beterraba, frutas, apresentam período de velocidade constantes quando desidratadas sob condições ambientais constantes, segundo VILLA (40). Em grãos de cereais quando acontece período constante, ele é frequentemente desprezado pelos pesquisadores, por causa de sua curta duração e a pequena quantidade de umidade a ser evaporada nesse período.

A teoria de difusão tem sido geralmente aceita para explicar o fluxo de umidade dentro do grão. O gradiente interno é causado por um teor de umidade mais baixo na superfície do que no interior do produto. A força de secagem na superfície é dada pela diferença entre a pressão de vapor na superfície e a pressão de vapor no ar em contato com a partícula. Se o grão pode ser considerado uma esfera com umidade distribuída simetricamente e sem gradiente de temperatura a taxa de secagem é representada matematicamente pela equação de difusão de massa:

$$\frac{\delta M(r)}{\delta t} = \frac{1}{r^2} \frac{\delta}{\delta r} \left[r^2 D \frac{\delta M(r)}{\delta r} \right] \quad |5|$$

com a condição de contorno:

$$\frac{\delta M(r=r_0)}{\delta r} = h_d A (p_{sg} - p_v) (M - M_e) \quad |6|$$

e a condição inicial

$$M(r, t=0) = M_0 \quad |7|$$

Onde: $M(r)$ é o teor de umidade local do produto em base seca; r a posição na esfera; D o coeficiente de difusão; r_0 o raio da esfera; h_d o coeficiente de transferência de massa por convecção; A a área exposta do grão; p_{sg} a pressão de vapor na superfície do grão; p_v a pressão de vapor do ar; M_e o teor de umidade de equilíbrio.

* PABIS & HENDERSON (27) e YOUNG & WHITAKER (41) estudaram a equação de difusão para descrever a secagem de milho e amendoim em casca respectivamente. HUSAIN e outros (24), estudaram o problema de difusão simultânea de calor e umidade nos grãos de cereais. As soluções tem apresentado algumas desvantagens como tempo consumido em seu uso devido a complexidade e a falta de coeficientes de difusão para maior parte dos produtos agrícolas. Equações empíricas tem sido mais aceitas por apresentarem resultados mais aproximados para uma faixa de variação das variáveis de interesse.

Equações semi-empíricas que representam o movimento de umidade durante o período de velocidade decrescente são baseadas na equação de transferência de calor de Newton: A taxa de variação na temperatura de um corpo envolvido por um meio, é proporcional à diferença em temperatura entre o corpo e o meio envolvente, quando a diferença de temperatura é pequena (equação 8).

$$\frac{d\theta}{dt} = K (\theta - T) \quad |8|$$

Onde: K é a constante de aquecimento ou resfriamento; θ é a temperatura do corpo a um tempo t e T a temperatura do meio.

Analogamente à equação de Newton, BARRE (04) equacionou a taxa de variação da umidade dos grãos em função da diferença entre a pressão de vapor do produto e a pressão de vapor do ar de secagem:

$$\frac{dM}{dt} = -b (p_{sg} - p_v) \quad |9|$$

Onde: p_{sg} e p_v são as pressões de vapor do grão e do ar, respectivamente, e b é a constante de secagem. Trabalhos de HUKILL (23) e FENTON (15), já apresentavam a teoria de secagem com base na pressão de vapor que se forma no interior do produto e a pressão de vapor do ar.

A força de secagem ($p_{sg} - p_v$) é mais convenientemente expressa como a diferença entre a umidade M do produto e a umidade M_e de equilíbrio com o ar. Estas forças de secagem ($p_{sg} - p_v$) e $(M - M_e)$ estão relacionadas através das propriedades de equilíbrio. Assumido que a umidade de equilíbrio é uma função linear da umidade relativa do ar de secagem na faixa geralmente encontrada em secagem, pode-se escrever:

$$\frac{dM}{dt} = -m p_{v,s} (M - M_e) \quad |10|$$

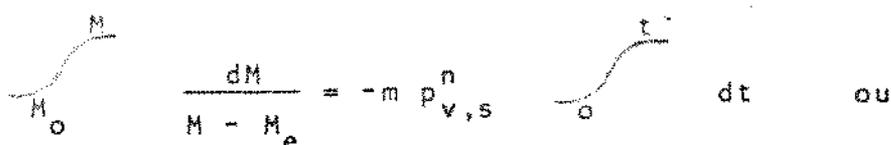
Onde: $0_{\text{produto}} m p_{v,s}$ pode ser considerado como a constante de secagem. Para variações estreitas na temperatura do ar, a constante de secagem pode ser considerada variar diretamente com $p_{v,s}$. Entretanto, para variações maiores, varia com $p_{v,s}^n$ conforme relatam THOMPSON et alii (28) para constante de secagem de milho. A influência da velocidade do ar na taxa de secagem é desprezível, conforme tem se verificado experimentalmente. Isto

pode ser explicado pelo fato de que a resistência externa à secagem é desprezada em relação à resistência interna (resistência devida a difusão interna da água no grão).

A equação [10] torna-se:

$$\frac{dM}{dt} = -m p_{v,s}^n (M - M_e) \quad |11|$$

Integrando em forma indefinida, temos:



$$\frac{dM}{M - M_e} = -m p_{v,s}^n dt \quad \text{ou}$$

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = M.R = e^{-m p_{v,s}^n t} \quad |12|$$

Onde: M.R é a razão de umidade, sem dimensão, e que fisicamente pode ser definida como a fração de água que falta para evaporar em relação à quantidade total de água evaporável.

A equação [11] foi melhorada por ROA et alii (32) que propuseram o seguinte modelo empírico:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = -mq(p_{v,s} - p_v)^n (M - M_e) t^{q-1} \quad |13|$$

que integrando para condições de temperatura e umidade constantes

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = M.R = e^{-m(p_{v,s} - p_v)^n t^q} \quad |14|$$

Onde: p_v é a pressão do vapor d'água no ar e q é outro parâmetro. A pressão de vapor saturado $p_{v,s}$ foi substituída na equação [11] pelo deficit de saturação $(p_{v,s} - p_v)$ que é realmente

um potencial de secagem. O expoente q foi adicionado com o propósito de corrigir as variações das propriedades físicas da secagem com respeito ao tempo t .

Esta equação, segundo ROA (33) é simples, precisa, geral e fisicamente bem fundamentada. Apresentou bons resultados para feijão. Para amendoim em casca, os erros foram desprezíveis comparados com os erros originados usando as equações de difusão de massa com coeficiente de difusão otimizados por YOUNG & WHITAKER (41). Para milho, os erros foram menores que os erros obtidos utilizando a equação empírica proposta por THOMPSON (38).

2.7.3. Secagem em Camada Espessa

A secagem de uma só partícula ou de uma só camada de grãos não altera as condições do ar significativamente. Porém, quando as partículas são amontoadas dentro de um secador, formando espessas camadas, o ar que passa por uma camada se modifica. Sua temperatura diminui ao ceder calor sensível para os grãos, e sua umidade aumenta ao receber a água evaporada do produto. Conseqüentemente, seu potencial de secagem diminui. Um modelo completo que faça simulações de secagem em tal situação deverá conter equações que calculem todas estas variações de temperatura e umidade tanto para o produto como para o ar.

De acordo com BAKKER-ARKEMA (01), a primeira tentativa importante para modelar a secagem de grãos em camada espessa, foi feita por Hukill em 1954. Entretanto, o primeiro estudo significativo, baseado em leis de transferência simultânea de calor e massa, foi publicado por Van Arsdell em 1955. O trabalho não teve, na época, possibilidade de uso devido a não existência de computadores eletrônicos adequados. O primeiro estudo moderno em secagem de grãos usando um computador eletrônico, para resolver o modelo de equações, foi publicado por BOYCE (06), sendo um modelo semi-empírico e os resultados computados não tiveram concordância com os dados experimentais. O mesmo autor apresenta, mais tarde, um modelo mais fundamental baseado em leis de transferência de calor e massa (07). Não teve, porém,

sucesso devido mais a falta de parâmetros básicos do que ao modelo. Vários modelos semi-empíricos foram propostos por THOMPSON (38) e utilizados por outros autores.

Um modelo eficiente composto de equações obtidas mediante um balanço de calor e massa, foi proposto por BAKKER-ARKEMA (01) e descrito também por BROOKER et alii (09), denominado pelo autor de modelo MSU (Michigan State University. Devido à natureza teórica das equações, o modelo tem apresentado uma aplicação mais geral para produtos biológicos, apesar de ser usado conjuntamente com uma equação empírica de camada delgada, cuja vantagem já comentamos anteriormente.

As seguintes suposições foram feitas pelos autores no desenvolvimento deste modelo: (1) Não há diminuição significativa do volume dos grãos durante a secagem. (2) Não existe gradiente de temperatura dentro do grão. (3) O ar é distribuído uniformemente através da camada de grãos. (4) A transferência de calor por condução entre os grãos é desprezível. (5) Os gradientes de temperatura e umidade absoluta do ar com respeito ao tempo são desprezíveis com respeito à posição. (6) Não existem perdas de calor nas paredes do secador. (7) Os calores específicos do ar e do produto são considerados constantes durante pequenos intervalos de tempo.

As suposições 2 a 7 têm sido aplicadas a todos os grãos. A variação do volume da camada de grãos tem sido considerada, entretanto, por alguns autores. SPENCER (34) incluiu o efeito desta variação na simulação na secagem de camada estacionária de trigo.

ROA & MACEDO (33) apresentam uma forma simplificada do modelo MSU, denominado modelo UNICAMP. Um balanço de energia e massa é desenvolvido em um volume diferencial (Sdx) localizado arbitrariamente em uma posição no silo estacionário (FIG. 6). Existem quatro variáveis desconhecidas: o teor de umidade do grão (M); a umidade absoluta do ar (H); a temperatura do ar (T), e a temperatura do produto (θ). Assim, são feitos três balanços, resultando as equações:

(1) Para a energia do ar

a energia que entra na secção numa posição x
- energia que sai na posição $x + dx$ = energia transferida ao produto por convecção.

$$V_a \rho_a S dx C_a T - V_a \rho_a S dx C_a (T + \frac{\delta T}{\delta x} dx) =$$
$$= ha S dx (T - \theta)$$

Sendo $V_a \rho_a = G_a$, resulta

$$\frac{\delta T}{\delta x} = \frac{ha(T - \theta)}{G_a C_a} \quad |15|$$

(2) Para a energia do produto

a energia transferida ao produto por convecção = energia para evaporação + troca de energia interna.

$$ha S dx (T - \theta) = - h_{fg} S dx \rho_p \frac{\delta M}{\delta t} +$$
$$+ S dx (\rho_p C_p + \rho_p C_w M) \frac{\delta \theta}{\delta t}$$

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{ha(T - \theta)}{\rho_p C_p + \rho_p C_w M} + \frac{h_{fg} \rho_p \frac{\delta M}{\delta t}}{\rho_p C_p + \rho_p C_w M} \quad |16|$$

(3) Para a umidade do ar

umidade que entra na secção x - umidade que sai na secção $x + dx$ = umidade evaporada do produto.

$$\begin{aligned} V_a \rho_a S dx H - V_a \rho_a S dx \left(H + \frac{\delta H}{\delta x} dx \right) &= \\ &= S dx \rho_p \frac{\delta M}{\delta t} \end{aligned}$$

$$\frac{\delta H}{\delta x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\delta M}{\delta t} \quad |17|$$

(4) Para a unidade do produto-equação |13|

$$\frac{\delta M}{\delta t} = - m q (M - M_e) (p_{v,s} - p_v)^n t^{q-1}$$

Solução analítica deste sistema de equações não é possível. Somente soluções numéricas com o uso de computador.

Para a solução numérica deste sistema de equações, as condições de entrada e de contorno do grão e do ar devem ser conhecidas. As condições para análise de secagem em camada espessa fixa são:

$T(0, t)$ - temperatura de entrada do ar

$\theta(x, 0)$ - temperatura inicial do produto

$H(0, t)$ - umidade absoluta de entrada do ar

$M(x, 0)$ - umidade inicial do produto

Este modelo de equações foi utilizado com sucesso por ROA & MACEDO (33) na simulação de secagem de feijão carioca com energia solar.

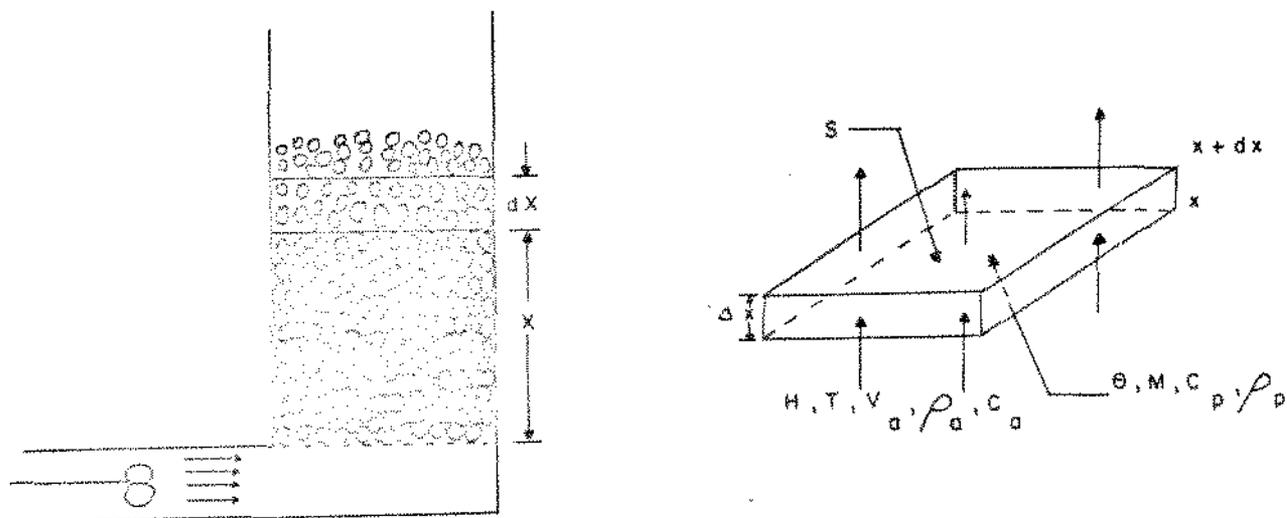


FIG. 6 - Secador estacionário de camada espessa e um elemento do volume para o balanço de energia e massa.

Um dos objetivos dos modelos atuais é diminuir o tempo de cálculo do computador, o qual pode ser muito grande, se modelos sofisticados são usados para simular longos períodos de secagem. Modelos simplificados ou empíricos são mais desejáveis, pois são rápidos em cálculos de sistemas de secagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados 2 experimentos de secagem natural em terreiros, de 22 de maio a 06 de junho e de 01 a 14 de julho de 1975, respectivamente, e 1 experimento de secagem em silo com coletor solar, de 31 de julho a 10 de agosto do mesmo ano.

Paralelamente a estes experimentos foram realizados outros ensaios de laboratório: secagens em silo piloto, secagens em camada delgada, determinação das propriedades físicas do produto e determinação das curvas de umidade de equilíbrio.

A parte experimental do trabalho foi encerrada em dezembro de 1975. O café espécie Coffea arábica e variedade Mundo Novo, para todos experimentos realizados, foi cedido pela Secção de Café do Instituto Agrônomo de Campinas - (IAC).

3.1. Secagem Natural em Terreiros

Os experimentos de secagem natural foram montados junto à Estação Meteorológica do IAC - Fazenda Santa Eliza.

Foram utilizadas peneiras de 50 X 50 X 8 cm, construídas com tela de arame galvanizado, malha de 5 mm, armadas com arame Nº 6 e montadas em suportes construídos com ferro de construção 3/8" (FIG. 7).

As peneiras contendo o produto, foram colocadas em três posições diferentes no primeiro experimento, isto é: (a) horizontal ao solo (processo tradicional de terreiro), (b) horizontal a 30 cm do solo, e (c) vertical. Para cada tratamento deste, foram feitas 2 repetições, com um peso por unidade de área de 28 Kg/m^2 , ou seja 7 Kg por peneira. No segundo experimento, foi acrescentado mais um tratamento, colocando-se uma pe

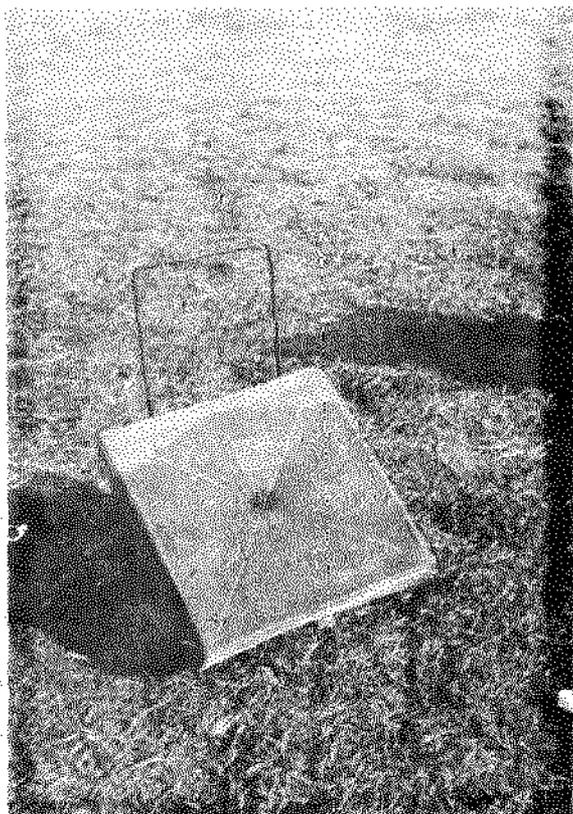
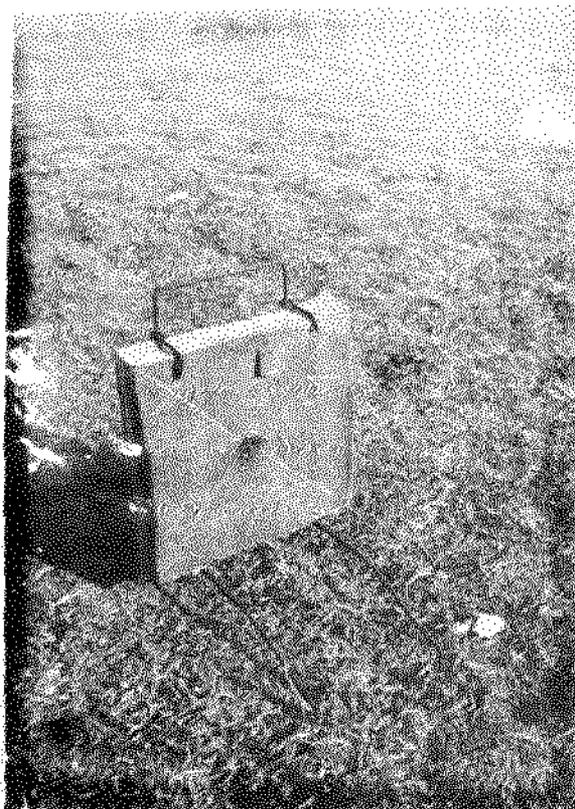
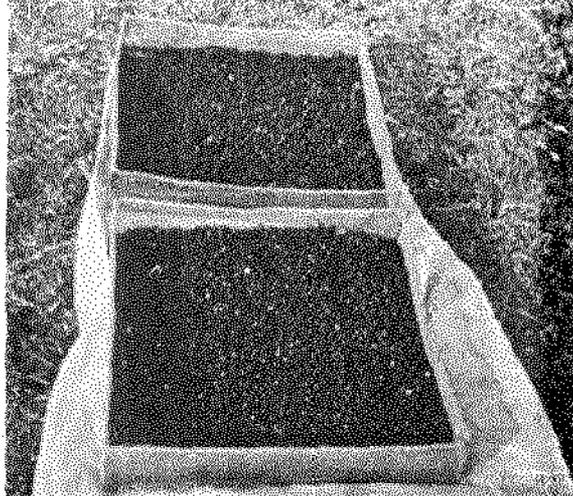
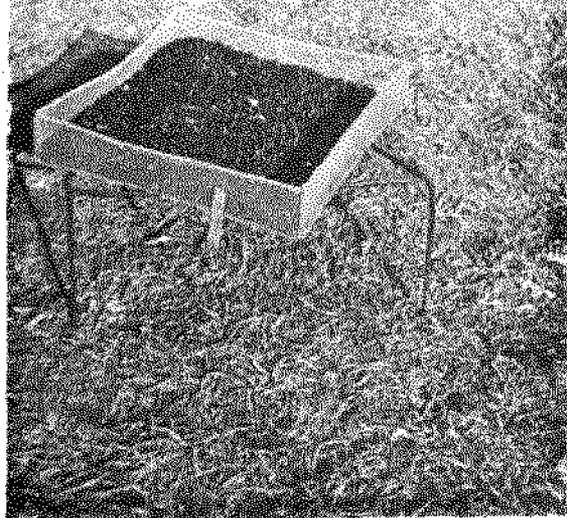


FIG. 7 - Secagem natural em terreiros

neira inclinada, fazendo ângulo de 50° em relação a superfície do solo, com posição voltada no sentido da trajetória do sol (FIG. 7). Foram feitas variações de densidade (peso por unidade de área) das peneiras horizontais ao solo com 3, 5 e 7 Kg por peneira, ou seja, 12, 20 e 28 Kg/m², respectivamente, e repetiram-se os tratamentos com peneira vertical e horizontal a 30 cm (28/Kg/m²).

As peneiras foram pesadas de 2 em 2 horas nos 3 primeiros dias de secagem e de 3 em 3 horas a partir do 4º dia, em balança Dayton - Cap. 20 Kg e 0,01 Kg de precisão, com início às 8:00 horas e término às 17:00 horas, com um período de 9 horas de secagem diária.

Nos mesmos intervalos das pesagens foram feitas leituras de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, nos seguintes aparelhos todos eles de fabricação R. Fuen - Berlin Steglitz: Higrotermôgrafo N° E 116, Actinôgrafo N° E 3400 e anemômetro N° A 6829, respectivamente.

Após a secagem, as peneiras foram colocadas em secador túnel da Faculdade de Engenharia de Alimentos, à temperatura de 110°C, durante 30 horas a fim de determinar o peso seco do café em cada peneira. Através dos pesos secos foram determinados os teores médios de umidade dos grãos das peneiras correspondentes a cada pesagem.

No Brasil as normas de classificação de grãos comercializáveis, estabelecem, segundo PUZZI (30), que a determinação de umidade dos grãos será feita em estufa à temperatura de 100-110°C até peso constante, ou a 105°C por 24 horas, no caso de sementes. Para café em fruto estabelecemos uma temperatura 110°C por 30 horas para todos os experimentos realizados neste trabalho, em vista de não existir um método padrão, e de se utilizar outro equipamento, como o secador túnel, para determinação do peso seco de grandes quantidades de café nas peneiras. Os resultados deste trabalho, não foram comparados com resultados de outros trabalhos que tenham adotado técnica diferente.

3.2. Secagem em Silo com Coletor Solar

Foi utilizado para este experimento, um silo metálico com fundo perfurado, de 1 m de diâmetro e 0,08 m de altura, tendo 5 orifícios de 20 em 20 cm para coletar amostras. O silo foi ligado a um coletor solar plano, de 8 m² de área, através de um ventilador centrífugo acionado por um motor de 1 HP. O coletor foi colocado com sua superfície voltada para o norte, fazendo um ângulo de 45° com o plano da superfície terrestre, tendo sua área exposta no sentido do caminhar do sol (FIG. 8 e 9).

Trezentos e treze quilos de café foram colocados no silo, atingindo uma altura inicial de 73,5 cm, e se constituindo de uma mistura de 31% de café cereja, 49% de café passa, 4% de café verde e 16% de café seco, com uma média de 44,44% de umidade (base úmida).

Foram feitas leituras de temperaturas de bulbo seco e úmido na base da camada de café e na saída do silo, de 30 em 30 minutos. A velocidade do ar foi medida na saída do silo com um anemômetro de mola em espiral Florite, escalas de 0 - 16 m/s e precisão de 0,1 m/s. Um higrotermôgrafo foi deixado junto ao silo para registrar temperaturas e umidades relativas do ar ambiental.

Um mostrador standard de grãos de 4 seções foi utilizado para retirar amostras a 20, 40 e 60 cm do fundo perfurado, com intervalos de 3 em 3 horas. As amostras foram divididas em duas, de aproximadamente 12 gramas cada, através de um mostrador Boerner e colocadas em cadinhos para determinação da umidade em estufa a 110°C durante 30 horas.

O tempo de secagem foi de 09 horas diárias, iniciando-se às 8:00 horas e encerrando-se às 17:00 horas, com um total de 7 dias e meio de operação do coletor e ventilador.

3.3. Experimentos de Laboratório

Para efetuar a análise matemática de secagem de

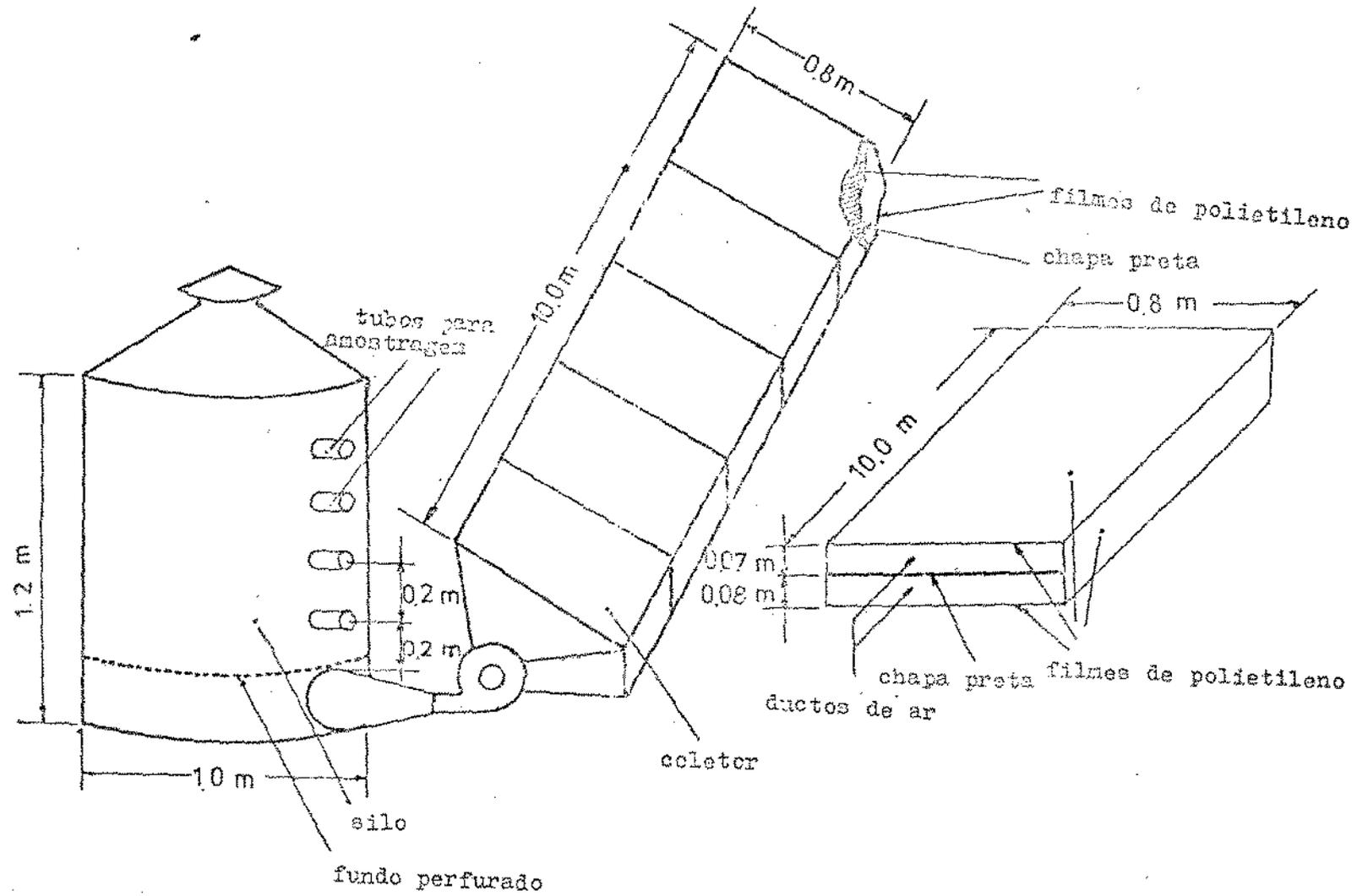


FIG. 8 - Silo experimental e coletor solar plano.

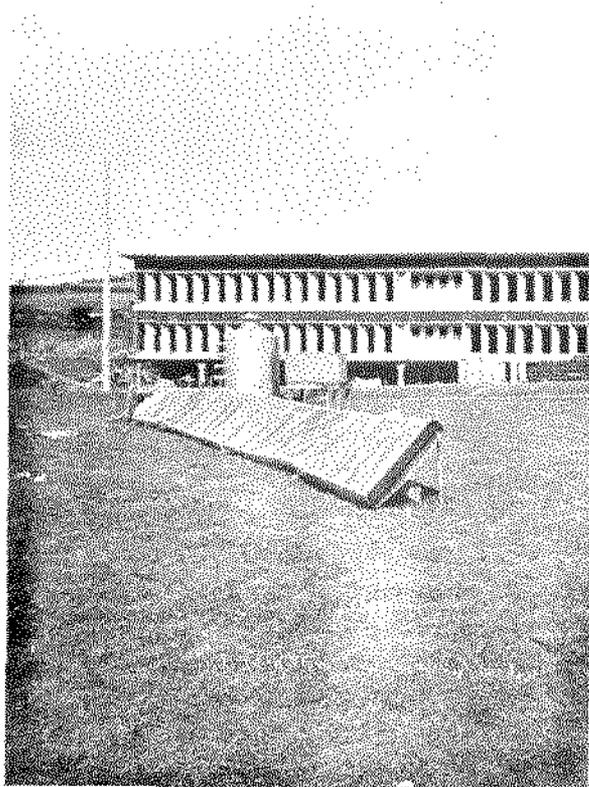
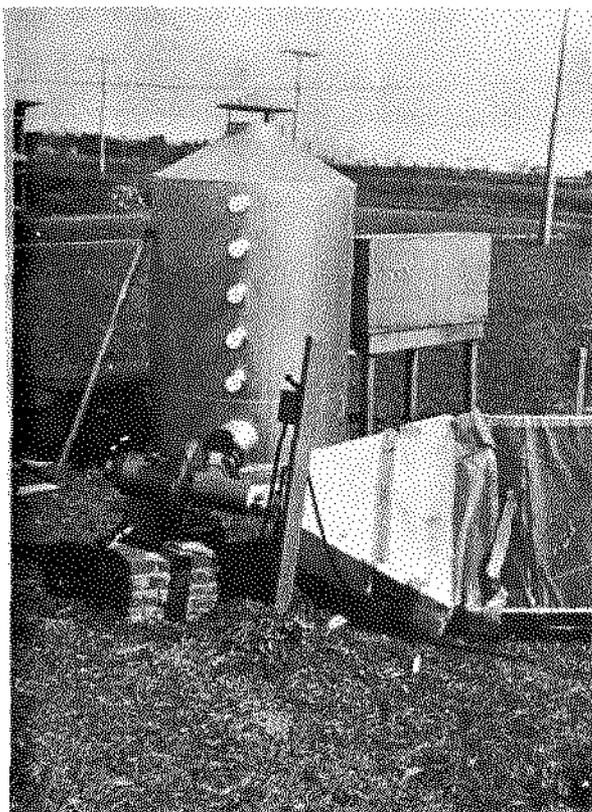


FIG. 9 - Silo com coletor solar

café em camada espessa no silo solar os seguintes experimentos foram necessários: (a) secagem em pequeno silo, que denominamos silo piloto; (b) determinação de umidades de equilíbrio do café em fruto; e (c) secagem em camadas delgadas. Utilizando-se os dados de secagem em silo piloto, foram determinadas propriedades físicas necessárias na análise, como a densidade e área específica em função da umidade.

Estes experimentos foram realizados nas plantas-piloto de Tecnologia e de Engenharia, da Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, da UNICAMP.

3.3.1. Secagem em Silo-Piloto

Foram realizados 2 experimentos de secagem em pequeno silo quadrangular de 27,5 X 27,5 cm de secção e 60 cm de altura, com duas vazões do ar.

O silo, com fundo telado, foi encaixado na saída de um ventilador Fan Test TE 84 da Plint & Partners Ltd Engineers. A entrada do ar do ventilador foi conectada a uma tubulação contendo uma série de resistências elétricas com controle termostático (FIG. 10).

No primeiro experimento, realizou-se uma secagem de 24,1 Kg de café cereja, com umidade inicial de 66,5% (base úmida), à temperatura de 35°C, e vazão do ar de 3110.0 m³/min.ton. No segundo foram secos 22,2 Kg de café cereja, à mesma temperatura, com umidade inicial de 66,0% (base úmida), e vazão de 1683.0 m³/min.ton. A umidade inicial para ambos os experimentos foi determinada colocando-se 3 amostras em estufa a 110°C por 30 horas e tirando-se a média aritmética das três.

O conjunto ventilador e silo foi montado em cima de uma balança para determinar os teores de umidade médios como função do tempo de secagem. As pesagens foram feitas de meia em meia hora no início, e a intervalos cada vez maiores à medida que as perdas de peso se tornavam menores. Além das pesagens, foram colhidos dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na entrada e saída do silo, e altura da camada. Pressões estáti

cas foram medidas na entrada do ventilador e a uma altura de 15 cm da base do silo.

Com a umidade inicial, calculada experimentalmente, determinou-se o peso do café no silo. Através do peso seco e das pesagens determinou-se os teores de umidade nos diversos intervalos de pesagem.

3.3.2. Secagem em Camada Delgada

Os experimentos de secagem em camada delgada foram realizados com auxílio de um secador rotatório da Bench Equipment Co., equipado com termostato para controlar a temperatura do ar. Na saída do ar foi adaptado um pequeno silo metálico quadrangular (FIG. 11). Uma peneira de arame galvanizado, colocada no fundo do silo, contendo uma camada da espessura de um grão, recebia o ar com temperatura constante. Abaixo da camada de grãos, através de um pequeno orifício, foram feitas leituras de temperatura de bulbo seco e úmido, com auxílio de dois termômetros. As pesagens do produto foram efetuadas de meia em meia hora no início, aumentando-se este intervalo a medida que a secagem ia se tornando mais lenta. Ao final da secagem, aproximadamente ao atingir o equilíbrio, o produto era retirado do silo e colocado em estufa a 110°C por 30 horas, a fim de determinar o peso seco, e por intermédio deste, o teor de umidade médio dos grãos nos intervalos.

Foram realizadas secagens de café cereja às temperaturas de 75, 60, 45 e 32°C. A umidade absoluta foi constante para as quatro experiências e igual a 10.0 g de água por Kg de ar seco.

3.3.3. Umidades de Equilíbrio

Foram determinadas umidades de equilíbrio dos grãos de café em 3 temperaturas, a 10°C, 30°C, e 55°C. O produto foi colocado em recipientes de vidro, contendo soluções saturadas de sal que permitem manter o ar com umidades relativas constantes (TABELA 1).

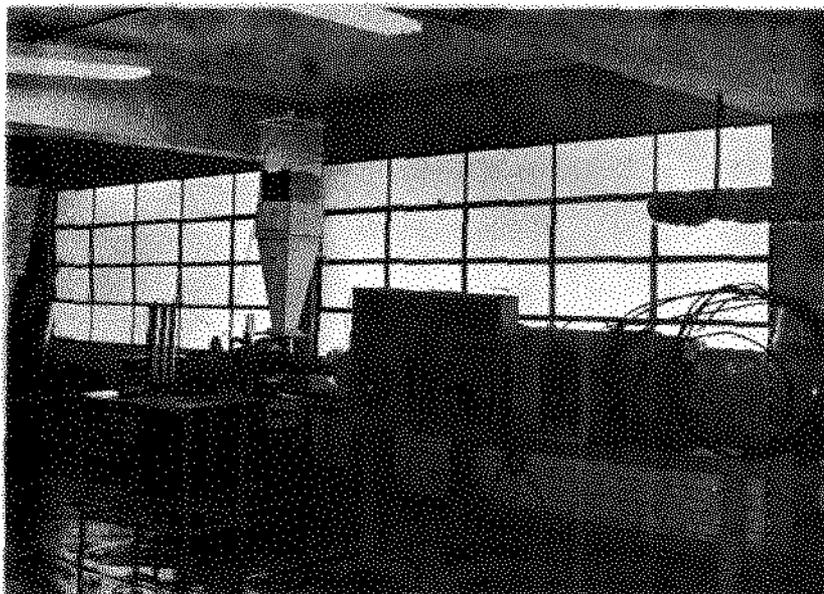


FIG.10 - Silo piloto adaptado a ventilador e resistências elétricas com termostato.

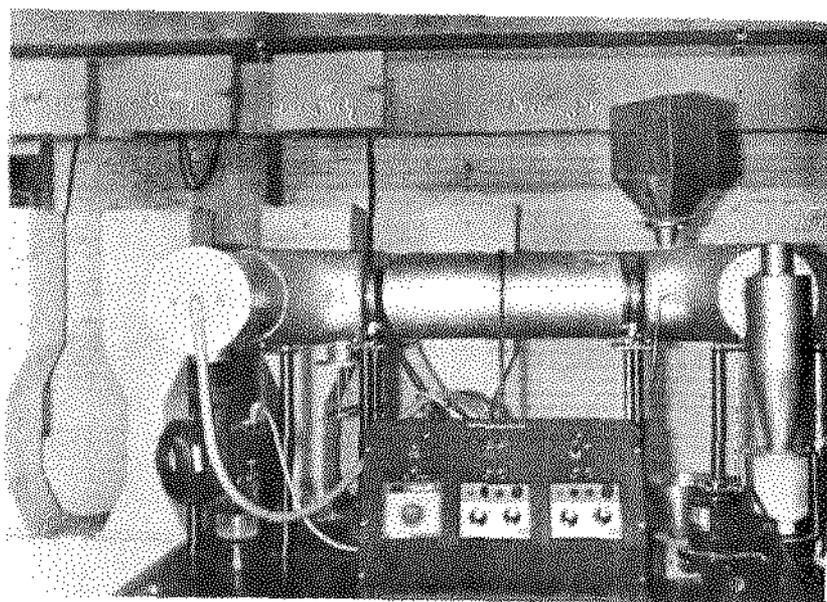


FIG. 11 - Secador rotatório com termostato e silo metálico adaptado na saída do ar.

TABELA I. Umidades relativas obtidas com soluções saturadas de sais.

SAL	TEMPERATURA °C			
	10	30	55	75
LiCl	11,2	11,2	11,2	11,2
K_2CO_3	25,0	22,0	18,5	15,5
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	34,0	32,8	31,0	29,5
KNO_3	51,0	47,2	43,0	39,5
NaBr	62,0	56,3	49,0	43,0
NaCl	75,5	75,6	75,0	75,0
$NH_4H_2PO_4$	94,8	92,0	88,5	86,0

Fonte: Hall (1957)

Para manter a temperatura a 10°C, os recipientes foram mantidos em câmara refrigerada, e em estufa para temperaturas de 30 e 55°C.

Afim de manter os grãos acima da solução foi adaptada uma pequena tela nos recipientes, presa por uma armação de fio inoxidável (FIG. 12).

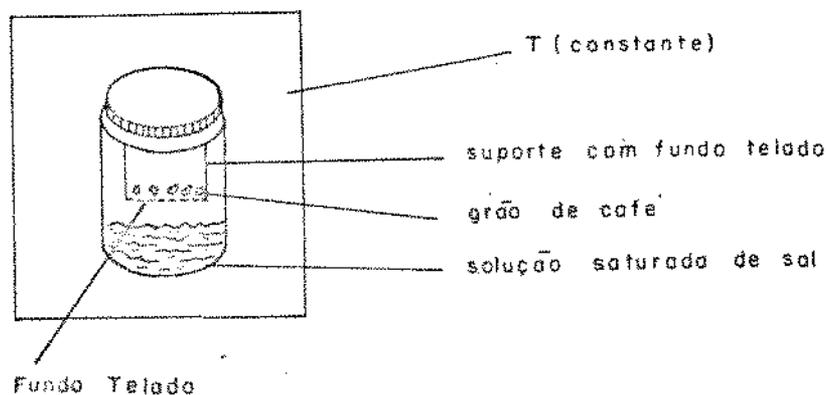


FIG. 12 - Recipientes para determinação de umidades de equilíbrio.

Foram feitas pesagens, retirando-se as telas contendo os grãos, de dois em dois dias, até peso constante. A seguir o produto era colocado em estufa a 110°C durante 30 horas para determinar o peso seco e conseqüentemente a umidade de equilíbrio.

3.3.4. Análise Sensorial

O café seco no silo com coletor solar, foi beneficiado em máquina da Seção de Café do Instituto Agronômico de Campinas. Testes de bebida do café foram efetuados por equipe de provadores do Laboratório de Análise Sensorial da Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP, e por equipe do Laboratório do IBC em São Paulo.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS, ANÁLISE MATEMÁTICA E DISCUSSÃO

Os primeiros experimentos de secagem natural foram realizados de tal modo que se pudesse analisar a influência de variáveis ambientais na secagem. Estas informações não encontradas na literatura, se tornaram necessárias para atender os objetivos deste trabalho, ou seja, analisar o processo de secagem natural com vistas à melhor utilização das variáveis ambientais, e portanto a diminuição de espaço, mão de obra e tempo na operação. A metodologia seguida por ROA (31), serviu de orientação para a montagem destes experimentos.

Uma análise preliminar dos resultados obtidos nos serviu de base para o estabelecimento dos trabalhos posteriores.

4.1. Secagem Natural em Terreiros

O calor se transmite naturalmente aos grãos por convecção e radiação. A velocidade de secagem depende: (a) das variáveis ambientais não controláveis como radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do ar; (b) das propriedades térmicas do produto e (c) do teor de umidade inicial do produto. Assim, a metodologia empregada nestes experimentos visou colocar os grãos em posições diferentes com relação aos elementos naturais, radiação e circulação do ar. No processo tradicional, com peneiras ao chão, normalmente há baixa circulação do ar, em vista do produto não ficar completamente exposto as correntes aéreas. Procurou-se, desta forma, colocar o produto em posições tais que se pudesse utilizar conjuntamente a radiação e a entalpia do ar como fontes de energia para evaporar a umidade dos grãos de café.

Os resultados destes experimentos (I e II) podem

ser vistos nas TABELAS 3 e 5 e nos GRÁFICOS 1 e 2. As condições ambientais médias nos intervalos de secagem são apresentadas nas TABELAS 2 e 4.

A comparação entre a secagem com peneiras ao chão, horizontal a 30 cm, vertical e inclinada, pode ser feita através das curvas apresentadas nos GRÁFICOS 1 e 2. As linhas contínuas representam a secagem durante as horas do dia e as linhas tracejadas a secagem durante a noite. A partir do dia 29/05 no experimento I e 08/07 no experimento II, as peneiras foram guardadas durante a noite. No dia 03/07 do experimento II as peneiras foram guardadas por motivo de chuva. Estas horas não foram computadas no tempo de secagem. Procuramos seguir neste trabalho algumas medidas adotadas na prática pelos agricultores, ou seja, revirar o produto das peneiras horizontais periodicamente e guardar as peneiras para proteger o café contra chuva e orvalho da noite durante os últimos dias de secagem (no terreiro o café é normalmente amontoado e coberto com lona).

Com relação a secagem durante as horas do dia (linhas contínuas) nota-se uma maior velocidade de secagem para as peneiras verticais, inclinadas e horizontais a 30 cm, até o teor de umidade próximo de 45%, do que para as peneiras ao chão. A diferença maior atingida foi de 5% para o experimento I, no dia 26/05, entre as peneiras ao chão e vertical, e de 10% entre as peneiras ao chão e inclinadas, no dia 06/07, para o experimento II. A partir destes pontos, entretanto, a maior eficiência de secagem destas peneiras começou a diminuir, se igualando e tornando finalmente menores do que a peneira ao chão. Se considerarmos, portanto, o tempo total de secagem, estas variações não apresentam vantagem com relação ao processo tradicional.

Algumas suposições podem ser feitas para explicar as diferenças das taxas de secagem natural nos sistemas utilizados. Grande parte do calor absorvido pelo grão nos períodos iniciais é utilizado para evaporar a alta umidade da casca e polpa (76-90%). A energia para evaporar a água superficial é ministrada principalmente pela entalpia do ar, ocorrendo, nestes períodos, maior velocidade de secagem em peneiras inclinadas,

TABELA 2. Condições ambientais médias - I Experimento -
Secagem em terreiros.

DIAS	Nº DE	TEMP.	UMID. REL.	VEL. VENTO	RADIACÃO
	HORAS				
	hr.	°C	%	m/s	cal/cm ² -hr
22-05-75	1	16,5	38,0	3,88	6,0
NOITE	14	13,8	71,1	4,62	-
23-05	10	19,6	39,8	5,23	34,2
NOITE	14	12,5	69,8	2,57	-
24-05	10	18,9	50,4	4,75	32,7
NOITE	14	12,9	69,8	4,00	-
25-05	10	19,9	47,6	3,91	27,0
NOITE	14	13,8	74,4	4,54	-
26-05	9	21,5	42,3	2,53	29,0
NOITE	15	16,8	75,0	3,30	-
27-05	9	22,0	38,3	2,44	32,0
NOITE	15	15,2	80,0	3,70	-
28-05	9	21,3	39,3	1,56	36,6
NOITE	15	14,5	77,0	3,40	-
29-05 [#]	9	21,6	36,6	1,88	31,7
30-05	9	22,0	35,6	2,46	34,0
31-05	9	21,6	43,6	2,59	32,0
01-06	9	19,5	33,3	1,86	31,0
02-06 ^{**}	3	23,0	40,0	1,50	30,0
NOITE	15	16,8	85,0	1,20	-
03-06	9	22,1	49,0	1,46	26,0
NOITE	15	19,3	80,0	1,10	-
04-06	9	21,5	73,3	2,30	22,0
05-06	9	20,2	61,6	3,13	23,0
06-06	9	23,6	47,6	5,90	24,0

* - Quando não há dados registrados à noite é porque as peneiras foram guardadas.

** - Guardadas às 11:00 horas, devido à chuva, e retiradas às 17:00 horas.

TABELA 3. Teores de umidade, porcentagem, base úmida - I experimento - Secagem em terreiros.

DIAS		PENEIRA	PENEIRA	
E	HORAS	HORIZ.	HORIZ.	PENEIRA
HORAS	ACUMULADAS	AO CHÃO	A 30 CM	VERTICAL
22/5-17:00	0	67,46	66,96	66,11
18:00	1	66,96	66,18	65,01
NOITE	15	-	-	-
23/5-08:00	15	66,05	65,37	64,11
10:00	17	65,17	64,95	62,70
11:00	18	64,01	64,03	61,49
13:00	20	62,72	63,27	59,93
14:00	21	62,03	61,45	59,24
15:00	22	61,39	60,66	58,39
16:00	23	61,06	60,26	58,02
18:00	25	60,72	59,70	57,34
NOITE	39	-	-	-
24/5-08:00	39	60,86	59,56	55,75
10:00	41	60,24	58,47	54,56
12:00	43	58,88	56,93	53,40
14:00	45	57,58	55,52	52,37
16:00	47	56,28	54,11	51,29
18:00	49	55,94	53,55	50,69
NOITE	63	-	-	-
25/5-08:00	63	56,19	53,18	49,75
10:00	65	55,51	52,21	48,88
12:00	67	53,98	50,58	47,87
14:00	69	52,34	48,94	46,82
16:00	71	51,63	48,26	46,21
18:00	73	51,32	47,91	45,97
NOITE	87	-	-	-
26/5-08:00	87	51,74	48,14	45,72
11:00	90	50,26	46,46	44,45
14:00	93	47,99	44,00	42,98

continua...

...Continuação TABELA 3.

DIAS E HORAS	HORAS ACUMULADAS	PENEIRA HORIZ. AO CHÃO	PENEIRA HORIZ. A 30 CM	PENEIRA VERTICAL
17:00	96	47,15	43,31	42,15
NOITE	111	-	-	-
27/5-08:00	111	46,53	42,61	41,58
11:00	114	45,24	40,99	40,25
14:00	117	42,91	39,13	39,02
17:00	120	41,59	37,82	38,39
NOITE	135	-	-	-
28/5-08:00	135	43,19	40,69	40,25
11:00	138	41,74	38,81	38,55
14:00	141	38,76	36,28	36,91
17:00	144	37,26	35,39	36,06
NOITE	159	-	-	-
29/5-08:00	159	39,74	38,48	38,55
11:00	162	38,43	36,28	36,91
14:00	165	35,83	33,72	35,01
17:00	168	34,54	32,76	34,11
30/5-08:00	168	33,78	31,97	33,37
11:00	171	33,00	31,16	32,61
14:00	174	30,97	29,70	31,45
17:00	177	30,12	29,05	31,05
31/5-08:00	177	29,69	28,61	30,44
11:00	180	29,25	28,17	30,03
14:00	183	28,14	27,49	29,40
17:00	186	27,45	26,80	28,77
01/6-08:00	186	26,99	26,57	28,34
11:00	189	26,04	25,39	27,24
14:00	192	24,57	24,41	26,34
17:00	195	24,07	23,91	26,11
02/6-08:00	195	24,07	24,16	25,87
11:00	198	23,30	23,16	24,94

TABELA 4. Condições ambientais médias - II Experimento -
Secagem em terreiro.

DIAS	Nº DE	TEMP.	UMID. REL.	VEL. VENTO	RADIAÇÃO
	HORAS				
	hr.	°C	%	m/s	cal/cm ² -hr
01-07-75	6	23,3	38,0	2,40	26,4
NOITE	15	-	-	-	-
02-07	9	20,2	52,9	2,31	28,7
NOITE	15	15,2	71,8	1,60	-
03-07	6	19,5	60,0	1,05	19,5
04-07	9	16,0	67,0	2,47	25,0
NOITE	15	12,3	88,3	1,10	-
05-07	9	21,8	45,3	4,83	31,0
NOITE	15	13,5	79,1	2,40	-
06-07	9	14,3	37,3	2,13	38,2
NOITE	15	6,1	72,5	1,20	-
07-07	9	14,8	31,0	2,83	36,0
NOITE	15	11,5	64,7	3,40	-
08-07	9	20,2	30,7	1,87	32,0
09-07	9	20,5	35,3	2,53	33,4
10-07	9	20,3	38,0	2,53	32,0
11-07	9	21,5	33,7	3,83	32,4
12-07	9	22,8	36,7	2,17	30,3
13-07	9	23,7	36,9	1,56	30,0
14-07	4	24,0	42,0	2,80	30,0

TABELA 5. Teores de umidade, porcentagem, base úmida - II Experimento - Secagem em terreiros.

DIAS		PENEIRA	PENEIRA		
E	HORAS	HORIZ.	HORIZ.	PENEIRA	PENEIRA
HORAS	ACUMULADAS	AO CHÃO	A 30 CM	VERTICAL	INCLINADA
01/7-11:00	0	73,43	72,25	71,57	72,14
13:00	2	73,04	70,61	69,76	70,09
15:00	4	71,78	69,59	68,71	58,95
17:00	6	71,56	69,21	68,06	68,34
NOITE	21	-	-	-	-
02/7-08:00	21	70,98	60,98	68,61	67,87
10:00	23	70,66	68,20	66,83	67,17
12:00	25	69,90	67,01	65,63	65,73
14:00	27	69,15	65,91	64,65	64,55
17:00	30	68,42	64,60	63,15	63,00
NOITE	45	-	-	-	-
03/7-08:00	45	68,31	64,47	61,80	61,61
11:00	48	67,88	63,53	60,52	60,37
*14:00	51	66,79	62,98	59,39	59,12
04/7-08:00	51	65,75	61,96	58,71	58,33
11:00	54	65,17	61,04	57,93	57,42
14:00	57	63,67	59,07	56,17	55,48
17:00	60	62,58	57,46	56,77	53,90
NOITE	75	-	-	-	-
05/7-08:00	75	62,65	58,37	55,58	54,65
11:00	78	61,01	55,71	53,18	51,73
14:00	81	58,48	52,68	51,23	49,48
17:00	84	57,24	51,01	50,00	48,14
NOITE	99	-	-	-	-
06/7-08:00	99	61,57	55,91	51,93	51,49
11:00	102	60,43	53,59	50,13	49,09
14:00	105	56,94	49,87	48,45	46,87
17:00	108	55,71	48,40	47,63	45,83
**NOITE	123	-	-	-	-

continua...

...Continuação da TABELA 5.

DIAS		PENEIRA	PENEIRA		
E	HORAS	HORIZ.	HORIZ.	PENEIRA	PENEIRA
HORAS	ACUMULADAS	AO CHÃO	A 30 CM	VERTICAL	INCLINADA
07/7-08:00	123	55,71	49,87	48,97	47,01
11:00	126	54,07	47,57	47,49	45,22
14:00	129	51,31	45,20	46,36	43,80
17:00	132	49,46	44,25	45,33	42,82
NOITE	147	-	-	-	-
08/7-08:00	147	50,40	45,51	45,33	43,31
11:00	150	48,62	43,60	44,23	41,96
14:00	153	45,45	41,57	42,82	39,63
17:00	156	44,48	40,67	41,98	39,63
09/7-08:00	156	43,64	39,94	41,30	38,06
11:00	156	42,41	38,99	40,60	38,29
14:00	162	40,76	37,82	39,70	37,10
17:00	165	39,81	37,42	38,96	36,48
10/7-08:00	165	39,22	36,81	38,58	36,27
11:00	168	38,00	35,76	37,62	35,00
14:00	171	36,30	34,46	36,62	33,90
17:00	174	35,42	34,01	36,22	33,45
11/7-08:00	174	34,74	33,56	35,39	33,22
11:00	177	34,04	32,87	34,97	32,29
14:00	180	32,61	31,93	34,32	31,58
17:00	183	31,87	31,21	33,67	30,85
12/7-08:00	183	31,11	30,71	33,22	30,60
12:00	187	29,81	29,45	32,31	29,35
17:00	192	27,34	27,61	30,90	27,78
13/7-08:00	192	26,77	27,07	30,42	27,24
12:00	196	25,00	24,22	28,93	26,14
17:00	201	23,14	23,92	27,90	24,71
14/7-08:00	201	22,82	23,62	27,37	24,42
12:00	205	21,19	22,40	26,30	23,23

* - As peneiras foram guardadas por motivo de chuva.

** - Aumento no teor de umidade devido a chuva de 7.9 mm.

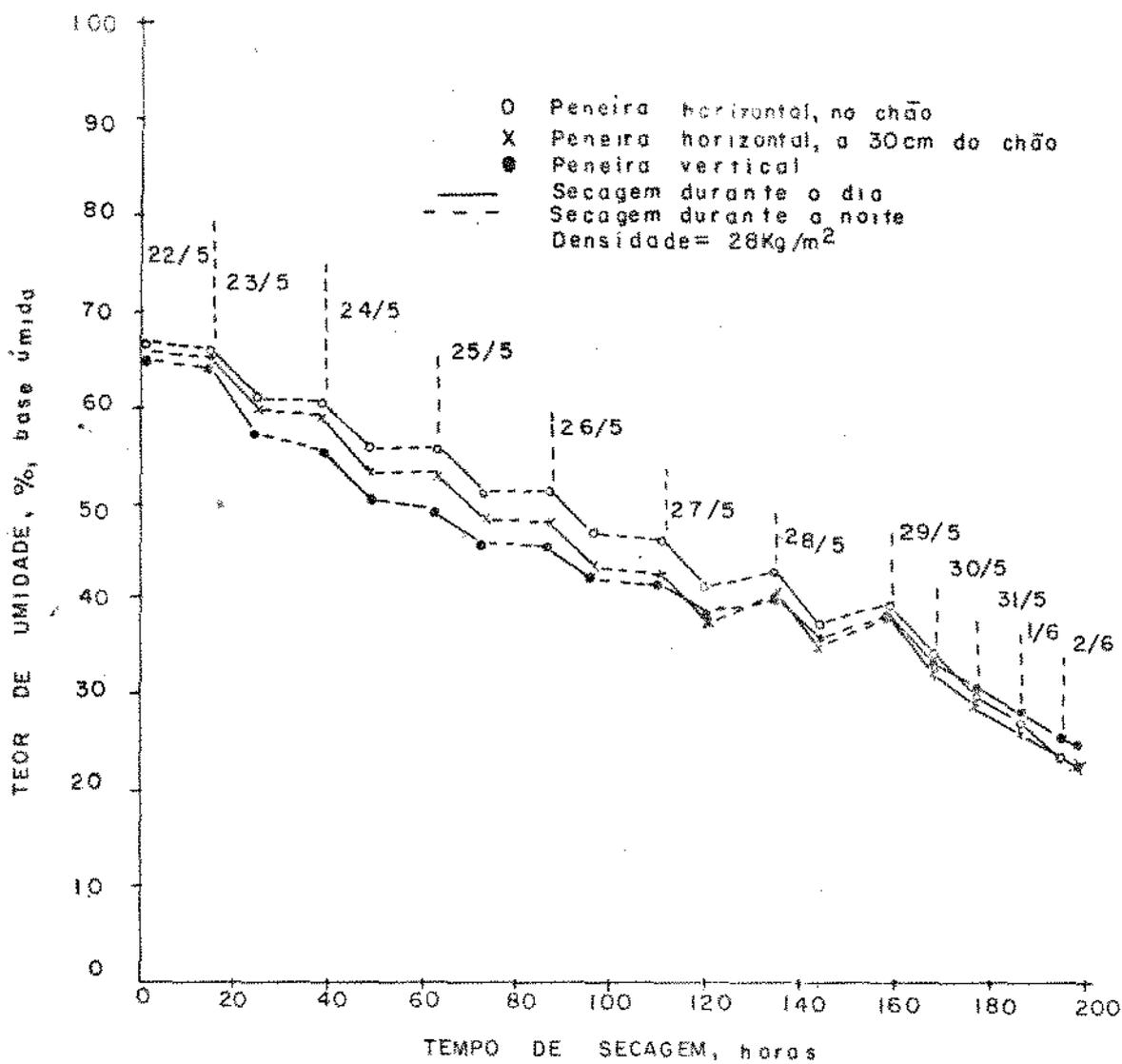


GRÁFICO I — Secagem natural de café em terreiro — Experimento I

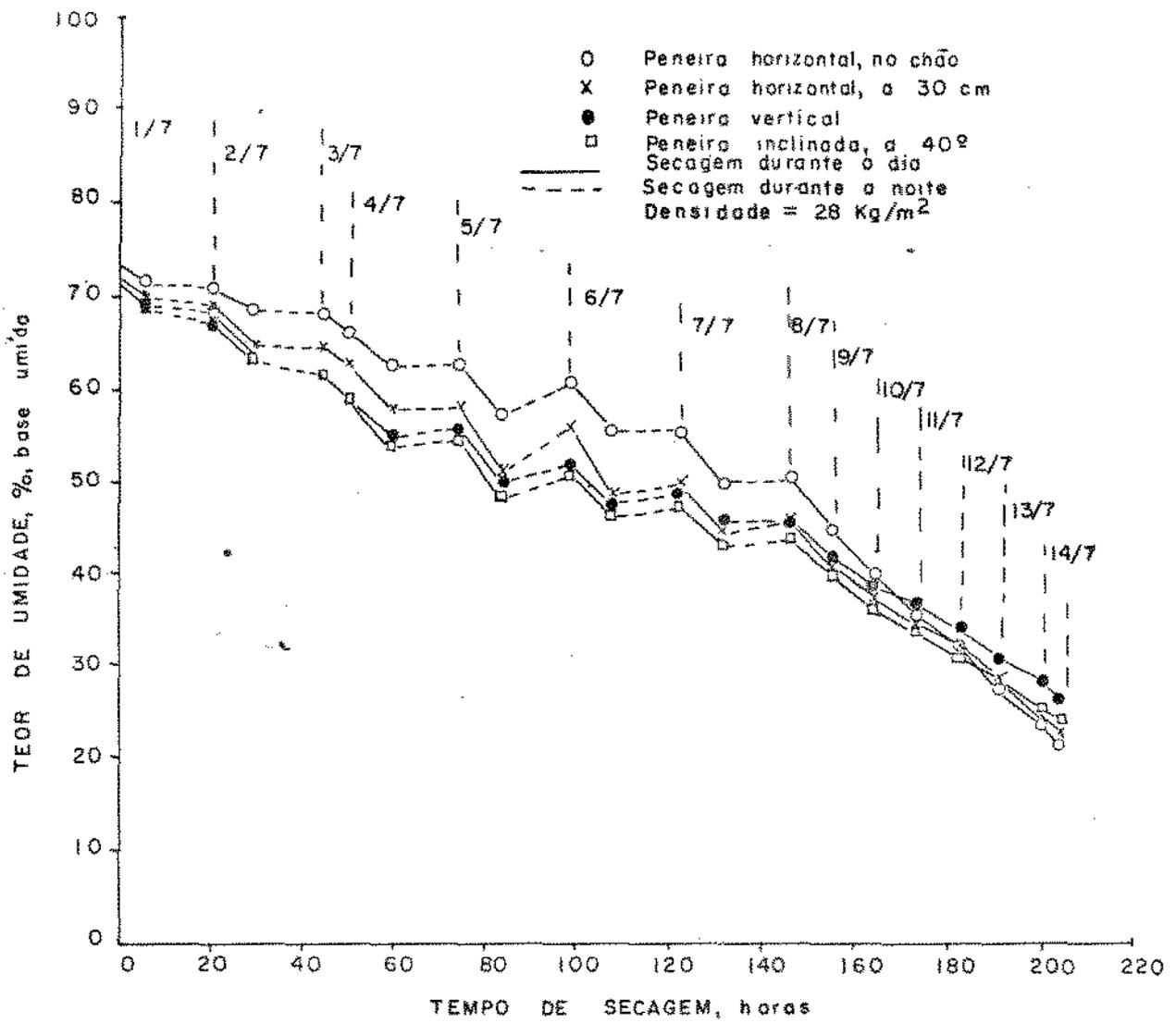


GRAFICO 2 — Secagem natural em terreiros, experimento II

verticais e a 30 cm do solo (horizontais), onde a circulação de ar é mais intensa. A polpa ao perder a umidade se funde à casca, havendo contração destas camadas superficiais que tornam-se duras e escuras. A secagem torna-se mais lenta ao final, e os grãos necessitam aumentar a sua energia interna afim de acelerar a difusão de umidade do interior para a periferia. Devido a sua cor escura há maior absorção das calorias que chegam através da radiação solar. As resistências internas são relativamente mais altas do que as externas, não havendo, em consequência disso, influência na velocidade de secagem, da maior circulação de ar que ocorre nas peneiras verticais e inclinadas. O grande aumento da resistência interna na secagem, nos períodos finais, deve-se em parte à presença de ar nos espaços vazios que se formam normalmente entre a semente e o pergaminho e entre o pergaminho e a casca.

Conforme se pode verificar, em ambos experimentos, pela inclinação das partes tracejadas, as peneiras horizontais ao chão e a 30 cm do chão só apresentaram perda de umidade durante a primeira noite, sendo esta perda, em torno de 1%, insignificante para um período de exposição de 15 horas. Os grãos das peneiras verticais e inclinadas perderam umidade somente até a 2ª noite (experimento II) e até a 3ª noite para a peneira vertical (experimento I) não sendo atingida, em nenhum caso, uma diminuição de 2% no teor de umidade. Durante a noite, a exceção dos casos vistos anteriormente, ocorre um fenômeno contrário ao da secagem, ou seja a adsorção de umidade pelos grãos em vista do abaixamento da temperatura e aumento de umidade relativa (TABELA 2 e 4). A umidade do ar atinge o ponto de orvalho e se condensa sobre a superfície dos grãos. Os dias do experimento I fornecem as médias de 21°C para a temperatura diurna, 14,2°C para a temperatura noturna, 44,00% para a umidade relativa do dia e 73,9% para a umidade relativa da noite. As médias para o experimento II foram 20,2°C, 11,7°C, 41,8% e 75,3% para as temperaturas e umidades relativas do dia e da noite, respectivamente. Uma inclinação positiva maior das linhas tracejadas indica ocorrência de chuva neste período, conforme está mostrando nos gráficos.

A secagem natural em terreiro apresenta uma séria desvantagem que é a relação entre o tempo total e o tempo em que há realmente perda de umidade (tempo real de secagem). Para o tempo real de secagem podemos computar somente os períodos diurnos, pois pelos gráficos podemos notar que houve mais absorção do que perda de umidade quando as peneiras ficarem expostas à noite. Para calcular o período total deve-se somar às horas acumuladas (TABELA 3 e 5) as horas das noites em que as peneiras foram guardadas. No experimento I para 258 horas totais houve secagem em apenas 97 horas, ou seja, 37,6% do tempo. No experimento II para 313 horas totais o café secou somente durante 115 horas, ou seja, 36,7% do tempo.

4.2. Experimentos de Laboratório

4.2.1. Secagem em Silo-piloto

Os dados obtidos destes experimentos estão apresentados na TABELA 6, GRÁFICO 3 e APÊNDICE A. No GRÁFICO 4 comparamos os dados médios de umidade de secagem em silo-piloto com dados calculados pela equação de camada delgada (item 4.2.4.). Pela boa correlação entre os dados experimentais e calculados conclui-se que a camada espessa comporta-se como uma camada delgada. Explica-se este fenômeno pela alta vazão do ar ($3.110,0 \text{ m}^3/\text{min.ton}$) empregada no experimento quando comparamos com as vazões $1-20 \text{ m}^3/\text{min.ton}$, utilizadas normalmente na prática. Os teores de umidade são médios, pois não houve gradiente significativo no teor de umidade em diversas alturas da camada. Para um valor médio final de 0,23 (base seca, decimal) os teores variaram entre 0,22, 0,23, e 0,24 na parte inferior, média e superior da camada, respectivamente. A umidade relativa foi calculada no diagrama psicrométrico utilizando-se os dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido (APÊNDICE A₂). As equações de umidade de equilíbrio (item 4.2.3.) e de secagem em camada delgada (item 4.2.4.) foram utilizadas nos cálculos.

Através dos dados experimentais da secagem em silo-piloto com vazão de $3110,0 \text{ m}^3/\text{min.ton}$ (TABELA 6) foram deter

TABELA 6. Teores de umidade (base seca) e volume de café cereja ($10^{-2} m^3$) durante a secagem em silo-piloto de $0.076 m^2$ de secção.

BAIXA VELOCIDADE DO AR*			ALTA VELOCIDADE DO AR**		
TEMPO(hr)	UMIDADE	VOLUME	TEMPO(hr)	UMIDADE	VOLUME
0,0	1,94	3,15	0,0	1,99	3,46
0,5	1,88	3,08	3,5	1,57	3,19
1,0	1,84	3,04	5,5	1,44	3,08
2,0	1,79	2,96	7,5	1,33	2,92
3,0	1,72	2,89	9,5	1,24	2,89
4,0	1,64	2,81	11,5	1,17	2,81
5,0	1,57	2,77	13,5	1,09	2,79
7,0	1,44	2,74	15,5	1,02	2,73
9,0	1,40	2,66	17,5	0,96	2,66
11,0	1,34	2,58	20,5	0,86	2,58
13,0	1,27	2,51	26,5	0,75	2,55
15,0	1,21	2,47	29,5	0,70	2,51
17,0	1,13	2,43	32,5	0,66	2,47
19,0	1,07	2,39	35,5	0,62	2,43
21,0	1,01	2,32	39,5	0,59	2,39
23,0	0,94	2,32	43,5	0,55	2,36
25,0	0,90	2,24	47,5	0,51	2,32
27,0	0,84	2,20	51,5	0,49	2,29
29,0	0,78	2,20	55,5	0,46	2,28
31,0	0,73	2,20	59,5	0,44	2,28
34,0	0,68	2,16	64,5	0,41	2,28
37,0	0,64	2,13	68,5	0,39	2,28
40,0	0,60	2,13	74,0	0,36	2,28
43,0	0,56	2,13	79,0	0,34	2,28
46,0	0,52	2,13	84,0	0,31	2,28
49,0	0,49	2,05	92,0	0,24	2,28
52,0	0,46	2,05	99,0	0,24	2,28
55,0	0,44	2,05	111,0	0,23	2,28

* - $1683,0 m^3/min.ton.$

** - $3110,0 m^3/min.ton$

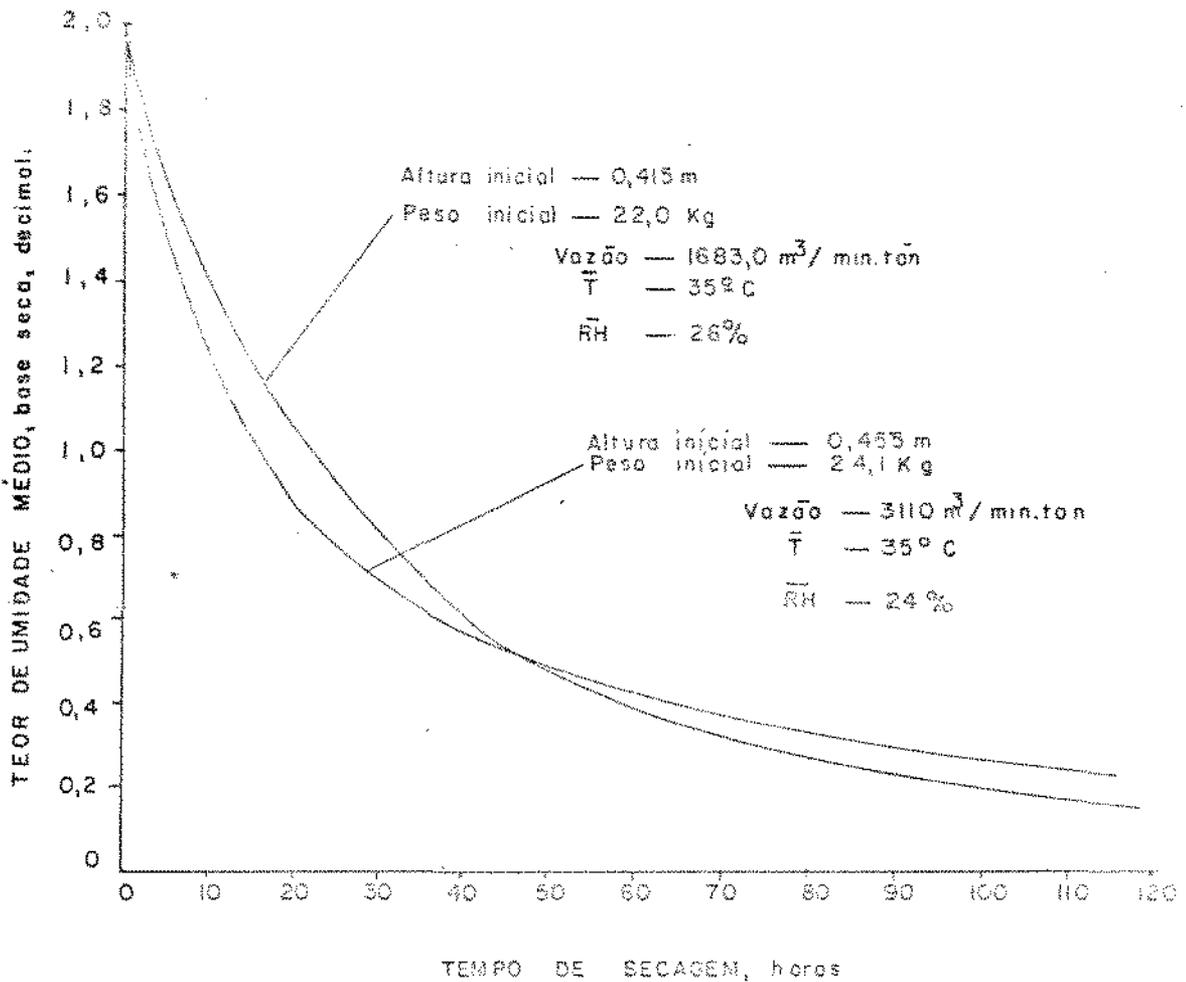


GRÁFICO 3 — Secagem de café cereja em sifo piloto quadrangular, à temperatura de 35°C

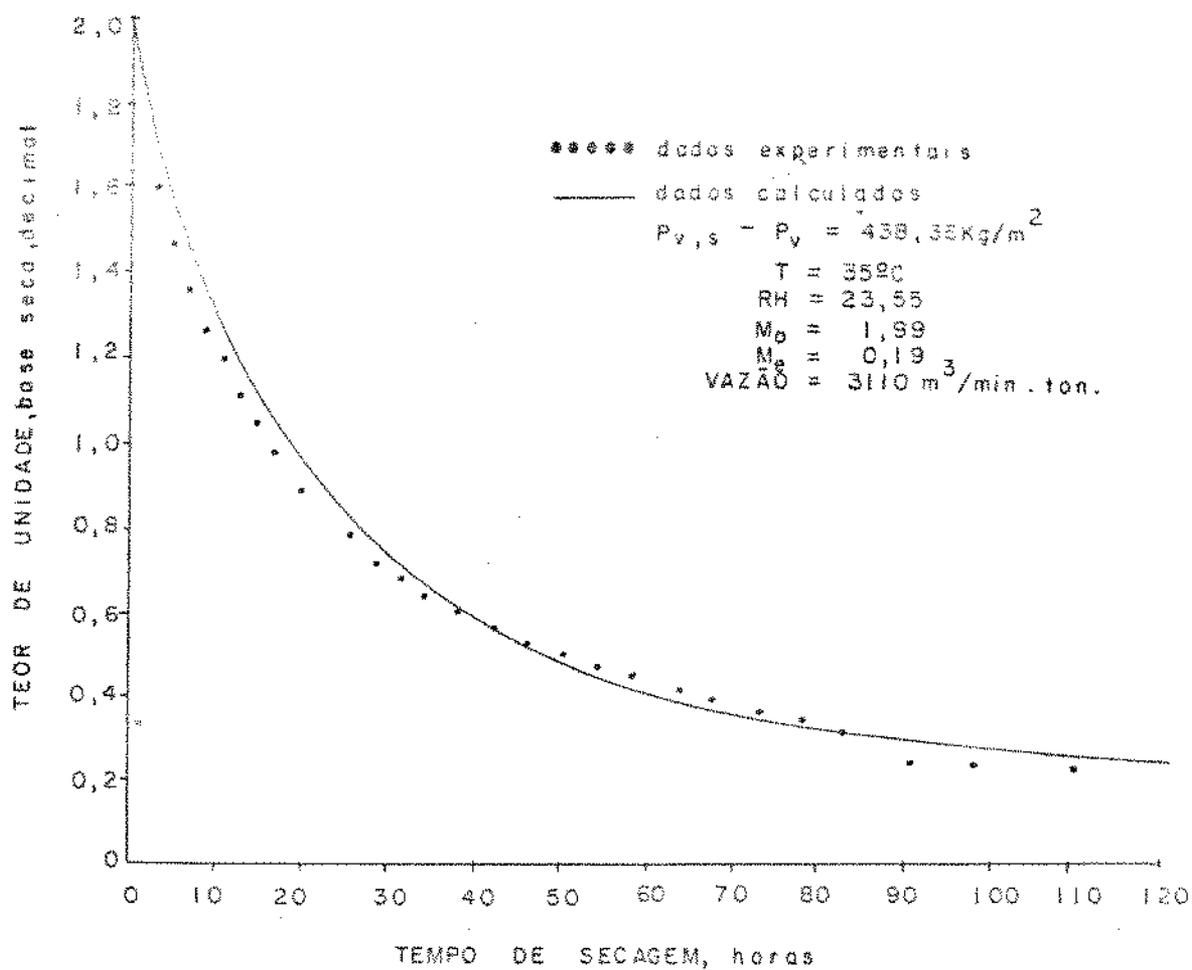


GRAFICO 4 — Comparação entre dados experimentais e calculados pela equação de camada delgada, na secagem em silo piloto com alta velocidade do ar.

minadas variações nas propriedades físicas dos grãos, tais como volume, densidade e área específica, em função do teor de umidade.

4.2.2. Propriedades Físicas

No desenvolvimento de um modelo matemático para simular a secagem de cereais (item 2.7.3.), BAKKER-ARKEMA e outros (01) se valeram da suposição de que o volume dos grãos no silo não varia durante a secagem, devido esta variação ser insignificante para cereais. Verificamos, entretanto, uma variação do volume, durante a secagem de café em silo-piloto com alta velocidade do ar, de 34.1%, conforme pode ser visto na TABELA 6 e GRÁFICO 5. O volume no silo diminui até o teor de umidade de 0.49 (base seca decimal), mantendo-se constante a partir deste valor.

No GRÁFICO 5 apresentamos a variação do volume no silo em função do teor de umidade, cuja relação linear é dada pela equação:

$$\frac{V - V_f}{V_f} = -0,149 + 0,338M \quad 2.0 > M > 0.49 \quad |18|$$

sendo:

V = volume aparente variável no silo, m³
V_f = volume final aparente no silo, m³
M = teor de umidade, base seca, decimal

Os coeficientes foram determinados por regressão linear (37) com os dados experimentais da TABELA 6.

Variando significativamente o volume do produto durante a secagem, a densidade aparente (ρ_p), definida como massa de matéria seca por volume no silo, também sofre variações. No GRÁFICO 6 apresentamos esta variação em função do teor de umidade. Os dados experimentais foram determinados dividindo a matéria seca (constante) pelo volume no silo (TABELA 6). A variação é dada pela função linear:

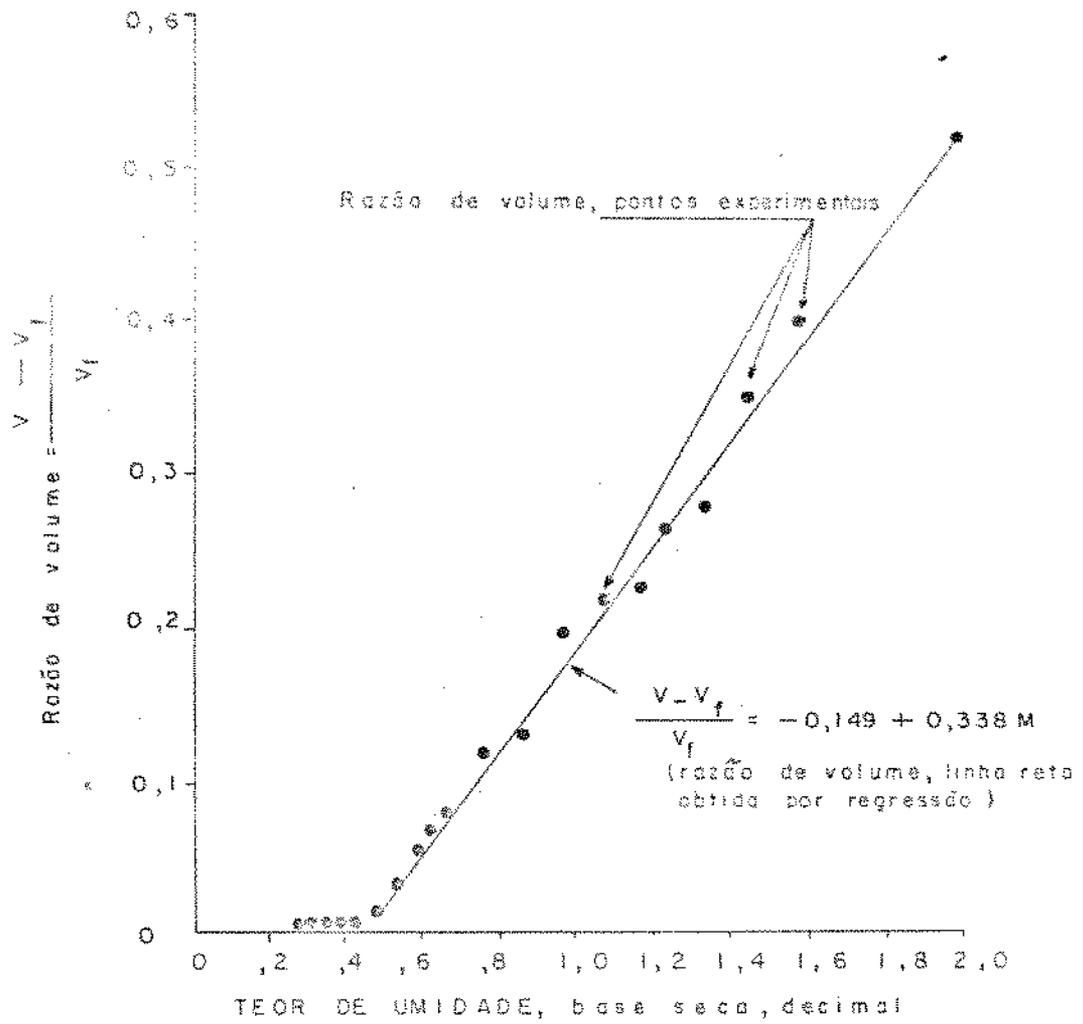
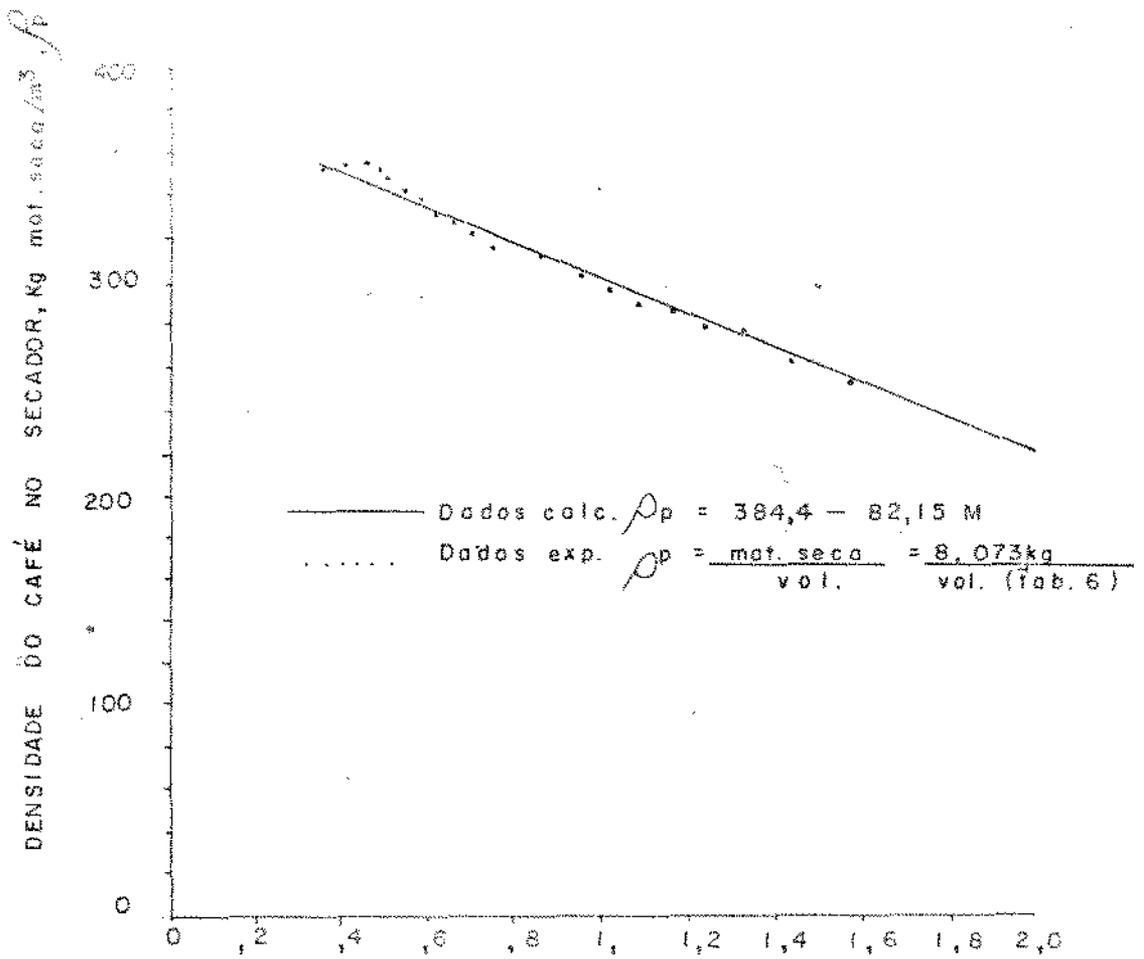


GRÁFICO 5 — Dados experimentais e calculados da variação do volume no silo piloto, com alta velocidade de ar.



TEOR DE UMIDADE, base seca, decimal

GRÁFICO 6 - Dados experimentais e calculados da variação de densidade no silo piloto, com alta velocidade do ar

$$\rho_p = 384,4 - 82,15M \quad 2,0 > M > 0,49 \quad |19|$$

cujos coeficientes foram calculados por regressão linear.

A área específica (m^2 de área dos grãos por volume aparente) também sofre variações devido a variação de volume do grão do café. A seguinte equação foi obtida empiricamente para calcular a área específica dos grãos de café em função do teor de umidade (base seca):

$$a = \frac{10^7 a(x^2 + y^2)^{0.25}}{0,43M + 1,088} \quad 2,0 > M > 0,49 \quad |20|$$

Onde:

$$x = 0.00621 (0,338M + 0,851)^{0.5}$$

$$y = 0.004685 (0,338M + 0,851)^{0.25}$$

Esta equação é válida somente para a faixa de variação de umidade correspondente às variações de volume do silo. Foi obtida utilizando-se os dados experimentais de variação do volume na experiência do silo-piloto (TABELA 6), a equação |18| e a seguinte fórmula do volume de um esferoide de revolução (14), forma geométrica aproximada para o grão de café em fruto:

$$S = \frac{4\pi}{\sqrt{2}} B\sqrt{(A^2 + B^2)} \quad |21|$$

Onde,

S = área do esferoide

A = semi-eixo maior

B = semi-eixo menor

A validade da equação da área específica foi determinada utilizando amostras do próprio experimento de secagem de café no silo com coletor solar. As áreas calculadas pela equação empírica foram comparadas com as áreas do esferoide de revolução com semi-eixos A e B medidos experimentalmente. Os erros nos cálculos das áreas para dois casos extremos de umidade (0.0 e 0.44) foram de 0.3 e 0.20 respectivamente. As seguintes

medidas obtidas em laboratório foram utilizadas nos cálculos:

- (a) Um volume aparente de 200 cm^3 dos grãos de café com 44% de umidade (base seca) foi ocupado por 176 unidades. Os semi-eixos médios foram de $A = 6,21 \times 10^{-3} \text{ m}$ e $B = 4,685 \times 10^{-3} \text{ m}$.
- (b) O mesmo número de grãos com 80% de umidade (base seca) e semi-eixos médios de $A = 7,15 \times 10^{-3} \text{ m}$ e $B = 5,73 \times 10^{-3} \text{ m}$ ocuparam um volume de $2,98 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Outra propriedade utilizada como constante para outros grãos e que a fizemos variar neste trabalho é o calor específico. Em vista do alto teor de umidade do grão de café foi utilizada a expressão (35):

$$C_p = 0.4 + 0.6 M_u \quad |22|$$

Onde,

C_p = calor específico do café

M_u = umidade em base úmida, decimal

A medida que o produto seca o calor específico se aproxima do valor 0.4, que é um valor médio aceitável para o grão seco de café (35).

4.2.3. Umidade de Equilíbrio

Conforme já referimos anteriormente (item 2.6.), a umidade de equilíbrio define o ponto final potencial da secagem em uma dada condição de temperatura e umidade do ar. A equação empírica de camada delgada [11], apresentada na secção 2:7.2., é função do teor de umidade de equilíbrio.

Na secagem em camada espessa (em silo) o ar se modifica constantemente em sua umidade e temperatura. Assim, na análise de uma camada espessa, necessita-se de uma equação que calcule o teor de umidade de equilíbrio para cada nova condição do ar de secagem. A equação empírica [1], vista anteriormente (item 2.6.), foi utilizada para o café, por representar bem os dados experimentais (TABELA 7).

$$M_e = (p_1 RH + p_2 RH^2 + p_3 RH^3) \text{ Exp } [(q_0 + q_1 RH + q_2 RH^2 + q_3 RH^3) (T + 273)]$$

TABELA 7. Dados experimentais de umidade de equilíbrio para grãos naturais de café (café em coco).

RH (Aproximada) %	UMIDADES DE EQUILÍBRIO, BASE SECA, PORCENTAGEM		
	10°C	30°C	55°C
11,2	36,56	23,69	4,57
25,0	37,46	25,90	4,51
34,0	38,92	24,94	7,63
51,0	42,50	20,69	8,10
62,0	48,51	33,57	13,23
75,7	51,08	44,18	18,39
94,8	152,24	68,63	34,19

A partir dos dados experimentais e regressão não linear, POWELL (), foram obtidos os coeficientes da equação, no computador PDP-10 da UNICAMP.

$$p_1 = 1527200$$

$$q_0 = -0,029458$$

$$p_2 = -3247800$$

$$q_1 = -0,0016309$$

$$p_3 = 3334100$$

$$q_2 = -0,013695$$

$$q_3 = 0,013205$$

O GRÁFICO 7 compara os dados experimentais com os calculados pela equação [1] e representados pelas curvas contínuas. Apesar de termos apresentado valores fixos de umidade relativa na TABELA 7, estes valores variam com a temperatura segundo a TABELA 1 (Ítem 3.3.3.). A correlação entre os dados experimentais e os cálculos é boa, e justifica-se a incorporação da equação [1] no modelo matemático, [14] a [16]. A diferença máxima entre o teor de umidade de equilíbrio experimental e calculado foi de 8%.

4.2.4. Secagem em Camada Delgada

No estudo sobre secagem em camada delgada (Ítem 2.7.2.) fizemos referências sobre o maior emprego de equações empíricas para predizer o comportamento dos grãos expostos às

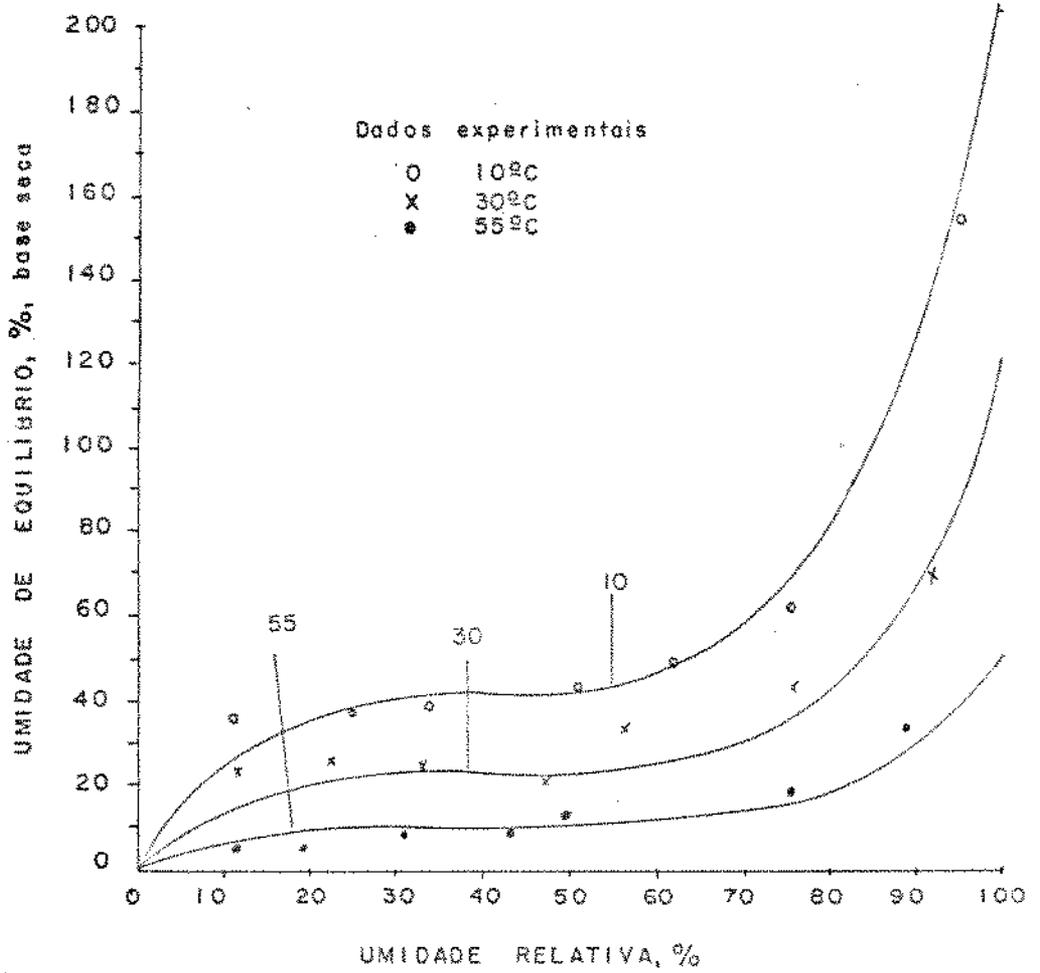


GRÁFICO 7 — Comparação entre dados de umidade de equilíbrio experimentais e calculados pela equação [1]

condições constantes de temperatura e umidade do ar. No presente trabalho o teor de umidade dos grãos foi calculado pela equação:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-m(p_{v,s} - p_v)^n t^q} \quad |12|$$

cuja origem e vantagens já comentamos anteriormente.

Os parâmetros m, n e q foram determinados por regressão linear. A equação foi linearizada com relação aos parâmetros m, n e q, como segue:

$$\ln MR = -m(p_{v,s} - p_v)^n t^q$$

$$\ln(-\ln MR) = p_1 + p_2 \ln(p_{v,s} - p_v) + p_3 \ln t$$

Onde,

$$p_1 = \ln m$$

$$p_2 = n$$

$$p_3 = q$$

Os dados das TABELAS 8 e 9, que correspondem a secagem de camadas delgadas a quatro temperaturas fixas, foram utilizados na análise por regressão linear.

TABELA 8. Dados empregados no cálculo da razão de umidade (MR) e teores de umidade de café cereja em secagem de camada delgada.

TEMPERATURAS °C	RH %	M _e (base seca) decimal	P _{v,s} - P _v (Kg/m ²)
32,0	35,0	0,20	312,33
45,0	16,0	0,13	826,60
60,0	8,0	0,053	1881,15
75,0	4,0	0,019	3767,28

TABELA 9. Dados experimentais de secagem de café em camada delgada.

32°C			45°C			60°C			75°C		
t	M.R	M									
0,0	1,00	2,32	0,0	1,00	2,14	0,0	1,00	1,82	0,0	1,00	2,11
0,5	0,96	2,24	0,5	0,94	2,03	0,5	0,92	1,68	0,5	0,88	1,87
1,0	0,94	2,19	1,0	0,90	1,95	1,0	0,87	1,59	1,0	0,82	1,73
1,5	0,91	2,14	1,5	0,87	1,89	1,5	0,82	1,50	1,5	0,77	1,64
2,0	0,89	2,10	2,0	0,84	1,82	2,0	0,77	1,42	2,0	0,71	1,51
2,5	0,88	2,07	2,5	0,80	1,75	2,5	0,73	1,35	2,5	0,68	1,44
3,5	0,84	1,98	3,0	0,77	1,69	3,0	0,69	1,27	3,0	0,63	1,33
4,5	0,81	1,93	3,5	0,75	1,63	3,5	0,65	1,20	3,5	0,57	1,22
5,5	0,78	1,86	4,0	0,73	1,59	4,0	0,61	1,13	4,0	0,52	1,10
6,5	0,76	1,81	4,5	0,70	1,54	4,5	0,58	1,08	4,5	0,46	0,99
7,5	0,73	1,75	5,5	0,65	1,44	5,0	0,55	1,02	5,0	0,43	0,91
8,5	0,71	1,70	6,5	0,61	1,36	5,5	0,53	0,99	5,5	0,39	0,83
9,5	0,69	1,66	7,5	0,58	1,29	6,0	0,50	0,93	6,0	0,36	0,77
11,5	0,64	1,56	9,5	0,52	1,18	6,5	0,47	0,89	6,5	0,32	0,68
14,5	0,59	1,45	11,5	0,46	1,06	7,0	0,45	0,85	7,0	0,29	0,62
17,5	0,54	1,34	13,5	0,40	0,94	7,5	0,44	0,83	7,5	0,26	0,56
20,5	0,49	1,24	15,5	0,37	0,88	8,0	0,42	0,80	8,0	0,23	0,51
23,5	0,44	1,13	17,5	0,34	0,82	8,5	0,40	0,76	8,5	0,22	0,48
26,5	0,39	1,04	19,5	0,32	0,77	9,0	0,37	0,71	9,0	0,20	0,44
29,5	0,36	0,96	21,5	0,29	0,71	9,5	0,35	0,68	10,0	0,18	0,40

Continua...

... Continuação da TABELA 9.

32°C			45°C			60°C			75°C		
t	M.R	M	t	M.R	M	t	M.R	M	t	M.R	M
32,5	0,32	0,89	23,5	0,27	0,68	10,0	0,33	0,64	11,0	0,16	0,35
35,5	0,30	0,84	26,5	0,23	0,60	10,5	0,32	0,63	12,0	0,14	0,31
39,5	0,28	0,79	29,5	0,21	0,56	11,0	0,31	0,61	13,0	0,12	0,28
43,5	0,26	0,75	32,5	0,18	0,50	13,0	0,21	0,52	14,0	0,11	0,26
47,5	0,24	0,71	35,5	0,16	0,46	15,0	0,23	0,46	15,0	0,11	0,25
51,5	0,22	0,67	38,5	0,15	0,43	17,0	0,20	0,40	16,0	0,10	0,24
55,5	0,20	0,63	41,5	0,13	0,39	19,0	0,17	0,35	17,0	0,10	0,23
60,5	0,19	0,60	45,5	0,12	0,37	21,0	0,14	0,30	19,0	0,09	0,22
65,5	0,17	0,57	49,5	0,10	0,34	23,0	0,13	0,28	21,0	0,09	0,21
70,5	0,16	0,55	53,5	0,09	0,31	25,0	0,11	0,25	23,0	0,09	0,21
75,5	0,15	0,52	57,5	0,07	0,28	27,0	0,09	0,22	25,0	0,08	0,18
80,5	0,14	0,49	61,5	0,06	0,26	29,0	0,08	0,20	27,0	0,08	0,18
85,5	0,13	0,47	65,5	0,05	0,24	31,0	0,08	0,19	-	-	-
91,5	0,12	0,45	70,5	0,05	0,23	33,0	0,07	0,18	-	-	-
97,5	0,10	0,42	74,5	0,04	0,21	35,0	0,07	0,17	-	-	-
103,5	0,09	0,40	80,0	0,03	0,20	41,0	0,06	0,16	-	-	-
109,5	0,08	0,38	85,0	0,03	0,19	48,0	0,05	0,15	-	-	-
115,5	0,07	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121,5	0,06	0,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
127,5	0,05	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A umidade relativa (RH) foi calculada no diagrama psicrométrico através dos valores de temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco medidos experimentalmente. A umidade de equilíbrio (M_e) foi calculada pela equação |1| vista no ítem anterior, em função da temperatura e umidade relativa. A pressão de vapor saturado ($p_{v,s}$) foi calculada por equação em função da temperatura. A pressão de vapor é o produto da pressão de vapor de saturação pela umidade relativa.

Os parâmetros da equação obtidos pela análise de regressão, estão apresentados na TABELA 10, juntamente com os parâmetros para milho e feijão (33).

No GRÁFICO 8 comparamos os dados experimentais (pontos) e calculados (linhas contínuas) para as diversas temperaturas. A correlação é boa, apresentando um erro médio de 0,026 e um erro máximo de 0,07 entre os dados calculados e experimentais da razão de umidade.

Os grãos naturais de café apresentam certas características de secagem que os distinguem de outros grãos de cereais e leguminosas. Em vista disso, apresentamos um breve estudo de comparação entre os grãos de café e grãos de feijão e milho (GRÁFICOS 9 e 10). Os parâmetros de equação para o feijão e milho foram tomados do trabalho de ROA e MACEDO (33), sendo que para o milho foram calculados pelos autores utilizando-se dos dados de THOMPSON et alii (38).

TABELA 10. Parâmetros da equação de secagem de camadas delgadas.

PARÂMETROS	CAFÉ EM FRUTO	MILHO	FEIJÃO
m	0,00537	0,0109	0,096870
n	0,4614	0,465	0,139227
q	0,7683	0,752	0,713140

A temperatura de 65°C e umidade relativa de 10,5%, o café atinge o teor de umidade de 13% (base úmida) em

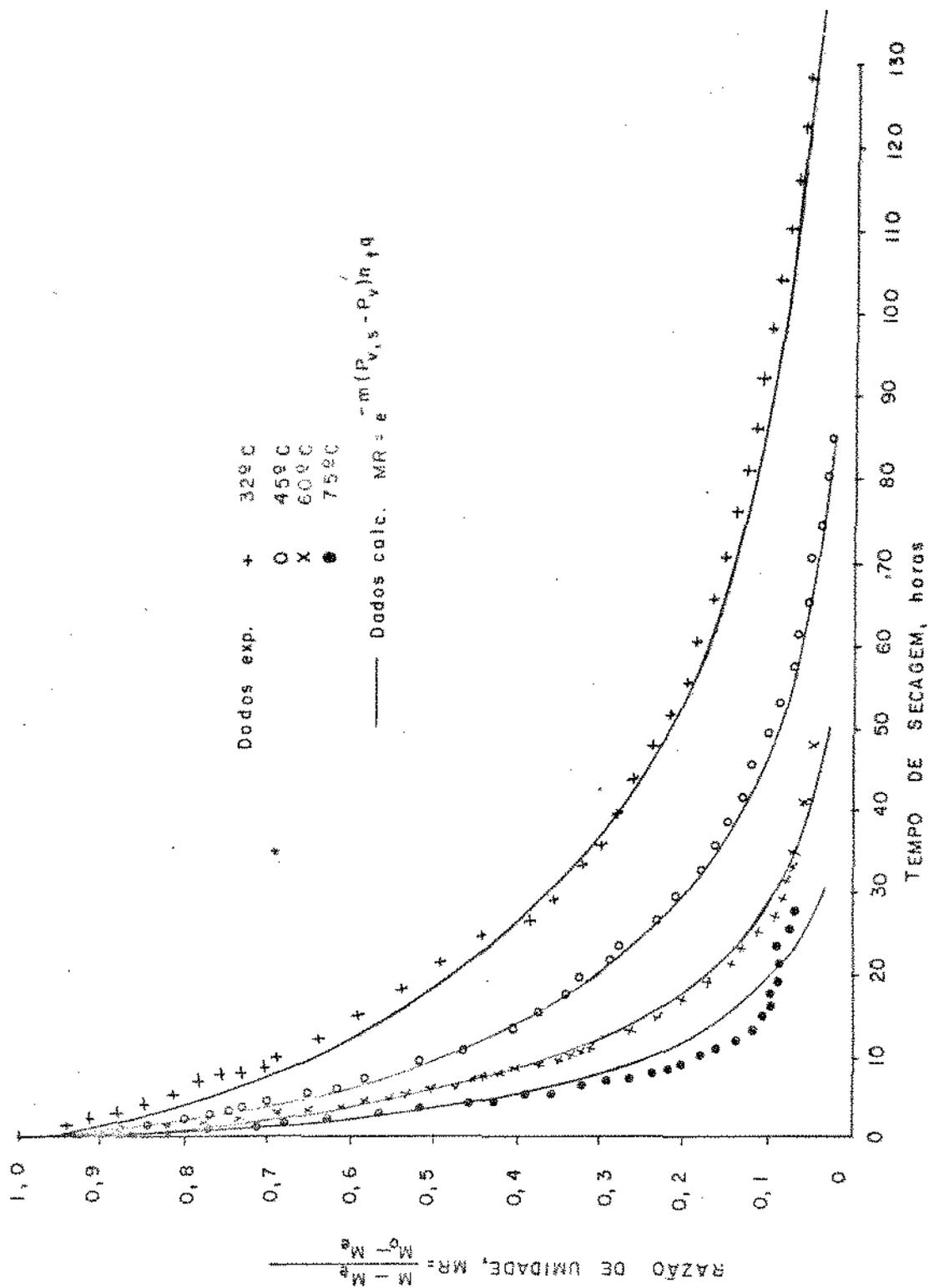


GRÁFICO 8 — Comparação entre dados experimentais e calculados de secagem de café cereja em camada delgada.

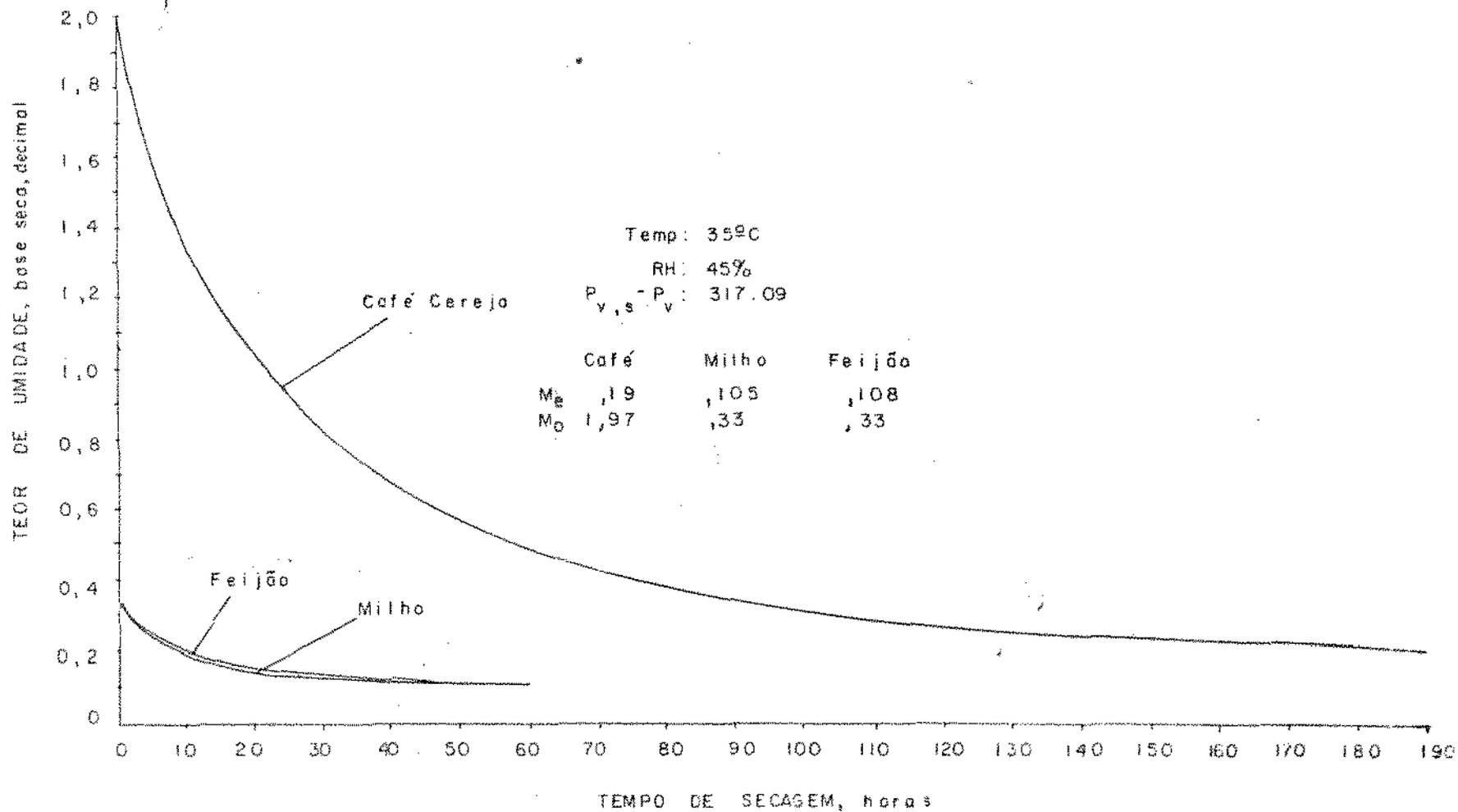


GRÁFICO 9

- Comparação entre curvas de secagem em camada delgada traçadas com dados calculados pela equação $MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = k^m (P_{v,s} - P_v)^n t^q$ para café, feijão e milho

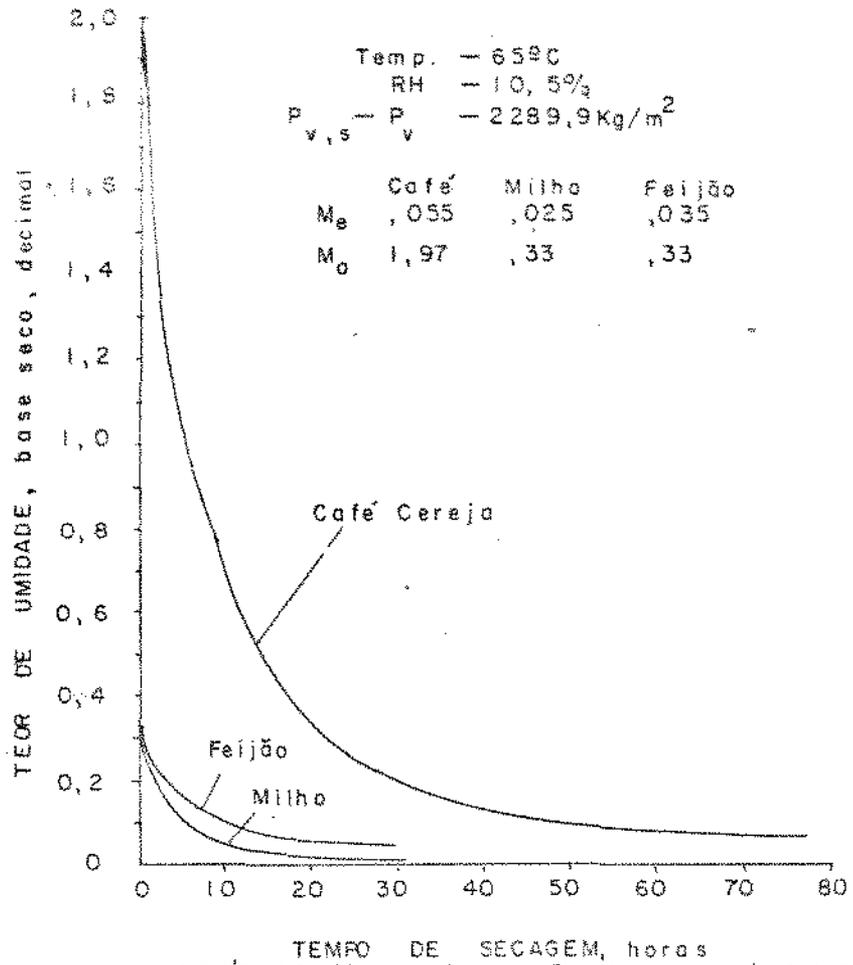


GRÁFICO 10 — Comparação entre curvas de secagem em camada delgada traçadas com dados calculados pela equação:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-m(P_{v,s} - P_v)^n t^q}$$

36 horas de secagem. O milho e o feijão levam 3 e 5 horas, respectivamente, para atingir esse mesmo teor. O tempo de secagem do café é portanto, 7 vezes maior que o de feijão e 12 vezes maior que o de milho. Algumas diferenças importantes são responsáveis por esta lentidão de secagem do café. O teor de umidade inicial dos grãos de café (60-70% - base úmida) é bem maior que os outros grãos (20-30%). A estrutura complexa que envolve a semente, no grão de café, se contrai durante a secagem transformando-se numa camada dura, deixando espaços vazios no interior, e portanto, aumentando a resistência interna. Os outros grãos além da estrutura simples, com apenas uma camada (casca) protegendo o endosperma e embrião, não se modificam significativamente, durante a secagem.

4.3. Secagem Natural de Café em Silo Estacionário com Coletor Solar

Os dados experimentais de umidade do café a 20 e 40 cm acima do fundo e na camada superior do silo (altura variável acima de 40 cm), estão apresentados na TABELA 11 e GRÁFICO 12. Foram gastos 7 dias e meio, ou seja 65 horas de secagem para reduzir a umidade média inicial de 44% (b.u.) para uma umidade média final de 13,9 (b.u.). Trezentos e treze quilos de café foram reduzidos para 204 Kg, e uma altura inicial da camada de 0,735 m foi reduzida para 0,419 m, correspondendo esta última a uma redução de 33% na altura. O aumento na temperatura com a utilização do coletor de 8 m² pode ser visto no GRÁFICO 11, onde nota-se aumentos de mais de 20°C acima da temperatura ambiental ao meio dia. Um fluxo de ar médio de 8,13 m³/min., contra uma pressão estática de 0,03 m de água, resultou em uma potência líquida útil de 39,5 W liberada pelo ventilador. As condições ambientais médias horárias durante a secagem dadas em temperatura (T), radiação solar (R) e umidade relativa (RH) estão apresentadas no APÊNDICE B₁. Os dados de temperatura (T), umidade absoluta (H) e vazão do ar (G_a) de entrada no silo, registrados de meia em meia hora, podem ser vistos no APÊNDICE B₂. A umidade absoluta foi determinada das relações psicrométricas com os

TABELA 11. Teores de umidade em base seca (Ms) e base úmida (Mu) da secagem em silo com coletor solar plano.

DIA E HORA	Camada Superior*		a 40 cm		a 20 cm		
	Ms	Mu	Ms	Mu	Ms	Mu	
31/7	9:30	0,820	44,90	0,860	45,20	0,710	41,70
	12:30	0,785	43,80	0,785	44,00	0,685	40,60
	15:30	0,855	45,60	0,615	38,00	0,555	35,20
	18:30	0,950	48,90	0,805	44,60	0,485	32,80
1/8	8:00	0,865	46,30	0,695	40,70	0,690	40,70
	11:00	0,700	41,20	0,655	39,50	0,580	36,70
	14:00	0,815	44,80	0,595	37,40	0,440	30,40
	17:00	0,550	35,50	0,475	32,30	0,400	28,50
2/8	8:00	0,525	34,20	0,520	34,10	0,435	30,10
	11:00	0,550	35,50	0,535	34,90	0,435	30,30
	14:00	0,470	32,00	0,420	29,40	0,305	23,30
	17:00	0,370	27,10	0,455	31,40	0,340	25,40
3/8	9:00	0,415	29,20	0,375	27,20	0,340	25,60
	11:00	0,530	34,70	0,375	27,30	0,265	20,80
	14:00	0,460	31,50	0,335	24,90	0,260	20,50
	17:00	0,360	26,50	0,345	25,50	0,235	19,30
4/8	8:00	0,390	27,90	0,330	24,80	0,250	20,00
	11:00	0,356	26,20	0,325	24,40	0,260	20,90
	14:00	0,310	23,60	0,260	20,60	0,190	16,10
	17:00	0,274	21,30	0,285	22,20	0,195	16,40
5/8	8:00	0,360	26,40	0,270	21,30	0,240	19,10
	11:00	0,246	19,70	0,255	20,40	0,190	16,10
	14:00	0,240	19,30	0,205	16,80	0,160	13,70
	17:00	0,226	18,40	0,255	20,10	0,165	14,30
6/8	8:00	0,210	17,30	0,200	16,70	0,160	13,80
	11:00	0,182	15,20	0,205	16,90	0,160	13,50
	14:00	0,210	17,50	0,225	18,50	0,165	14,00
	17:00	0,186	15,70	0,190	16,20	0,185	15,50
7/8	8:00	0,195	16,10	0,195	16,30	0,165	14,40
	11:00	0,182	15,50	0,160	13,90	0,140	12,40

* - Altura Variável

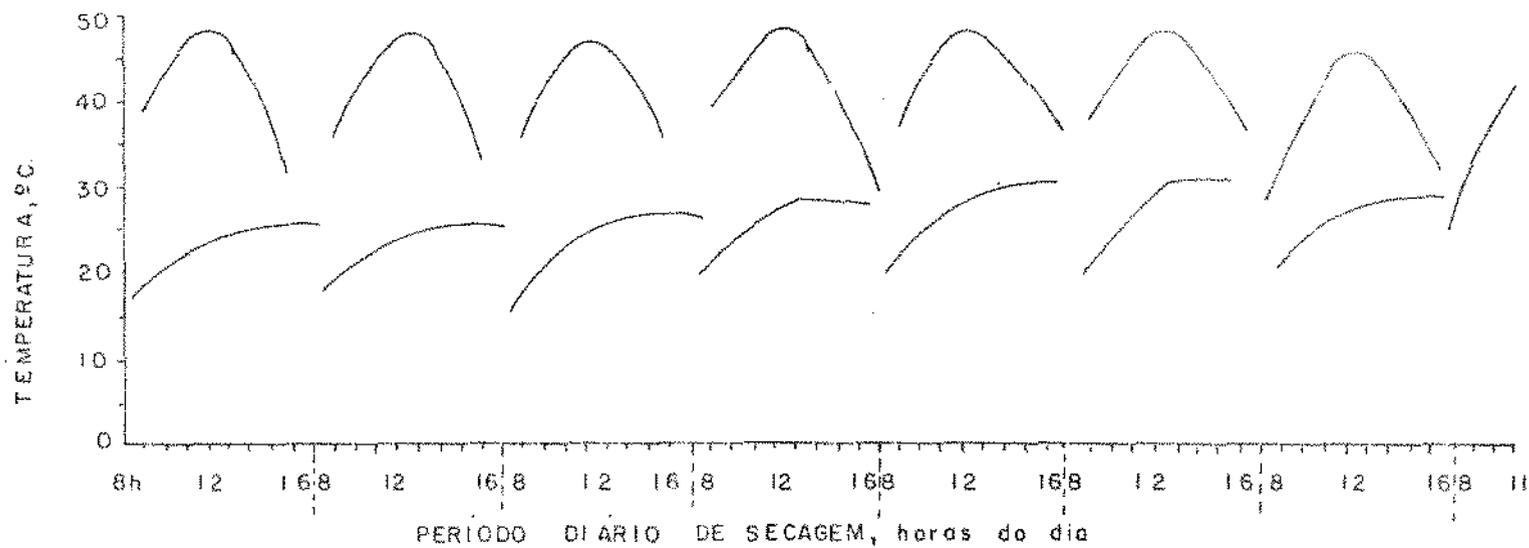


GRÁFICO II - Temperaturas ambientais e de saída dos coletores durante a secagem de café em silo com energia solar.

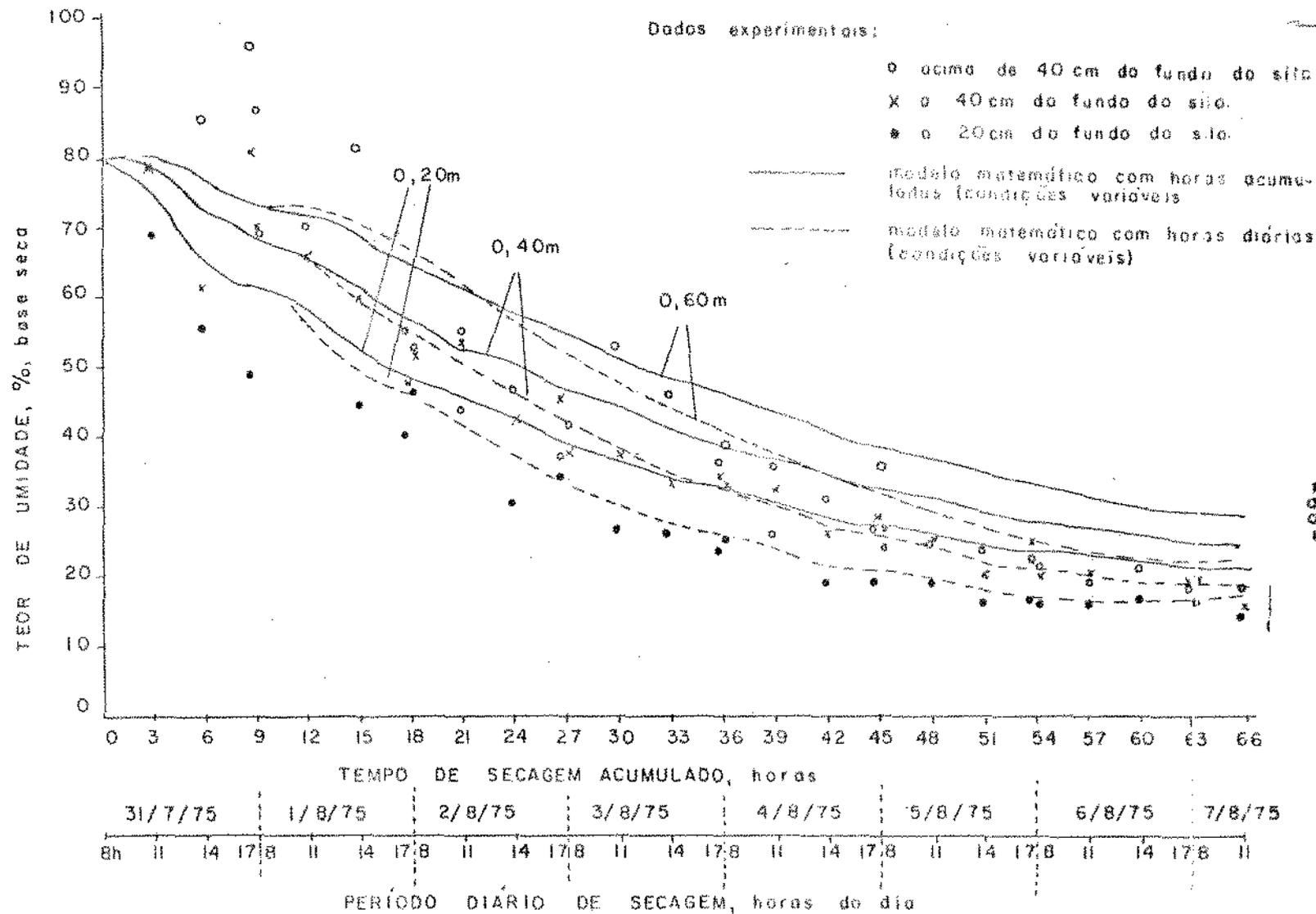


GRÁFICO 12 — Comparação entre dados experimentais e calculados com horas acumuladas e diárias.

dados de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido tomados na entrada do secador. A vazão foi calculada em função da velocidade do ar tomada na saída do silo, secção de saída do silo e volume específico do ar.

O café foi classificado como bebida "dura" pelo Laboratório de Análise Sensorial da Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP, e bebida "apenas mole", pelo Laboratório do IBC em São Paulo - SP., não tendo sido constatada a presença de sabores ou odores estranhos.

O modelo UNICAMP proposto por ROA & MACEDO (item 2.7.3.), foi utilizado para simular a secagem do café no silo, juntamente com as equações empíricas de camada delgada [12] e de umidade de equilíbrio [1] e equações de densidade aparente [19] e área específica [20].

O sistema de equações foi solucionado numericamente, em computador digital PDP-10 do centro de computação da UNICAMP. O programa utilizado (APÊNDICE B₄) efetua os cálculos com acréscimos no tempo e na altura da camada de $\Delta t = 0,10$ horas e $\Delta x = 0,02$ m, respectivamente. O teor de umidade para qualquer tempo e posição foi calculado mediante a simples expressão:

$$M_{x,t + dt} = M_{x,t} + \frac{\delta M_{x,t}}{\delta t} \Delta t \quad | 23 |$$

Para resolver numericamente o modelo de secagem as seguintes condições iniciais e de contorno dos grãos e do ar foram utilizadas:

$T(0,t)$ = temperatura de entrada do ar (função do tempo)

$\theta(x,0)$ = temperatura inicial do café (constante)

$H(0,t)$ = umidade de entrada do ar (função do tempo)

$\bar{M}(x,0)$ = umidade inicial do café (constante)

$G_a(0,t)$ = vazão de entrada do ar (função do tempo)

Os dados de temperatura, umidade e vazão do ar foram calculados por polinômios ajustados em função do tempo, utilizando-se os dados do APÊNDICE C₂. Foram utilizadas ainda formulações matemáticas para calcular a pressão de vapor de sa-

turação em função da temperatura de bulbo seco, a pressão de vapor de água em função da umidade absoluta e pressão atmosférica do ar, a umidade relativa em função da pressão de vapor de água e pressão de saturação de vapor de água, e o coeficiente de transferência de calor por convecção em função da vazão de ar seco.

Os teores de umidade a 20, 40 cm e na camada superior do silo podem ser vistos na TABELA 11. No GRÁFICO 12 comparamos os dados de umidades experimentais e calculados, com condições de contorno variáveis (polinômios). A camada superior, em vista da variação do volume de café no silo, não possui altura fixa. Os dados experimentais desta camada foram apresentados no gráfico apenas como ilustração, não podendo, portanto, ser comparados com os dados calculados a 60 cm. As curvas contínuas representam os dados calculados com horas acumuladas de secagem, isto é, o tempo (t) variando de 0 a 65 horas, e as curvas descontínuas foram calculadas com t variando de 0 a 9 horas para cada dia de secagem. Como se pode observar, as curvas calculadas intermitentemente, isto é, com tempos diários de secagem, representam melhor os dados experimentais. Este fato pode ser explicado pela uniformização da umidade dentro de cada grão durante a noite, quando o café era mantido em repouso à temperatura ambiental e sem ventilação. Desta forma, o grão fica com o mesmo teor médio de umidade, aumentando porém, a umidade superficial, e com isso as taxas de secagem se elevam no reinício da secagem após o período de repouso. Os dados calculados continuamente não poderiam representar, em vista disso, a secagem real. Isto vem comprovar os resultados obtidos por TOSELLO e outros (39) com secagem parcelada de café: o parcelamento com períodos de repouso diminui o tempo de secagem.

A correlação entre os dados experimentais e calculados (secagem intermitente) é, portanto, boa. O erro máximo, após 30 horas de secagem foi de 4%. Erros maiores no início podem ser devidos a heterogeneidade dos grãos de café quanto ao tamanho e teor de umidade inicial, não sendo possível retirar uma amostra média representativa da camada. Exemplo de dados de saída do computador está no APÊNDICE B₄.

Embora não se possa prever exatamente o desenvolvimento da secagem, isto é, com ótima precisão, estudos comparativos podem ser feitos. Com a utilização do modelo pode-se simular condições diferentes de secagem e estudar a influência de certos variáveis independentes na eficiência da secagem.

No GRÁFICO 13 comparamos os dados calculados pelo modelo em condições variáveis (polinômios) e médias diárias de temperatura, umidade e vazão do ar (TABELA 12). As linhas contínuas correspondem aos dados calculados com o modelo e com as condições reais (variáveis) do experimento. As linhas descontínuas correspondem ao modelo com condições de contorno médias diárias. Os resultados no gráfico indicam a possibilidade de usar valores médios das condições climatológicas para estudos de simulação, conforme foi demonstrado também por ROA & MACEDO (33) em secagem de feijão.

TABELA 12. Condições de contorno médias da secagem de café em silo com coletor solar.

DIA	NÚMERO DE HORAS DE SECAGEM	TEMPERATURA	UMIDADE ABSOLUTA g/Kg de ar seco	VAZÃO Kg/m ² hr
31/7	9	38,9	8,4	492,3
01/8	9	40,1	9,6	496,6
02/8	9	41,4	8,6	489,1
03/8	8	41,1	8,8	491,8
04/8	9	42,4	8,7	494,9
05/8	9	42,3	8,6	496,4
06/8	9	39,3	10,2	495,5
07/8	3	34,7	11,5	510,3

O modelo foi utilizado para mostrar a eficiência da utilização do coletor solar na secagem dos grãos. O GRÁFICO 14 mostra as curvas de simulação com as condições médias experimentais dadas pelo coletor (TABELA 12) e com as condições médias ambientais (APÊNDICE B₁). A queda de umidade dos grãos de ca

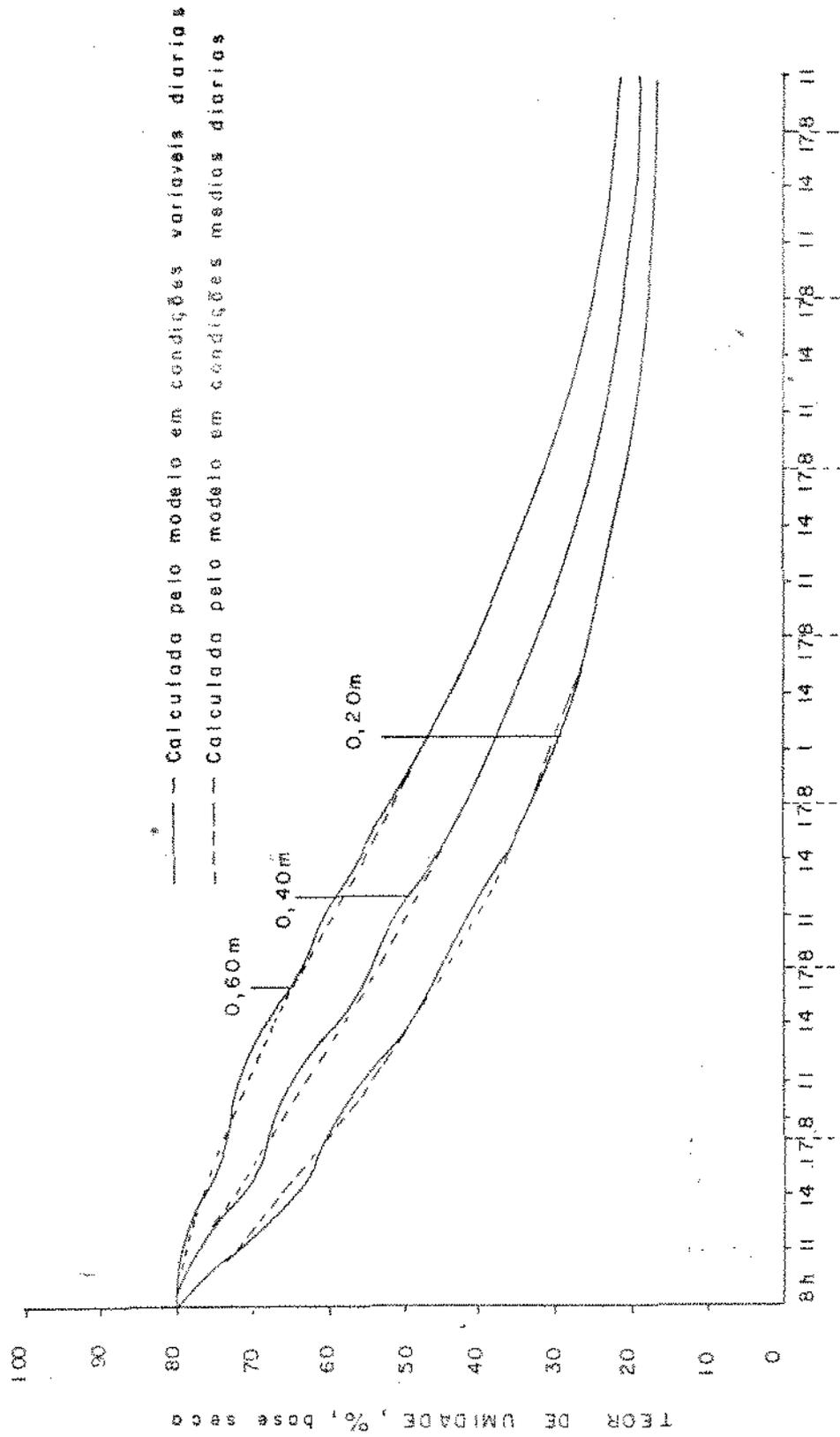


GRÁFICO 13 — Comparação dos dados calculados pelo modelo em condições variáveis e médias de temperatura, umidade e vazão do ar.

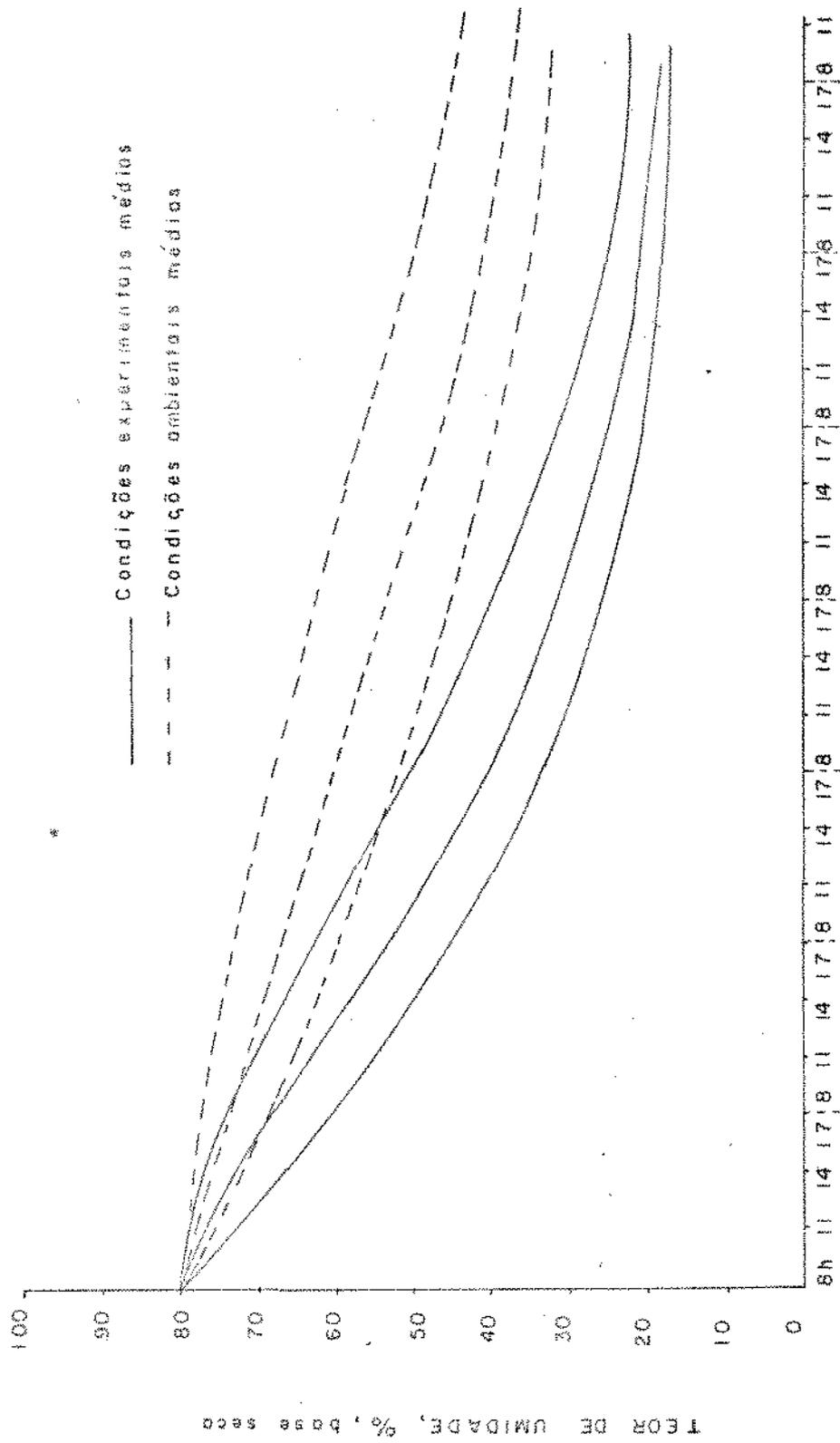


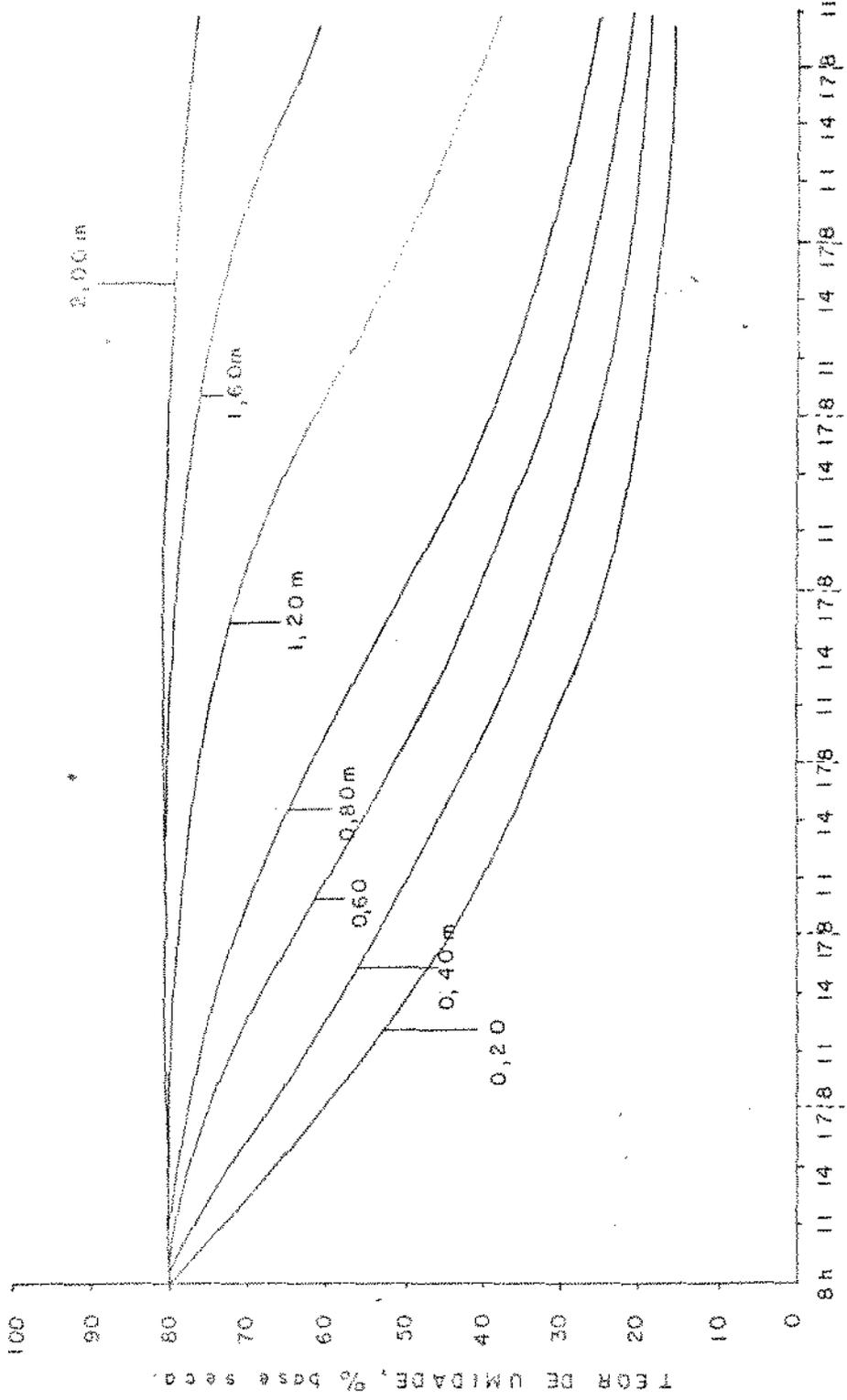
GRÁFICO 14 — Comparação entre os valores calculados com condições médias; experimentais e ambientais.

fê utilizando o coletor solar foi de 59% (80-21) a 60 cm, no final da secagem. A queda no mesmo período, com ventilação de ar natural, sem aquecimento, foi de apenas 36% (80-44). Os grãos situados a 20 cm atingem um teor final de 17% (base seca) após 65 horas de secagem com coletor solar, ao passo que na secagem com ar ambiental a umidade estaria, a esse tempo, em 33% (base seca).

O GRÁFICO 15 mostra a variação da umidade em diversas posições do silo durante a secagem de uma camada de 2,00 m de altura. Podemos observar que praticamente não há secagem na camada superior à 2,00 m, havendo uma queda na umidade inicial (80%) de somente 7% (73%). Os grãos a 1,60 m tiveram uma redução da umidade de apenas 19% (61%), o que corresponde somente à 29,7% da umidade total a ser extraída (80%-13%).

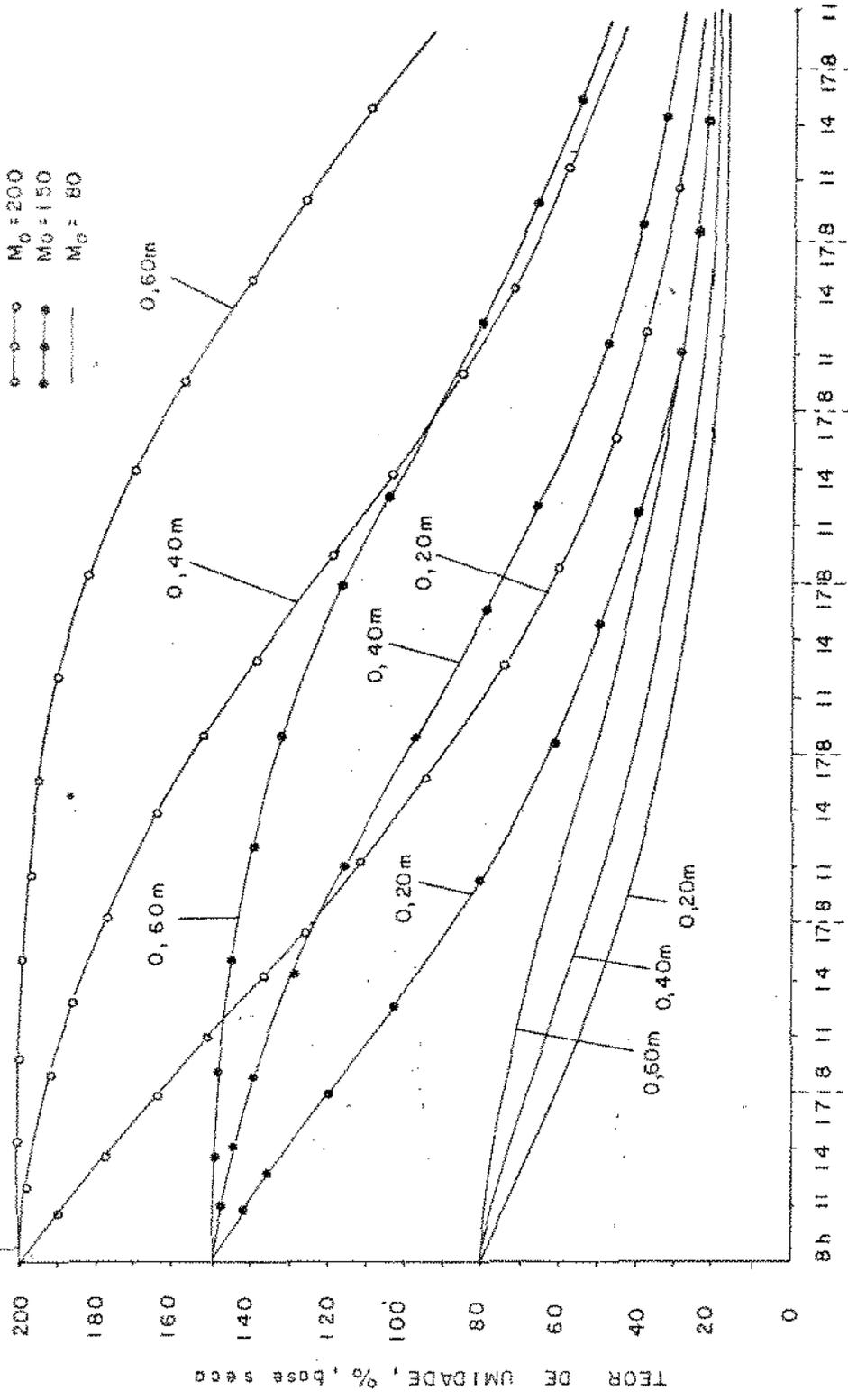
O café colhido é constituído de grãos maduros, verdes e semi-secos, com diferenças acentuadas no teor de umidade, conforme já fizemos referência. A quantidade de cada tipo de grão varia durante a colheita, variando portanto o teor de umidade inicial. No GRÁFICO 16 simulamos 2 teores de umidade inicial afim de que pudéssemos compará-los com o teor inicial do experimento. Esses teores são de 80 (experimentos), 150 e 200% em base seca (44, 60 e 66,6% em base úmida, respectivamente). Como poderia se prever, teores de umidade iniciais mais altos aumentam o gradiente de umidade no silo. Os grãos com teor de umidade inicial maior apresentam maior número de grãos com altos teores de umidade superficial e em consequência disso a velocidade de secagem no início, nas camadas inferiores, é maior. Isto se pode ver pela maior inclinação das curvas de 200% e 150% de umidade inicial a 20 cm, em relação à curva de 80% à mesma altura do silo. Esta diferença de velocidade de secagem se reduz bastante, ao final.

A influencia da temperatura na secagem de uma camada de 1,00 m de altura de café, para 3 secções do silo, pode ser vista no GRÁFICO 17. Foram somados e subtraídos 5°C nas temperaturas médias diárias de secagem. As diferenças no teor final de umidade são de 4 a 6% a mais ou menos, para uma mesma ca



PERIODO DIARIO DE SECAGEM, horas do dia

GRAFICO 15 - Variação da umidade em diversas alturas do silo durante a secagem de uma camada de 2,00m de espessura, em condições experimentais médias (coletor solar)



PERÍODO DIÁRIO DE SECAGEM, horas do dia
GRÁFICO 16 - Influência do teor de umidade inicial na perda de umidade
a) 0,20m, 0,40m, e 0,60m do piso, na secagem de uma camada de café
de 1,00m de altura, em condições médias experimentais (colletor solar)

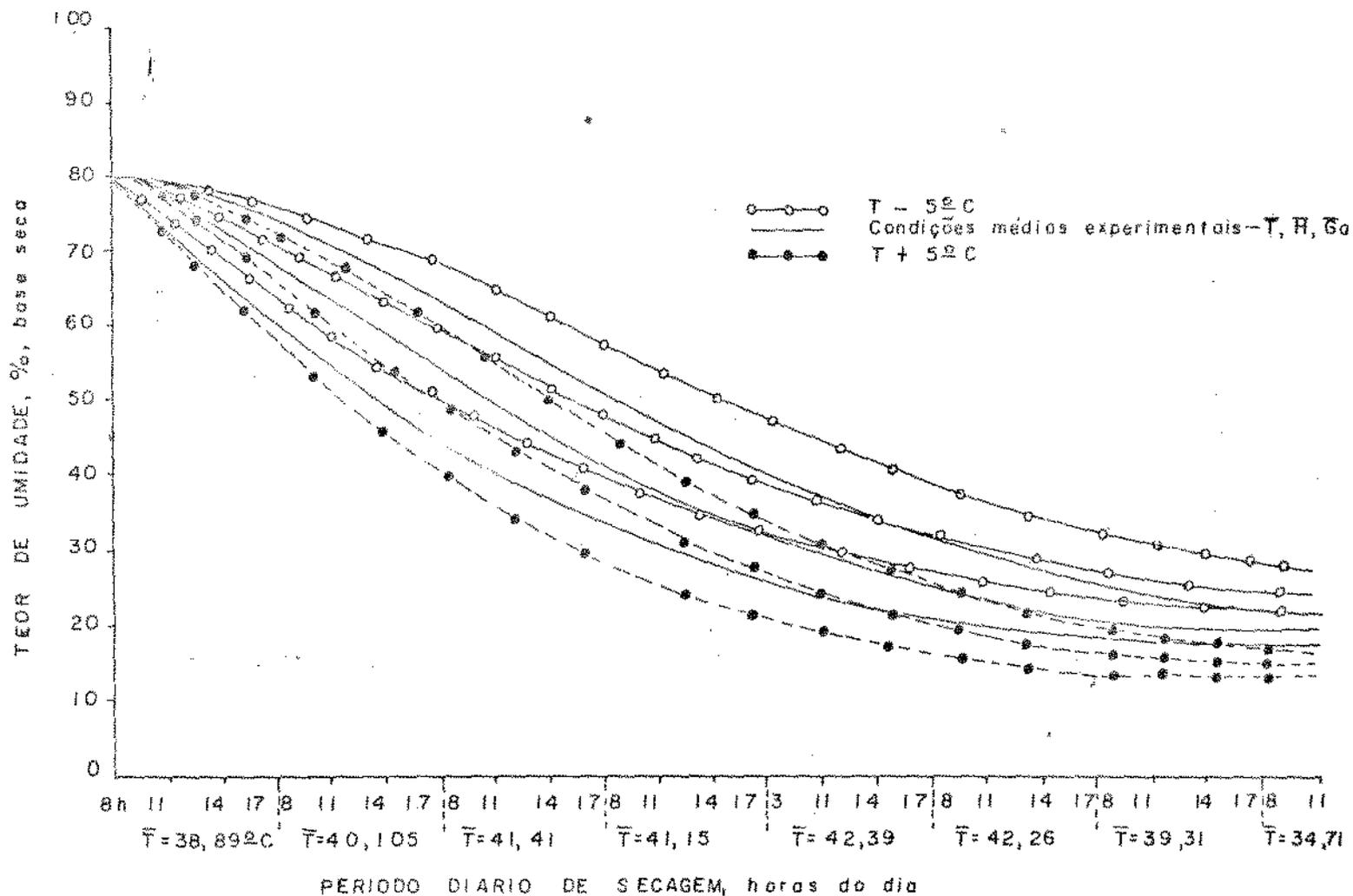
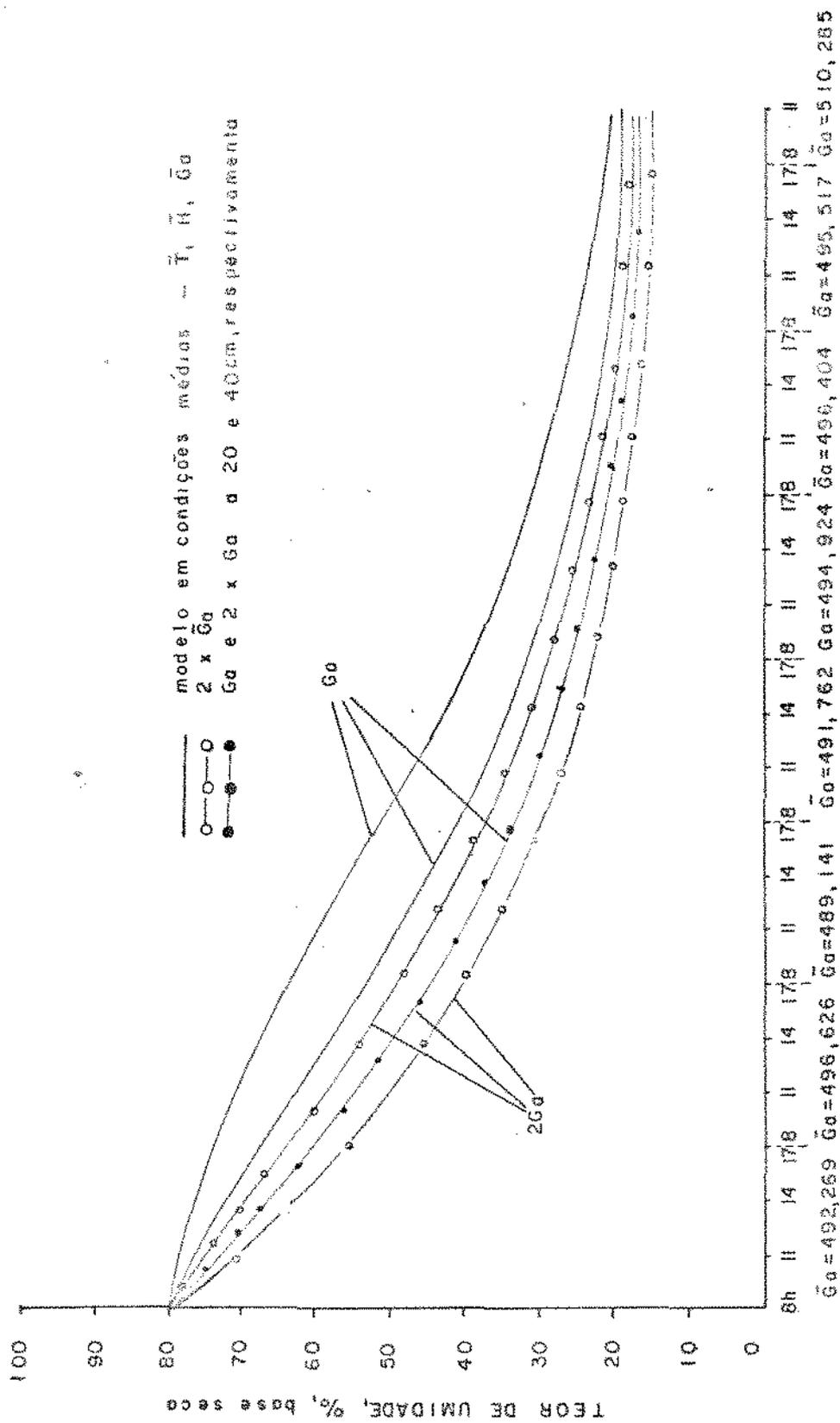


GRÁFICO 17 - Influencia da temperatura nos teores de umidade calculados pelo modelo em condições médias.

mada, conforme se soma ou se subtrai 5°C na temperatura de experimento. Somando-se 5°C à temperatura obtida com o coletor de 8 m² de área, consegue-se o teor de umidade dentro da faixa ideal (11-13%, base úmida) para que o café possa ser beneficiado.

No GRÁFICO 18 apresentamos a influência da vazão do ar na secagem. Foi feita uma simulação utilizando o dobro das vazões médias diárias. Nota-se uma sensível redução no gradiente de umidade com a aproximação das curvas. Ao final da secagem, porém, a diferença entre os teores de umidade, a 20 cm, com vazão normal e duplicada, foi de somente 1%. Maior diferença pode ser notada na camada a 60 cm, não chegando, entretanto, a 5%. A influência da maior vazão do ar se faz sentir mais no início da secagem, como se pode ver no gráfico, quando o produto ainda possui alto teor de umidade superficial.



PERÍODO DIÁRIO DE SECAGEM, horas do dia

GRÁFICO 18 — Influência do vazão do ar nos teores médios de umidade calculados pelo modelo em condições médias espermentais

5. CONCLUSÕES

As modificações no sistema tradicional de secagem natural em terreiro, testadas neste trabalho, não apresentaram vantagens com relação ao tempo de obtenção do produto seco final. Apenas nos primeiros dias de secagem, quando o produto ainda possui bastante umidade superficial, houve maior velocidade de saída de umidade nos grãos das peneiras inclinadas, verticais e horizontais a 30 cm, devido a maior circulação e turbulência do ar nestes sistemas. Após esta fase forma-se nos grãos uma estrutura externa rígida, com espaços de ar entre esta estrutura e a semente, e os mesmos necessitam aumentar sua energia interna para acelerar a difusão da água. O aquecimento é mais intenso nos grãos que absorvem maior radiação solar e perdem menos calor por convecção, isto é, quando esparramados ao solo, sem circulação do ar, no processo tradicional.

O tempo de secagem natural em terreiros, que varia entre 15 e 20 dias, pode ser substancialmente reduzido com a melhor utilização da radiação solar através de coletores solares e secagem em camadas espessas.

Equações empíricas reproduzem bem os dados experimentais de secagem em camada delgada e teores de umidade de equilíbrio, podendo ser utilizadas com boa aproximação na análise da secagem de café em silo.

Os grãos de café diferem muito de outros grãos de cereais e leguminosas quanto a estrutura, teor de umidade inicial e tamanho. Enquanto os outros grãos são bastante homogêneos no que se diz respeito a umidade e tamanho dos grãos, o café apresenta grãos de diversos tamanhos e teores de umidade diferentes (30 a 70%, base úmida). O tempo de secagem dos grãos naturais de café é 12 vezes maior que o de milho e 7 vezes mai

or que o de feijão, a temperatura de 65°C e umidade relativa de 10,5%.

O coletor solar plano de 8 m² permitiu aumentar a temperatura ambiental em 20°C, ao meio dia, quando a radiação solar é mais intensa, para uma vazão do ar de 8,13 m³/min.

Um modelo matemático desenvolvido na UNICAMP, baseado em equações fundamentais de transferência de calor e massa, e em equações empíricas de secagem de camadas delgadas e de equilíbrio de umidade, foi utilizado para analisar os dados experimentais de secagem de café no silo com ar aquecido pelo coletor solar. As taxas de secagem da equação de camada delgada são expressas como função de déficit de saturação de vapor de água que é uma função potencial de secagem. O modelo pode ser utilizado para simular condições diferentes de secagem.

O volume de café no silo diminuiu em 34%, durante a secagem, até um valor limite de 49% (base seca), quando não há mais contrações no grão. O volume varia linearmente com teor de umidade. Em vista desta variação, propriedades físicas importantes na análise, como a densidade e área específica, também variam. A variação da área específica foi dada por uma equação empírica. Demonstrou-se que a densidade também varia linearmente com o teor de umidade.

Para calcular a perda de umidade, na equação de camada delgada [11], a utilização de horas diárias de secagem, com tempo (t) variando de 0 a 9 para cada dia (cálculo intermitente) forneceram dados que se aproximam mais dos dados experimentais do que horas acumuladas (cálculos contínuos durante todos os dias de secagem). Este fato revela a importância de períodos de descanso na secagem de café (secagem parcelada).

Os dados calculados pelo modelo com condições médias de entrada não diferiram daqueles calculados com condições variáveis (polinômios). Os valores médios puderam, assim, ser utilizados para estudos de simulação.

O aumento da energia do ar, pela utilização do coletor, acelerou em 1,6 vezes a secagem dos grãos de café si -

tuados à 0,60 m do fundo, em relação a secagem com as condições ambientais.

Quanto maior o teor de umidade inicial dos grãos de café, maiores gradientes de umidade se formam no silo. Produtos com teor de umidade inicial de 60% (base úmida) apresentam gradientes de umidade no silo, durante a secagem, 5 vezes maiores do que aqueles com 44% (base úmida), entre 18 e 35 horas de secagem.

Outra simulação mostrou que se aumentarmos ou diminuirmos as temperaturas médias diárias do experimento em 5°C, teremos os teores de umidades finais diminuídos ou aumentados entre 4 e 6%. Após 65 horas de secagem o aumento de temperatura reduz o gradiente final de umidade no silo.

A vazão é outra variável que pode ser utilizada para reduzir o gradiente de umidade. Uma simulação com a vazão experimental duplicada mostrou uma redução à metade no gradiente resultante da secagem com as vazões médias diárias do experimento. Quanto à velocidade de secagem, a influência da vazão do ar se faz sentir somente quando o produto ainda possui teores altos de umidade (acima de 40%, base úmida).

O modelo proposto pode ser utilizado para otimizar sistemas de secagem de café. Através de simulações pode-se encontrar condições ótimas de secagem com respeito à eficiência, custo da operação e qualidade do produto.

6. RESUMO

Apesar da produção brasileira de café ter sofrido um revés nos últimos anos, o Brasil ainda é o maior produtor e exportador de café. O café brasileiro, entretanto, tem perdido em qualidade para outros países da América Latina. O produto colhido pode ser processado integralmente, ou despulpado deixando a semente envolta apenas no pergaminho. Esta última prática permite utilizar somente o grão maduro e promover uma secagem mais uniforme, resultando um produto de melhor qualidade. No Brasil, devido às grandes extensões de cultura, falta de mão de obra e problemas técnico-econômicos não se realiza o despulpamento.

O café colhido na forma de grãos naturais (frutos do cafeeiro), é secado em terreiros de cimento, tijolo ou chão batido; ou então realiza-se uma meia seca em terreiro e termina a secagem em secadores com aquecimento artificial e movimentação dos grãos. O primeiro sistema é muito rústico e o segundo bem sofisticado.

Nos objetivos deste trabalho, foram incluídos testes de sistema de secagem de grãos naturais de café, com aproveitamento da energia solar, para diminuir o tempo, o espaço e a mão de obra que se gasta em terreiros, evitar os danos na qualidade e reduzir custos operacionais altos que ocorrem com secadores artificiais.

Foram desenvolvidos experimentos de secagem natural em terreiros com o objetivo de estudar a influencia de variáveis ambientais na secagem. Para isto, mudou-se a posição dos grãos em relação a superfície do terreiro colocando o produto em peneiras horizontais a 30 cm do solo, verticais, inclinadas e rentes ao solo (sistema tradicional). No início da seca -

gem, os sistemas não tradicionais mostraram maior eficiência devido a maiores turbulências do ar em contato com um produto com alto teor de umidade superficial. A turbulência ocasiona maiores velocidades de transferência de calor e massa nestes sistemas. Ao final da secagem, porém, o método tradicional, com maior absorção da energia radiante e menos esfriamento, foi mais eficiente por aumentar a energia interna do grão, necessária para vencer uma maior resistência interna à difusão de umidade. Em vista de não haver uma melhoria na eficiência da secagem com as modificações introduzidas, uma análise mais profunda não foi efetuada.

Outro experimento foi realizado, procurando melhorar o aproveitamento da energia solar na secagem de café. A secagem natural em terreiros que normalmente dura de 15 a 20 dias, foi reduzida para 7 dias e meio em um silo estacionário. Foram secos 313 Kg de café (peso inicial) com teor médio inicial de umidade de 44% (base úmida), altura inicial da camada de 0,735 m. Um coletor solar plano de 8 m² de área, foi ligado ao silo afim de aumentar a energia do ar ambiental para a secagem. Conseguiu-se acréscimos na temperatura do ar em torno de 20°C, para uma vazão ao redor de 26 m³/min.ton., às 12:00 horas (meio dia). Um modelo matemático, desenvolvido na UNICAMP, composto de 3 equações teóricas diferenciais e uma equação empírica de secagem em camada delgada, foi utilizado na análise dos resultados experimentais e posteriores simulações. Propriedades do produto, indispensáveis na análise, tiveram que ser determinadas em laboratório. Um experimento de secagem em silo-piloto nos forneceu dados para estudar a variação do volume do café durante a secagem, e como consequência a variação da área específica e densidade dos grãos. Demonstrou-se que o volume e a densidade variam linearmente com o teor de umidade. A variação da área específica foi calculada por uma equação empírica em função do teor de umidade. Foram determinados, experimentalmente, teores de umidades de equilíbrio dos grãos a temperaturas de 10, 30 e 55°C e umidades relativas próximas de 11,0; 25,0; 35,0; 51,0; 62,0; 75,0 e 95,0%. Uma equação empírica de umidade de equilíbrio foi utilizada na análise da secagem no silo. Seus parâme -

tros foram determinados por meio de regressão linear e os dados experimentais. Uma equação, também empírica, de secagem em camada delgada, foi utilizada na análise. Experimentos de secagem em camada delgada a 75, 60, 45 e 32°C, forneceram os dados para calcular os parâmetros da equação por regressão linear.

Os dados calculados pelo modelo apresentaram boa aproximação em relação aos dados experimentais. O modelo foi utilizado para confirmar a proposição de que a secagem parcelada (com horas de descanso) diminui o tempo que o café permanece no secador. Outras simulações permitiram verificar o ganho de energia com a utilização do coletor solar e a possibilidade de utilizar as variáveis de contorno para diminuir o gradiente de umidade no silo. Foi demonstrada, enfim, a viabilidade do modelo para estudos de sistemas de secagem de café. Condições ótimas de secagem com energia solar podem ser simuladas para aumentar a eficiência do secador, diminuir o custo e produzir um produto de boa qualidade.

7. SUMMARY

Though coffee production in Brazil has suffered a setback in recent years, Brazil remains the foremost coffee producer and exporter. Brazilian coffee, however, has declined in quality compared with that of other producers in Latin America. The harvested product can be processed either whole (raw beans) or without the pulp, leaving the seed encased in its parchment (pulped beans). As the latter process requires use of only the ripe beans (cherries) for uniform drying, the final product is of better quality. Due to expanding cultivation, lack of manpower, and problems both technical and economic, the hulling of coffee in Brazil is not widespread.

The harvested coffee in the form of raw beans (fruit of the coffee plant) is either completely dried on concrete, brick or earthen floors, or is partially dried in this manner and the process completed in driers by means of artificial heating and tumbling of the beans. The first process is very primitive while the second is much more sophisticated.

The objectives of this investigation were to test a process of drying raw coffee beans by means of solar energy, in order to reduce the time, space and manual labor involved in floor drying and to avoid the damage and high operational costs incurred with artificial dryers.

Tests of natural drying on floors were developed in order to study the influence of environmental variables involved in the drying process. For this reason the beans were placed in four positions: (1) in horizontal sieves 30 cm above the ground; (2) in vertical sieves having the lower edge 10 cm above the ground; (3) in sieves inclined at an angle of about 45° with the lower edge on the ground; and (4) in horizon

sieves on the ground, insulated by a sheet of waterproof plastic (traditional position). At the outset of the drying period, the non-traditional process proved to be more effective due to a more vigorous air turbulence and contact with the product; it was possible to have a higher rate of heat and mass transfer in these systems. Towards the end, however, the traditional method, having greater absorption of radiant energy and less cooling, proved to be more efficient in increasing the internal energy of the bean, a condition necessary to overcome internal resistance to moisture diffusion.

In view of the fact that there was no improvement in the efficiency of the drying process with the foregoing modifications, a more detailed analysis was not undertaken.

Another experiment attempting to improve the use of solar energy during the coffee drying process was effectuated. A natural floor-drying process which normally lasts 15-20 days was reduced to 7 1/2 days in a stationary silo. Three hundred and thirteen kilograms of coffee were dried in a layer with an initial height 0,735 meters. A flat solar collector with an area of 8 square meters was connected to the silo in order to increase the energy of the air inside for the drying process.

Temperature increases of about 20°C were obtained with the help of an air flow of about 26 m³/min.ton., at 12:00 noon. A mathematical model, developed at the Universidade de Campinas, São Paulo state, and composed of three theoretical differential equations and one empirical thinlayer drying equation was used to analyse the experimental results and to make posterior simulations. Properties of the product which were indispensable to the analysis, had to be determined in the laboratory. An experiment whereby the drying process took place in "pilot-silos" furnished data with which the variation in the volume of coffee during the drying process could be studied and, consequently, the variation of the specific area and density of the beans. It was shown that both the volume and the density vary linearly with the moisture content. Equilibrium moisture content

data were determined experimentally for the beans at temperatures of 10°C, 30°C, 55°C, and relative humidities of approximately 11%, 25%, 35%, 51%, 62%, 75% and 95%. An empirical equation for equilibrium moisture content was used in analyzing the drying process within the silo, the parameters of which were determined by means of non-linear regression and experimental data. A second empirical equation for drying in thin layers was used in the analysis. Experiments with drying in thin layers at 75°C, 60°C, 45°C, 32°C furnished data with which it was possible to calculate the parameters of the equation by linear regression.

The values calculated by means the model revealed a good approximation to the experimental data. The model was used to confirm the hypothesis that the divided drying process' (with intervals of rest) reduced the time that the coffee remained in the dryer. Other simulations enabled the gain in energy due to the use to be verified. The possibility of using contour variables to reduce the gradient of humidity in the silo was also determined. Finally, the experiment demonstrated' the viability of the model in studying systems of coffee drying under optimal drying conditions with solar energy can be simulated in order to increase the efficiency of the dryer, to reduce the cost and to produce a high-quality product.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. BAKKER-ARKEMA, F.W. et alii. Grain drier simulation. MSU, East Lansing, Agricultural Experiment Station, 1974. (Technical Bulletin 224). 79 p.
02. _____ & RUGUMAYO, E.W. Tropical grain storage with aeration using solar energy. In: ANNUAL OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE). Califórnia, Davies, 22-25 de junho de 1975. (Paper nº 75-6041).
03. BARBOSA, L.F.; TEIXEIRA, A.A. & CASTILHO, A. Um novo desmucilinizador do café despulpado. São Paulo. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, DPV, 1962. 42 p.
04. BARRE, H.J. Vapor pressures in studying moisture transfer problems. Agricultural Engineering, St Joseph, Mich., 19: 247-9, jun. 1938.
05. _____; BAUCHMAN, G.R. & HANDY, M.Y. Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed grain drying. Transaction of the ASAE, St Joseph, Michigan, 14 (6): 1061-64, 1971.
06. BOYCE, D.S. Grain moisture and temperature changes with position and time during thorough drying. Journal of Agricultural Engineering Research, Newcastle, 10 (4): 333, 1965.
07. _____. Heat and moisture transfer in ventiled grains. Journal of Agricultural Engineering Research, Newcastle, 11 (4): 255, 1966.

08. BROOKER, D.B.; BARKER-ARKEHA, F.W. & ROTH, M.G. Solar energy and grain drying: a method of analysis. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL, 7ª. Budapest, Hungria, outubro de 1975.
09. _____; _____ & HALL, C.W. Theory and simulation of cereal grain drying. In: Drying cereal grains. Westport Connecticut, A.V.I. 1974. Cap. 8, p. 185-221.
10. CAFÉ o ano de geada. Conjuntura Econômica, Rio de Janeiro, 30 (2): 88-90, fevereiro de 1976.
11. CAFÉ firme em março. Conjuntura Econômica, Rio de Janeiro, 30 (4): 6-7, abril de 1976.
12. CAFÉ a cafeicultura e a industrialização. Mundo Agrícola, São Paulo, 1 (1): 47-57, 2º semestre de 1975.
13. CARVALHO, A. Secagem de café em terreiro. Boletim da Superintendência dos Serviços do Café, São Paulo, 31 (353): 34-5; 1956.
14. CASILLAS, A.L. MÁQUINAS - formulário técnico. São Paulo, Editora Mestre Jou, 1961, 634 p.
15. FENTON, F.C. Storage of grain sorghums. Agricultural Engineering, St Joseph, Mich. 22: 185-8, 1941.
16. FOOTE, H.E. A study of the drying of coffee on the terreiro. IBEC Research Institute, New York, (30): 1-14, 1954.
17. GIBSON, A. Aspectos fotoquímicos da secagem de cafés arábicas da África Oriental. In: COLLOQUE INTERNACIONAL SUR LA CHIMIE des CAFES, 5º. Paris, (Lisbonne, 14-19 Jun. 1971), ASIC, 1972. s.p.

18. GOLDEMBERG, J. A Crise de Energia. *Ciência e Cultura*, São Paulo, 27 (7): 711-9, 1975.
19. GOMES, J.R. et alii. Estudo sobre a seca do café em tulha de ventilação natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 3º. Curitiba, Paraná, EMBRAPA, 18-21 nov. 1975. p. 235-238.
20. HALL, C.V. Moisture equilibrium. In: *Drying farm crops*. Westport, Conn., AVI, 1957. Cap. 2, p. 17-47.
21. ———. Theory of drying. In: *Drying farm crops*. Westport, Conn., AVI, 1957. Cap. 9, p. 245-277.
22. HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, St Joseph, Mich., 33: 29-31, 1952.
23. HUKILL, W.U. Basic principles in drying corn and grain sorghum. *Agricultural Engineering*, St Joseph, Mich., 28 (8): 335-8, 1947.
24. HUSAIN, A.; CHEN, C.S. & CLAYTON, J.T. Coupled heat for moisture diffusion in porous food products (an application to rough rice drying). In: ANNUAL MEETING AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 22-5 jun. 1975, Califórnia, Univ. of Califórnia. p. 1-13. (Paper nº 75-4061).
25. KINCH, D.M. Design criteria for mechanical drying of coffee beans. *Transactions of the ASAE*, St Joseph, Mich., 10: 40-2, 1967.
26. MONACO, L.C. Progressos na secagem de café. *Boletim da Superintendência dos Serviços do Café*, São Paulo, 33(380): 40-1, 1953.

27. PABIS, S. & HANDERSON, S.M. Grain drying theory. II. A critical analyses of the drying curve for shelled corn. Journal of Agricultural Engineering Research, Newcastle, 6:272-277, 1961.
28. PHILLIPS, A.L. A solar-energy method for reducing coffee drying costs. Journal of Agriculture of University of Puerto Rico, Rio Pedras - P.R., 47(4):226-235, 1963.
29. POWELL, H.S.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. Computer Journal, London, 7(2):15, - 1964.
30. PUZZI, D. Determinação da umidade dos grãos. In. — Conservação dos grãos armazenados. São Paulo, Editora Agronômica Ceres Ltda., 1973. Cap. 3., p. 45-54.
31. ROA, G.M. Natural drying of cassava. Michigan, Michigan - State University, 1974. 234 p. (Tese de Doutorado).
32. ——— et alii. Drying of Cassava. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Stillwater, Oklahoma State University, junho 23-26 de 1974. p. 1-15 (Paper nº 74-3037).
33. ——— & MACEDO, I.C. Drying of "Carioca" beans with solar energy in a stationary bin. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Lincoln, Nebraska, junho de 1976. p. 1-9. (Paper nº 76-3021).
34. SPENCER, H.B. A revised model of the wheat drying process. Journal of Agricultural Engineering Research, New-Castle 17:189-94, 1972.
35. SIVETZ, M. & FOOTE, H.E. Green coffee processing. In: ——— Coffee processing technology. Westport, Connecticut, AVI, 1963. Cap. 3, p. 48-99.

36. ——— & ———, Mechanical coffee driers. In ——— Coffee processing technology. Westport, Connecticut, AVI, 1963. Cap. 6. p. 129-54.
37. SPIEGEL, R.M. Ajustamento de curvas e o método dos mínimos quadrados. In ——— Estatística; resumo da teoria 875 problemas resolvidos 619 problemas propostos. São Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1974. 580 p.
38. THOMPSON, T.L.; PEART, R.M. & FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying a new model. Transactions of the ASAE, St Joseph, Mich. 11(4):582-6, 1968.
39. TOSELLO, A. et alii. Influência do parcelamento na secagem do café. Bragantia, Campinas, S.P. 23(24):299-322, 1964
40. VILLA, L.G. Single particle convective moisture losses from horticultural products in storage. Michigan, Michigan State University, 1973. 221 p. (Tese de doutoramento).
41. YOUNG, J.H. & WHITAKER, T.B. Evaluation of the diffusion equation for describing thin layer drying of peanuts in the hull. In ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. St Joseph, Michigan, 1969. (Paper nº 69-346).

APÊNDICE A

Dados de secagem em silo piloto:

Simbologia:

- t - tempo de secagem, horas
- Ts₁ - temperatura de bulbo seco do ar na entrada do silo, °C
- Tu₁ - temperatura de bulbo úmido do ar na entrada do silo, °C
- Ts₂ - temperatura de bulbo seco na saída do silo, °C
- Tu₂ - temperatura de bulbo úmido na saída do silo, °C
- p₁, p₂, p₃ - pressão em mm de água, na entrada do tubo do ventilador, no tubo antes do ventilador, e no silo, respectivamente.
- H - altura da camada, cm
- T - temperatura do ar ambiente, °C
- RH - umidade relativa do ar ambiente, %

A₁ - Baixa velocidade do ar - 1683 m³/min.ton.

t	Ts ₁	Tu ₁	Ts ₂	Tu ₂	P ₁	P ₂	P ₃	T	RH	H
0,0	35,0	20,0	26,0	19,0	10	5	12	-	-	41,5
0,5	34,0	20,0	26,0	19,0	10	5	12	-	-	40,5
1,0	35,0	20,0	26,0	19,0	10	5	12	-	-	40,0
2,0	36,0	20,5	20,0	20,0	10	5	12	-	-	39,0
3,0	36,0	20,0	20,5	19,5	10	5	12	-	-	38,0
4,0	35,0	20,0	28,5	19,0	11	6	11	28,5	48,0	37,0
5,0	35,0	20,0	29,0	19,5	11	6	11	26,0	57,0	36,5
7,0	35,0	19,0	29,5	19,0	12	4	11	24,0	64,0	36,0
9,0	34,0	20,0	28,5	20,0	12	4	10	23,0	74,0	35,0
11,0	35,0	20,0	30,0	19,0	12	4	9	21,5	80,0	34,0
13,0	35,0	19,5	30,0	19,0	12	4	9	21,0	80,5	33,0
15,0	34,0	19,0	30,0	18,5	13	3	8	20,5	81,0	32,5
17,0	35,0	19,0	30,0	18,5	13	3	8	20,0	81,5	32,0
19,0	34,0	20,0	31,0	20,0	15	3	7	20,0	82,0	31,5
21,0	35,0	20,5	31,5	19,5	11	4	5	21,5	76,0	30,5
23,0	35,0	21,0	32,0	20,0	11	4	5	23,0	72,0	30,5
25,0	35,0	22,0	33,0	22,0	11	4	3	24,5	64,0	29,5
27,0	36,0	22,0	33,0	22,0	11	3	3	25,0	65,0	29,0
29,0	36,0	21,0	33,0	20,5	11	4	3	24,0	69,0	29,0
31,0	34,0	20,0	31,0	19,0	11	4	3	-	-	29,0
34,0	34,0	19,0	31,0	19,0	11	4	3	-	-	28,5
37,0	34,0	20,0	31,5	19,5	11	4	3	20,0	80,0	28,0
40,0	35,0	19,5	32,5	19,5	12	4	3	20,0	80,0	28,0
43,0	34,0	20,0	32,0	20,0	19	4	3	21,0	75,0	28,0
46,0	35,0	21,0	33,0	20,5	11	4	5	23,5	69,0	28,0
49,0	35,0	22,5	36,0	22,0	11	4	2	24,0	68,0	27,0
52,0	37,0	20,5	34,0	20,0	12	4	3	23,0	70,0	27,0
55,0	36,0	20,0	32,0	19,5	11	4	4	20,0	78,0	27,0
59,0	34,0	19,5	32,5	19,0	12	4	3	19,5	79,0	27,0
63,0	34,0	19,0	33,0	19,0	12	4	3	20,5	76,0	27,0
67,0	35,0	18,5	34,0	19,0	11	4	3	21,5	66,0	26,5
72,0	35,0	20,0	35,0	20,0	11	3	2	24,0	52,0	26,5
76,0	36,0	20,0	34,0	19,0	11	4	2	23,5	62,0	26,5
81,0	34,0	19,0	32,0	19,0	11	4	2	21,0	78,0	26,5
86,0	34,0	19,5	33,0	19,0	12	4	3	20,0	79,0	26,5
91,0	34,0	20,0	33,0	19,5	12	4	3	22,5	74,0	26,5
96,0	35,0	21,0	35,0	20,5	11	4	3	34,0	65,0	26,5
101,0	36,0	21,0	35,0	20,5	11	4	3	23,0	65,0	26,5
106,0	36,0	21,0	34,0	20,5	12	4	3	21,5	78,5	26,5
112,0	35,0	19,0	32,0	19,0	11	4	3	21,0	81,0	26,0

A₂ - Alta velocidade do ar - 3110 m³/min.ton.

t	Ts ₁	Tu ₁	Ts ₂	Tu ₂	P ₁	P ₂	P ₃	T	RH	H
0,0	35,0	22,0	30,0	21,0	47	17	50	-	-	45,5
1,5	34,0	20,0	30,0	21,0	47	17	44	21,0	72,0	-
3,5	34,0	20,0	30,0	20,0	48	17	35	20,0	75,0	42,0
5,5	36,0	20,0	31,0	20,0	47	17	28	19,5	76,0	40,5
7,5	34,0	20,0	31,0	20,0	47	17	24	19,0	78,0	38,5
9,5	35,0	20,0	32,0	19,5	48	17	22	19,0	80,0	38,0
11,5	34,0	20,0	33,0	19,5	48	17	18	19,8	80,0	37,0
13,5	34,0	20,0	32,0	19,0	47	17	14	18,5	80,0	36,7
15,5	36,0	20,5	32,5	19,0	48	17	11	20,0	75,0	36,0
17,5	35,0	20,5	33,0	20,0	48	17	11	22,0	63,0	35,0
20,5	37,0	20,0	33,5	20,0	49	17	20	22,5	63,5	34,0
23,5	36,5	21,0	34,0	20,0	50	17	19	21,0	67,0	-
26,5	34,0	19,0	34,0	19,0	47	17	22	20,5	74,0	33,5
29,5	35,0	20,0	34,0	19,5	47	17	21	20,0	77,0	33,0
32,0	35,0	20,0	34,0	19,5	47	17	20	19,5	75,0	32,5
35,5	34,0	19,0	33,0	18,0	47	17	25	18,5	74,0	32,0
39,5	34,0	19,0	33,0	18,5	47	17	24	19,5	67,0	31,5
43,5	35,0	18,0	35,0	18,5	47	17	26	21,5	57,5	31,0
47,5	36,0	18,5	35,0	18,5	48	17	26	20,5	63,0	30,5
51,5	35,0	18,5	33,0	18,0	48	17	26	18,5	73,0	30,2
55,5	34,0	18,0	32,0	17,0	48	17	26	17,0	76,0	30,0
59,5	33,0	17,5	32,0	17,0	48	17	27	16,0	78,0	30,0
64,5	33,5	18,0	33,0	17,0	47	17	28	18,0	68,0	30,0
68,5	38,0	19,0	37,0	19,0	47	17	26	20,0	56,0	30,0
74,0	37,0	19,0	37,0	19,0	47	16	26	19,0	73,0	30,0
79,0	34,0	19,0	33,0	18,5	47	17	26	17,5	79,0	30,0
84,0	33,0	18,0	32,0	17,5	47	17	26	18,0	78,0	30,0
92,0	38,0	18,5	36,0	18,0	47	17	26	19,0	70,0	30,0
99,0	36,0	18,5	35,0	18,0	47	17	26	21,8	56,5	30,0
111,0	38,0	17,0	36,0	16,5	47	17	26	17,6	70,6	30,0

APÊNDICE B

Dados de secagem em silo com coletor solar

Simbologia:

- T - temperatura do ar, °C
- H - umidade absoluta, g de vapor/kg de ar seco
- G_a - vazão do ar, kg de ar seco/hr m^2
- R - radiação solar, cal/cm²
- RH - umidade relativa, %

Apêndice B₁ - Condições ambientais (médias horárias) durante a secagem natural em silo.

HORAS	4/8			5/8			6/8			7/8		
	T	R	RH									
8:00	17,0	0,30	49	18,0	0,40	51	16,0	0,40	57	20,0	0,30	56
9:00	20,0	0,50	43	20,0	0,55	43	19,0	0,60	48	22,0	0,45	46
10:00	22,0	0,62	39	22,0	0,67	37	22,0	0,70	38	25,0	0,60	40
11:00	23,5	0,72	35	23,0	0,74	33	25,0	0,75	34	27,0	0,70	36
12:00	24,0	0,73	32	25,0	0,75	31	26,0	0,75	30	28,0	0,73	34
13:00	25,5	0,72	29	25,3	0,72	28	27,0	0,74	29	28,0	0,65	30
14:00	26,0	0,65	27	26,0	0,65	26	27,5	0,60	26	29,0	0,65	29
15:00	26,0	0,50	28	26,0	0,50	26	27,5	0,50	27	28,0	0,45	28
16:00	26,0	0,30	30	26,0	0,25	26	27,0	0,25	27	28,5	0,30	28
17:00												

Continuação Apêndice B₁

HORAS	4/8			5/8			6/8			7/8		
	T	R	RH									
8:00	20,0	0,30	55	20,0	0,30	51	21,0	0,35	57	20,0	0,40	76
9:00	24,0	0,45	45	22,5	0,45	46	22,0	0,55	55	21,3	0,60	69
10:00	27,0	0,55	37	25,0	0,60	41	24,0	0,65	49	23,0	0,65	59
11:00	28,0	0,65	34	29,0	0,68	36	26,0	0,70	46	-	-	-
12:00	30,0	0,70	30	30,5	0,70	32	27,0	0,70	40	-	-	-
13:00	30,5	0,68	28	31,5	0,60	28	29,0	0,55	34	-	-	-
14:00	30,0	0,50	27	31,5	0,55	26	29,5	0,45	32	-	-	-
15:00	31,0	0,40	27	31,0	0,40	27	29,5	0,30	32	-	-	-
16:00	31,0	0,40	28	30,5	0,25	28	29,0	0,25	34	-	-	-
17:00												

Apêndice B₂ - Condições de entrada de ar durante a secagem de café em silo com coletor solar.

Tempo t horas	31/7			1/8			2/8			3/8		
	T	H	G _a	T	H	G _a	T	H	G _a	T	H	G _a
0,0	39,0	8,8	503,610	26,0	10,2	524,318	24,0	9,2	516,386	27,0	9,0	510,177
0,5	41,0	8,7	500,485	29,0	9,7	507,444	30,0	12,0	491,937	33,0	8,5	489,281
1,0	44,0	8,5	461,313	36,0	11,0	494,942	36,0	11,0	494,942	39,0	9,6	491,742
1,5	47,0	8,0	457,355	40,0	10,2	500,891	40,0	10,2	500,891	40,5	9,5	501,442
2,0	48,0	8,5	444,181	42,5	9,8	485,677	41,0	9,5	488,227	34,0	8,8	485,063
2,5	49,0	8,7	454,013	44,0	10,0	494,734	44,0	9,2	483,841	45,0	8,3	482,092
3,0	49,5	9,2	441,627	45,5	10,2	469,355	46,0	9,2	480,811	45,0	8,6	471,136
3,5	48,0	9,0	466,589	46,0	10,0	468,768	46,0	9,2	469,363	48,0	9,2	478,501
4,0	47,5	8,5	490,501	48,0	10,0	477,213	48,0	9,0	477,970	49,0	8,6	476,789
4,5	46,0	8,2	481,574	48,0	10,0	488,575	47,0	8,5	479,842	49,5	8,3	486,922
5,0	44,5	8,2	472,326	49,0	10,3	486,828	47,0	8,0	480,223	49,0	9,6	476,789
5,5	41,0	8,0	489,389	47,0	9,5	490,489	46,5	7,4	481,432	42,5	8,2	498,425
6,0	38,0	7,8	494,262	44,0	10,0	483,228	45,0	7,2	483,855	43,0	8,1	496,612
6,5	34,0	7,0	501,332	45,0	10,2	481,558	45,0	7,2	483,855	39,0	8,2	504,090
7,0	32,0	8,3	515,565	42,0	10,0	497,872	42,0	7,0	488,613	43,0	8,7	497,795
7,5	26,0	8,3	538,129	39,0	9,8	514,506	40,0	6,5	503,841	42,5	8,2	486,911
8,0	22,0	8,8	557,371	34,5	7,5	512,028	36,5	6,7	509,370	38,0	7,8	505,308
8,5	21,5	8,5	558,582	31,0	6,5	506,678	-	-	-	35,5	10,5	497,947
9,0	21,0	8,2	534,918	26,0	7,8	550,797	-	-	-	30,5	9,2	506,463

Continuação Apêndice B
2

Tempo t Horas	4/8			5/8			6/8			7/8		
	T	H	G _a									
0,0	28,5	9,9	520,222	27,0	8,0	548,788	28,0	10,5	520,591	25,0	11,2	525,244
0,5	33,0	9,3	513,067	33,5	9,2	512,312	30,5	11,0	515,899	30,0	12,0	515,934
1,0	37,0	9,8	506,053	38,0	8,6	505,388	34,5	10,8	497,511	33,0	10,7	523,837
1,5	40,5	9,9	511,966	39,5	9,5	502,248	36,0	10,2	507,363	34,5	11,5	508,793
2,0	45,0	8,8	494,118	41,5	10,2	498,504	37,0	10,5	505,493	38,5	11,4	502,346
2,5	45,5	10,1	480,879	44,0	10,0	483,228	41,0	10,2	487,686	40,0	12,3	499,232
3,0	47,0	8,6	479,766	47,0	9,5	490,489	42,5	11,2	496,141	42,0	11,6	496,614
3,5	49,0	8,7	476,713	48,0	9,0	489,350	46,0	11,6	490,393	-	-	-
4,0	49,5	9,4	486,767	49,0	8,7	488,064	47,0	11,2	477,795	-	-	-
4,5	49,5	8,5	476,126	48,0	9,0	500,730	47,0	11,2	477,795	-	-	-
5,0	49,0	8,7	476,713	48,5	8,8	488,744	47,0	9,7	478,930	-	-	-
5,5	48,5	8,9	488,667	47,0	8,0	480,223	45,0	10,2	481,558	-	-	-
6,0	47,5	8,5	479,094	48,0	9,0	477,970	42,0	9,3	498,424	-	-	-
6,5	47,0	8,0	480,223	45,0	8,0	483,240	42,0	10,0	486,293	-	-	-
7,0	43,0	8,0	474,717	44,0	7,7	484,994	40,5	8,5	501,442	-	-	-
7,5	36,0	8,1	520,898	42,0	7,0	488,613	39,0	9,7	491,197	-	-	-
8,0	41,0	7,5	501,440	39,0	7,0	493,307	38,0	9,4	493,009	-	-	-
8,5	37,0	7,8	507,661	37,0	7,7	507,742	33,0	9,3	501,136	-	-	-
9,0	32,0	7,2	528,477	37,0	7,7	507,742	31,0	9,5	504,269	-	-	-

APÊNDICE B₃

Códigos mnemônicos utilizados no programa:

XMC	-	teor de umidade do produto
POS	-	posição no silo
PVAP	-	pressão de vapor
XEQMC	-	teor de umidade de equilíbrio
PSAT	-	pressão de vapor saturado
H	-	umidade absoluta do ar
T	-	temperatura do ar
RH	-	umidade relativa
THE	-	temperatura do produto
X	-	parâmetros da equação de umidade de equilíbrio
XM, XN, XQ	-	parâmetros da equação de camada delgada
TTIME	-	tempo total
TLENGH	-	altura total da camada
DELT	-	acrêscimos no tempo, DT
DELX	-	acrêscimos na altura, DX
XMO	-	umidade inicial do produto
TIN	-	temperatura inicial do ar
HIN	-	umidade absoluta inicial
GA	-	vazão do ar
RHOP	-	densidade do produto
HFG	-	calor latente de vaporização
PATM	-	pressão atmosférica
AREA	-	área da secção do silo
CA	-	calor específico do ar
THIN	-	temperatura inicial do produto
ASP	-	área específica do produto
CW	-	calor específico da água
HTC	-	coeficiente de transferência de calor por convecção
DMDT	-	variação da umidade com relação ao tempo, dM/dt
CP	-	calor específico do produto


```

XJT=JTIME
IPRINT=XIL/TNXPR
XPRINT=XJT/TNTPR
PRINT 81, XMO, TIN, HIN, VEO, RHOP, HFG, XN, XN, XQ
PRINT 82, TTIME, TLENGH, DELT, DELX, ILENGH, JTIME, IPRINT, XPRINT
QINV=1./XQ
DO 14 I=1, ILPI
  XMC(I)=XMO
  T(I,1)=TIN
  T(I,2)=TIN
  H(I,2)=HIN
  H(I,1)=HIN
  THE(I)=THIN
10 CONTINUE
POS(1)=0.0
TYPE 999, NYC
0
999 FORKAY( HTC = 1 G10,5)
  DO 30 L=2, 11
    LDEL=1
    POS(L)=POS(LM)+IPRINT*DELX
30 CONTINUE
    TIME=0.01*DELT
    PRINT 89, (POS(K), K=1, 11)
    TPORT=0.0
11 CONTINUE
    IF(TIME=TTIME) 12, 13, 13
12 CONTINUE
    TIME=TIME+DELT
    IF(TIME=9.915) 51, 52
51 LD=1
    TIM=TIME
    GO TO 59
52 IF(TIME=18.) 53, 53, 54
53 LD=2
    TIM=TIME+9.9
    GO TO 59
54 IF(TIME=26.) 55, 55, 56
55 LD=3
    TIM=TIME+18.
    GO TO 59
56 IF(TIME=35.) 57, 57, 58
57 LD=4
    TIM=TIME+26.
    GO TO 59
58 IF(TIME=44.) 121, 121, 122
121 LD=5
    TIM=TIME+35.
    GO TO 59
122 IF(TIME=53.) 123, 123, 124
123 LD=6
    TIM=TIME+44.
    GO TO 59
124 IF(TIME=62.) 125, 125, 126
125 LD=7
    TIM=TIME+53.
    GO TO 59
126 LD=8
    TIM=TIME+62.
59 CONTINUE

```

403 - AUTOCORR - 20/7/53 - 8

```

T(1,2)=A0(LD)+TIM*(A1(LD)+TIM*(A2(LD)+TIM*(A3(LD)+TIM*(A4(LD
1)+TIM*(A5(LD)+A6(LD)*TIM))))
C
14 PRINT 14,T(1,2)
   FORMAT(IX,F5,1)
H(1,2)=B0(LD)+TIM*(B1(LD)+TIM*(B2(LD)+TIM*(B3(LD)+TIM*(
184(LD)+TIM*(B5(LD)+B6(LD)*TIM))))
C
24 PRINT 24,H(1,2)
   FORMAT(IX,F5,4)
GASC=C7(LD)+TIM*(C1(LD)+TIM*(C2(LD)+TIM*(C3(LD)+TIM*(C4(LD
1)+TIM*(C5(LD)+TIM*(C6(LD)+TIM*(C7(LD))))))
C
34 PRINT 34,GASC
   FORMAT(IX,F12,5)
GA=GASC/.79
PV=H(1,2)*PATH/(.6219+H(1,2))
HTC=.2143*GA+.59
T(2,1)=T(1,2)
H(2,1)=H(1,2)
D
987 FORMAT(' T(1,2)=',G12,5,' H(1,2)=',G12,5,' VEL=',G12,5
1,' GA=',G12,5)
XLENGH=0.0
DO 20 I=2,IMP2
IM=I-1
IP=I+1
IFLAG=0
XLENGH=XLENGH+DELX
DB=T(I,1)
15 PSAT(I)=2.256E06*10**(-((374.25+DB)*(3.243781+5.8682E-03*(374.15+
1DB))+1.1702379E+08*(374.15+DB)**3)/((DB+273.15)*(1.+2.1078462E-03
2*(374.15+DB))))
D
997 FORMAT(' PSAT(I) = ',G12,5)
PVAP(I)=H(I,1)*PATH/(.6219+H(I,1))
RH(I)=PVAP(I)/PSAT(I)
IF(RH(I).GT..99999999) RH(I)=1.0
XEQMC(I)=.01*RH(I)*(X(1)+RH(I)*(X(2)+X(3)*RH(I)))*EXP
1((X(4)+RH(I)*(X(5)+RH(I)*(X(6)+X(7)*RH(I))))*(T(I,1)+273.))
D
996 FORMAT(' XEQMC(I) = ',G12,4)
DHDT=-((XN*XQ)*((PSAT(I)*PVAP(I))*XN)*(XNC(IM)+XEQMC(I))*TIM**
1(XQ=1.))
IF(PSAT(I)-PVAP(I))61,62,62
61 IF(XNC(IM)+XEQMC(I))61,62,62
63 DHDT=-DHDT
62 CONTINUE
RHOP=394.4-82.15*XNC(IM)
IF(XNC(IM).LT..441)RHOP=348.1718
XA=.00821*((.338*XNC(IM)+.851)**.5)
Y=.001585*((.338*XNC(IM)+.851)**.25)
ASP=(3.886*Y+2.411*RT(XA**2+Y**2))/(3.834E-07*XNC(IM)+9.667E-07)
IF(XNC(IM).LT..441)ASP=285.1545
H(1,2)=H(IM,2)-RHOP*DHDT*DELX/GA
T(1,2)=T(IM,2)-HTC*ASP*DELX*(T(IM,2)-THE(IM))/(GA*CA)
THE(T(1,2))=.75+.32
IF(XNC(IM).LT..17)HF=(1294.+57*THE)*.01+.4369*HXD*(-28.25*XNC
1(IM))
IF(XNC(IM).GT..17)HF=1861.
HEP=HF*(589.4/106.)
XNU=XNC(IM)/(1.+XNC(IM))

```


Anêndice 5 - Dados de saída do computador.

ANO	TIN	HIN	VEL	THOP	HFC	XH XH	XO
0,600	37,400	0,209	0,000	290,000	509,400	0,005	0,461 0,768

TTIME	TLENGTH	DELT	DELA	ILENGTH	JTIME	PRINT	XPRINT
09,000	1,000	0,100	0,020	50	050	5	9,205

FORMAÇÃO = 0,00 0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70 0,80 0,90 1,00 METROS

TEMPO = 0,013 HORAS

XHC(K)	=	1700	1707	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
THE(K)	=	24,0	19,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
H(K)	=	.0084	.0133	.0130	.0130	.0130	.0130	.0137	.0137	.0137	.0137	
RH(K)	=	.182	.778	.878	.882	.880	.879	.879	.879	.879	.879	
XEQHC(K)	=	.158	.792	.795	.812	.806	.803	.801	.800	.800	.800	
T(K)	=	38,9	21,4	20,1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	

TEMPO = 1,010 HORAS

XHC(K)	=	1720	1762	1781	1793	1798	1799	1799	1799	1799	1799	1799
THE(K)	=	35,0	30,3	25,1	21,5	20,2	19,8	19,8	19,8	19,6	19,6	19,6
H(K)	=	.0084	.0109	.0126	.0134	.0136	.0136	.0135	.0135	.0134	.0134	
RH(K)	=	.182	.343	.582	.726	.875	.890	.889	.890	.890	.891	
XEQHC(K)	=	.158	.210	.270	.343	.401	.458	.453	.453	.453	.453	
T(K)	=	38,9	31,9	25,3	21,2	19,9	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	

TEMPO = 1,019 HORAS

XHC(K)	=	1694	1733	1758	1777	1792	1797	1799	1800	1800	1800	1800
THE(K)	=	36,2	32,1	28,4	25,0	22,7	21,4	20,7	20,5	20,3	20,2	20,1
H(K)	=	.0084	.0135	.0121	.0134	.0141	.0141	.0144	.0144	.0143	.0142	
RH(K)	=	.182	.343	.357	.633	.754	.852	.891	.890	.890	.891	
XEQHC(K)	=	.158	.202	.229	.308	.365	.420	.437	.430	.430	.430	
T(K)	=	38,9	33,5	28,8	24,9	22,2	21,0	20,4	20,2	20,1	20,1	