

SECAGEM DE AMÊNDOAS DE CACAU RELACIONADA ÀS TEORIAS DE SECAGEM EM CAMADAS DELGADAS*

Jairó. Cunha

RESUMO

Testes de secagem de amêndoas de cacau em camada delgada foram levados a efeito em um secador de unidades múltiplas ("multi-unit drier").

Curvas de secagem para as temperaturas de 50, 57,7, 60, 70, 74 e 75°C com fluxo de ar constante (9,14 m.min⁻¹, foram plotadas. Cada temperatura teve duas repetições, com exceção da temperatura de 60°C, que teve quatro repetições.

As curvas de secagem são relacionadas às teorias existentes de secagem em camada delgada. Valores da unidade de equilíbrio (Me) e constante de secagem (K) foram determinados e curvas teóricas de secagem foram calculadas e comparadas com as curvas experimentais.

Valores da unidade de equilíbrio (Me) e constante de secagem (K) para secagem em camada delgada, foram correlacionadas entre si e com a temperatura. Equações de regressão linear foram estabelecidas para possibilitar a predição de secagem de amêndoas de cacau em camada delgada.

SUMMARY

Thin layer tests for cocoa beans were carried out in a "multi-unit drier" and drying curves for the temperatures of 50; 57.7; 60; 70; 74 and 75°C and constant air flow of 9.14 m. min⁻¹ were plotted. Each temperature was repeated twice apart that of 60°C which was repeated 4 times. The drying curves are related to the existing thin layer drying theories. Values of the equilibrium moisture content (Me) and drying constant (K) were calculated and theoretical drying curves were predicted and compared with the experimental curves.

Values of equilibrium moisture content (Me) and drying constant (K) for thin layer drying were correlated between them and with temperature and regression equations were set up to make possible predictions of thin layer drying for cocoa beans.

1. INTRODUÇÃO

O processamento das amêndoas de cacau consiste principalmente de três fases: fermentação, secagem e armazenamento. Os dois últimos são mais difíceis e o armazenamento depende dos resultados alcançados na secagem.

Após a fermentação, as amêndoas vão para a secagem com o teor de umidade (T.U.) base úmida (B.U.) que varia de 52 a 59% na Malásia (HOWAT et alii 1957 WOOD, 1971) e até 60% foi mencionado por um consultor da FAO (ROHAN, 1963).

(*) Parte do Trabalho de Tese de Mestrado, apresentado no "Cranfield Institute of Technology - National College of Agricultural Engineering", Silsoe, Inglaterra.

O processo de secagem deve reduzir o teor de umidade do cacau para o nível de 7 a 8% B.U. (HOWAT, et alii, 1957; HAYNES, 1958; GOSH e CUNHA, 1975) para se garantir um período de armazenamento seguro, no qual o Brasil é aproximadamente de 6 meses.

As amêndoas sofrem, então, uma redução de quase a metade de seu peso original. Se a secagem é muito lenta, o que ocorre no processo de secagem natural pelo sol durante os períodos de mau tempo, as amêndoas podem mofar, o que aumenta o número de horas de trabalho para prepará-las para a comercialização e, ainda, com sérios riscos de afetar a sua qualidade. As amêndoas mofadas precisam ser revolvidas mais frequentemente ou amontoadas na barçaça para serem pisadas por um grupo de trabalhadores, após serem aspergidas com um pouco de água. Isto elimina o mofo externo, e dá brilho, conferindo um bom aspecto às amêndoas, mas não elimina o mofo interno, que ocorre em prolongadas condições de mau tempo e que é responsável pela má qualidade e depreciação do produto. Por outro lado, quando as amêndoas são secas muito rapidamente ou abaixo de 7 a 8% B.U., o que ocorre na secagem artificial devido ao uso de elevadas temperaturas, elas se tornam frágeis e se quebram facilmente, causando perdas durante a sua secagem e manuseio. As migalhas resultantes da quebra das amêndoas são vendidas no mercado a preço reduzido.

Secagem bem conduzida contribui decididamente para produzir um cacau de boa qualidade, que é fundamental na produção de um chocolate saboroso. Neste particular, a secagem ao sol é reconhecida por todos os países produtores como a melhor, desde quando ela dá tempo a que as mudanças químicas ocasionadas pela fermentação continuem a ocorrer durante a secagem.

ROHAN (1963), demonstrou que a retirada precoce das amêndoas do processo de fermentação, proporciona uma continuação ativa da destruição da antocianina. Todavia, ele considera a coloração marrom das amêndoas (Figura 1) como o aspecto de maior importância na secagem e que a coloração marrom está associada com a oxidação dos polifenóis por um sistema polifenol-oxidase, o qual somente se ativa na presença de oxigênio.

A maioria dos trabalhos publicados em secagem de cacau, como os mencionados por BRAVO e McGRAW (1974) (De VOS, 1956; HOWAT et alii, 1957; WOOD, 1961; ALLISON e KENTON, 1964; NEWTON, 1963; SHELTON, 1967 e HAYNES, 1958) foram relacionados principalmente com o desempenho dos secadores, seus custos de operação e a qualidade do produto comparados com os da secagem ao sol.

Pouca ou quase nenhuma atenção (De VOS, 1956) foi dada à temperatura das amêndoas de cacau durante o processo de secagem.

A temperatura considerada como prejudicial às amêndoas varia de autor para autor.

De VOS (1956) mencionou experimentos anteriores, os quais consideraram como prejudiciais, temperaturas acima de 55 a 60°C. Ele próprio encontrou resultados discordantes. Encontrou que, usando-se 90°C nas primeiras 2 a 3 horas e se reduzindo depois para 70°C, a secagem deu um cacau de boa qualidade.

No oeste da África e em Camarões, HAWAT et alii (1957) e WOOD (1961) encontraram que a secagem a 80°C produziu cacau de boa qualidade. O primeiro mencionou que a maioria das reações químicas envolve sistemas de enzimas e, então, as temperaturas não devem ser muito elevadas, o que conduziria a uma inativação desses sistemas. Bom chocolate não pode ser obtido na ausência desses sistemas. Eles encontraram pequenas diferenças entre sabor de chocolate feito com amêndoas secas ao sol e secas nos secadores artificiais. O último encontrou temperatura de 80°C, o fluxo de ar de 2,45 a 2,75 m.min⁻¹ e espessura das amêndoas de 12,7 cm como as demais econômicas condições de operação, isto significando baixo fluxo de ar e altas temperaturas.

Temperaturas de 60°C e fluxo de ar de 15 a 18 m.min⁻¹ são recomendadas (SALZ, 1972) para estágios de pré-secagem e 82 a 85°C e 9 a 11 m.min⁻¹ para estágios finais.

SHELTON (1967) e WOOD (1971) encontraram que um baixo fluxo de ar de 9,14 m.min⁻¹ (30 ft.min⁻¹) e temperaturas de 60 a 65,5°C (140° a 150°F) deram a

melhor eficiência geral de secagem.

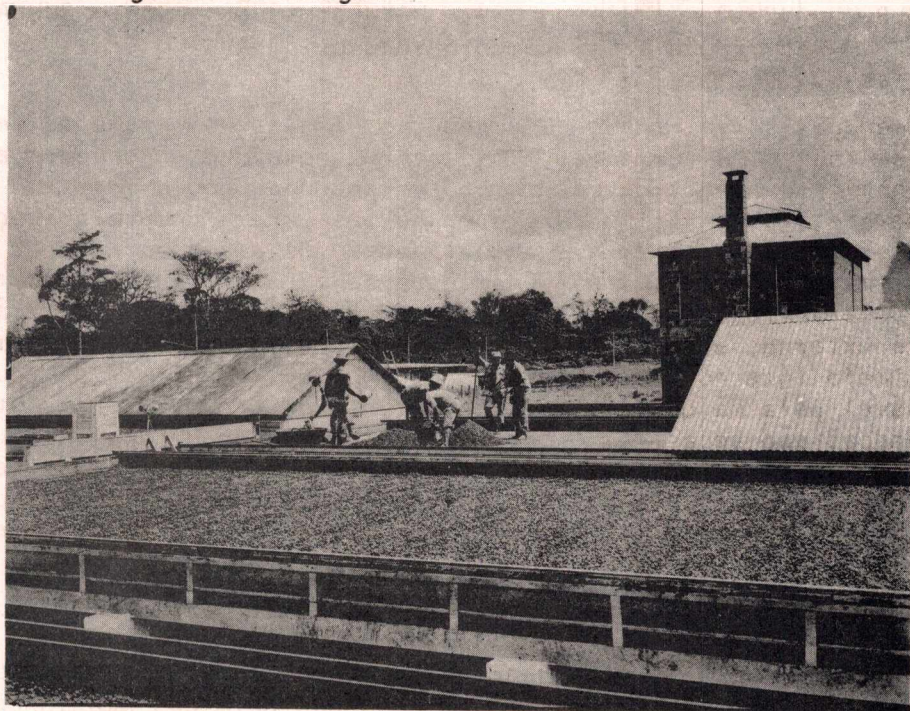


FIGURA 1 - Exemplo de secagem de cacau ao sol em barcaça.

Uma coloração marrom muito boa é mostrada.

(original em cores)

Muito poucos experimentos têm sido feitos para estudar as características fundamentais das amêndoas de cacau, de modo que elas não são bem conhecidas, particularmente aquelas relacionadas às teorias de secagem.

A primeira tentativa foi feita por BRAVO e MCGRAW (1974) na qual uma camada fina de amêndoas foi seca sob fluxo de ar controlado (constante). Curvas de secagem foram obtidas para as temperaturas de 37 a 86°C e fluxos de ar de 2,8 a 77,6 m.min⁻¹. Três períodos de secagem diferentes foram observados: primeiro - o de taxa de secagem constante, o qual foi uma função da temperatura e fluxo de ar a taxa de secagem, sendo controlada pela taxa de transferência de calor. Segundo - a umidade do interior da amêndoa foi transferida para a corrente de ar através da testa. As amêndoas experimentaram uma considerável mudança em forma. O período final: o restante da umidade foi seco extremamente devagar. No segundo e terceiro períodos a taxa de secagem foi uma função da temperatura somente.

Até o momento, não existem trabalhos que correlacionem as curvas de secagem para amêndoas de cacau com as teorias existentes ou que estendam as investigações de camadas delgadas para predição de comportamento de secagem em camadas espessas.

O objetivo do presente trabalho foi, então, investigar as características fundamentais da amêndoa de cacau e relacioná-las ao processo de secagem tais como:

1. Conduzir testes de secagem em camadas delgadas variando as temperaturas.
2. Investigar a correlação entre curvas experimentais e teorias de secagem existentes.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

A secagem em camada delgada é a secagem na qual cada grão é totalmente

exposto ao fluxo de ar passando através dos grãos. Inicialmente, o ar extrai a água que está na superfície do grãos. Mais tarde, a extração de água fica dependendo do movimento da umidade do interior do grão para sua superfície, onde a água é então evaporada pelo ar que passa pelos grãos, contanto que o ar esteja ainda com capacidade de absorção de umidade.

O movimento da umidade dentro do grão é uma resposta às condições externas. Sua taxa de movimento será afetada pela taxa de ar passando através dos grãos, se condições estáveis não são mantidas (NELLIST, 1974).

Condições estáveis são virtualmente mantidas experimentalmente pela secagem de camada delgada ou camada exposta, com um excesso de fluxo de ar.

A equação que define o movimento da umidade durante o período de secagem é baseada na equação de Newton (Hall, 1971), na qual a temperatura é substituída pelo teor de umidade, base seca, como segue:

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-Kt) \quad \text{Eq. 1}$$

na qual:

- M = Teor de umidade, base seca, a qualquer tempo
- M_e = Umidade de equilíbrio
- M₀ = Teor de umidade inicial, base seca
- K = Constante de secagem
- t = Tempo.

2.1. Determinação de Umidade de Equilíbrio - M_e

O termo M_e na equação 1 é chamado de umidade de equilíbrio dinâmico e usualmente difere de equilíbrio estático (obtida das curvas de equilíbrio de umidade).

Esta equação descrever a curva de secagem e para se encontrar o valor de M_e para a curva experimental, procede-se da forma a seguir:

Tomando-se três pontos diferentes num gráfico de teor de umidade em função do tempo, e se fazendo o intervalo de tempo entre os pontos 1 e 2, o mesmo intervalo entre os pontos 2 e 3, três valores diferentes para M (M₁, M₂ e M₃) e três valores diferentes para t (t₁, t₂ e t₃) são obtidos. Substituindo-se os três valores na equação 1 e se dividindo as equações obtidas entre si, encontramos que:

$$M_e = \frac{M_1 \cdot M_3 - M_2^2}{M_1 + M_3 - 2M_2} \quad \text{Eq. 2}$$

Tomando-se valores de M₁, M₂ e M₃, o mais espaçadamente possível na curva de secagem, substituindo-os na equação 2, o valor de M_e será encontrado.

2.2. Determinação da Constante de Secagem - K

Na equação 1, o primeiro termo $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}$ é conhecido como a taxa de teor de umidade que, plotada em função do tempo (t), em papel semilogarítmico, produz uma linha reta. A constante de secagem K é representada pela inclinação dessa reta e valores diferentes podem ser discernidos.

HALL (1971) indica uma solução gráfica para cálculo da constante de secagem K, usando-se a fórmula:

$$\frac{Y}{X} = (0,4343) (K) (F) \quad \text{Eq. 3}$$

onde:

$$\frac{Y}{X} = \text{Inclinação da linha reta}$$

F = Fator de escala, representado por um número tomado da origem do eixo de X, igual à largura de um ciclo do eixo de Y (Ver figura nº 6 semi-logarítmico)

2.3. Predição de Secagem em Camadas Delgadas

A disponibilidade de valores da umidade de equilíbrio (M_e) e da constante de secagem (K) nos possibilita o cálculo de valores teóricos do teor de umidade (M) em um dado tempo (t). A fórmula 2.1 poderá ser escrita:

$$M = \exp(-Kt) (M_o - M_e) + M_e \quad \text{Eq. 4}$$

Entrando-se na equação 4 com valores apropriados do teor de umidade inicial (M_o), umidade de equilíbrio (M_e), constante de secagem (K) e se variando o tempo (t) os pontos teóricos do teor de umidade serão encontrados.

Da mesma forma, tomando-se M como o teor de umidade desejado, é possível calcular-se o tempo de secagem requerido.

3. MATERIAL E MÉTODO

Frutos frescos de cacau foram importados da CEPLAC, BAHIA, BRASIL, oriundos do cruzamento de uma seleção local (SIC) com clones "United Fruit" (UF), "Imperial College Selection" (ICS) e "IQUITOS Material Collection" (IMC).

As amêndoas foram fermentadas durante 2,5 dias, numa caixa de isopor, para compensar as diferenças em temperatura e aeração, como se o material fosse tratado em grande quantidade.

O teor de umidade inicial das amêndoas ao final da fermentação, foi de 118,3% base seca (B.S.), determinado pela secagem de três amostras numa estufa a 105°C até atingir peso constante. O método de secagem de amostras até o peso constante em estufa a 105°C foi adotado durante todo o experimento.

3.1. Equipamento

Os testes para determinar as curvas de secagem em camada delgada para amêndoas de cacau foram feitos no Secador de Múltiplas Unidades ("multi-unit dryer"), no National Institute of Agricultural Engineering (N.I.A.E.).

O Secador de Múltiplas Unidades, Figura 2, consistiu de 8 plataformas circulares de secagem de 0,185m² cada uma, com armação de alumínio e sua plataforma era feita de um nylon de malha muito fina, onde as amêndoas foram postas para secagem, Figura 4.

As plataformas assentavam-se em hastes, Figura 4D as quais estavam rigidamente ligadas, na sua parte inferior, a uma balança de prato superior "Sauter-Toppan", Figura 4A.

Na base da haste um pequeno ressalto suportava um depósito removível, Figura 4B, dentro do qual pequenas esferas de aço podiam ser adicionadas, provenientes de um reservatório, Figura 4C, de onde eram liberadas automaticamente.

A perda de peso das amêndoas de cacau e a temperatura do fluxo de ar durante os testes de secagem, foram registradas, através de perfuração em fitas de papel por um registrador de dados "Solartron Compact Series 2 and 2 Addo type 5"

Um sistema de pesagem automática, ligado ao registrador, permitiu que a perda de peso fosse verificada num intervalo clínico de 4 segundos, em cada

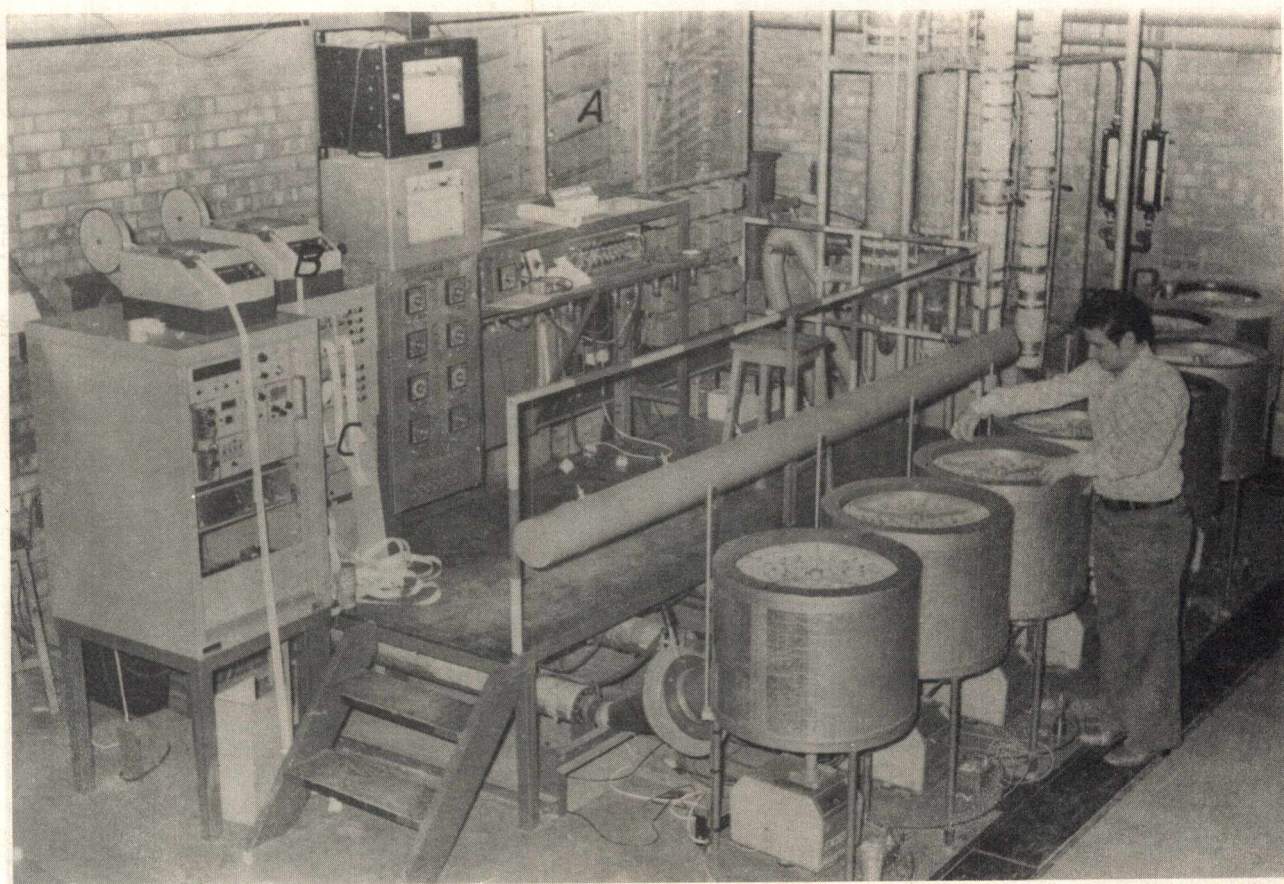


FIGURA 2 - Secador de Múltiplas Unidades (Multi-unit Drier) para secagem em camadas delgadas.

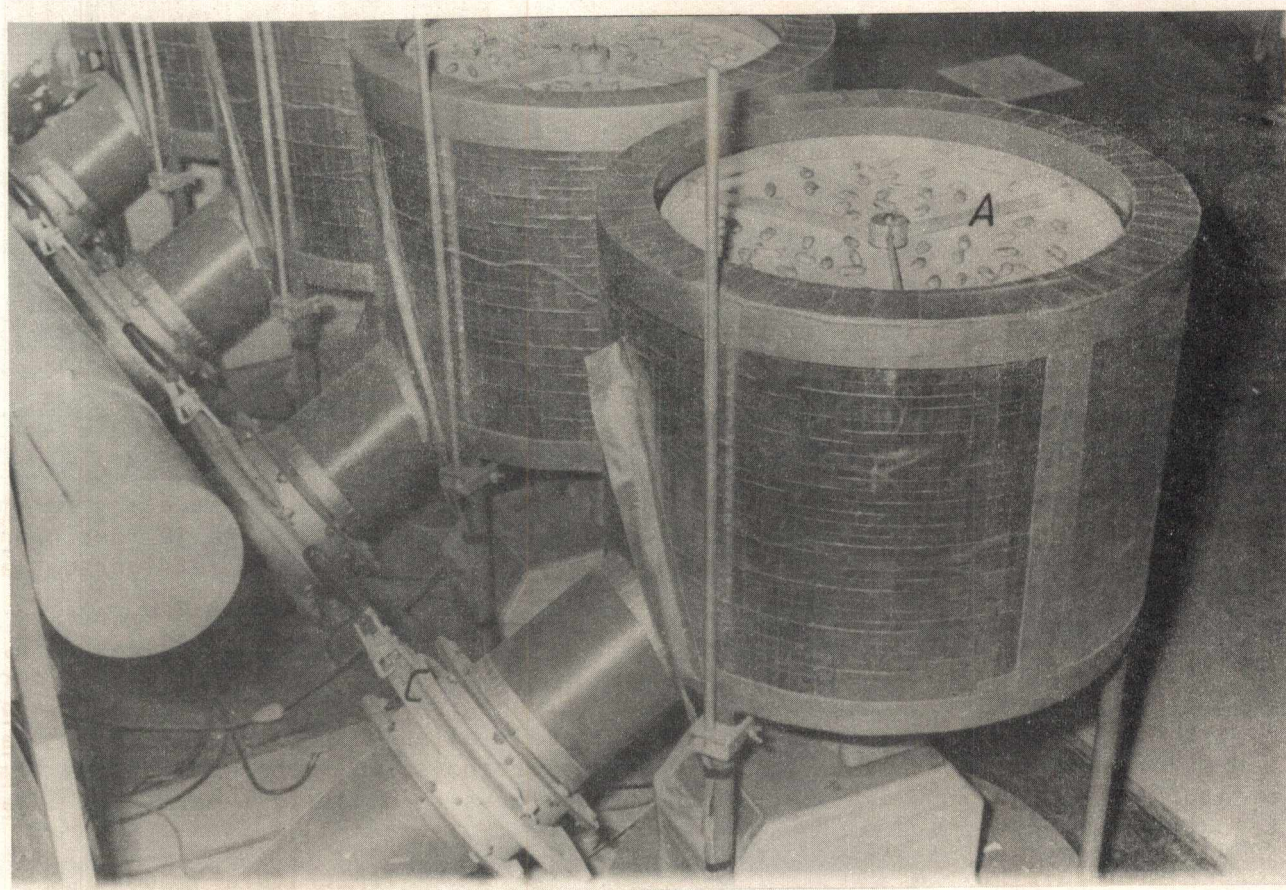


FIGURA 3 - Camada delgada de amêndoas de cacau na plataforma (A). Diafragma Iris (B) e controle de fluxo de ar (C).

uma das 8 plataformas, e os dados fossem registrados num único tipo de papel de 8 dígitos, Figura 2B. O tempo cíclico também foi registrado numa fita de papel, Figura 2C.

A temperatura de cada plataforma de secagem foi também registrada numa fita. As leituras da temperatura foram baseadas na alimentação em milivolts vindos de termopares de Cromo-Constantan e podiam ser reguladas por meio de um relógio digital para serem lidas a intervalos de tempo diferentes. Para este experimento, foi usado o intervalo de tempo de 30 minutos.

GREIG (1970) e NELLIST (1974) descreveram o aparelho com muito mais detalhes e apresentaram diagramas dos componentes principais.

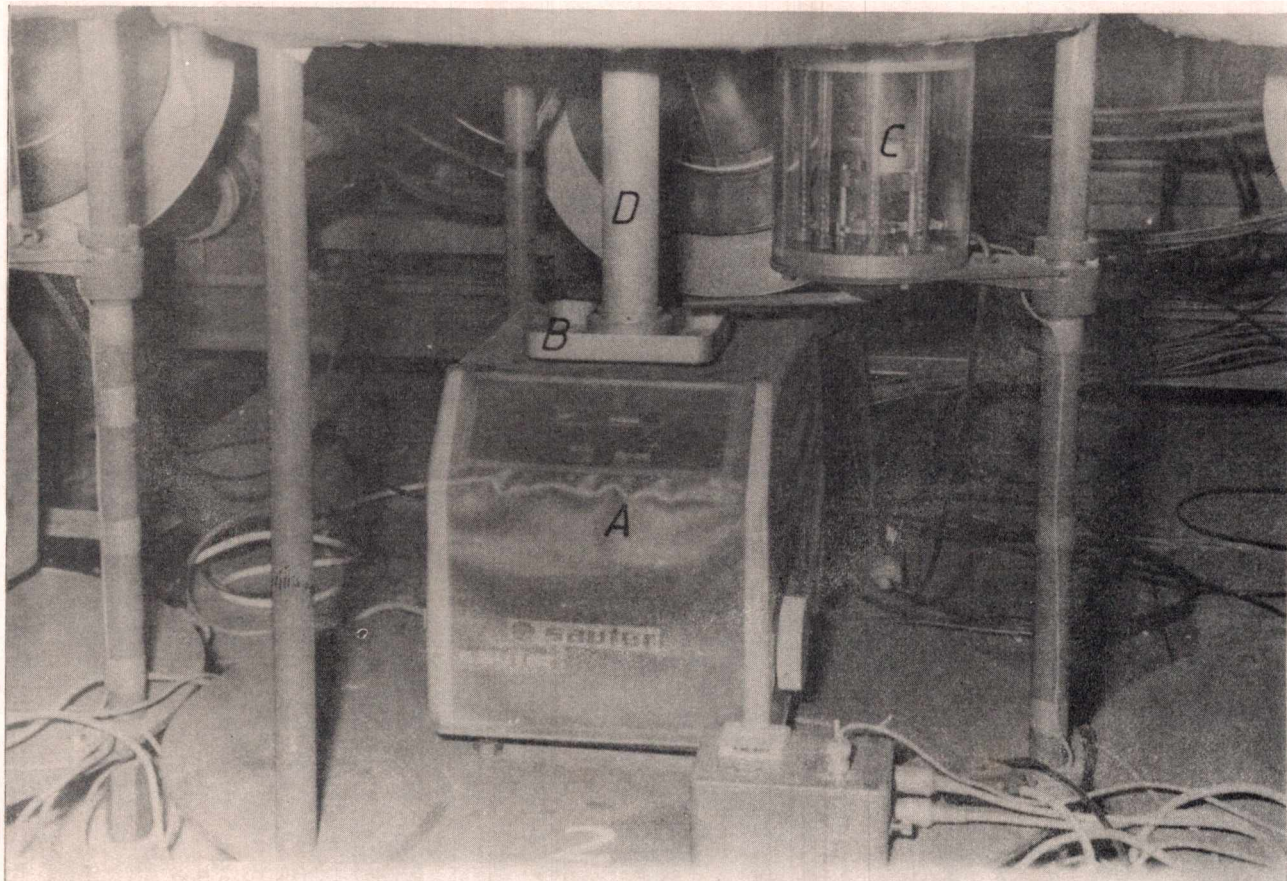


FIGURA 4 - Balança de prato superior "Sauter Toppan" (A), haste (D), depósito re-movível (B) e reservatório (C).

3.2. Trabalho Experimental

Ao final do processo de fermentação, as amêndoas a serem secas, foram levadas diretamente ao Secador de Múltiplas Unidades, o qual estava já funcionando. Parte delas foi posta em saco plástico, selada e colocada no refrigerador a 50°C para o segundo teste.

As temperaturas de secagem foram planejadas para variar de 50 a 80°C, em intervalos de 10°C com duas repetições. A temperatura de 50°C é dada por SALZ (1972) como a temperatura ao final da fermentação (ponto de começo de secagem) e 80°C é geralmente aceita como uma das mais altas temperaturas a serem usadas para a secagem do cacau. Entretanto, o aparelho só foi capaz de dar uma temperatura máxima de 75°C e as seguintes temperaturas foram obtidas para cada plataforma:

Plataforma - Nº	Temperatura - °C
1	50,0
2	60,0
3	74,0

Plataforma - Nº	Temperatura - °C
4	70,0
5	75,0
6	Não funcionou bem
7	60,0
8	57,7

O fluxo de ar foi fixado em $9,14 \text{ m.min}^{-1}$ (30 ft.min^{-1}) baseado em SHELTON (1967), WOOD (1971) e SALZ (1972), e foi determinado pela pressão diferencial através de uma placa com orifício. A pressão diferencial foi calculada e ajustada no painel, Figura 2A, em termos de coluna de água, através de controle manual, Figura 3C.

Com fluxo de ar e temperatura constantes, indicados respectivamente pela pressão diferencial no painel e pelo registrador de temperatura de múltiplos pontos, o teste de secagem prosseguiu como indicado: A plataforma 1 foi removida e pesada numa balança, após o que as amêndoas de cacau foram espalhadas numa camada delgada. O peso da plataforma e plataforma com amêndoas foram obtidos separadamente. A plataforma com amostra foi imediatamente recolocada na câmara e naquele momento uma outra pessoa zerou o contador impressor da plataforma 1. A balança foi então rapidamente ajustada para leitura de 100g. O circuito do foto interruptor foi imediatamente ligado, o que causou a adição de uma esfera de aço (peso = 0,51g) pelo reservatório, Figura 4C, e a leitura da balança passou a indicar 100,51g.

A secagem prosseguiu então e cada vez em que o peso se reduziu para 100 g outra esfera foi adicionada pelo reservatório, aumentando a leitura para 100,51g. A perda de peso e o intervalo de tempo foram registrados automaticamente.

O mesmo procedimento foi imediatamente e continuamente repetido para as outras plataformas, em ordem cronológica, até a plataforma 8. O tempo tomado para acionar cada plataforma foi de aproximadamente 2 minutos.

Ao final do teste, cada plataforma, da 1 para a 8, foi desligada e pesada. As amêndoas foram seladas num saco plástico para a determinação do teor de umidade final. O tempo tomado foi de aproximadamente 2 minutos, o que compensou para cada plataforma, em termos de tempo total de secagem.

As esferas de aço foram pesadas para cada plataforma separadamente, re-presentando a perda de peso.

Os dados coletados e os automaticamente registrados, foram então alimentados num Programa de Sistema de Secagem, chamado C.V.S.G., o qual usa a N.A.G. Biblioteca de Programas designado E.O.4.F.A.F. para minimizar os quadrados mínimos. O E.4.F.A.F. usou o método de: PECKHAM, G. "A new method for minimizing a sum of squares without calculating gradients." Computer J, 1970, 13, 418-420. (Informação dada por Dr. M.E. NELLIST - N.I.A.E).

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O primeiro teste durou 19 horas e o segundo 22 horas e 45 minutos. Os dados coletados, de cada teste, são apresentados no Quadro 1. Estes dados, devidamente introduzidos no computador, produziram aproximadamente 160 pontos (teor de umidade e tempo respectivo), dos quais uma média de 23 pontos foi usada para plotar cada curva de secagem.

Os pontos das curvas com a mesma temperatura foram plotados juntos num único gráfico, após o que foram representados por uma única curva de valor médio. As curvas de valor médio para cada temperatura foram plotadas juntas para originar a Figura 5.

QUADRO 1 - Dados de Secagem em Camada Delgada

Nº	TESTE Nº 1				TESTE Nº 2			
	Peso Inicial da Amostra g	Peso Final da Amostra g	Peso das Esferas Adicionadas - g	Teor de Umidade Final % B.S.	Peso Inicial da Amostra g	Peso Final da Amostra g	Peso das Esferas Adicionadas - g	Teor de Umidade Final % B.S.
1	161,2	80,5	79,5	8,52	161,3	78,1	82,8	7,69
2	160,4	77,3	82,0	5,52	158,6	75,4	83,0	4,88
3	158,0	73,2	85,5	3,70	159,4	74,2	85,0	3,15
4	155,0	72,2	73,7	4,06	156,7	73,7	76,2	3,78
5	159,0	73,8	84,0	3,61	156,2	72,1	82,3	3,22
7	160,2	75,9	83,4	6,13	158,0	75,3	82,4	5,08
8	160,0	76,4	83,0	5,84	159,9	74,8	84,8	5,21

Teor de Umidade Unicial = 118,29% B.S.

Duração: Teste nº 1 = 19 horas e

Teste nº 2 = 22,75 horas

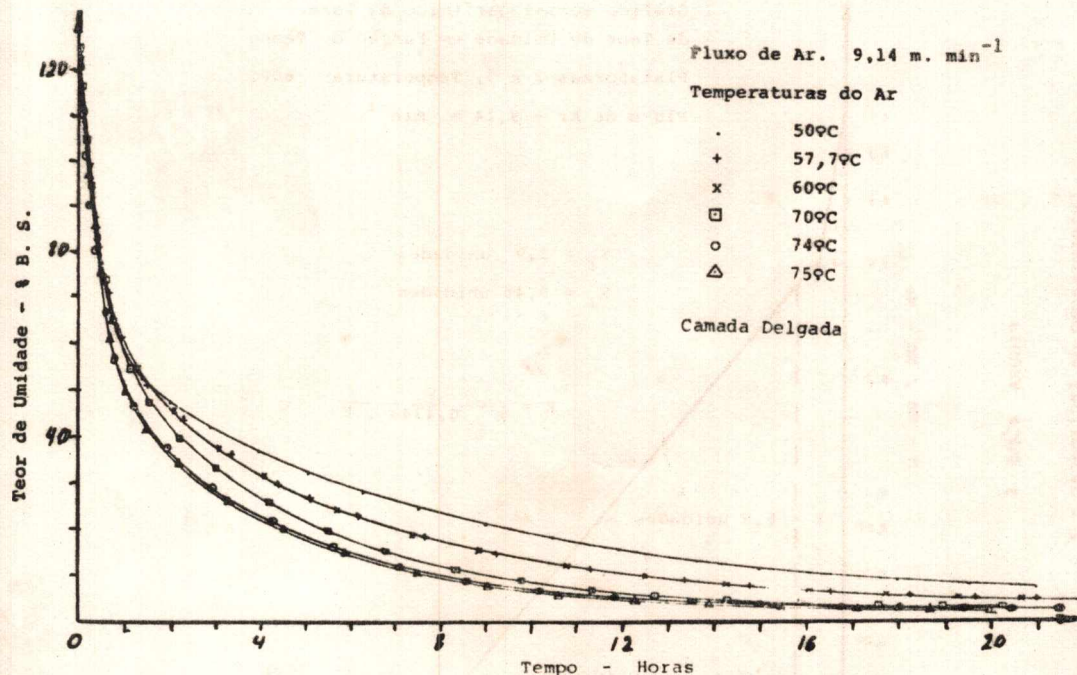


FIGURA 5 - Curvas de Secagem para Amêndoas de Cacau

4.1. Correlação entre Curva Experimental de Secagem e Teorias de Secagem Existentes

Usando-se a equação 2, e se lendo os valores de M_1 , M_2 e M_3 na Figura 5 para os tempos de 2, 10 e 18 horas, respectivamente para cada curva de secagem, os valores de M_e foram encontrados e são apresentados no Quadro 2.

A taxa de teor de umidade foi plotada em função do tempo em papel semi logarítmico para cada uma das temperaturas (50; 57,7; 60; 70; 74 e 75°C). Neste trabalho só apresentamos a Figura 6 correspondente à temperatura de 60°C, como exemplificação. Em cada gráfico, duas linhas retas diferentes foram observadas, uma para o período de taxa de secagem constante (linha reta superior) e outra para o período de taxa de secagem decrescente (linha reta inferior) e, assim, dois valores diferentes de K foram calculados de acordo com a equação 2 e são apresentados no Quadro 2.

QUADRO 2 - Valores da Umidade de Equilíbrio (M_e) e da Constante de Secagem (K) para Amêndoas de Cacau

Temperatura °C	U.E. (M_e) % B.S.	Constante de Secagem K_1	Constante de Secagem K_2
50,0	3,875	0,130	0,838
57,7	3,586	0,180	0,810
60,0	3,413	0,173	0,838
70,0	2,850	0,233	0,916
74,0	2,630	0,242	0,846
75,0	2,600	0,252	0,950

K_1 = Constante de Secagem para o período de taxa de secagem decrescente

K_2 = Constante de Secagem para o período de taxa de secagem constante

Determinação da Inclinação - K

FIGURA 6

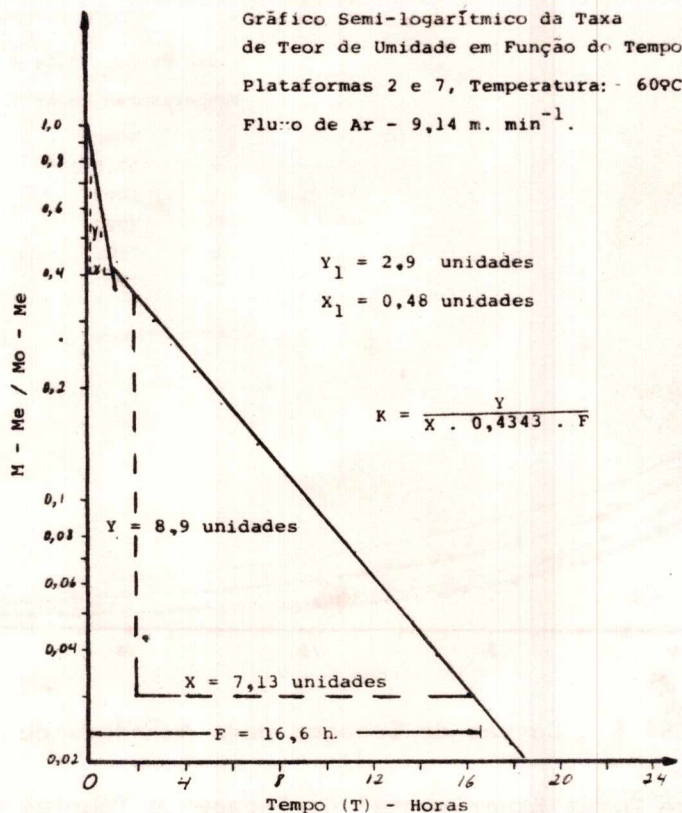


FIGURA 6 - Determinação da Inclinação - K.

4.1.1. Cálculo das Curvas Teóricas de Secagem

Usando-se a equação 4, como explicado no parágrafo 2.3, os pontos teóricos do teor de umidade, para as temperaturas de 50; 57,7; 60; 70; 74 e 75°C foram encontrados e comparados com as curvas experimentais. Neste trabalho apresentamos a comparação para a curva de 60°C, Figura 7, como exemplificação.

A constante de secagem K_1 foi usada para calcular os pontos teóricos para o período de taxa decrescente (P.T.D.) da curva, com teor de umidade inicial (T.U.I.) (Quadro 3) arbitrariamente tomado, como o ponto de transição (P.T.) entre o período de taxa constante (P.T.C.) e o período de taxa decrescente. A constante de secagem K_2 foi usada para calcular os pontos teóricos para o período de taxa constante, com o teor de umidade inicial, sendo o teor de umidade inicial da secagem (Quadro 3).

QUADRO 3 - Teores de Umidade Iniciais Usados para Calcular os Pontos Teóricos

Temperatura °C	TUI para PTC (% B.S)	TUI para PTD % (B.S)	PT entre PTC e PTD (horas)
50,0	120,00	51	1,58
57,7	126,00	50	1,72
60,0	122,00	50	1,72
70,0	126,00	50	1,40
74,0	123,00	44	1,42
75,0	123,63	44	1,40

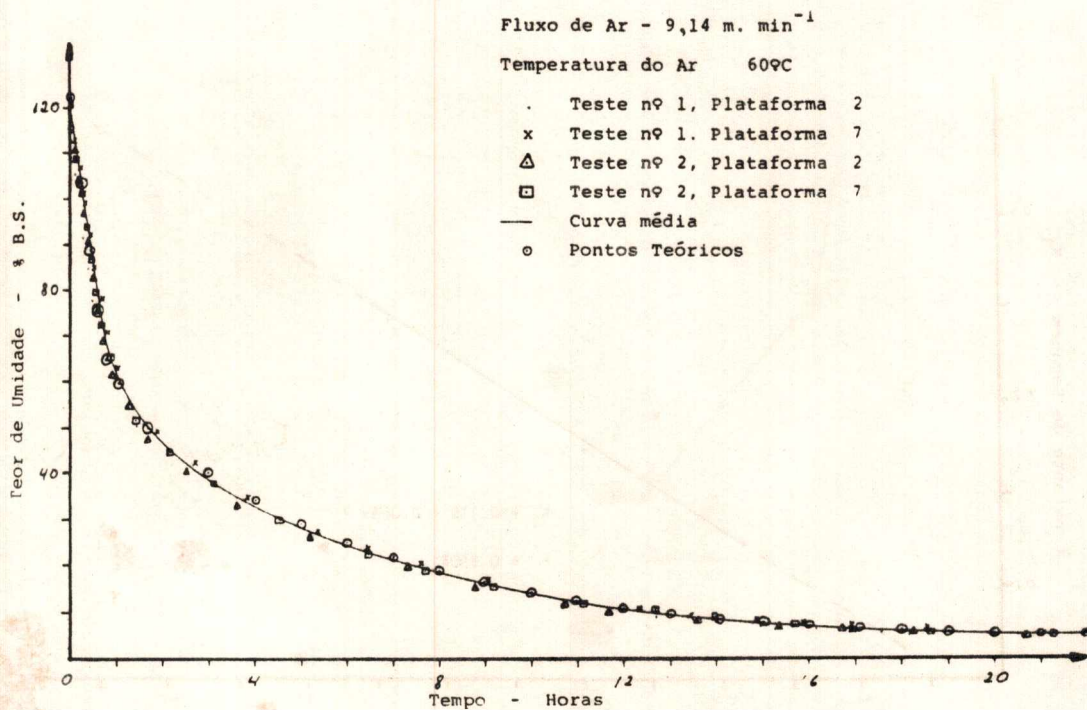


FIGURA 7 - Curva de Secagem para Amêndoas de Cacau.

4.1.2. Relação entre Temperatura (T), Umidade de Equilíbrio (Me) e Constante de Secagem (K)

Do Quadro 2, foi inicialmente investigada a relação entre umidade de equilíbrio (Me) e temperatura (T) e a Figura 8 plotou uma linha reta.

Plotando a constante de secagem (K_1) em função da temperatura (T), ou tra linha reta foi obtida na Figura 9.

Um terceiro gráfico, relacionando a constante de secagem (K_1) e a umidade de de equilíbrio (Me), foi feito na Figura 10 e uma terceira linha reta foi obtida.

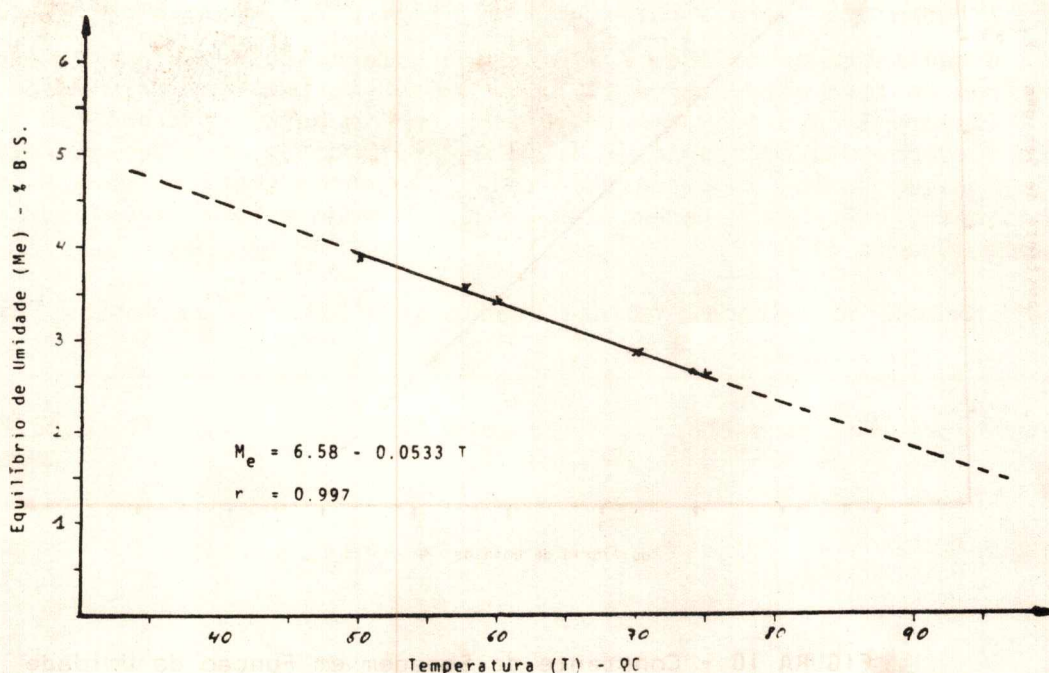


FIGURA 8 - Equilíbrio de Umidade para Amêndoas de Cacau em Função da Temperatura.

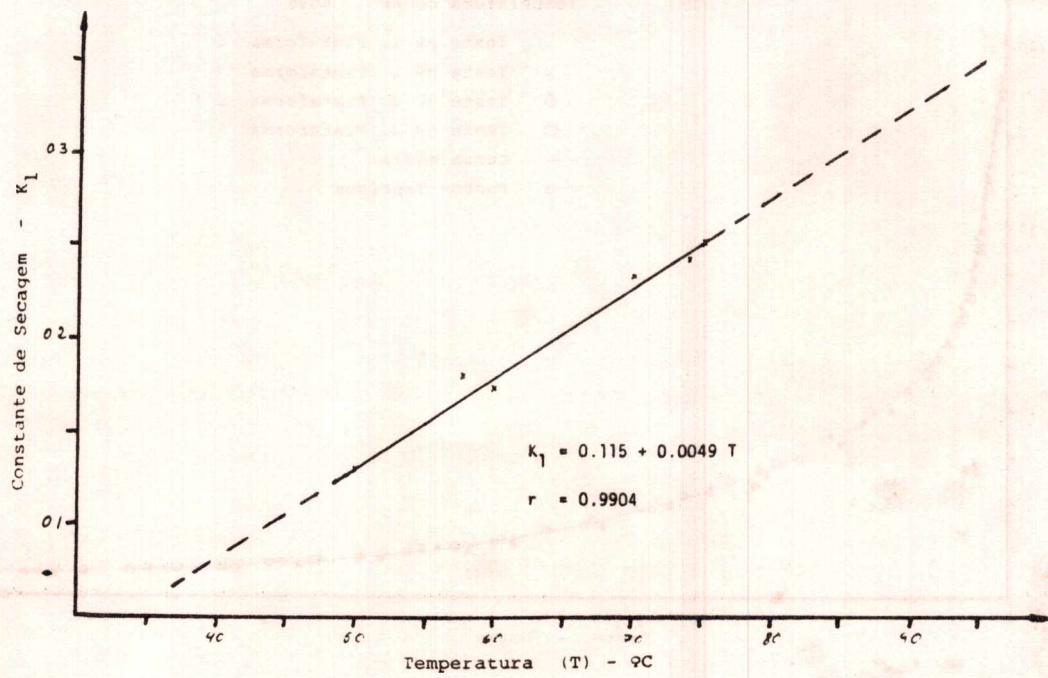


FIGURA 9 - Constante de Secagem para Amêndoas de Cacau em Função da Temperatura.

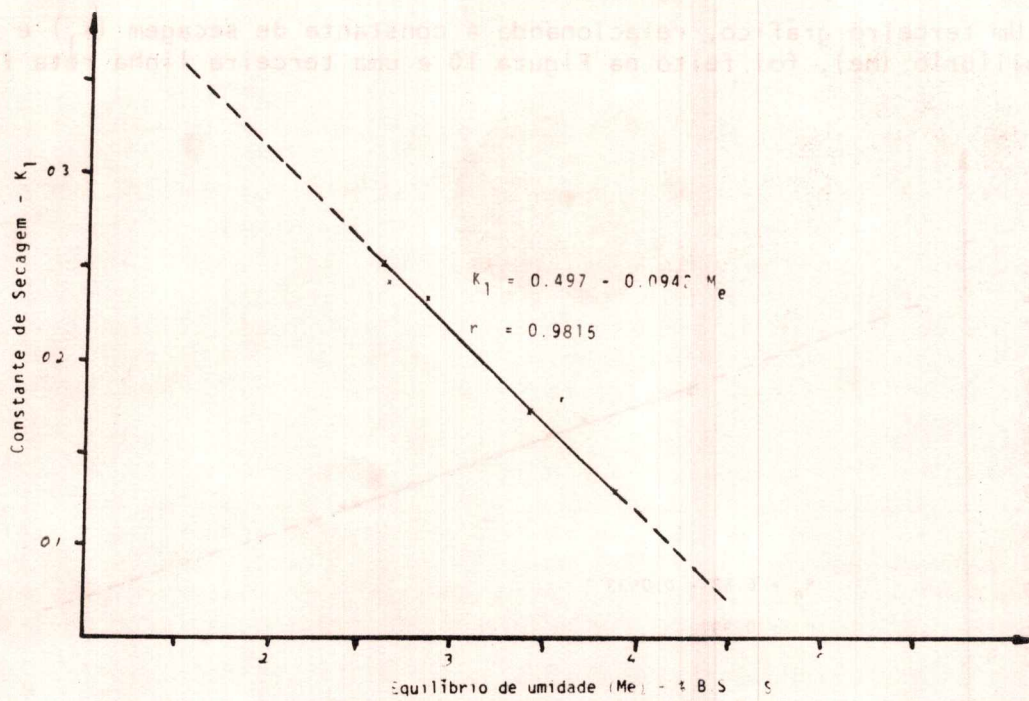


FIGURA 10 - Constante de Secagem em Função da Umidade de Equilíbrio para Amêndoas de Cacau.

A equação de regressão linear foi aplicada aos três gráficos e 3 equações foram encontradas para definir as relações entre T, Me e K_1 .

$$\begin{aligned} \text{Me} &= 6,58 - 0,0533 T && \text{Eq. 5} \\ K_1 &= 0,115 + 0,0049 T && \text{Eq. 6} \\ K_1 &= 0,497 - 0,0942 \text{ Me} && \text{Eq. 7} \end{aligned}$$

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Se a porcentagem de umidade, calculada dos tempos cíclicos registrados, fosse plotada em função do tempo, haveria ao final da curva de secagem, uma discrepância com o teor de umidade final determinado na estufa. O programa computacional mencionado no parágrafo 3.2., forneceu os teores de umidade já com a discrepância corrigida.

O fluxo de ar foi bastante uniforme durante os testes, exceto para a plataforma nº 8, na qual a pressão diferencial oscilou e um fluxo de ar de $8,4 \text{ m.min}^{-1}$ foi observado ao final do teste. Isto explica o alto valor de K_1 no Quadro 2, para a temperatura de $57,7^\circ\text{C}$. Isto também explica a maior discrepância deste ponto, da linha reta, nas Figuras 8, 9 e 10.

A Figura 5 mostra as curvas de secagem como sendo uma função da temperatura. Os resultados obtidos concordaram com os encontrados por BRAVO e MCGRAW (1974), mostrando três períodos de secagem diferentes. O primeiro, um período de taxa de secagem quase constante, e o terceiro, um período de taxa de secagem decrescente (o mais destacado deles). O segundo período teve uma duração muito curta, podendo mesmo ser considerado como um estágio de transição do primeiro para o terceiro período e pode ser melhor apreciado quando a taxa de teor de umidade é plotada em função do tempo no papel semi-logarítmico, Figura 6.

5.1. Correlação entre Curva Experimental de Secagem e Teorias de Secagem Existentes

Quando os valores de K_1 foram usados para calcular os valores teóricos, para toda a sua extensão, a curva teórica não se correlacionou bem com a curva experimental.

Todavia, quando o ponto de transição entre a taxa constante e a taxa decrescente de secagem foi considerado e valores diferentes de K foram tomados para cada período, Quadro 2, contanto que o teor de umidade inicial para cada período tenha sido tomado convenientemente (Quadro 3), os pontos teóricos calculados para cada período separadamente, correlacionaram-se muito bem com o período experimental respectivo, Figura 7.

De fato, três valores para K e três correlações deveriam ser feitas, para cada curva de secagem. Entretanto, o segundo período foi tão curto que o melhor procedimento foi prever os valores teóricos para o primeiro e terceiro períodos e uni-los usando uma curva flexível. O ponto de transição tomado arbitrariamente deve ser escolhido convenientemente como um ponto intermediário entre o fim do período de taxa constante e o começo do de taxa decrescente de secagem.

Em geral, o erro entre as curvas experimentais e teóricas foi sempre inferior a 2% do teor de umidade para todas as temperaturas usadas.

O ponto de transição, Quadro 3, não manteve uma correlação com o teor de umidade ou temperatura e significou que uma média de 1,5 horas de secagem foi omitida no começo do experimento, de maneira a correlacionar a equação 4 com o período de taxa de secagem decrescente.

Considerando-se um fluxo de ar de $9,14 \text{ m.min}^{-1}$, predições de tempo de secagem poderão ser feitas para amêndoas de cacau, usando-se a equação 1, considerando-se: a) cada período de secagem separadamente (taxa constante e taxa de crescente de secagem), contanto que valores apropriados de M_0 , M e K sejam tomados para cada período, ou; b) somente o período de taxa decrescente, adicionando-se ao tempo calculado uma média de 1,5 horas. Valores para M_e e K_1 , para o período de taxa decrescente, poderão ser lidos nas Figuras 8 e 9 ou calculados das equações 6 e 7, respectivamente, de acordo com a temperatura.

5.2. Relação entre Temperatura (T), Umidade de Equilíbrio (M_e) e Constante de Secagem (K)

A constante de secagem para o período de taxa constante de secagem (K_2) Quadro 2, não apresentou correlação com a temperatura. Os dados analisados estatisticamente resultaram em uma pobre correlação.

As equações 6 até 8 foram determinadas graficamente devido ao arranjo dos pontos em uma linha reta, Figuras 8 até 10, respectivamente. As duas primeiras equações definem a umidade de equilíbrio (M_e) e constante de secagem (K_1) como uma função da temperatura. A terceira equação define K_1 como uma função de M_e . Elas podem ser usadas para prever valores de M_e e K_1 de acordo com variações de temperatura, para fluxo de ar de $9,14 \text{ m.min}^{-1}$.

As equações devem ser testadas com outras amostras de cacau para saber até quando poderemos estendê-las às outras partidas de amêndoas de cacau desde quando elas deverão ser usadas para material biológico.

6. CONCLUSÕES

As curvas de secagem em camada delgada para amêndoas de cacau concordaram com pesquisas anteriores apresentando: três períodos distintos de secagem, período de taxa constante e dois períodos diferentes de taxa decrescente de secagem e, também, uma dependência de temperatura.

A equação 1, que define a curva de secagem em camada delgada, aplicada separadamente a dois períodos diferentes de secagem (período de taxa constante e de taxa decrescente), considerando-se valores apropriados da constante de secagem (K) e teor de umidade inicial (M) para cada período, predisse de maneira consistente uma correlação entre as curvas teóricas e as curvas experimentais de secagem para amêndoas de cacau.

Os valores da umidade de equilíbrio (M_e) e constante de secagem para o período de taxa decrescente de secagem (K_1) foram uma função da temperatura, assim como a constante de secagem (K_1) foi uma função da umidade de equilíbrio (M_e) e suas relações foram expressas em três equações de regressão diferentes (6, 7 e 8).

7. AGRADECIMENTOS

Os testes de secagem em camada delgada foram feitos devido à disponibilidade de um Secador de Unidades Múltiplas (Multi-Unit Drier), no National Institute of Agricultural Engineering (N.I.A.E.), gentilmente cedido por seu Diretor.

O autor agradece ao Dr. M.E. NELLIST pela ajuda no uso dos programas de computador para processamento dos dados.

Muito agradece, também, ao Sr. M. HUGHES, pela assistência nas determinações dos teores de umidade das amostras.

LITERATURA CITADA

- ALLISON, H.W. and KENTON, R.H. "Mechanical drying of cocoa". *Trop. Agric. Trin.* Vol. 41, No. 2, Apr., pp 115-119. 1964.
- BRAVO, A. and McGAW, D.R. "Fundamental artificial drying characteristics of cocoa beans". *Trop. Agric. Trin.*, Vo. 51, No. 3, July.
- DE VOS, L. "Artificial drying of cocoa". Landbouwproef Station in Suriname. Bull. No. 73. 1956.
- GHOSH, B.N. and CUNHA, J. "Effect of season on sun drying of cocoa beans in Brazil". *Turrialba, Oct./Dec.*, 12(4): 396-403. 1975.
- GREIG, D.J. "The determination of rate constant in the thin layer drying of agricultural crops". *J. Agric. Engng. Res.*, 15(2): pp. 106-110. 1970.
- HALL, C.W. "Drying farm crops". The AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut.
- HAYNES, D.W.M. "Cocoa drying". *Malaya Agric. J.*, 41(2): pp. 88-96. 1958.
- HOWAT, G.R., POWELL, B.D. and WOOD, G.A.R. "Experiments on cocoa drying and fermentation in West Africa". *Trop. Agric. Trin.*, 34, No. 4, Oct., pp. 249-259. 1957.
- NELLIST, M.E. "The drying of ryegrass seeds in deep layers". A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Newcastle-upon-tyne, Vol. 1 and 2.
- NEWTON, K. "Cocoa drying with the lister moisture extraction unit". *Papua and New Guinea Agric. J.*, 16(2,3), pp. 91-102. 1963
- ROHAN, T.A. "Processing of raw cocoa for the market". F.A.O. Agricultural Studies, No. 60. 1963.
- SALZ, A.G- "Cocoa processing a practical approach to fermenting and drying", In Conference on Cocoa and Coconuts, *Proceedings, Kuala Lumpur*, pp 181-218. 1972,
- SHELTON, B. "Artificial drying of cocoa beans". *Trop. Agric. Trin.*, Apr., Vol. 44, No. 2, pp. 125-132. 1971.
- WOOD, G.A.R. "Cocoa drying". *Planter*, 47, pp 449-454. 1971.
- WOOD, G.A.R. "Experiments on cocoa drying in the Camerrooms". *Trop. Agric. Trin.*, 38, No. 1, Jan. 1961.