

BRAGANTIA

Boletim Técnico da Divisão de Experimentação e Pesquisas
INSTITUTO AGRONÔMICO

Vol. 6

Campinas, Fevereiro de 1946

N.º 2

ENSAIOS SÔBRE A SECAGEM DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS

(PELO AR QUENTE)

André Tosello

INTRODUÇÃO

A secagem pelo ar quente, por ser a mais econômica e de maior rendimento, é a mais difundida. Apesar disto, não está suficientemente conhecida, a julgar pelos numerosos tipos de secadores que são construídos sem o menor conhecimento técnico do problema.

No relatório do Instituto Agronômico de 1894-1895 existe um bem elaborado trabalho de Dafert e Rivinus (1) sôbre a secagem do café. Já naquele tempo Dafert e Rivinus escreviam--- “o problema da secagem artificial ainda não está resolvido e nem o será pelos reclames e experiências públicas”. Parece-nos que poucos se deram ao trabalho de ler as experiências dêstes dois ilustres cientistas.

Neste trabalho dividimos o assunto em 3 partes : Na primeira fizemos uma análise teórica da secagem pelo ar quente, estabelecemos as fórmulas de aplicação imediata e introduzimos dois novos conceitos : o rendimento térmico em função do calor total do ar quente e o rendimento teórico da secagem do grão ; nas segunda e terceira partes estudamos a secagem do café e da mamona, respectivamente.

Convém assinalar que os resultados dêstes ensaios não são definitivos. Galileo, um dos maiores gênios da humanidade, adotou como lema da sua querida Academia del Cimento a bem significativa frase --- “provando e riprovando”.

O PROBLEMA GERAL DA SECAGEM PELO AR QUENTE

A secagem, por êste processo, baseia-se na propriedade pela qual aumentando-se a temperatura do ar úmido a sua umidade relativa di-

minui, e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta.

Suponhamos, num dado momento, que o ar ambiente possua as características seguintes :

temperatura — t_0

umidade relativa — $\frac{f_0}{F_0} = \varphi_0$

pressão atmosférica — H_0

Êste ar passando através de um aquecedor (fornalha, resistência elétrica, tubos de vapor, etc.) eleva a sua temperatura e, por conseguinte, abaixa seu estado higrométrico. Para que o ar seja introduzido no secador, geralmente, força-se a sua circulação, por meio de um ventilador, e modifica-se a sua pressão. Dêsse modo, num instante dado, as novas características do ar passam a ser :

temperatura — t_1

umidade relativa — $\frac{f_1}{F_1} = \varphi_1$

Pressão — H_1

Após ter permanecido em contacto com o produto a secar, o ar sai do secador com uma temperatura menor, em virtude de ter absorvido uma certa porção de umidade do produto, o seu estado higrométrico se torna bem mais elevado, e sua pressão volta a ser a reinante na atmosfera. Sejam as seguintes, as condições do ar na saída do secador num instante dado :

temperatura — t_2

umidade relativa — $\frac{F_2}{F_2} = \varphi_2$

Pressão — $H_2 = H_0$

A secagem, geralmente, é uma operação demorada, leva algumas horas e, por isso, as condições do ar ambiente e de aquecimento do mesmo se tornam quantidades variáveis. Nestas condições, os dados anteriores não devem ser tomados como constantes e sim como variáveis dependentes do tempo.

Analisemos, separadamente, cada elemento a fim de estabelecer as dependências existentes entre os mesmos.

1. Temperatura

Vamos admitir a temperatura do ar ambiente -- t_0 como uma variável dependente apenas do tempo. A temperatura t_1 evidentemente depende de t_0 e das condições do aquecedor e até certo ponto pode ser regulada pelo operador.

Para o estudo do secador e da secagem não nos interessa a dependência de t_1 em relação ao aquecedor ; vamos admitir t_1 como uma função do tempo Θ unicamente.

Façamos então :

$$t_0 = f_0 (\Theta)$$

$$t_1 = f_1 (\Theta)$$

$$t_2 = f_2 (\Theta)$$

Por meio de três termômetros e com a observação de suas temperaturas, em intervalos de tempos pequenos, pode-se construir as curvas representativas dessas funções.

2. Estado higrométrico

A umidade relativa do ar ambiente φ_0 — é uma função do tempo Θ . Conhecendo-se aquêlê elemento pode-se conhecer a umidade relativa φ_1 do ar quente à temperatura t_1 pela fórmula :

$$\varphi_1 \frac{F_1}{H_1} = \varphi_0 \frac{F_0}{H_0}$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 \frac{F_0}{F_1} \frac{H_1}{H_0}$$

em que F_0 é a tensão máxima do vapor à temperatura ambiente t_0 , e F_1 tensão máxima à temperatura do ar quente t_1 . A pressão do ar úmido H_1 é uma função de H_0 e da pressão total p_1 do ar no tubo de entrada do secador. Podemos escrever :

$$H_1 = H_0 + p_1$$

geralmente, p_1 é dado em milímetros de água e H_0 em milímetros de mercúrio, e, por isso :

$$\frac{H_1}{H_0} = \frac{H_0 + \frac{p_1}{13,6}}{H_0} = \frac{13,6 H_0 + p_1}{13,6 H_0} \quad (1)$$

F_0 e F_1 sendo funções das temperaturas t_0 e t_1 respectivamente, podemos então escrever :

$$\begin{aligned} F_0 &= F(t_0) \\ F_1 &= F(t_1) \end{aligned} \quad \varphi_1 = \varphi_0 \frac{F(t_0)}{F(t_1)} \frac{13,6 H_0 + p_1}{13,6 H_0}$$

O ar úmido na saída do secador possui um estado higrométrico φ_2 à temperatura t_2 . Se quisermos saber o seu estado higrométrico φ'_2 reduzido à temperatura de entrada t_1 , temos :

$$\varphi'_2 \frac{F_1}{H_1} = \varphi_2 \frac{F_2}{H_2}$$

$$\varphi'_2 = \varphi_2 \frac{F_2}{F_1} \frac{H_1}{H_2}$$

$$\varphi'_2 = \varphi_2 \frac{F(t_2)}{F(t_1)} \frac{13,6 H_0 + p_1}{13,6 H_0}$$

3. A umidade retirada pelo ar quente

Sabemos que a quantidade de vapor d'água contida num kg de ar sêco entrado no secador é dada pela expressão :

$$P_{v1} = 0,623 \frac{\varphi_1 F_1}{H_1 - \varphi_1 F_1} = 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0}$$

No ar de saída do secador teríamos :

$$P_{v2} = 0,623 \frac{\varphi_2 F_2}{H_0 - \varphi_2 F_2}$$

Num momento dado, o ar úmido retira, por kg de ar sêco, a seguinte quantidade de umidade do produto :

$$P_{v2} - P_{v1} = 0,623 \left(\frac{\varphi_2 F_2}{H_0 - \varphi_2 F_2} - \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} \right)$$

simplificando vem :

$$P_{v2} - P_{v1} = 0,623 \frac{H_0 (\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0)}{(H_0 - \varphi_2 F_2) (H_0 - \varphi_0 F_0)} \quad (2)$$

ou também :

$$P_{v_2} - P_{v_1} = 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F(t_2) - \varphi_0 F(t_0)}{[H_0 - \varphi_2 F(t_2)] [H_0 - \varphi_0 F(t_0)]}$$

Esta expressão demonstra que : $p_{v_2} - p_{v_1}$, quantidade de vapor retirada do produto, por kg de ar seco entrado no secador, é uma função dos valores :

$$H_0, \varphi_0, t_0, \varphi_2 \text{ e } t_2$$

H_0 — pressão atmosférica é uma função do tempo Θ , e de outro lado, sabemos que :

$$t_0 = f_0(\Theta)$$

$$t_1 = f_1(\Theta)$$

$$t_2 = f_2(\Theta)$$

os estados higrométricos do ar φ_0 e φ_2 são variáveis e que, em última análise, dependem também de Θ . Todas estas variáveis dependentes de Θ substituídas em (2) nos vão dar uma expressão do tipo :

$$P_{v_2} - P_{v_1} = K. \Psi^*(\Theta)$$

em que K é uma constante e $\Psi^*(\Theta)$ uma função de Θ .

De um modo geral, a função $\Psi^*(\Theta)$ é de determinação difícil, porquanto depende de várias outras funções cujos tipos são extremamente variáveis com o tempo Θ . Este problema, porém, pode ser facilmente resolvido graficamente, como veremos mais adiante.

A quantidade de ar úmido entrada no secador pode ser determinada em cada instante, desde que se conheça a sua velocidade no momento considerado. A determinação da velocidade pode ser feita, diretamente, por meio de um anemômetro ou, indiretamente, conhecendo-se a pressão dinâmica do ar.

Sendo a pressão dinâmica do ar p_d , num momento dado, podemos achar a velocidade pela fórmula conhecida :

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

em que h é a altura em metros de ar correspondente a p_d em milímetros de água. Entre h e p_d existe a seguinte relação :

$$h \times \psi = P_d \times 1 \quad h = \frac{P_d}{\psi}$$

em que ψ é o pêsso específico do ar úmido, que é dado pela expressão :

$$\psi = 1,293 \frac{1}{1 + \alpha t} \frac{H_1 - 0,377 f_1}{H_1} \cong 353 \frac{H_1 - 0,377 f_1}{(273 + t_1) H_1}$$

Portanto, temos :

$$h = \frac{P_d}{353} \frac{(273 + t_1) H_1}{H_1 - 0,377 f_1}$$

ou, ainda :

$$V \cong 0,236 \sqrt{p_d \frac{H_1 (273 + t_1)}{H_1 - 0,377 f_1}}$$

De outro lado temos

$$f_1 = \varphi_1 F_1$$

$$f_1 = \varphi_0 \frac{F_0}{F_1} \frac{H_1}{H_0} F_1$$

que, substituído em v , nos dá :

$$V = 0,236 \sqrt{p_d \frac{H_0 (273 + t_1)}{H_0 - 0,377 \varphi_0 F_0}}$$

que é a fórmula da velocidade de entrada do ar quente e úmido no secador, num momento dado.

Sendo S a secção de entrada do ar no secador, a quantidade de ar entrada no mesmo, num instante dado, é :

$$Q = 0,236 S \sqrt{p_d \frac{H_0 (273 + t_1)}{H_0 - 0,377 \varphi_0 F_0}}$$

O que interessa para o cálculo é a quantidade de ar sêco, em pêsso, contida nesta expressão.

Sabemos que o pêsso p_a de ar sêco contido num metro cúbico de ar úmido é dado pela expressão :

$$P_a = 1,293 \frac{1}{1 + \alpha t} \frac{H_0 - f_0}{H_0}$$

ou simplificando :

$$P_a = \frac{353}{273 + t_1} \left\{ 1 - \frac{\varphi_0 F_0}{H_0} \right\}$$

Finalmente, a quantidade, em quilogramas, de ar sêco entrada no secador é :

$$Q = Q_1 \times P_a \cong 83.3 \text{ S } \sqrt{\frac{p_d (H_0 - \varphi_0 F_0)^2}{H_0 (273 + t_1) (H_0 - 0,377 \varphi_0 F_0)}}$$

Nota-se imediatamente que Q é uma função das variáveis H_0 , φ_0 , t_0 , t_1 e p_d , as quais são, como já vimos, funções do tempo Θ . Sintetizando podemos escrever :

$$Q = K_1 \cdot \chi (\Theta)$$

A quantidade de ar sêco entrada no secador no fim de um tempo elementar $d\Theta$, será :

$$dQ = K_1 \cdot \chi (\Theta) \cdot d\Theta$$

e a quantidade de vapor d'água retirada do produto, nesse intervalo de tempo, será :

$$d_p = K_1 \chi (\Theta) \cdot (p_{v2} - p_{v1}) \cdot d\Theta$$

$$d_p = K \cdot K_1 \cdot \chi (\Theta) \cdot \Psi (\Theta) \cdot d\Theta$$

Durante o intervalo de tempo compreendido entre Θ_1 e Θ_2 , a quantidade total de vapor d'água retirada do produto, será :

$$P = K K_1 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \chi (\Theta) \cdot \Psi (\Theta) \cdot d\Theta$$

Admitindo-se que o produto a secar tenha entrado no secador com um grau de umidade igual a h_1 e após $\Theta_2 - \Theta_1$ unidades de tempo tenha-se reduzido a h_2 , temos :

$$h_1 = \frac{P_1 - P_0}{P_0} 100$$

$$h_2 = \frac{P_2 - P_0}{P_0} 100$$

em que P_2 , P_1 e P_0 são os pesos dos produtos a secar nos momentos Θ_2 , Θ_1 e Θ_0 respectivamente. A quantidade de água retirada quando o grau de umidade baixa de h_1 para h_2 , será então :

$$\frac{h_2 - h_1}{100} P_0 = P_2 - P_1$$

Devemos ter :

$$\frac{h_2 - h_1}{100} P_0 = P_2 - P_1 = KK_1 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \Psi (\Theta) \chi (\Theta). d\Theta$$

4. Calor necessário à secagem

Sabemos que a quantidade de calor total contida num volume de ar úmido que possui um quilograma de ar sêco é dada pela fórmula :

$$q_1 = c_1 t + 0,623 \frac{\varphi F}{H - \varphi F} (c_2 t + 595)$$

em que : c_1 e c_2 são os calores específicos do ar e do vapor, respectivamente, à pressão H e à temperatura do ensaio.

Podemos, ainda, escrever :

$$q_1 = c_1 t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} (c_2 t_1 + 595)$$

esta fórmula nos dá a quantidade de calor, por kg de ar sêco, entrada no secador, a qualquer momento.

Sendo, como é fácil notar, q uma função de Θ , podemos escrever :

$$q_1 = K_2 \Sigma (\Theta)$$

A quantidade de calor entrada no secador no fim de um tempo $d\Theta$, será :

$$dq_1 = K_1 K_2 \Sigma (\Theta). \chi (\Theta). d\Theta$$

No intervalo de tempo compreendido entre Θ_1 e Θ_2 o calor total entrado no secador será :

$$q = K_1 K_2 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \Sigma (\Theta). \chi (\Theta). d\Theta$$

5. Quantidades de calor absorvidas

a) *Para evaporar a água contida no produto*

O produto foi colocado no secador com uma percentagem de umidade h_2 e saiu com h_1 , e, nestas condições, a perda de água é, como já vimos :

$$P = P_2 - P_1 = \frac{h_2 - h_1}{100} P_0$$

O calor necessário para evaporar a quantidade $P = P_2 - P_1$ de água é dado pela expressão :

$$Q_1 = P [(c_2 \times t_m + 595) - (1 \times t_e)]$$

em que t_m é a temperatura média de secagem e t_e a temperatura exterior.

b) *Calor necessário para elevar a temperatura da massa do estado inicial para a de regímen de trabalho :*

$$Q_2 = P_0 c (t_m - t_e)$$

c) *Calor necessário para aquecer o secador*

Sendo G o pêsô do secador e c_s o seu calor específico, isto é, o calor específico do material componente do secador, pode-se admitir que, depois de algum tempo, as suas paredes internas estejam à mesma temperatura que o produto e as externas à temperatura ambiente.

Podemos escrever então : —

$$Q_3 = G. c_s \left\{ \frac{t_m + t_e}{2} - t_e \right\} = G. c_s \frac{t_m - t_e}{2}$$

d) *Calor perdido pela irradiação :*

$$Q_4 = k S (t_m - t_e) \Theta$$

em que S é a superfície das paredes, k o coeficiente de transmissão Θ o número de horas de duração do ensaio.

e) *Rendimento total do secador*

Sendo τ este valor, devemos ter :

$$\tau = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}$$

donde se vê que, quanto menores os valores de Q_2 , Q_3 e Q_4 , tanto maior o rendimento do secador.

A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO NA SECAGEM

As qualidades intrínsecas do produto influem grandemente não só no tempo como no rendimento da secagem. As principais características do produto que exercem influência sobre a secagem são : grau de umidade inicial do produto, peso específico, calor específico, forma e dimensões, estrutura, etc.

Analisemos, separadamente, a ação de cada um destes fatores na secagem.

1. Grau de umidade inicial

Sabe-se que a água contida no produto a secar (café, mamona, mandioca, cereais, etc.) está sob três formas : água livre ou de capilaridade, água de constituição e água de composição. As duas primeiras podem ser removidas pela secagem, a última, não. Quando se fala em grau de umidade deve-se entender como sendo somente a água sob as duas primeiras formas.

A mais fácil de ser retirada pela secagem é a água de capilaridade. Em virtude de possuir mobilidade, as partes mais secas do material absorvem das partes mais úmidas esta forma de água. Este fenômeno também se dá com a água de constituição, porém com muito mais lentidão. Nestas condições, depois que toda a água de capilaridade fôr retirada pela secagem, a operação se torna muito mais lenta, porque a água de constituição, sendo pouco móvel, as partes internas do corpo permanecem ainda úmidas, enquanto as externas já estão secas. Este é o motivo por que na secagem rápida (artificial) o produto se apresenta heterogêneo. O produto será tanto mais homogêneo quanto maior o tempo gasto para secá-lo. Seria aconselhável, quando possível, efetuar a seca parceladamente, isto é : o produto é seco até um certo grau, em seguida retirado do secador para que a seca continui lentamente até seu término. O des-

canço do produto parcialmente sêco só será eficiente após a extração de tôda a água de capilaridade. É, portanto, de máxima importância conhecer-se a quantidade de água livre contida no produto.

De um modo geral, os produtos agrícolas contêm uma percentagem de água de constituição variável de 35% dependendo da natureza do produto.

Outro fator importante a se conhecer na umidade do produto é (principalmente tratando-se de secagem com o fim de conservação) a percentagem de umidade máxima que pode conter sem estar sujeito a fermentações prejudiciais. No caso do café, êste é um ponto de grande importância, porque uma vez constatado que com 20% de umidade, por exemplo, pode ser armazenado sem sofrer fermentações prejudiciais, a seca poderia ser feita até êste ponto.

Nestas condições, o conhecimento da umidade inicial do produto é de grande importância, visto que se pode ter uma idéia da marcha a seguir na secagem. Um produto que entra no secador com grande percentagem de umidade conterà, naturalmente, grande percentagem de água livre e, nestas condições, a secagem será mais demorada, mas, com maior rendimento. Êste será tanto maior quanto maior a quantidade de água livre contida no produto. De outro lado, quanto maior a percentagem de água livre, tanto menor deve ser a temperatura de secagem, para que o produto não se altere, como veremos mais adiante.

2. Pêso específico

Temos a considerar o pêso específico absoluto e o pêso específico aparente do produto. Ambos têm grande influência sôbre as condições de secagem. Os produtos de maior pêso específico absoluto são mais difíceis de serem secos, porque, em geral, possuem maior percentagem de água de constituição que é mais difícil de ser retirada. Sendo mais pesado, o produto é mais duro e mais compacto o que dificulta a condutibilidade calorífica trazendo, como consequência, uma maior heterogeneidade na seca. O pêso específico absoluto maior, exige uma maior quantidade de calor para se atingir uma dada temperatura, pois a quantidade de calor absorvida por um corpo para se aquecer é função linear da massa do corpo e do seu calor específico.

O pêso específico aparente tem influência não só sôbre a capacidade de secagem do secador como sôbre a própria marcha da secagem. Sendo o secador um corpo com capacidade limitada para um dado volume de material, é evidente que, quanto maior o pêso específico aparente do produto, maior é a massa que se pode colocar no secador e isto é um fator de aumento de rendimento. De outro lado, os produtos de pêso específico aparente grande, dão massas muito compactas, o que aumenta a resistência oferecida à passagem do ar quente através das mesmas. Nestas condições, necessita-se de maior pressão de ar e, conseqüentemente, maior potência do ventilador.

3. Calor específico

Já vimos que a quantidade de calor absorvida pelo corpo para se aquecer varia linearmente com o seu calor específico. Ora, é evidente que na secagem a ar quente a umidade é retirada do produto mediante o contacto dêste como uma porção daquele. Durante êste contacto o produto absorve calor do ar quente para elevar a sua temperatura do estado inicial à reinante no interior do secador. A quantidade de calor absorvida pelo corpo para se aquecer é uma perda, porém inevitável; dêsse modo, quanto menor êste valor, tanto maior o rendimento da secagem. De outro lado os corpos de maior calor específico, armazenando uma maior quantidade de calor para atingirem uma dada temperatura, levarão um tempo mais longo para resfriar. Nestas condições, a massa ficará sujeita a menores oscilações de temperatura pelas mudanças bruscas da temperatura de entrada do ar.

4. Forma e dimensões

A rapidez e perfeição da seca dependem, principalmente, da forma do produto. É claro que, quanto maior a superfície do corpo exposta ao ar, tanto maior é a rapidez da evaporação da água nêle contida. Os corpos achatados, neste particular, levam vantagem sôbre os esféricos. De outro lado, êstes aquecem mais uniformemente.

As dimensões têm influência sôbre o pêso específico aparente. Os produtos de dimensões menores possuem mais elevado pêso específico aparente, massa mais compacta e, por isso, oferecem maior resistência à passagem do ar quente. Em certos casos de produtos a granel, as dimensões dos grãos são tão pequenas, que se produz uma vedação completa da passagem do ar através da massa, dificultando grandemente a secagem. De outro lado, as dimensões exageradas são prejudiciais, porquanto a massa do produto se torna muito pouco compacta e o ar a atravessa rapidamente sem tempo de ficar em contacto suficiente para promover a retirada da umidade.

5. Estrutura

Aqui êste termo deve ser tomado no sentido mais genérico do que específico. Os corpos que possuem uma estrutura uniforme, como, por exemplo, os cereais, são de marcha mais estável na secagem. Esta se processa uniformemente desde o início até o fim da seca. (desde que se considere o que já foi dito com relação às formas de água existentes no produto). Além disso, êstes produtos tornam mais fácil o reconhecimento do seu ponto de seca, pela simples aparência dos mesmos.

Os produtos de estrutura heterogênea, como, por exemplo : café em côco, que é constituído de casca, pergaminho e semente, cada qual tendo percentagem de umidade diferente e a mamona, que também possui as três camadas referidas com os mesmos caraterísticos em grau mais acentuado, exigem uma assistência mais frequente durante a secagem e mesmo mais prática para se conhecer, pela aparência, o ponto de seca, pois enquanto uma das camadas está sêca, a outra pode estar completamente úmida.

6. Homogeneidade

A perfeição da seca só pode ser obtida na secagem artificial quando o produto é homogêneo, isto é, quando os corpos estão mais ou menos com o mesmo grau de umidade. Êste fato torna-se de muito maior importância quando o produto é destinado à alimentação do homem, como é o caso do café. Êste é um dos mais sensíveis às pequenas variações do estado de seca. O caso mais comum, na prática, é apresentar-se um produto heterogêneo e nestas condições, como já tivemos oportunidade de dizer, a homogeneização só poderia ser obtida numa secagem lenta ou numa secagem parcelada.

Tomemos o caso do café para exemplificar. Êste produto é colhido entre nós com grãos verdes, maduros (cerejas), meio sêco (passa) e ressecados (coquinho). Cada um dêstes componentes apresenta graus de umidade diferentes que variam desde 70% até 16%. Ê evidente que êste produto, sêco no secador em condições normais, não pode produzir um resultado idêntico ao que teria se fôsse sêco lentamente, isto porque, enquanto um grão de café que contém 70% de água, fica em contacto do ar quente t horas, o grão que contém 16% de água passará do ponto ótimo de seca tornando-se um café ressecado. Seria de grande conveniência que antes da secagem se fizesse uma separação prévia do produto com o fim de grupar os grãos que possuem teores de umidade mais ou menos próximos. Com esta operação facilitar-se-ia grandemente a secagem. O ideal seria a separação completa do cerêja, "passa" e "coquinho". Atualmente, isto, em parte, é possível por meio dos separadores de café em côco (5).

A massa sendo constituída de material heterogêneo não se deve secá-la completamente no secador, pois, neste caso, o produto obtido seria muito heterogêneo, sem possibilidade de se poder homogeneizá-lo. Deve-se proceder de uma das seguintes maneiras :

a) Secagem mais ou menos lenta até atingir o grau máximo de umidade que o produto pode suportar armazenado, sem prejuízo para a sua conservação, pois assim o término da secagem será natural.

Durante o armazenamento, as partes mais sêcas, em contacto com as partes mais úmidas, absorvem umidade, tornando mais homogênea a massa.

b) Secagem rápida até um certo ponto, em seguida o produto é retirado do secador e fica armazenado, depois volta novamente ao secador e assim por diante até completar a seca. É evidente que, neste caso, se deve dispor de instalações apropriadas e o serviço se torna mais complicado e a operação mais onerosa.

A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA SECAGEM SÔBRE O PRODUTO

Estudando o problema inverso, de certo modo, já tivemos oportunidade de tocar em muitos pontos da influência que a secagem pode ter sôbre a qualidade do produto. Os principais elementos que caracterizam as condições do ar quente para a secagem são : temperatura — pressão — estado higrométrico do ar no interior do secador.

1. Temperatura

É a temperatura o fator mais importante na secagem dos produtos agrícolas. O seu contrôle deve ser realizado em todo o transcorrer do ensaio a fim de que se tenha não só a temperatura do produto como também a quantidade de calor entrada no secador. Temos a distinguir diversas temperaturas, a saber : temperatura de entrada do ar no secador, temperatura do produto, e temperatura do ar que sai do secador. A primeira e a última se relacionam mais com a quantidade de calor absorvida para evaporar a água contida no produto. A outra influencia grandemente as qualidades do produto.

Numerosos autores são unânimes em afirmar que, quanto mais úmido o produto, tanto menor deve ser a temperatura de secagem. Estas afirmativas têm sido contraditadas por alguns autores. O que os fatos demonstram claramente é o seguinte : quanto maior a quantidade de água livre contida no produto, tanto menor deve ser a temperatura de secagem.

A explicação desta última afirmativa parece ser a seguinte : a água livre funciona como um verdadeiro dissolvente, de modo que, quanto maior a sua temperatura, tanto maior será o seu poder dissolvente. Pela evaporação da água, os dissolvidos se vão acumulando na periferia do produto. Dêsse modo há uma verdadeira imigração do centro para a periferia dos produtos que são facilmente solúveis na água quente. A água de constituição, também funciona como dissolvente, porém, sendo imóvel, o fenômeno não será prejudicial. É evidente que um produto que sofreu êste fenômeno, em grande escala, estará, no fim da secagem, bastante alterado.

Pelo que acabamos de afirmar conclui-se que a temperatura de secagem deve ser aumentada gradativamente à medida que o produto fôr secando, até atingir o ponto de completa evaporação de tôda a água livre. Daí por diante, a temperatura poderá manter-se constante. Os secadores mais racionais são justamente aquêles em que o produto mais úmido

encontra o ar mais frio e à medida que vai sendo sêco vai ficando em contacto com o ar mais quente.

Mais do que a marcha da temperatura na secagem, importa conhecer a temperatura limite de cada produto, isto é, a máxima temperatura que o mesmo pode suportar. Naturalmente temos aqui diversos casos a considerar, pois, como já vimos, a temperatura é função da quantidade de água livre contida no produto. Para o nosso caso, vamos admitir a temperatura limite como sendo a máxima admissível pelo produto no estado inicial da secagem, isto é, com o máximo de água livre. Esta temperatura será função da própria natureza do produto, e, além disso, ela é dependente do fim para o qual se destina o produto sêco. O café, por exemplo, sendo um produto cujo preço está sujeito às condições de gôsto, cheiro, aparência, etc., terá que ser sêco nas melhores condições possíveis, isto é, a secagem artificial deve ser de tal maneira que o produto obtido tenha tôdas as propriedades de sabor, cheiro, etc., que o mesmo teria se tivesse sofrido uma secagem natural. De outro lado, a um produto como a mamona, por exemplo, que é utilizado para um fim mais grosseiro, as condições de secagem artificial não necessitam dar-lhe rigorosamente as mesmas propriedades como se a seca fôsse natural. Para a mamona, o problema consiste sômente em dar uma temperatura de secagem que não altere o óleo; quanto aos outros fatôres, como aparência, cheiro, etc., seriam, neste caso, de menor importância.

Os poucos dados existentes sôbre a temperatura de secagem dos produtos agrícolas são mais ou menos concordes em dar os valores indicados na tabela abaixo:

PRODUTO	temperatura limite	umidade inicial	umidade final
		(‰ em relação ao pêso úmido)	
Arroz	45—50°C	—	12—15 %
Feijão	45—50°C	—	12—15 %
Milho	45—50°C	—	8—12 %
Outros cereais	40—50°C	—	inferior a 15 %
Café em côco	70°C	50—60 %	17 %
Café despolpado	70°C	45—55 %	12 %
Raspa de mandioca	65°C	70—80 %	12 %
„ „ „ prens.	65°C	45—55 %	12 %
Mamona	75—80°C	60—70 %	5—10 %
Algodão	85—95°C	superior a 20 %	10—12 %
Hortalças	40—45°C	85—95 %	10—15 %
Forragens	40—45°C	70—85 %	10—15 %
Frutas em geral	35—40°C	60—80 %	12—20 %
Ovos	35—40°C	—	—
Caseína	35—40°C	—	—
Amido	35—40°C	—	—
Casulos	100°C	—	—

Pelos próprios dados da tabela nota-se que entre os produtos agrícolas há uma certa concordância na percentagem final de umidade, isto é, quantidade de água contida no produto em estado de equilíbrio com o ambiente. Estes dados demonstram, e isto parece certo, que a percentagem mínima de água admissível num produto agrícola é de 10%. Uma secagem, mais intensa, de modo a deixar o produto com menos de 10% de água, é prejudicial. Neste caso, quando não se processam transformações que alteram as condições de poder germinativo e nutritivo do produto, êste reabsorve umidade do ar a fim de restabelecer o estado de equilíbrio com o ambiente.

Com relação à umidade inicial, os poucos dados nos evidenciam que êste fator é função da qualidade do produto, e da época em que foi colhido. De um modo geral, esta percentagem é superior a 50%, exceção feita ao algodão, que raramente atinge 20%.

A maior contradição existente é sôbre a temperatura limite de secagem. Raramente há concordância entre dois autores sôbre êste fator. Estas discordâncias naturalmente devem residir no fato de que os autores fizeram determinações com produtos de características diversas. É a umidade o principal elemento que afeta a temperatura limite de secagem do corpo. O produto será tanto mais resistente à temperatura, quanto menor o seu teor de umidade.

Nos secadores modernos é possível secar o amido a temperatura de ordem de 80°C, desde que se empregue o princípio das "correntes contrárias", isto é, o ar quente caminhando em sentido contrário ao produto. Além disso, outros fatores devem influenciar, como, por exemplo, o estado de maturação, o tempo de contacto com o ar quente, etc. Os dados por nós indicados na tabela foram os mais baixos. As determinações para o café e a mamona foram feitas por nós, e êstes produtos possuíam as umidades iniciais indicadas na tabela.

2. Pressão

A pressão com que o ar quente entra no secador tem importância sôbre as condições de secagem do produto. Deve ser tal que a velocidade do ar quente seja suficiente para se colocar em contacto com o produto em condições de poder retirar o máximo de umidade. Pressões demasiadas, dão baixo rendimento, por que, além de exigirem maior consumo de energia do ventilador, provocam desperdícios de calor. De outro lado, pressões fracas fazem com que o ar quente não seja suficiente para atravessar a camada do produto no tempo necessário e provocam secagens heterogêneas.

3. Estado higrométrico do ar no interior do secador

As condições do ar dentro do secador devem ser tais, que, em seu trajeto através da massa do produto, possua máxima capacidade de ab-

sorção da unidade na entrada do secador e mínima na saída. Em outras palavras, o ar deve sair completamente saturado. A capacidade de absorção do ar é função de sua temperatura e do seu estado higrométrico. Podemos escrever que a sua capacidade de absorção C é :

$$C = f \left(\frac{t}{\varphi} \right)$$

Um exemplo : a 50°C e para $\varphi = \frac{f}{F} = 0,4$ o ar contém 33 gramas de vapor por kg de ar sêco e para $\varphi = 1$ êle terá 82,7 gramas de vapor. A diferença $82,7 - 33 = 49,7$ gramas, dará a capacidade de absorção do ar.

O SECADOR — CONDIÇÕES PARA QUE SE OBTENHA UM BOM RENDIMENTO

Teremos oportunidade de verificar mais adiante que a principal condição que o secador deve satisfazer é que o produto fique em contacto com o ar quente o tempo necessário para que êste se sature.

É evidente que se todo o ar que entrasse no secador saísse saturado, isto seria o ideal, porém dificilmente esta condição é verificada. Como é natural, esta realização está ligada aos seguintes fatores :

- a) Perfeito contacto do ar entrado com o produto.
- b) Tempo suficiente de contacto, do ar quente com o produto, a fim de que êste possa retirar o máximo de umidade.

Para solucionar êstes dois itens o engenho humano tem idealizado uma infinidade de tipos de secadores, porém nenhum, como acontece com tudo o que é humano, atingiu a perfeição. Temos estudado diversos tipos de secadores e alguns têm dado ótimo rendimento.

Para que o produto fique em contacto bem uniforme com o ar quente, um dos processos auxiliares mais práticos é movimentar a massa, e, neste caso, o mais racional é adotar-se o princípio das correntes contrárias, isto é, dar à massa um movimento em sentido contrário ao ar quente. A movimentação da massa pode ser obtida fâcilmente dando ao secador um movimento conveniente. Assim é que existem secadores cilíndricos com movimento rotativo, secadores em espirais com movimento rotativo, secadores planos com movimento retilíneo alternativo, etc. Em certos secadores, o movimento da massa é feito pela ação do seu próprio pêso.

Se o movimento da massa é um ótimo meio de se uniformizar o produto e colocá-lo em maior contacto com o ar quente, apresenta, porém, para certos produtos, quando o movimento é muito intenso, como no caso dos secadores rotativos, o inconveniente de prejudicar as condições

de secagem dos mesmos. Como exemplo, podemos citar a mandioca, que, em certos secadores, perde cêrca de 12 ou mais por cento em pêso, devido à formação de uma farinha vulgarmente denominada farelo.

As condições secundárias a que devem satisfazer os bons secadores residem nos seguintes itens :

c) O secador deve ser construído de material, tanto quanto possível, mau condutor de calor.

É evidente que esta exigência está limitada às condições da prática construtiva e à econômica. Os materiais mais indicados para a construção dos secadores são o ferro e a madeira. O primeiro é bom condutor de calor, porém de grande resistência, durabilidade e relativamente barato. O segundo é mau condutor de calor, mas é menos resistente que o ferro, menos durável e está sujeito a grandes variações pela ação do calor, o que em parte é prejudicial às condições de funcionamento do secador. Uma boa prática é vedar as superfícies expostas ao ambiente, com material isolante.

d) Quanto menor a quantidade de material empregado no secador, tanto melhor, não só pelo fato de se tornar mais leve, mais barato e mais simples a sua construção, como também por ser menor a quantidade de calor absorvida pelo mesmo para se aquecer.

Nestas condições, a madeira seria preferível ao ferro, porque embora possuindo um calor específico cêrca de três vêzes maior tem um pêso específico 10 vêzes menor. De outro lado, porém, as condições da resistência e durabilidade fazem com que o ferro seja preferido.

Além dêstes fatôres, interessam também, como elementos que tornam mais simples e cômoda a operação de secagem, os seguintes :

e) Sistema simples de carga e descarga do produto, com fácil regulagem da alimentação.

Em relação a êste ítem costuma-se classificar os secadores em : contínuos e não contínuos. Os primeiros trabalham continuamente, isto é, o produto vai secando durante o seu trajeto dentro do secador, desde o momento de sua entrada até a saída ; portanto, durante todo o transcorrer da operação o produto está sendo carregado e descarregado. Os segundos são carregados totalmente, em seguida inicia-se a operação de secagem até que todo o produto fique sêco. Neste ponto efetua-se a descarga. Faz-se nova carga, recomeça-se a secagem e assim por diante.

Os primeiros são mais rápidos e dão maior rendimento de secagem. Os segundos, porém, são de mais fácil e segura regulação da seca.

f) Outro fator importante a considerar num bom secador é a regulação da temperatura de secagem, ou de entrada do ar quente.

Já tivemos ocasião de explicar que a secagem de um mesmo produto deve ser feita a temperaturas dependentes da umidade que o mesmo encerra. Por isso torna-se necessário, durante a secagem, a regulação da

temperatura, e é evidente que, quanto mais simples êste processo, tanto melhor.

Esta operação é fàcilmente realizada na maioria dos secadores pela introdução, no tubo de entrada do ar quente, de comunicações com o ar ambiente. Pela maior ou menor introdução do ar ambiente, diminui-se ou aumenta-se a temperatura do ar de entrada no secador.

ENSAIOS SÔBRE SECAGEM DE CAFÉ

1. Determinação do calor específico do café

Fizemos dois ensaios para a determinação do calor específico do café sêco. Para isso utilizamos um recipiente do Calorímetro "Paar", construído de material bastante indicado para esta espécie de ensaio. Determinamos o coeficiente térmico do calorímetro, em gramas de água, e a média dos dois resultados, que aliás foram bastante concordantes, foi de $A = 53,5$ gramas de água.

Chamando :

m — pêso do café sêco

M — pêso da água

A — equivalente térmico do calorímetro, em gramas de água

t_1 — temperatura do café

t_2 — temperatura da água

Θ — temperatura final

c — calor específico do café

temos :

$$c = \frac{(M + A) (\Theta - t_2)}{m (t_1 - \Theta)}$$

com os dados obtidos nos dois ensaios determinamos os valores de c , cujo resultado médio foi :

$$c = 0,33$$

que admitimos com sendo o calor específico do café completamente sêco. É evidente que êste valor é variável com a quantidade de água contida no grão.

O calor específico do café que possui H % de umidade pode ser obtido pela fórmula de Kollmann :

$$c_h = \frac{H/100 + c}{H/100 + 1}$$

Para um café com 50% de umidade o calor específico seria :

$$c_{50\ 0/0} = \frac{0,5 + 0,33}{0,5 + 1} = 0,55$$

Admitindo-se uma percentagem de umidade igual a 23%, que é umidade contida no café sêco no secador que serviu para os nossos ensaios, o calor específico seria :

$$c_{23\ 0/0} = 0,45$$

Nestas condições, sendo o calor de vaporização da água 606,5 -- 0,695 t, segundo Regnault, para vaporizarmos uma certa quantidade de água contida no grão de café, teríamos que dispendir :

$$(606,5 - 0,695 t) \text{ m calorías}$$

Acontece, porém, que, para elevarmos a temperatura da água a t_0 C, somos obrigados a elevar também a temperatura do café, e o calor absorvido para se elevar a massa m_2 de café, massa do café sêco, a essa temperatura é :

$$m_2 c (t_2 - t_0)$$

Nestas condições, o rendimento teórico de secagem do grão será :

$$\eta = \frac{(606,5 - 0,695 t_2) m}{m_2 c (t_2 - t_0) + (606,5 - 0,695 t_2) m}$$

Tomemos um exemplo real. O café entra com 50% de umidade, o seu calor específico, nestas condições, é 0,55 e a temperatura de secagem de 55°C. Temos então :

$$m_2 = 1 \text{ grama (pêso do café com 50\% de umidade)}$$

$$m_1 = 0,667 \text{ gr (pêso do café completamente sêco contido numa grama de café úmido)}$$

$m = m_2 - m_1 = 0,33$ gr (pêso da água contida numa grama de café)
temperatura ambiente = 20°C

$$\eta = \frac{(606,5 - 0,695.55). 0,33}{0,55. (55 - 20) + (606,5 - 0,695.55). 0,33}$$

$$\eta = 0,90$$

A expressão que dá o valor de η nos mostra que, quanto maior é o calor específico do produto, tanto menor é o rendimento teórico de secagem do mesmo.

No fim da secagem, quando o café está com pouca umidade, o rendimento baixa em virtude da diminuição de m_1 . Isto demonstra que o rendimento teórico depende, não só do calor específico do corpo, como também, e com muito maior intensidade, da umidade nêle contida.

2. Determinação da umidade do café

Como é sabido o café é colhido, entre nós, bastante heterogêneo. Uma massa de café recentemente colhida contém grãos em todos os graus de maturação e em todos os estados de seca. Todavia, o que acontece na prática, ou, pelo menos, deve acontecer, é que esta massa contenha maior percentagem de café "cerêja", ou melhor café maduro. Portanto, a colheita deve ser feita quando haja maior quantidade de café maduro. Em certas zonas do nosso Estado, na Noroeste, por exemplo, o sol intenso faz com que o café seque rapidamente, e nestas condições a massa é constituída por grande percentagem de secos.

Estas considerações nos servem para indicar que a determinação da umidade da massa do café com o fim de secagem é uma operação que deve ser feita com muito bom senso. Para o efeito de seca o que interessa é a determinação da umidade média da massa.

Fizemos diversos ensaios com o café colhido em condições normais, pelo processo de derriça no "pano". Diante dos resultados obtidos pela determinação da umidade na estufa a 100—110°C pudemos organizar a tabela abaixo :

<i>Especificação</i>	<i>Umidade em relação ao pêso sêco</i>
Café cerêja	75—80%
Café "passa" (passado de cerêja)	45—60%
Café "bóia" (quase sêco)	30—40%
Café coquinho	20—25%
Café sêco em condições normais	18%
Café sêco beneficiado	12—15%

Êstes dados foram obtidos calculando-se a percentagem de umidade do café em relação ao pêso sêco, pela fórmula :

$$h = \frac{P_1 - P_0}{P_0} 100$$

em que :

h — percentagem de umidade

P_1 — Pêso do café úmido

P_0 — Pêso do café completamente sêco

Pelos resultados obtidos vê-se que uma massa de café pode ter a sua umidade compreendida entre os limites extremos de 20 a 80%. É claro que êstes dados extremos não se verificam na prática, pois seria pouco possível a colheita de um cafezal em que todos os grãos fôssem completamente secos ou, caso contrário, fôssem completamente maduros, ou, pelo menos, que a colheita fôsse só de grãos maduros.

A massa de café que serviu para campo dos nossos ensaios de secagem foi por nós tomada como a mais próxima possível da que comumente aparece na prática. Assim é que foi adotado um dos processos de colheita mais generalizado. Tiramos diversas amostras da massa e fizemos várias determinações de umidade e tôdas elas foram mais ou menos concordantes com a percentagem de umidade média de 51%.

Como se vê pelo próprio resultado, nota-se que o café utilizado continha grande percentagem de sêco, fato êste muito natural em se tratando de colheita feita tardiamente e em virtude de o ano ter decorrido muito sêco.

Podemos adiantar, baseados nos dados anteriores, que, em geral, a massa de café a secar tem uma percentagem de umidade variável de 40 a 60%, em relação ao pêso sêco.

De outro lado, como já tivemos ocasião de explicar, um fator muito importante da umidade na secagem é se saber qual a quantidade de água livre e de constituição contida no grão. Pela construção da curva de secagem na estufa pode-se deduzir a quantidade de água de constituição contida no café.

Tomamos uma massa de café, bem homogênea, com 60% de umidade (caso dos mais comuns) e colocamos na estufa a 100—110°C e fizemos várias determinações de umidade e com estas construimos a curva indicada pelo gráfico I.

Pode-se notar que até 35% de umidade retirada, a linha é uma reta. Portanto, a quantidade de água retirada é função linear do tempo. Vê-se que em 5 horas, apenas, conseguimos retirar 35% dos 51% de água existente, em seguida a linha deixa de ser reta para tomar a forma de curva parabólica e assintótica. Nas 5 horas seguintes só foram retirados mais

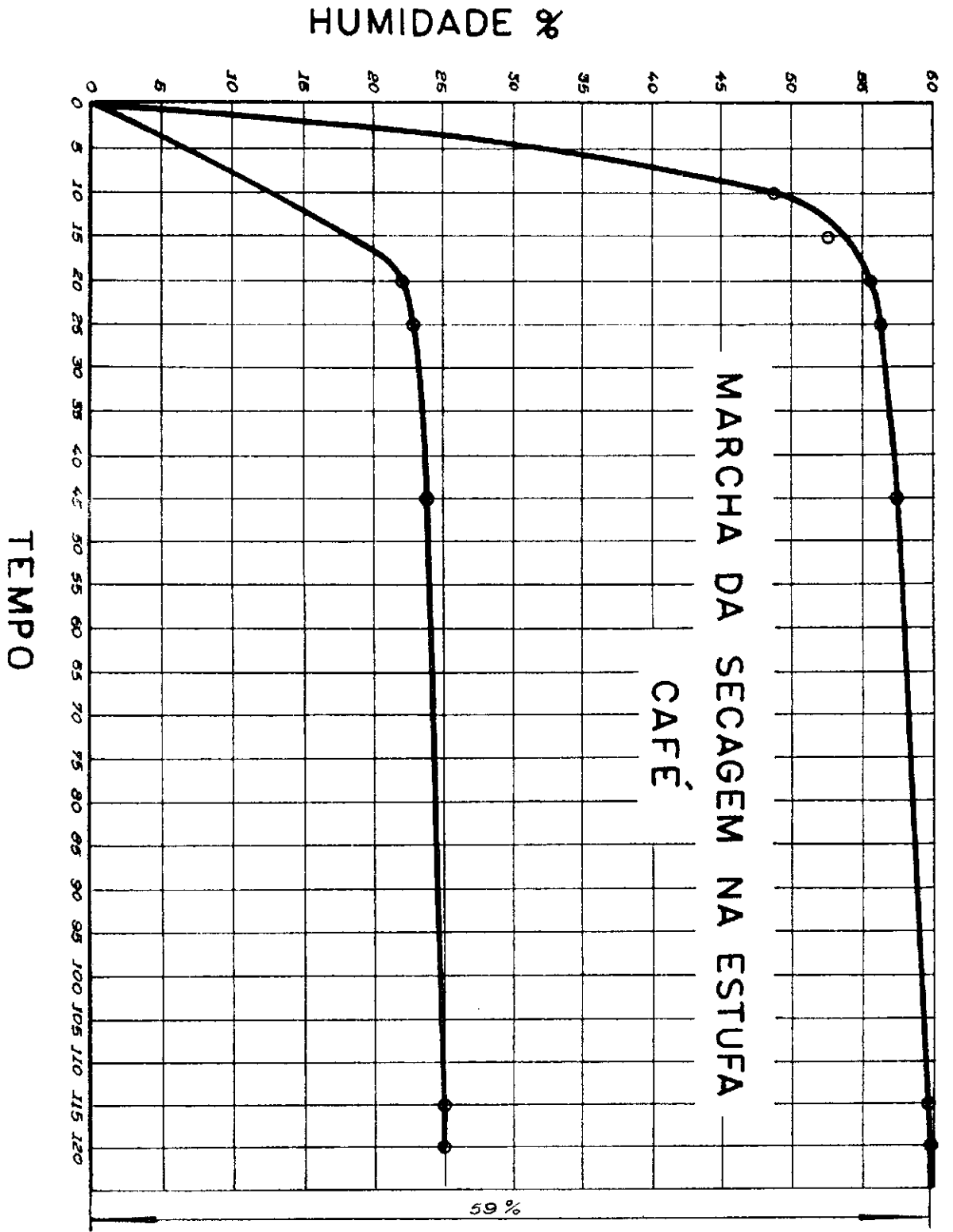


Gráfico I

15% de umidade, o que demonstra ser agora mais difícil a retirada de água. É evidente, pois, que, nos primeiros momentos, foi evaporada a água livre; depois evapora-se água livre e água de constituição e, finalmente, só de constituição. Vê-se claramente a forma assintótica da curva, pois os últimos 5% de umidade necessitaram de cerca de 100 horas para ser eliminados, a 100—110°C de temperatura.

Diante disto, podemos admitir como bastante provável que o café contém, em termo médio, de 20 a 25 % de água de constituição e o restante de água livre, portanto de mais fácil extração. Esta nossa asserção é de certo modo confirmada pela linha 2 do mesmo gráfico, que representa a marcha da secagem do café com 25 % de umidade. Note-se, neste caso, que a linha é parabólica desde o início.

Baseados no que acabamos de anunciar achamos que, na secagem artificial do café, o ponto de secagem deve estar compreendido entre 20 e 25% de umidade. Não convém ultrapassar este ponto pelos seguintes motivos:

a) *Econômico* — Por que até este ponto a secagem se faz com relativa facilidade, pois se evapora somente a água livre. Daí por diante necessita-se de muito mais calor e tempo para retirar uma pequena percentagem a mais de umidade.

b) *Com 20 - 25% de umidade* o café pode ficar algum tempo entulhado sem perigo de fermentar. Verificamos café entulhado com 25% durante 20 dias sem que houvesse qualquer alteração no gosto, cheiro e aparência.

c) Com o próprio calor armazenado durante a secagem, o café quando amontoado e protegido continua a secar chegando a perder ainda boa percentagem de água. (4).

Nos nossos ensaios, o café foi retirado do secador com 23,5% de umidade e imediatamente amontoado e coberto com encerado. Verificou-se, após 48 horas, depois de completamente frio, que a massa havia perdido cerca de 5,7% de umidade, ficando com o teor final de 17,8%.

Os 5,7% de água foram retirados fora do secador, pois, para isso, só se dispendeu o calor armazenado pelo produto, que de outra forma seria praticamente perdido. Se existe esta grande vantagem em secar o café no secador, apenas até o seu grau de umidade de constituição, para, em seguida, secá-lo lentamente com o seu calor armazenado, a vantagem torna-se muito maior se levarmos em consideração a qualidade da secagem, pois que na última fase se processa a homogeneização do produto. O café, quando recentemente retirado do secador, apresenta-se heterogêneo, com grãos completamente secos e outros ainda por secar, esta heterogeneidade é facilmente observada pela diferença de cor dos grãos. O processo por nós aconselhado, que acabamos de descrever, efetua, durante o armazenamento, a necessária uniformização da massa. (*)

(*) O processo de descanso é comum na América Central — Vide viagem de estudos aos países cafeeiros das Américas do Sul e Central — Teodoro de Camargo e J. E. Teixeira Mendes; (página 30, do Capítulo — Costa Rica).

Fizemos ensaios com a mesma massa de café, sêco no terreiro em condições normais e sêco no secador da maneira indicada anteriormente. Estes dois cafés, após terem sido beneficiados nas mesmas condições, foram enviados a Santos para serem provados, e os resultados foram os seguintes :

	1. ^o PROVADOR	2. ^o PROVADOR	3. ^o PROVADOR
Amostra A (café sêco no terreiro)	duro, livre de Rio	mole, ligeiramente fermentado	mole
Amostra B (café sêco no secador)	duro, livre de Rio	mole, ligeiramente fermentado	mole

Como se vê, houve divergência entre os provadores, mas não entre as amostras; os três provadores demonstraram, independentemente, que não havia a mínima diferença entre as amostras A e B.

Outro fator importante a se determinar na umidade do café é o grau máximo que o mesmo pode conter quando entulhado sem fermentar. Não pudemos, dada a escassez de tempo, realizar ensaios neste sentido, mas podemos adiantar que abaixo de 25% de umidade o café talvez possa ser entulhado sem perigo.

A determinação da umidade limite, no ar, para o café, têm importância, principalmente para o beneficiado por causa da exportação. Parece-nos que há uma certa praxe em se fixar a percentagem de umidade do café em grão, para exportação, em 12%. Isto, naturalmente, dependerá do grau de umidade de equilíbrio do café no ar. É o que se chama comumente "ponto de saturação ao ar". Não temos elementos para fixar este ponto para o café beneficiado. Para o café em "côco" podemos afirmar que está compreendido entre 15 e 18%, de acôrdo com as nossas determinações feitas em massas de cafés secos no terreiro e entulhados. Dificilmente pode-se chegar, na seca natural do terreiro, a percentagens menores que 15%.

O café sêco no terreiro, com 5 dias de sol, deu, em têrmo médio, 18,5% de umidade, ao passo que o café sêco no secador deu os seguintes resultados :

Pêso total do café entrado no secador.
com 51% de umidade $P_1 = 933,4$ kg.

Pêso total do café que saíu do secador.
com 23,5% de água $P_0 = 761,8$ kg.

Pêso total do café, após 48 horas de
entulhado, com 17,8% de água $P_0 = 735$ kg.

Verifica-se, então, que o secador retirou cerca de $P_1 - P_0 = 171,6$ kg de água, os restantes $P_0 - P'_0 = 26,8$ kg foram evaporados pelo calor armazenado no café durante a secagem.

3. Sobre o peso específico do café

Verificamos que o café com 50% de umidade possui um peso específico aparente médio de 0,46 a 0,47 kg por decímetro cúbico, o que corresponde a um peso médio de 23,5 a 24 kg por alqueire, isto é, por cinquenta litros. Este mesmo café, depois de reduzido a 23,5% de umidade teve seu peso específico aparente também reduzido a 0,40 kg por decímetro cúbico, ou seja 20,5 kg por alqueire; com 18% de umidade, o seu peso específico aparente ficou sendo de 195,5 kg por alqueire.

É evidente que este peso específico está sujeito a variações, não somente provenientes das variedades do café, como, também, do solo, clima, idade, época de colheita, etc. Porém, para a maioria dos cafés colhidos normalmente, o peso específico aparente depende, em primeiro lugar, do grau de umidade contido nos mesmos.

Dados que nos foram fornecidos pela Fazenda Modelo da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" nos permitiram determinar os seguintes pesos médios, por alqueire, das principais variedades de café cultivadas em nosso Estado:

Nacional (sêco, em côco)	20	kg por alqueire
Sumatra (sêco, em côco)	19	kg por alqueire
Amarelo (sêco, em côco)	19,5	kg por alqueire
Bourbon (sêco, em côco)	18,5	kg por alqueire

4. Considerações sobre a temperatura de secagem

Vimos na tabela da página 53 que a temperatura limite para a secagem do café em "côco", em boas condições, é de 70°C, embora haja quem, como H. Benthall, aconselhe a secagem até com 85°C. (2)

Pela análise do gráfico II, verifica-se que trabalhamos desde o início com temperatura baixa, variando de um mínimo de 52°C para um máximo de 66°C. A média oscilou entre 62 e 64°C. Procuramos, o quanto permitiam as condições do secador, começar com uma temperatura baixa e ir subindo gradualmente à medida que o café ia secando. Assim é, que, durante a primeira hora, a temperatura permaneceu em torno de 58°C para depois permanecer em torno de 62-64°C.

A nossa secagem, como se vê, foi feita nas melhores condições possíveis de temperatura. Pois bem, assim mesmo, o café saiu do secador completamente heterogêneo e sua uniformização só foi possível pela terminação da secagem lentamente. Daí se infere que uma temperatura muito mais alta, como, por exemplo, 85°C, seria completamente preju-

dicial à secagem, porque grande parte do café ficaria ressecado, enquanto outra não atingiria ainda o ponto de seca e, nessas condições, a uniformização tornar-se-ia muito difícil.

Como então admitir que E. H. Benthal indique para o seu secador "Guardiola" temperaturas de secagem da ordem de 85°C? Estas temperaturas podem ser admitidas nos cafés bem homogêneos. Daí a explicação porque, na Colômbia, Venezuela e outros países, o referido secador tem logrado bom êxito, pois é sabido que nestes países o produto a secar é constituído de café unicamente no estado de despulpado de grãos "ce-rejas", portanto bem homogêneo. Entre nós, não sendo possível obter produtos nestas condições, a temperatura de secagem deve ser no máximo de 70°C.

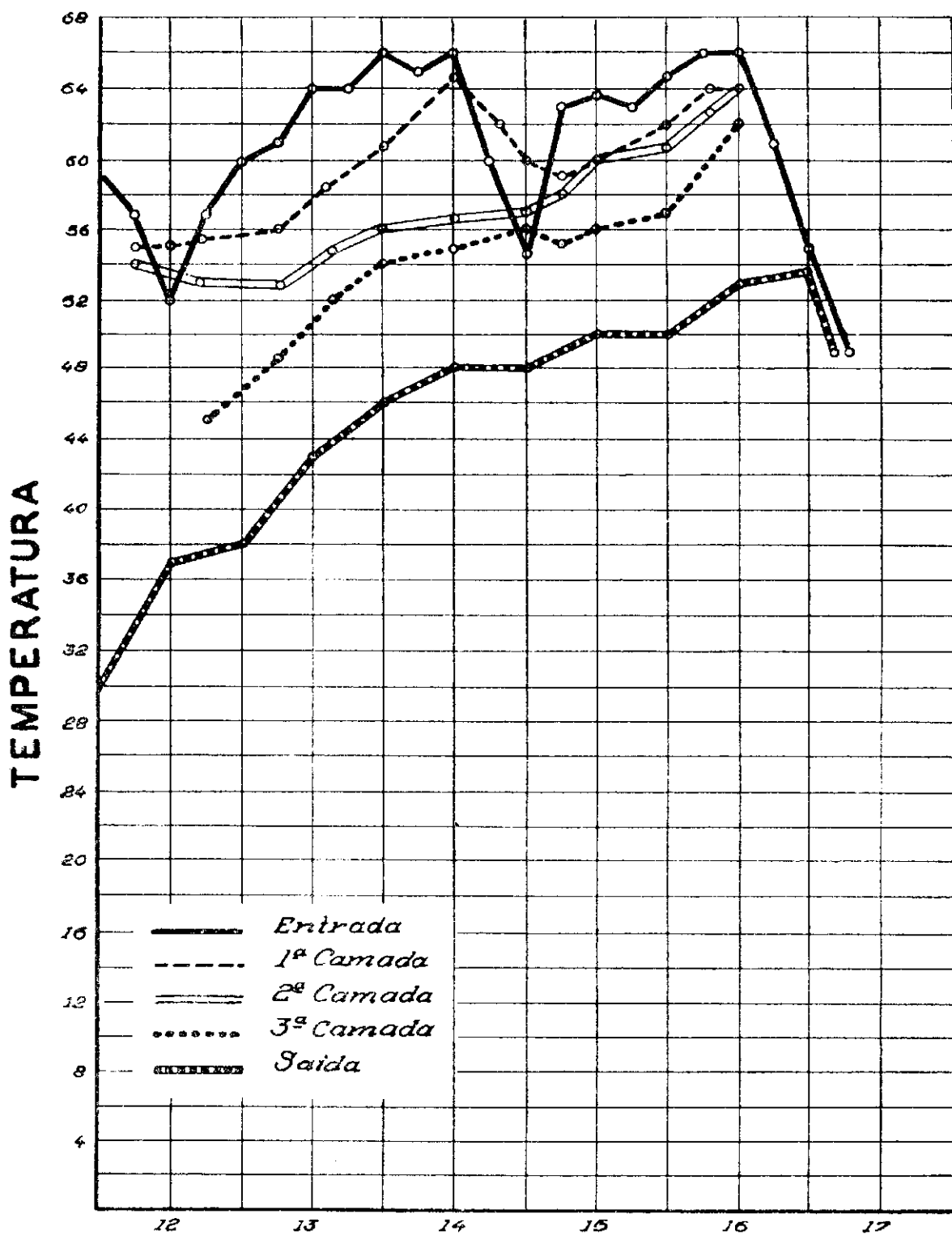
Em hipótese alguma a temperatura de secagem deve ultrapassar de 90°C, pois verificamos que a essa temperatura, em estufa, o café começa a apresentar anormalidades.

Diante do exposto, pode-se fazer a seguinte pergunta: — Nestas condições, a secagem pelo ar quente será tanto mais perfeita quanto menor a temperatura? É evidente que sim, pois é sabido que, quanto mais lenta a secagem, mais uniforme é o produto. Além disso, à baixa temperatura, certos gases muito voláteis que, inevitavelmente, abandonariam o produto durante a secagem não o fariam, contribuindo dêsse modo para a permanência das qualidades originais do produto. Todavia, contrário ao que acabamos de afirmar, age o fator econômico, pois a seca a alta temperatura é muito mais rápida. Basta considerar o seguinte:

1 metro cúbico de ar, a 40% de umidade, e a 40°C de temperatura, tem uma capacidade de absorção do vapor d'água igual a 30 gramas. Essa mesma quantidade de ar a 70°C poderá absorver cerca de 170 gramas, ou seja 5,6 vezes mais. É justamente na rapidez e comodidade que residem as vantagens da secagem artificial.

Mais importante que a temperatura de entrada do ar quente no secador é a temperatura do próprio café contido no seu interior. Analisando-se o gráfico II vemos que a primeira camada, isto é, a que está mais próxima da entrada do ar quente, atingiu a temperatura máxima de 65°C; no início da secagem sua temperatura esteve na ordem dos 56°C e depois passou a estar em torno de 62°C. Em média, a temperatura do produto na primeira camada foi de 2°C abaixo da do ar quente de entrada. Uma simples inspeção no gráfico I mostra que, em média, a segunda camada tem sua temperatura inferior à primeira cerca 3°C, e a última camada possui também a temperatura média inferior cerca de 3°C da anterior. Estes resultados estão perfeitamente de acordo com o que se pretende obter numa boa secagem. Os produtos quanto mais secos maiores temperaturas podem admitir.

É evidente que o ar deve sair do secador com o máximo de umidade, portanto, se possível saturado, e, nestas condições, a sua temperatura de saída deve ser mínima; e quanto maior fôr o estado de seca do café dentro do secador, maior a temperatura de saída do ar. No período final da secagem, a temperatura do ar de saída deve estar em torno da tem-



TEMPO

Gráfico II

peratura da última camada de café. A análise do gráfico II mostra que, de fato, no início, a temperatura de saída foi da ordem de 35°C; passou em seguida a 45°C e no fim chegou a 50°C.

Como se vê, a princípio, a curva da temperatura de saída do ar do secador era muito mais baixa que a de entrada; com o decorrer da experiência elas se tornaram convergentes para quase coincidirem no fim.

5. As condições do ambiente

As condições do ar ambiente, como sejam: temperatura, umidade, pressão, etc., exercem influência que, às vezes, pode tornar-se notável na marcha da secagem.

Tomemos a fórmula 2, da página 42, e façamos uma pequena transformação:

$$p_{v2} - p_{v1} = 0,623 \frac{H_0 (\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0)}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)} \quad (2)$$

$$p_{v2} - p_{v1} = 0,623 \frac{\frac{\varphi_2 F_2}{\varphi_0 F_0} - 1}{\left(\frac{1}{\varphi_0 F_0} - \frac{1}{H_0} \right) (H_0 - \varphi_2 F)}$$

Por aí se nota que, quanto menor o produto $\varphi_0 F_0$, tanto maior a quantidade de vapor $p_{v2} - p_{v1}$ retirada, supondo-se H_0 constante. A variação de H_0 é muito pequena e pouca influência exerce sobre a secagem, mas se pode admitir que a variação de p_{v2} e p_{v1} é no sentido oposto de H_0 .

Verifica-se pelo gráfico III, o qual indica a pressão atmosférica durante os ensaios de secagem do café, que a pressão é praticamente constante e permanece em torno de 172 milímetros de mercúrio.

Vejam, agora, se a umidade e a temperatura exerceram influência sobre a marcha da secagem. Ora, parece, a princípio, que, quanto mais quente o ar ambiente, tanto melhor para a secagem. Assim é de fato, e isto geralmente acontece, porém, não propriamente por causa da temperatura, mas, sim, pela influência que esta exerce sobre a umidade do ar ambiente. É a umidade do ar ambiente o principal, ou melhor, o único elemento que nos indica a capacidade de secagem deste ar. É evidente que o ar pode estar com alta temperatura, por exemplo, 80°C, e não secar; é bastante estar saturado de umidade.

A influência que a temperatura exerce é justamente sobre a quantidade de umidade máxima que o ar pode conter. Quanto maior a temperatura do ar, maior é a quantidade de água necessária para a sua saturação. Um metro cúbico de ar a pressão de 760 milímetros de mercúrio precisa conter, a 40°C, cerca de 50 gramas de ar para

TEMPERATURA

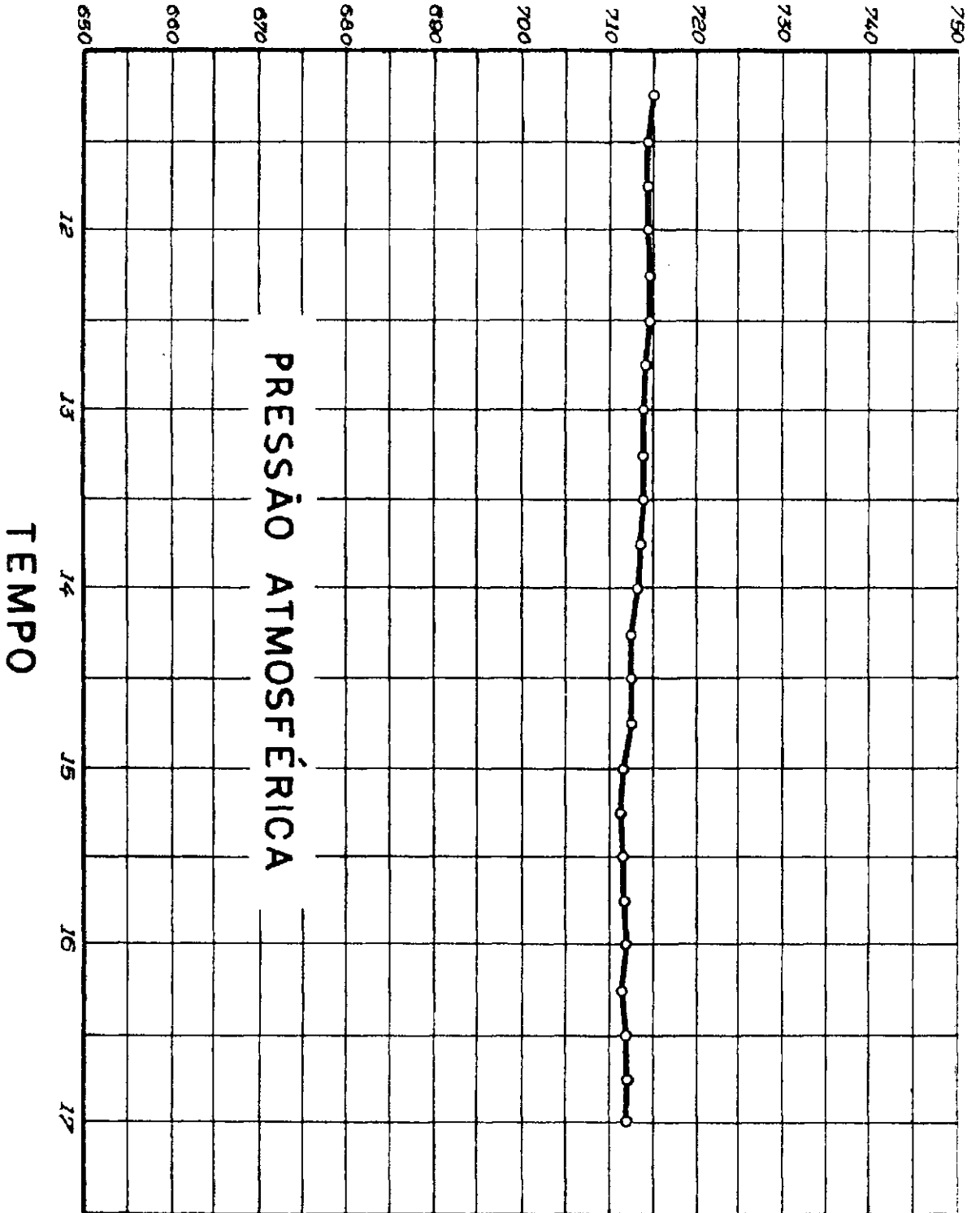


Gráfico III

estar saturado, ao passo que a 70°C deverá conter mais de 200 gramas de água para atingir o estado de saturação.

Portanto, não é a temperatura nem o grau de umidade considerados separadamente que dão as condições do ambiente, mas, sim, estes dois fatores analisados em conjunto. Pode acontecer que estes dois fatores, o que é muito comum, variem continuamente e seu produto permaneça constante. Neste caso, a variação de um, foi consequência da variação do outro.

Analisemos os gráficos IV e V e tomemos por exemplo as condições do ambiente em diversos pontos no decorrer do ensaio, a saber :

tempo	umidade	temperatura	tensão máxima	tensão atual
11,1/2	0,59	19°,5	17,0	10,0
12	0,56	27°C	26,8	14,7
12,1/2	0,67	25°C	23,8	15,9
13	0,65	19°,5	17,0	11,0
13,1/2	0,61	21°,5	19,2	11,7
14	0,59	20°C	17,5	10,5
14,1/2	0,57	22°,5	20,4	11,6
15	0,54	22°,0	19,8	10,8
15,1/2	0,56	22°,5	20,4	11,4
16	0,55	22°,5	20,4	11,2
15,1/2	0,60	24	22,4	13,4
17	0,57	21°,5	19,2	10,9

Os resultados da tabela indicam que o produto $\varphi_0 F_0$ ou seja f_0 , tensão do vapor, permaneceu mais ou menos constante, em torno de 10 a 11, excetuando-se, naturalmente, os dois valores calculados nos pontos 12 e 12½ horas, que estão bem afastados da média, o que se pode atribuir a qualquer anormalidade alheia ao fenômeno.

Dêsse modo, podemos afirmar que neste ensaio as condições do ambiente foram naturais durante todo o transcorrer do mesmo.

O valor da tensão do vapor $f_0 = \varphi_0 F_0$ nos indica o estado de saturação do ambiente. Poder-se-á fazer a pergunta seguinte : qual seria a ordem de grandeza da influência que as condições do ambiente exercem sobre a secagem ? Em certos casos, as condições do ambiente podem tornar proibitiva a secagem econômica. Em outros, pode-se até desprezar o secador. Vejamos o exemplo, para se ter uma idéia.

Admitamos que em vez de $\varphi_0 = 0,6$ e $t_0 = 19^\circ\text{C}$, como eram as condições do ambiente às 12 horas do dia em que foram feitos os ensaios de secagem de café, as condições fôsem as seguintes : $\varphi_0 = 0,8$ $t_0 =$

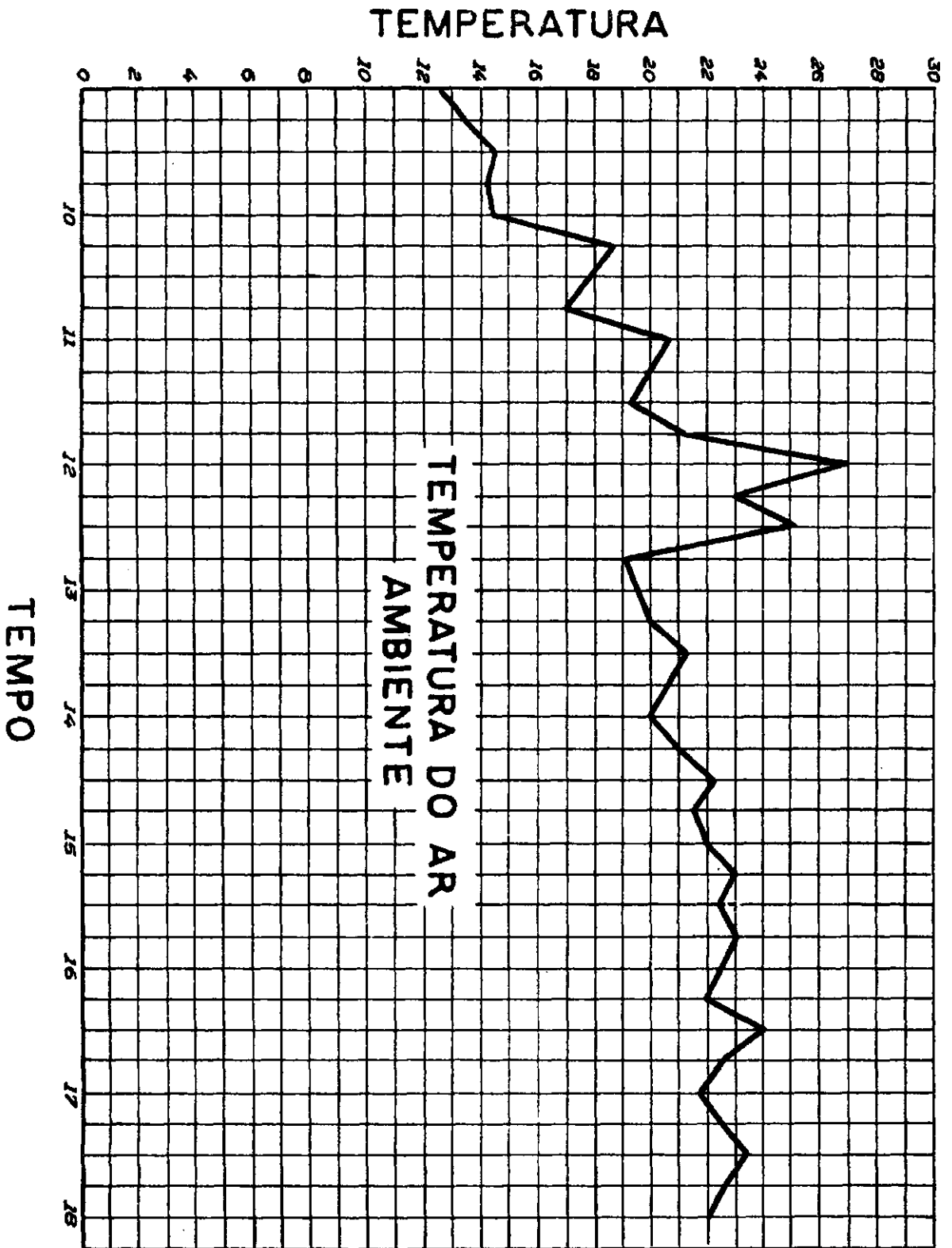


Gráfico IV

35°C e suponhamos que a secagem deve ser feita à temperatura de 50°C. No primeiro caso, um metro cúbico de ar contém 10 gramas de vapor e para se saturar a 50°C sua capacidade de absorção é de 80 — 10 = 70 gramas; no segundo caso, o ar contém 30 gramas por metro cúbico e sua capacidade de absorção fica reduzida a 80 — 30 = 50 gramas. Por aí se vê que, neste caso, o ar possui uma capacidade de absorção 5/7 da primitiva, o que equivale a dizer que se necessita de mais ar para se proceder à secagem de uma mesma quantidade de produto. De outro lado, a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do ar úmido até 50°C, é, no primeiro caso, de 7 calorias e, no segundo, é de 3.

6. Marcha da secagem

Verificando-se o gráfico VI, que nos mostra o grau de umidade do ar na saída do secador, chegamos a concluir que a marcha da secagem parece ter sido normal. É evidente que o ideal seria que o ar na saída do secador fôsse saturado de umidade. Isto, porém, só é possível teoricamente. Na prática, o que se verifica é uma diminuição progressiva da percentagem de umidade contida no ar servido do secador e isto é em virtude de a secagem se tornar mais difícil à medida que o produto se vai tornando mais sêco. As razões já foram explicadas anteriormente.

Para o nosso caso, da secagem de café, notou-se, pelo gráfico VI, que a curva toma a forma naturalmente apresentada pela secagem normal. Assim é que, a princípio, a percentagem de umidade é de 60%, baixando para 45%, às 12 horas, 40% às 12½, etc., até atingir 15%, às 16½ horas. Esta curva nos dá apenas uma idéia da marcha da secagem, porém ela está influenciada pelas condições do ambiente. A idéia exata da marcha da secagem pode ser obtida construindo-se, pelo cálculo, a curva de variação da quantidade de vapor d'água retirada do café por kg de ar sêco em função do tempo de secagem.

Esta curva, indicada no gráfico VII, foi construída do seguinte modo: conhecendo-se os valores $H_0, \varphi_0, \varphi_2, t_0, t_2$, pode-se por meio da fórmula aproximada:

$$p_{v2} - p_{v1} = 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)}$$

determinar os pontos da curva procurada.

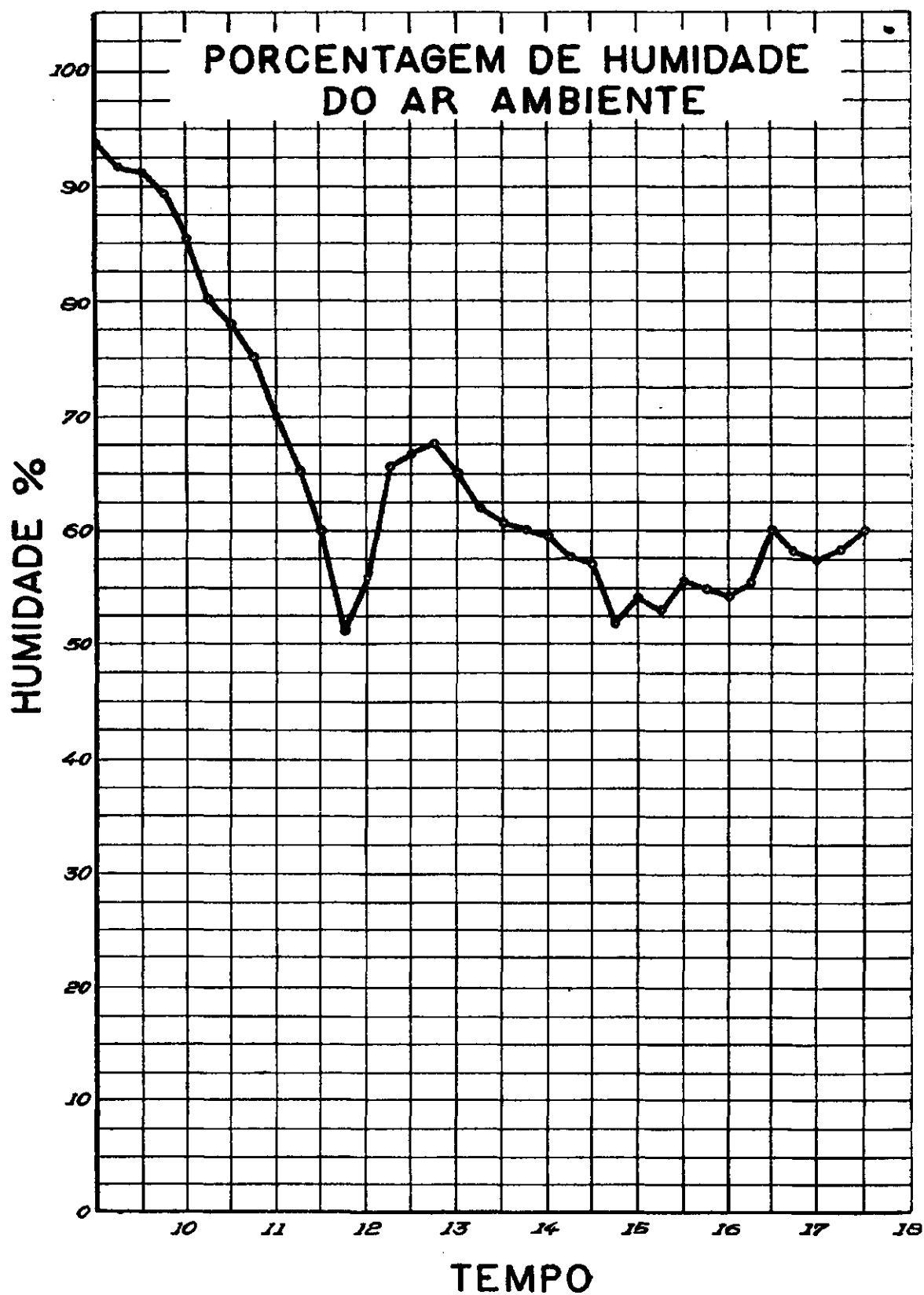


Gráfico V

No ensaio de secagem de café os resultados obtidos estão indicados na tabela abaixo :

tempo	pressão atmosférica	umidade do ar		temp. do ar		tensão máx.		$p_{v_2} - p_{v_1}$
		entrada	saída	entrada	saída	F_0	F_2	
11½	714	0,59	0,60	19,5	30	17,0	31,8	8,3
12	714	0,56	0,45	27	37	26,8	46,5	5,5
12½	714	0,67	0,40	25	38	23,8	49,3	3,7
13	714	0,65	0,30	19,5	43	17	64,4	7,4
13½	713	0,61	0,25	21,5	46	19,2	75	6,5
14	712	0,59	0,20	20	48	17,5	83	5,5
14½	712	0,57	0,20	22,5	48	20,4	83	4,6
15	712	0,54	0,17	22	50	19,8	92	5,5
15½	712	0,56	0,17	22,5	50	20,4	92	4,6
16	712	0,54	0,18	22,5	53	20,4	107	7,4
16½	712	0,60	0,16	24	54	22,4	112	4,5
17	712	0,57	0,32	21,5	47	19,2	79	13,0

Os valores de $p_{v_2} - p_{v_1}$ nos dão as quantidades, em gramas, de vapor de água, por quilograma de ar sêco entrado no secador. Vejamos agora as quantidades de ar sêco entradas no secador, em cada instante, isto é, em função do tempo.

A fórmula seguinte nos indica êstes valores em função de, entre outras variáveis, p_a , S , e t_1 .

S é a secção de entrada do ar no secador. ($d = 0,63$ m).

Temos então :

$$Q = 83.3 S \sqrt{p_a \frac{(H_0 - \varphi_0 F_0)^2}{H_0 (H_0 - 0,377 \varphi_0 F_0) (273 + t_1)}}$$

Um elemento importante para a determinação de Q é o conhecimento da pressão dinâmica p_a do ar na entrada do secador. Determinamos êste valor por meio de um tubo de Pitot. A marcha seguida para o cálculo de p_a foi a seguinte : procuramos determinar, no maior número de pontos possíveis do tubo de entrada do ar, os valores de P_a . Para isto dividimos a secção do tubo, que era circular, em cinco áreas, constituídas de coroas circulares equivalentes, portanto de áreas

$$s_1 = \frac{S}{5}$$

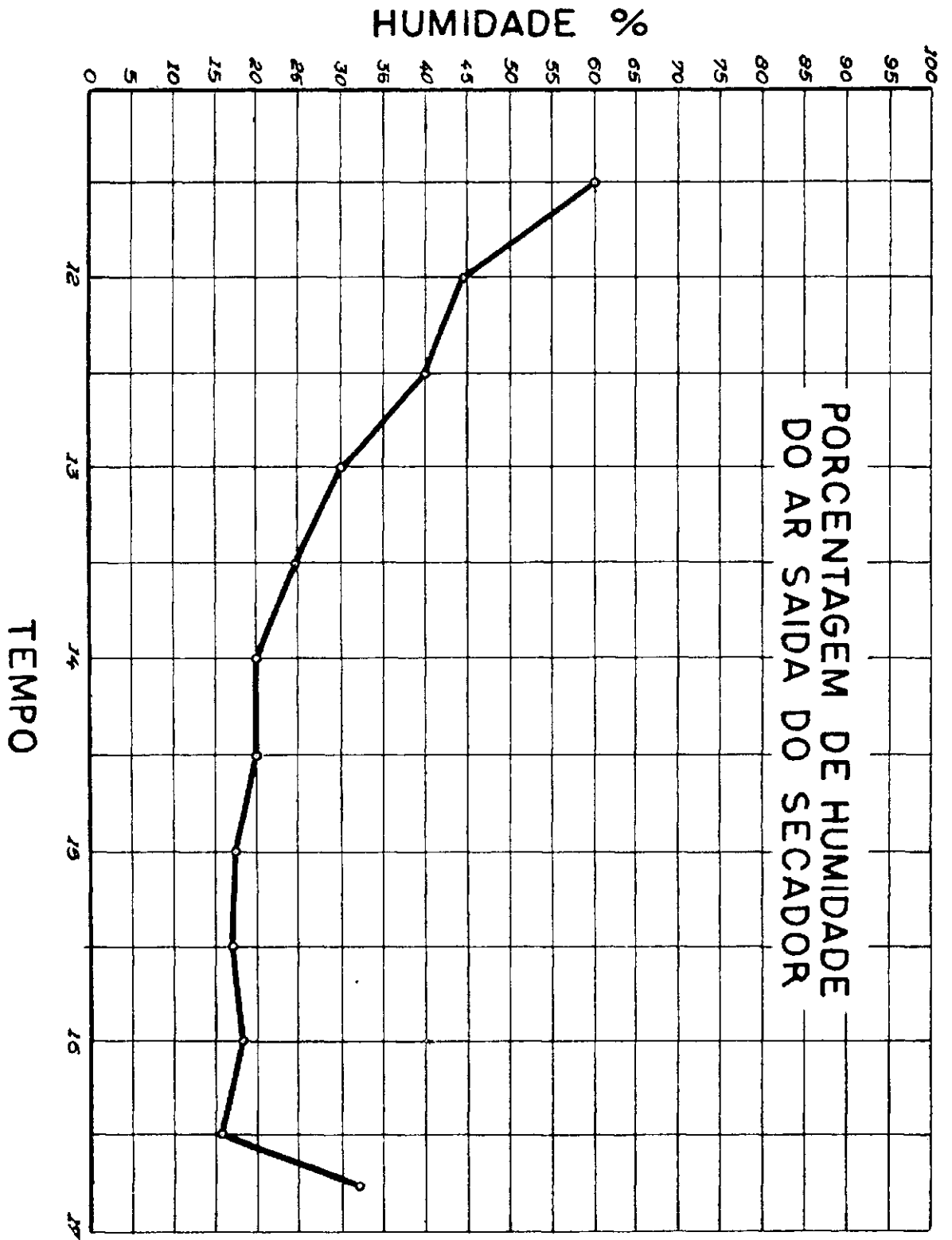


Gráfico VI

Determinamos as pressões dinâmicas médias em cada uma dessas áreas elementares, pela determinação de P_d médio, em 4 pontos. Os resultados obtidos foram :

$$s_1 \rightarrow p_d = 2,2 \text{ (médio)}$$

$$s_2 \rightarrow p_d = 2,0 \quad ,,$$

$$s_3 \rightarrow p_d = 1,7 \quad ,,$$

$$s_4 \rightarrow p_d = 1,3 \quad ,,$$

$$s_5 \rightarrow p_d = 0,9 \quad ,,$$

nestas condições admitimos como pressão dinâmica média o seguinte resultado :

$$p_d = \frac{2,2 + 2,0 + 1,7 + 1,3 + 0,9}{5} = 1,6 \text{ m/m}$$

Este resultado foi obtido às 11,45 horas. Às 14 horas, o resultado obtido foi P_d 1,3 m/m. Os outros resultados deram valores mais ou menos próximos do valor médio que foi $P_d = 1,5$ milímetros de água. Em vista disso podemos tomar como constante o valor 1,5, porque os resultados obtidos oscilaram em torno deste valor com um desvio inferior a 10%. Como no cálculo de Q deve-se tomar a raiz quadrada de P_d o erro relativo será afetado por p_d no máximo de 5%.

Vejamos o valor de Q , às 11½ horas. Neste momento temos :

$$p_d = 1,5 \text{ m/m}, t_1 = 57,5^\circ\text{C}, f_0 = 11,7 \text{ H}_0 = 714$$

donde :

$$Q = 83.3 \text{ S} \sqrt{1,5 \frac{(714 - 11,7)^2}{714 (273 + 57,5) (13,6 \times 714 - 5,13 \times 11,7)}} \\ = 1,65 \text{ Kg/seg.}$$

Calculando-se os outros valores de Q , em momentos diferentes, vamos notar que podemos considerar $Q = 1,65 \text{ kg/seg}$ como um valor constante, pois todos os outros valores achados estão em torno deste número com um desvio da ordem de 5%.

Vimos que :

$$dQ = K_1 \chi (\Theta) d\Theta \text{ e neste caso :}$$

$$dQ = 1,65 d\Theta$$

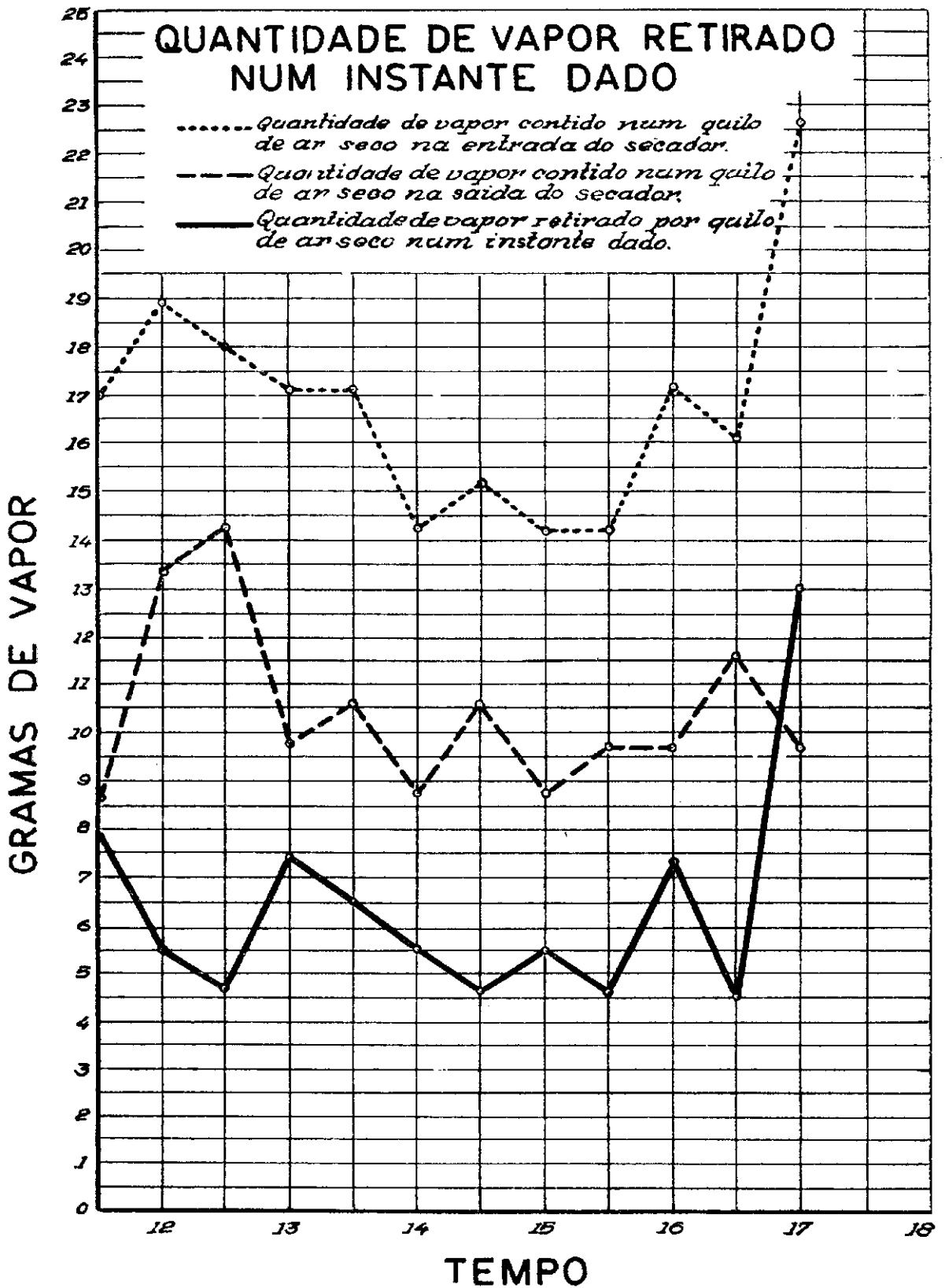


Gráfico VII

A quantidade total de vapor retirada, no fim do tempo $d\Theta$, é dada pela expressão :

$$d_p = K_1 \chi (\Theta), (p_{v_2} - p_{v_1}) d\Theta$$

$$d_p = 1,65 (p_{v_2} - p_{v_1}) d\Theta$$

$$d_p = 1,65 \cdot 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)} d\Theta$$

$$p = 1,65 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)} d\Theta$$

A determinação do integral :

$$\int_{\Theta_1}^{\Theta_2} 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)} d\Theta$$

entre os intervalos $\Theta_1 = 11\frac{1}{2}$ e $\Theta_2 = 16\frac{3}{4}$ foi feita gráficamente e a curva integral é a representada no gráfico VIII.

Para a integração gráfica adotamos o polo a uma distância $b = 10$ unidades. Cada unidade da escala horizontal correspondente a 30 minutos ou 1.800 segundos ; cada unidade da escala vertical a 1 grama de vapor d'água. Nestas condições, a escala de integração será : $10 \cdot 1800 = 18000$. De outro lado, vimos que admitimos como constante a quantidade de ar Q sêco entrada por segundo no secador. Esta constante de multiplicação da integral será : $18000 \cdot 1,65 = 29.700$ de ar sêco por unidade (que neste caso é $\frac{1}{2}$ hora).

Às $16\frac{3}{4}$ horas, fim da secagem, a curva integral tem o valor 6,1 ; êste número, multiplicado pela constante 29.700, nos dá, em gramas, a quantidade total de vapor retirada até êste momento. Temos então :

$$p = 29700 \cdot 6,1 = 181.170 \text{ gramas ou seja}$$

$$p \cong 181 \text{ kg de vapor d'água aproximadamente.}$$

Comparando-se êste resultado, determinado pelo cálculo, com o realmente observado que foi 171.600 gramas, vamos verificar que o êrro relativo cometido é :

$$\frac{181.170 - 171.600}{171.600} < 6\%$$

bastante admissível para um ensaio desta natureza.

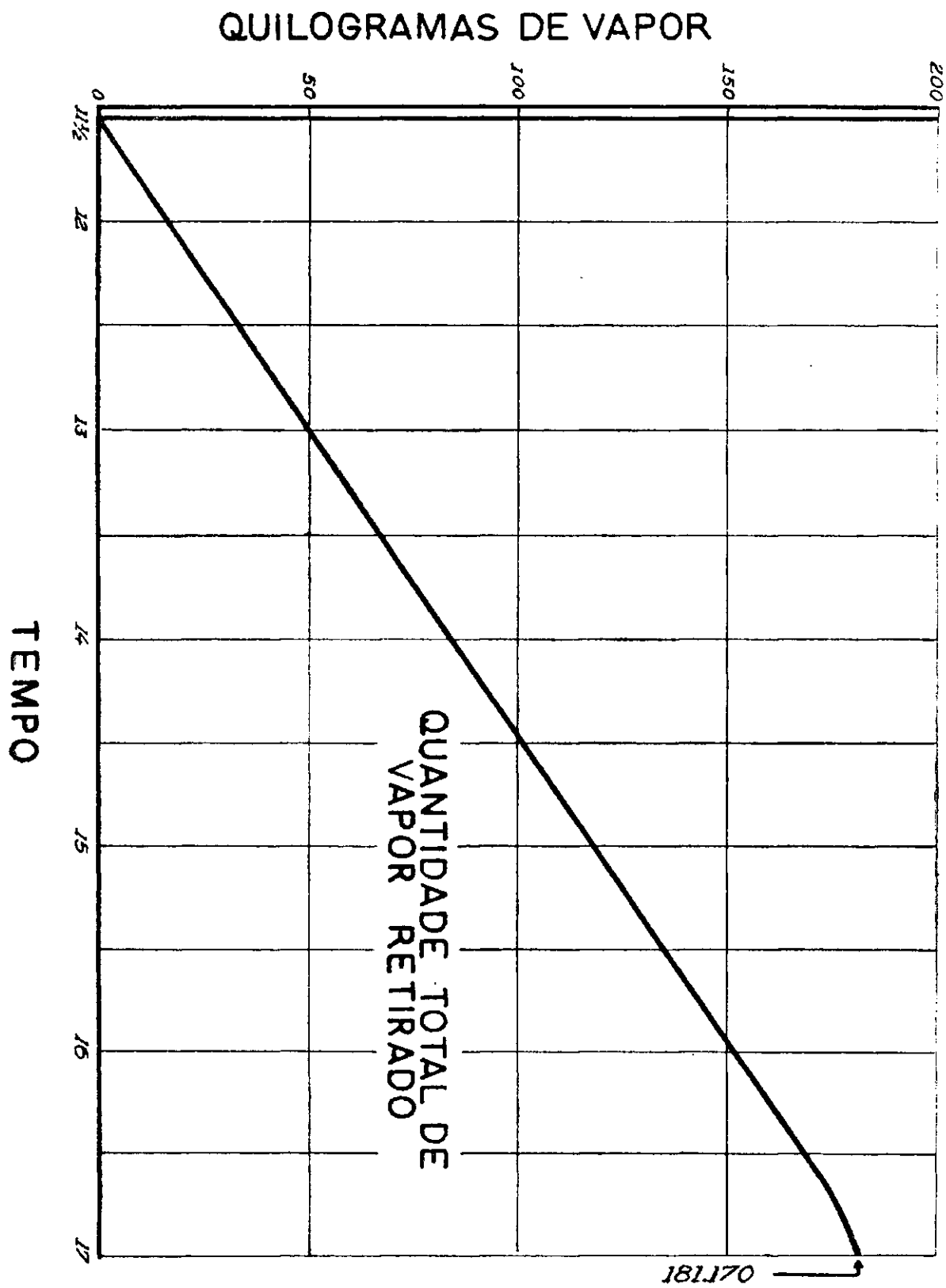


Gráfico VIII

Diante disto podemos considerar a curva integral, representada no gráfico VIII, como muito aproximada da verdadeira marcha da secagem.

Pela forma de curva nota-se que durante todo o transcorrer do ensaio ela se manteve mais ou menos próxima de uma reta partindo da origem, o que indica, que, para êste caso, até 23,5% de umidade, a quantidade de água retirada pelo secador é uma função linear do tempo, do tipo :

$$h = a.t$$

em que o valor de a é facilmente encontrado. Pode-se perguntar : por que motivo a função é linear ? A explicação está, em primeiro lugar, baseada no fato de que a água evaporada era tôda constituída por água livre, e, em seguida, por terem as condições de secagem permanecido constantes durante o ensaio.

7. O calor na secagem

Vimos, anteriormente, que a quantidade de calor contida num volume de ar úmido que encerra um kg de ar sêco é dada por :

$$q = c_1 t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0)} (c_2 t_1 + 595)$$

em que c_1 e c_2 são, respectivamente, o calor específico do ar e do vapor à temperatura t_1 e à pressão H_0 . A variação da temperatura sendo pequena podemos tomar os seguintes valores médios para c_1 e c_2 : (3)

$$c_1 = 0,24$$

$$c_2 = 0,50$$

Donde :

$$q = 0,24 t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} (0,50 t_1 + 595)$$

Vimos também, anteriormente, que podemos admitir como constante a quantidade Q de ar sêco entrada no secador por unidade de tempo e como sendo igual a 1,65 kg por segundo.

Nestas condições, a quantidade de calor entrada no secador por segundo é :

$$q = 1,65 \left[0,24 t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} (0,50 t_1 + 595) \right]$$

O gráfico IX nos mostra a curva representativa desta função, tendo como variável independente o tempo Θ , pois, como já vimos, t_1 , φ e F_0 são funções do tempo Θ .

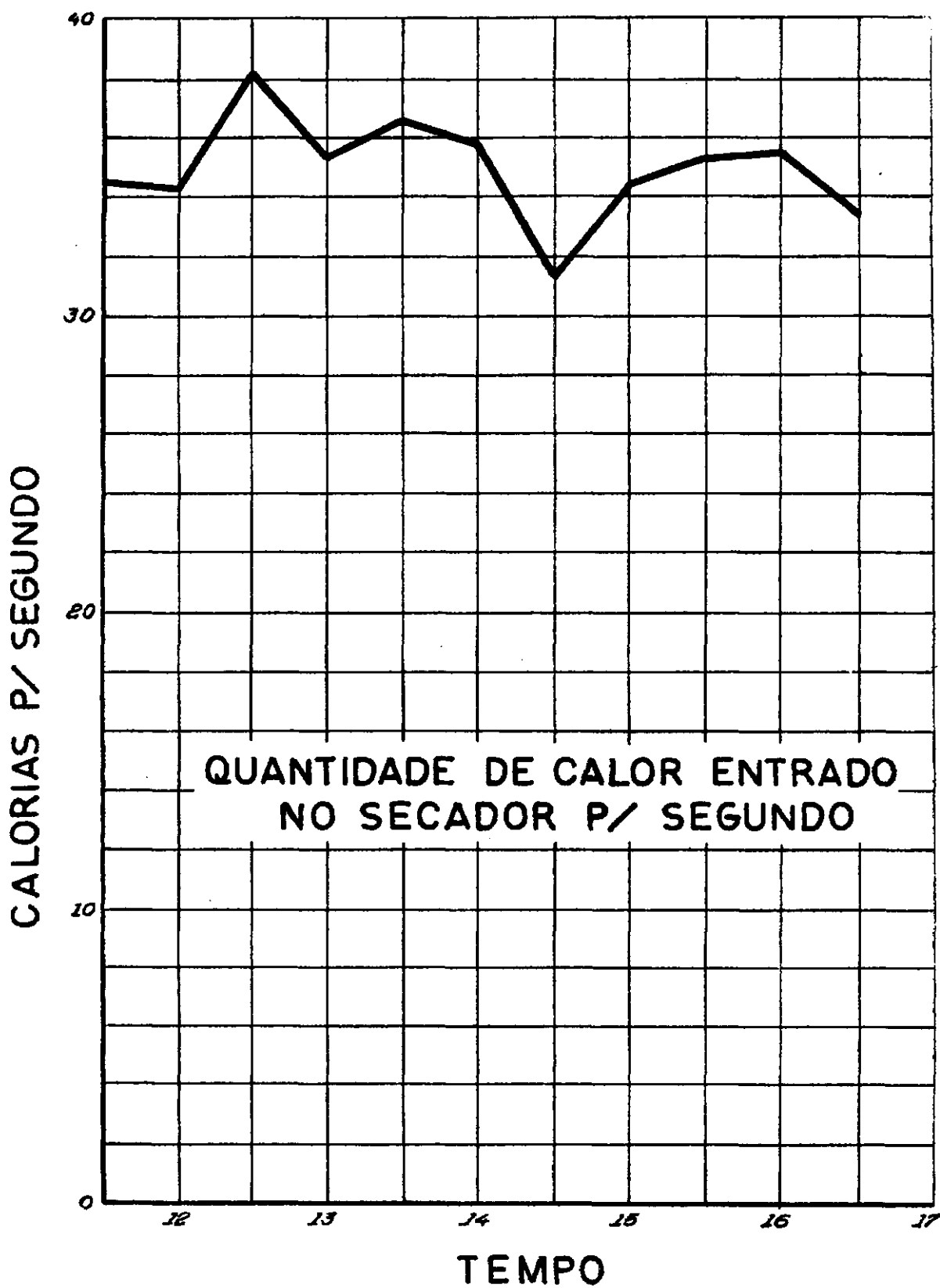


Gráfico IX

A relação dos valores de q_1 calculados por esta fórmula está na tabela abaixo :

tempo	temperatura	tensão do vapor	Pressão atm.	q_1	q	q_1
Θ	t_1	f_0	H_0			
11 ½	59	10,0	714	33,6	17,1	34,3
12	52	14,7	714	35,5	25,0	34,2
12 ½	60	15,9	714	39,8	25,0	38,2
13	64	11	714	30,8	18,1	35,2
13 ½	66	11,7	713	38,2	19,6	36,4
14	66	10,5	712	39,7	15,6	35,8
14 ½	55	11,6	712	33,6	19,9	31,2
15	63,5	10,8	712	36,2	18,8	34,6
15 ½	64	11,4	712	37,1	19,8	35,4
16	66	11,2	712	37,6	19,9	35,5
16 ½	54	13,4	712	34,9	22,3	33,5

O calor total entrado no secador no período de 11½ horas até 16¾ horas, será, como já vimos :

$$Q = \int_{11\frac{1}{2}}^{16\frac{3}{4}} K_2 \Sigma (\Theta) = 630000 \text{ grandes calorias}$$

Esta integração foi feita gráficamente e está indicada no gráfico X.

3. Rendimento do secador

Vimos, anteriormente, que o rendimento é dado pela expressão :

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_t}$$

em que :

$$Q_1 = P [(C_2 \times t_m + 595) - t_e]$$

Portanto :

$$Q_1 = 171.6 [0,50 \times 55 + 595 - 22]$$

$$Q_1 = 102100 \text{ grandes calorias}$$

Admitimos como t_m médio 55º e como t_e médio 22ºC, o que não corresponde exatamente à realidade ; porém, um erro de mais ou menos

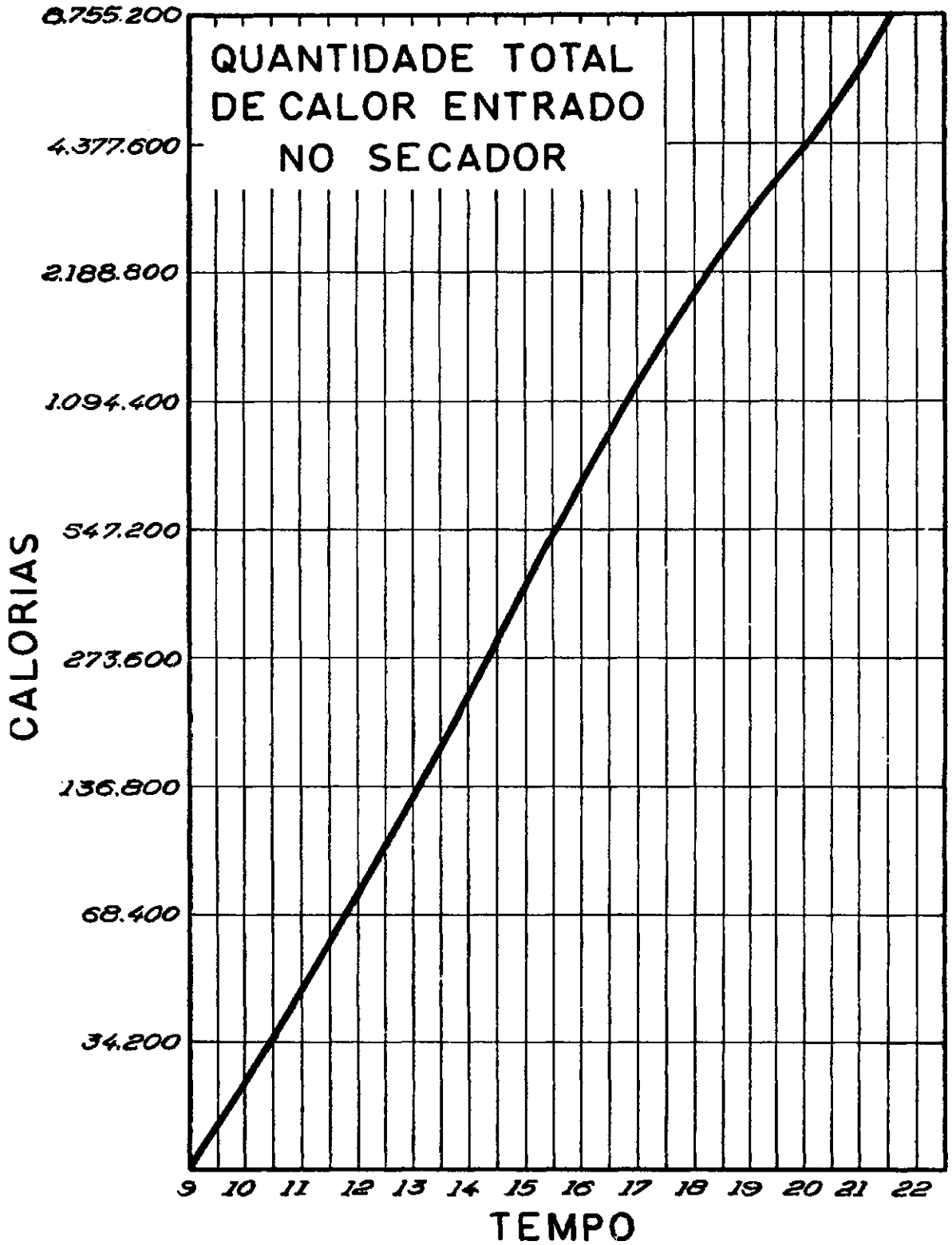


Gráfico X

10% nestes resultados vai influir no resultado final com um erro inferior a 1%.

Nestas condições, o rendimento do secador, neste ensaio, foi da ordem de :

$$\eta = \frac{102.100}{630.000} \cong 0,16$$

9. Análise das perdas

Segundo o que já vimos anteriormente, podemos calcular aproximadamente as perdas de calor a fim de se ter uma idéia sôbre onde reside a imperfeição ou as imperfeições do aparelho.

a) A quantidade necessária, de calor, para se elevar a temperatura do café, do estado inicial (temperatura ambiente) ao estado final (temperatura no interior do aparelho), é :

$$Q = P_0 C (t_m - t_e)$$

em que P_0 , é o pêso do café completamente sêco e C o seu calor específico. Porém, no nosso caso, o café deve ser tomado com a percentagem de umidade final, ou seja com 23,5%. Com esta umidade, o pêso é de 761,800 kg e o calor específico C é :

$$C = \frac{0,235 + 0,33}{0,235 + 1} = 0,46$$

Temos então :

$Q = 761,800 \cdot 0,46 (55 - 22) = 11564$ calorías ou seja cêrca de 1,84% do total.

b) A quantidade de calor necessária para aquecer o secador é, segundo vimos :

$$Q = GC_s \left(\frac{t_1 + t_e}{2} - t_e \right) = GC_s \frac{t_1 - t_e}{2}$$

em que G é o pêso do secador ; para o nosso caso, podemos tomar com aproximação suficiente $G = 1000$ kg (parte em contacto com o calor). O calor específico do ferro é $C_s = 0,115$, logo :

$$Q = 1000 \cdot 0,115 \left(\frac{55 + 22}{2} - 22 \right)$$

$Q = 1900$ grandes calorías ou seja cêrca 0,31% do total.

c) A quantidade de calor perdida pelas paredes é :

$$Q = K, S (t_1 - t_e) \Theta$$

o coeficiente K de transmissão é dado por hora e por metro quadrado de parede. Segundo Hütte — Vol. 1.º, temos :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\chi}}$$

em que :

α_1 e α_2 são os coeficientes de convecção dos fluídos separados pela parede.

δ espessura da parede em metros

χ coeficiente de condutibilidade da parede

Temos então :

Admitindo que haja uma diferença média entre as temperaturas do interior do secador e da parede externa de 10°C, Hütte dá o seguinte valor para :

$$z = 3,0 + 0,08 \Delta$$

$$z = 3,0 + 0,08.10 = 3,8$$

Para facilitar o cálculo admitimos a parede como homogênea e uniforme e $\delta = 0,002$. O coeficiente χ para ferro, é 50, segundo Hütte.

Logo :

$$K = \frac{1}{\frac{2}{3,8} + \frac{0,002}{50}} = 1,9$$

A superfície S do secador pode ser determinada aproximadamente, do seguinte modo : a sua forma é, em síntese, constituída por um tubo de entrada de ar com 0,63 metro de diâmetro e 1 metro de comprimento, e um tambor cilíndrico com 2,40 metros de diâmetro e 0,50 metro de altura.

Temos então :

$$S = 14,68 \text{ metros quadrados.}$$

Nestas condições :

$$Q = 1,9 \times 14,68 (55 - 22) \times 5$$

$Q = 4600$ calorías, ou seja, cêrca 0,72% do total.

Como vemos, tôdas estas perdas somadas não atingem 3% do total, o que representa uma insignificância. Isto indica que o calor restante, isto é, o que falta para completar o total de calor entrado, deve ter saído no ar servido do secador.

Analisemos as quantidades de calor contidas no ar servido do secador.

Quando êste ar entrou no secador, levou consigo a quantidade total de calor igual a 630000 calorias. Esta é constituída por duas partes: uma que é contida no ar quando estava nas condições do ambiente e outra, subtraída do aparelho aquecedor.

Veamos estas duas partes, separadamente:

a) Vamos admitir, para facilitar, que o ar ambiente durante todo o transcorrer do ensaio teve uma temperatura constante $t_0 = 22^\circ\text{C}$ (que é a temperatura média calculada) e uma percentagem de umidade $\varphi_0 = 0,59$ (que é a média calculada) constante. Estas duas hipóteses podem ser feitas, uma vez que o êrro cometido é pequeno em relação à precisão dos nossos resultados.

O abaco da pag. 70 da Sechage du bois de A. Ihne nos indica que para $t_0 = 22^\circ\text{C}$ e $\varphi_0 = 0,59$ o ar úmido contém para cada kg de ar sêco, 11 calorias. Sabemos que no secador entram 1,65 kg de ar sêco por segundo; às condições do ambiente, temos portanto:

$$Q = 1,65 \cdot 3600 \cdot 5 \cdot 11 = 326700 \text{ calorias ou seja } 51,8\% \text{ do total.}$$

b) A quantidade restante $Q_2 = 630000 - 326700 = 303300$ grandes calorias foi subtraída do aquecedor.

A quantidade Q_1 de calor pouca ação vai ter sôbre a secagem, porquanto na saída, na pior das hipóteses, o ar deve estar nas mesmas condições do ambiente. Portanto, a quantidade de calor que realmente tem ação na secagem, pelo ar quente, é Q_2 .

Como vimos, a quantidade de calor Q_2 assim se distribuiu:

11564 grandes calorias para elevar a temperatura do café.

1900 grandes calorias para elevar a temperatura do secador.

4600 grandes calorias perdidas pela irradiação.

102100 grandes calorias necessárias para evaporar a água retirada (estas são realmente úteis).

183136 grandes calorias que foram realmente perdidas pela ineficiência do secador, ou pela falta de suficiente contacto do ar quente com o produto, ou outra causa qualquer. Esta quantidade de calor saíu com ar quente servido e fêz com que êste ar saísse a uma temperatura mais elevada que a do ar ambiente.

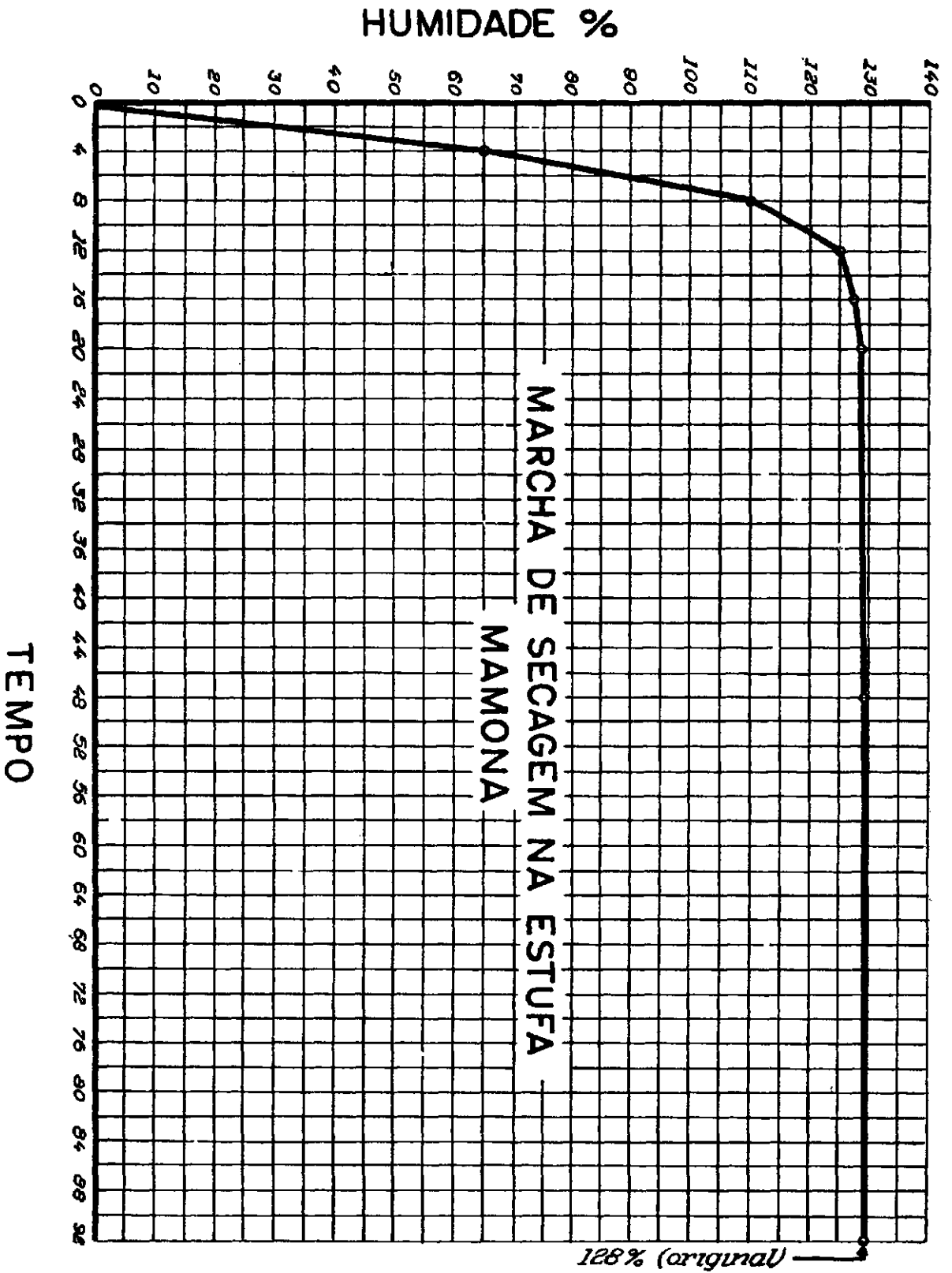


Gráfico XI

Nestas condições, o rendimento que mais realmente mostra a eficiência do secador, é o seguinte :

$$\eta = \frac{102100}{303300} \cong 33,8\%$$

ENSAIOS SÔBRE SECAGEM DE MAMONA

1. Determinação do calor específico da mamona

Foram feitas duas determinações do mesmo modo que as indicadas na página 57. Os resultados obtidos foram os seguintes :

1.^a determinação $c = 0,39$

2.^a determinação $c = 0,43$

resultado médio adotado $c = 0,41$ para a mamona completamente seca.

Para a mamona contendo 128% de umidade, como é o nosso caso, o calor específico é, sempre segundo Kollman :

$$c_{128} = \frac{1,28 + 0,41}{1,28 + 1} = 0,74$$

A mamona com 8% de umidade, após estar no secador, tem um calor específico :

$$c_8 = \frac{0,08 + 0,41}{0,08 + 1} = 0,45$$

Admitindo-se uma temperatura de secagem de 55°C, o rendimento teórico de secagem da mamona será, segundo pag. 58 :

$$\eta = \frac{(606,5 - 0,695 t_2) m}{m_2 c_2 (t_2 - t_1) + (606,5 - 0,695 t_2) m}$$

$$\eta = \frac{(605,5 - 0,695 \times 55) 0,56}{0,74 (55 - 20) + (605,5 - 0,695 \times 0,74) 0,56} = 0,91$$

TEMPERATURA

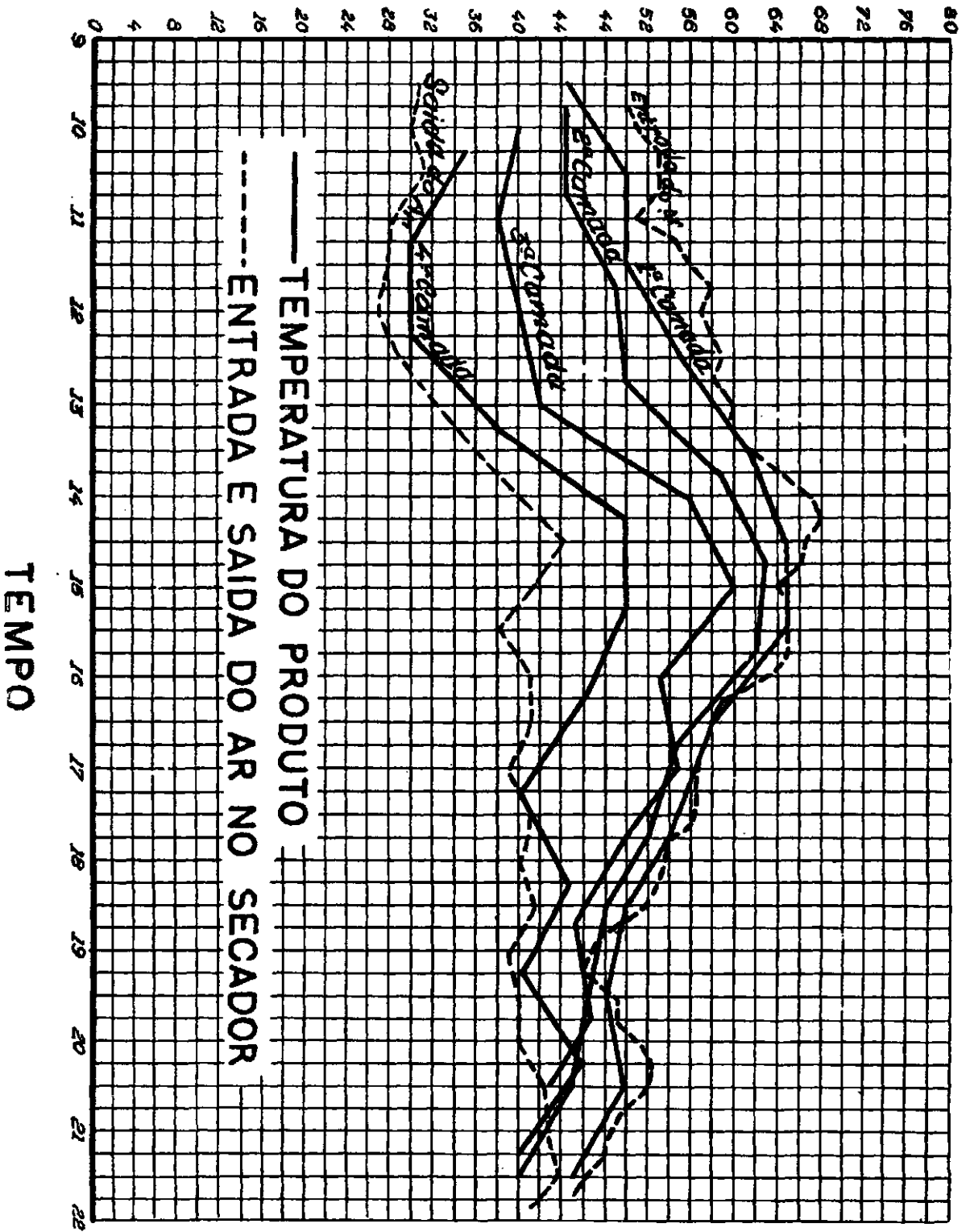


Gráfico XII

para o início da secagem, e :

$$\eta = \frac{(606,5 - 0,695 \times 55) \times 0,08}{0,45 (55-20) + (606,5 - 0,695 \times 55) \times 0,08}$$

$$\eta = 0,74$$

para o fim da secagem. O rendimento teórico da secagem da mamona é menor que o do café, no fim da secagem, não só porque o seu calor específico é maior como também é menor a sua percentagem de umidade. Por êstes resultados vê-se a grande influência da quantidade de água contida no produto sôbre o rendimento teórico de secagem.

2. A umidade da mamona

A mamona, quando colhida, apresenta-se muito heterogênea ; numa mesma planta encontram-se cachos verdes, maduros e completamente secos ; e num mesmo cacho encontramos frutos com todos os teores de umidade. Dêsse modo, como o café, a mamona que se apresenta comumente na prática para sofrer a operação de secagem é constituída por uma massa bastante heterogênea.

Neste caso, porém, não tem muita importância a aparência do produto depois de sêco ; os frutos ressecados não perdem o seu valor econômico. Não se necessita de uma atenção constante como é para o caso do café. Pelo contrário, quanto mais sêco o produto, melhor. Naturalmente, o limite é dado pelas condições econômicas.

Para os nossos ensaios de secagem, a mamona utilizada era mais ou menos homogênea e continha grande percentagem de umidade, o que demonstra ser constituída em grande parte de frutos verdes. A média de várias determinações deu 128% de umidade em relação ao pêso sêco.

O gráfico XI, nos dá a curva da secagem da mamona na estufa a 100—110°C.

Comparando-se êsse gráfico com o gráfico I chega-se imediatamente a uma primeira conclusão, que é a seguinte : seca-se a mamona com mais facilidade que o café. Nas primeiras doze horas de estufa conseguimos retirar 125% de água, enquanto que os 3% restantes necessitaram 80 horas para serem retirados.

Diante do que foi dito pode-se admitir, termo médio, a mamona como tendo 130% de umidade, em relação ao pêso sêco. Pode-se também afirmar, diante do gráfico XI, que a percentagem de água de capilaridade é quase total na mamona, cêrca de 110%, enquanto que os 18% a 20% restantes são de água de constituição. Isto indica que a secagem da mamona é feita com relativa facilidade.

Outro ponto importante a considerar na secagem da mamona é que ela não necessita de seca parcial e posterior "descanso", pois aqui não

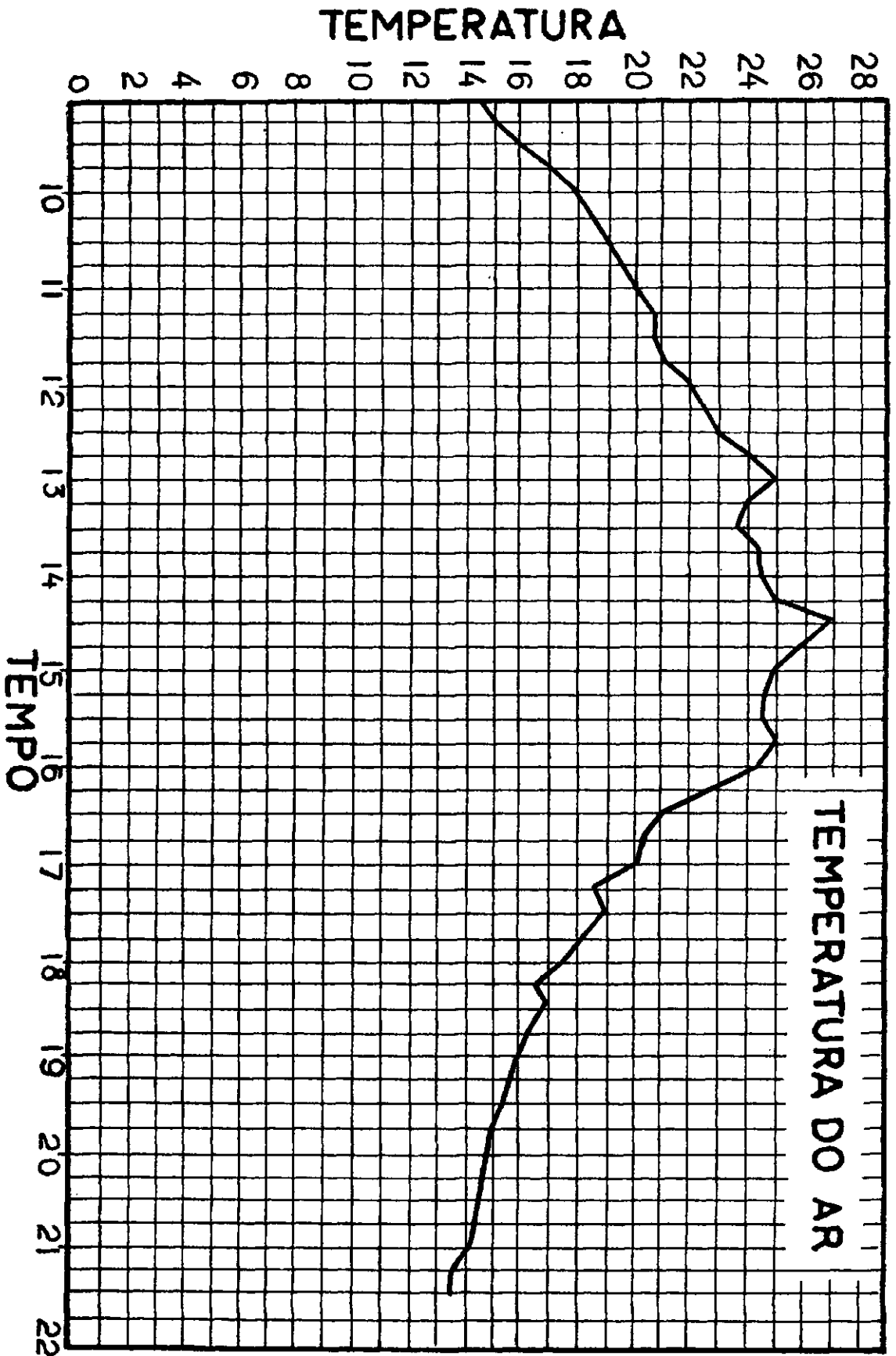


Gráfico XIII

se visa homogeneidade de côr, aspecto, etc. Pode-se terminar, completamente, a secagem no secador, para se ganhar o maior tempo possível.

Em resumo, os resultados das determinações da secagem de mamona, em nossos ensaios, foram :

Pêso total da mamona entrada no secador (com 128% de umidade)	$P_1 = 1326,500 \text{ kg}$
Pêso total da mamona saída do secador (com 8% de umidade)	$P_0 = 628,200 \text{ kg}$
Quantidade de água retirada pelo secador	$P_1 - P_0 = 698,300 \text{ kg}$

3. Pêso específico da mamona

O nossos ensaios deram, para a mamona original, recém-colhida, um pêso específico médio aparente de 0,41, o que corresponde, aproximadamente, a 20,5 kg por alqueire. Isto para a mamona contendo, como vimos, 128% de umidade em relação ao pêso sêco ou 60% em relação ao úmido.

A mamona sêca tem pêso específico muito menor, pode ser calculado em 0,30 a 0,35 ou seja cêrca de 15 ou 18 kg por alqueire.

Em tôrno de 10% de umidade os frutos entram em deiscência, sendo, até certo ponto, um inconveniente para a secagem.

4. Considerações sôbre a temperatura

A mamona na estufa a 95°C apresentou-se completamente alterada na sua côr, o que em parte é um índice demonstrativo de que esta temperatura é prejudicial. Temos verificado também que a 80°C não houve qualquer alteração no seu aspecto. Como medida de precaução podemos tomar esta temperatura como a limite, para a secagem.

O gráfico XII nos mostra a marcha da temperatura de entrada do ar quente e a da mamona contida no secador nas suas diferentes camadas. Nota-se que a máxima temperatura atingida pelo produto, no secador, esteve em tôrno de 64°C, o que demonstra ter sido ótima a secagem em relação a êste fator. Poderíamos, no fim, ter dado maior temperatura, porém as condições do ambiente e do aquecedor não permitiram. A análise do gráfico XII revela que as temperaturas começaram a crescer, notadamente, às 12 horas para atingir a um máximo em tôrno das 14 - 15 horas, para daí em diante decrescer até o fim do ensaio. Como se vê, existe uma perfeita concordância com o gráfico da temperatura do ar, gráfico XII, no qual a máxima temperatura também está entre 14 - 15 horas. Isto demonstra, de certa maneira, que o aquecedor funcionou, mais ou menos, de modo constante, durante o transcorrer do ensaio e

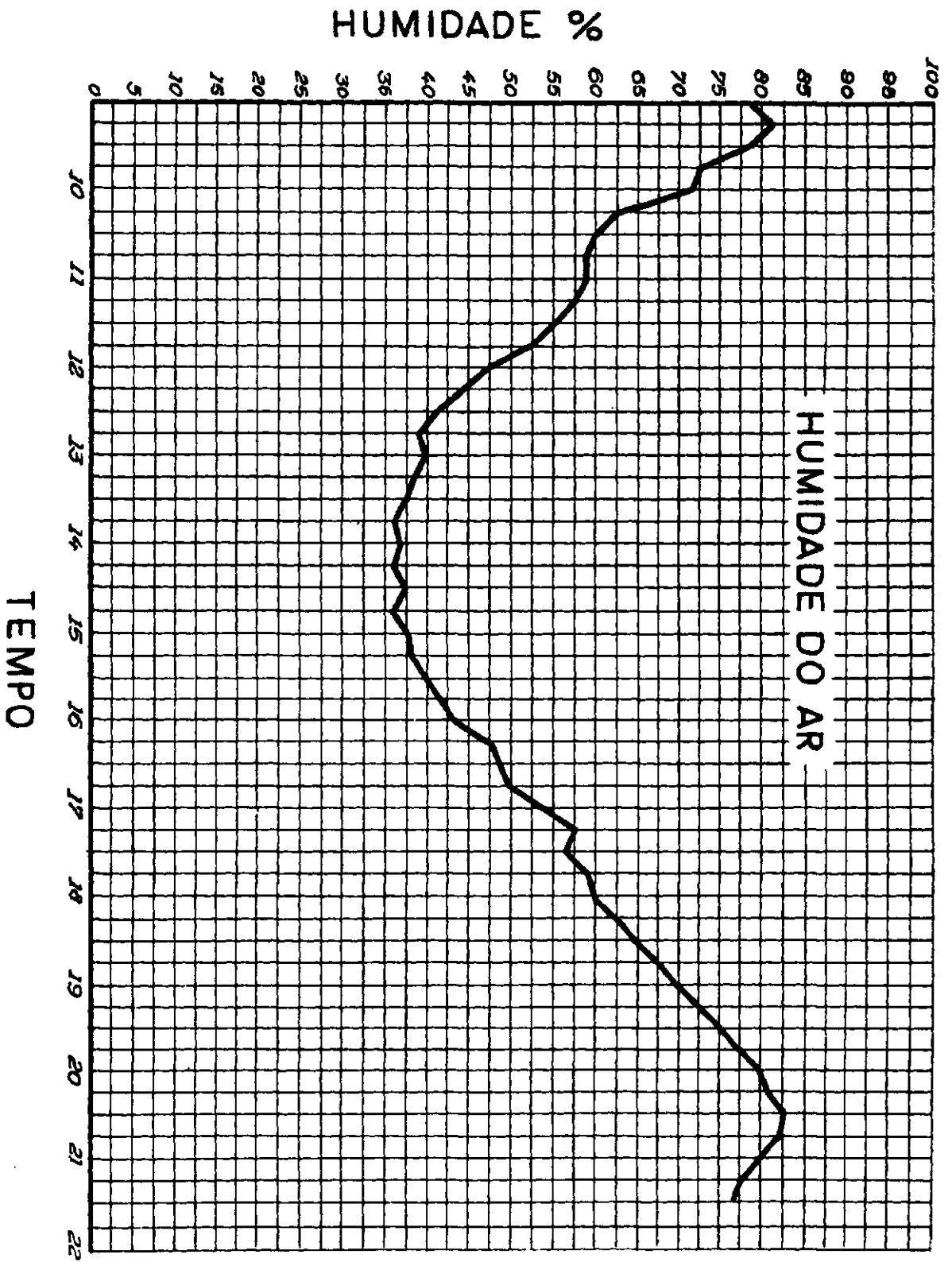


Gráfico XIV

pode-se afirmar que a variação da temperatura de entrada do ar foi devido, unicamente, à variação da temperatura do ar ambiente.

Outro fato interessante a se constatar nesse gráfico, é que, no início, as temperaturas de entrada do ar, das diferentes camadas de mamona dentro do secador e de saída do ar, são diferentes. À medida que a secagem continua, estas diferenças vão diminuindo para quase se igualarem às temperaturas no fim da secagem. A explicação é clara. No início, o ar em contacto com as primeiras camadas de mamona, retira grande porção de umidade e, como consequência, baixa sua temperatura. No fim, o ar de entrada já encontra as camadas quase secas e, neste caso, o seu teor de umidade pouco varia e, como consequência, a sua temperatura.

5. As condições do ambiente

Durante os ensaios, a pressão atmosférica permaneceu, praticamente, constante e em tórno de 712 milímetros de mercúrio.

Os gráficos XIII e XIV nos mostram as variações de temperatura e umidade do ar, respectivamente. Que a temperatura do ar exerceu influência sobre a marcha da secagem já foi evidenciado no ítem anterior, porém esta influência é proveniente, como já vimos, da variação da umidade contida no ar.

Pode acontecer, e é muito comum, que a variação do grau de umidade do ar ambiente seja proveniente da variação da temperatura desse mesmo ar. Os gráficos XIII e XIV parecem indicar, com bastante clareza, o que acabamos de afirmar. É fácil demonstrar o que dissemos. Efetuando-se o cálculo de $f_0 = \varphi_0 \times F_0$, como foi indicado na página 69, vamos notar que f_0 permaneceu mais ou menos constante durante o transcorrer do ensaio, e isto indica, como já vimos, que as condições do ambiente permaneceram normais. Chamamos condições normais do ambiente as que comumente se verificam; é sabido que a temperatura do ambiente começa a subir às 6 horas até atingir um máximo entre 14 - 15 horas para depois diminuir, ao passo que com o grau de umidade dá-se o inverso.

6. A marcha da secagem

O gráfico XV indica a umidade do ar na saída do secador. A análise deste gráfico revela que, no início da secagem, o ar saiu com grande per-

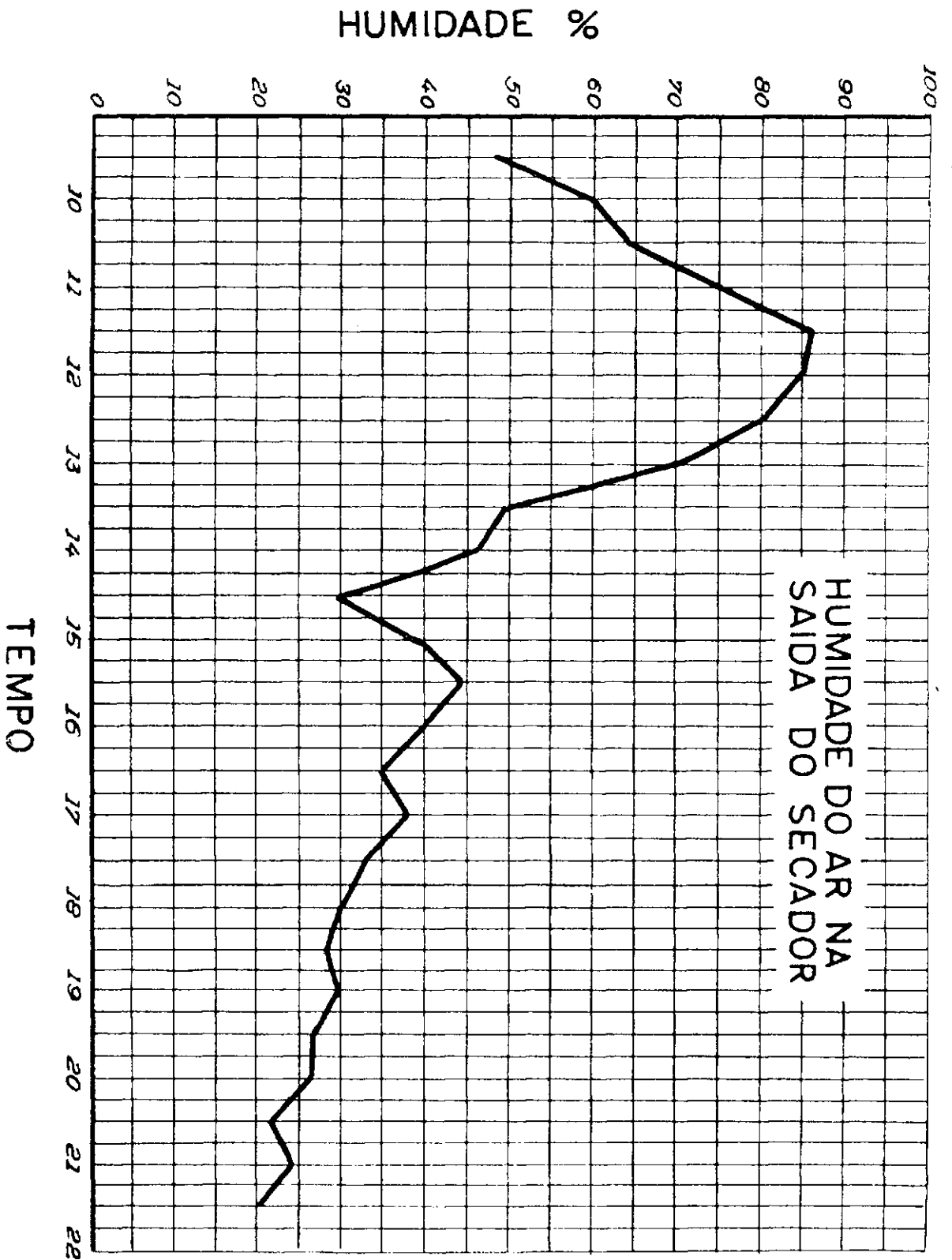


Gráfico XV

centagem de umidade e à medida que a operação prossegue esta percentagem vai diminuindo. É evidente que, no início da operação, a secagem se processa com maior facilidade em vista da alta percentagem de água livre contida na mamona.

Como já vimos, a idéia exata da marcha da secagem pode ser vista calculando-se a variação da quantidade de vapor d'água retirado da mamona por kg de ar sêco entrado no secador.

O gráfico desta variação pode ser obtido pela fórmula :

$$P_{v_2} - P_{v_1} = 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)}$$

cujos valores estão colocados na tabela à página seguinte; é sabido que $p_{v_2} - P_{v_1}$ representa a quantidade, em gramas, de vapor contida num kg de ar sêco. Para se saber a quantidade de vapor retirada pelo ar em função do tempo, temos que determinar a quantidade de ar sêco entrada no secador. Para isso, temos :

$$Q_1 = 83.3 S \sqrt{p_a \frac{(H_0 - \varphi_0 F_0)^2}{H_0 (273 + t_1) (13,6 H_0 - 5,13 \varphi_0 F_0)}} = K_1 \chi (\Theta)$$

primeiramente temos que determinar p_a . A marcha seguida para esta determinação é a já vista na página 75, a saber :

1.^a determinação :

$$s_1 - - p_{dm1} = 3,5$$

$$s_2 - - p_{dm2} = 2,8$$

$$s_3 - - p_{dm3} = 2,6 \quad p_{dm} = \frac{3,5 + 2,8 + 2,6 + 2,6 + 2,2}{5} \cong 2,7$$

$$s_4 - - p_{dmv} = 2,6$$

$$s_5 - - p_{dm6} = 2,2$$

2.^a determinação :

$$p_{dm} = \frac{1,7 + 1,5 + 1,5 + 1,2 + 1,0}{5} = 1,3$$

QUANTIDADE DE VAPOR

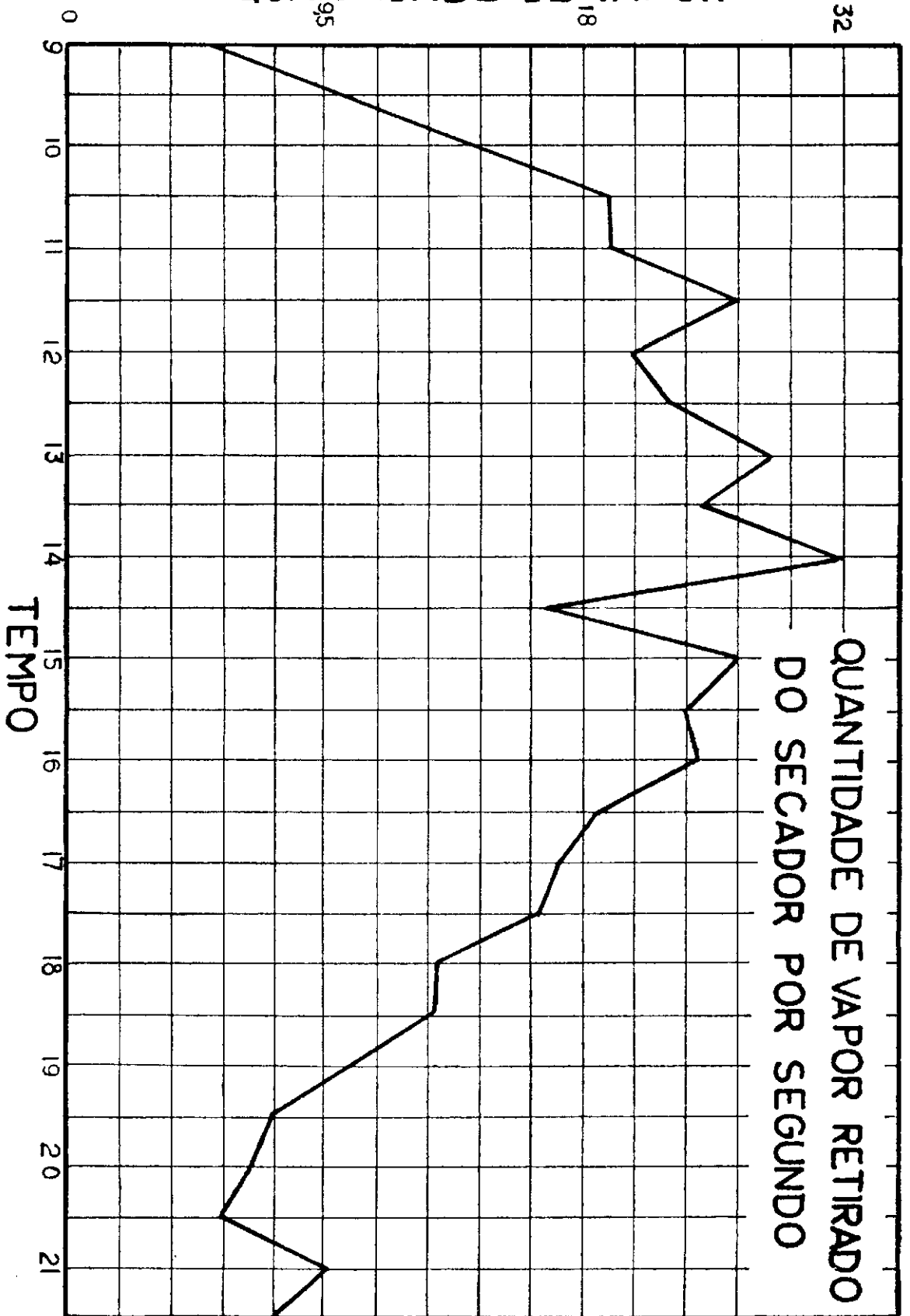


Gráfico XVI

tempo	Pressão atmosférica	temperatura do ar	umidade do ar	temperatura de saída do ar	umidade do ar na saída	tensão máx. do vapor no ambiente	tensão máx. do vapor na saída	Pv2 - Pv1
θ	H ₀	t ₀	φ ₀	t ₂	φ ₂	F ₀	F ₂	
9,0	712	14,5	0,78	30,0	0,40	12,4	31,8	2,75
9,5	712	16,0	0,79	31,0	0,48	13,6	33,5	4,83
10,0	712	18,0	0,72	30,0	0,60	15,5	31,8	7,23
10,5	712	19,0	0,60	31,0	0,64	16,5	33,5	10,6
11,0	712	20,0	0,58	28,5	0,74	17,5	29,2	10,5
11,5	712	20,5	0,56	28,0	0,86	18,0	28,4	13,2
12	712	22,0	0,47	26,0	0,85	19,8	25,3	11,1
12,5	712	23,0	0,41	27,0	0,80	21,1	26,8	11,7
13,0	712	25,0	0,40	32,0	0,69	23,8	35,3	13,6
13,5	712	24,0	0,37	35,5	0,49	22,4	44,0	12,1
14	712	24,5	0,37	39,5	0,46	23,1	54,0	14,9
14,5	712	27,0	0,38	44,5	0,30	26,8	68,2	9,4
15,0	712	25,0	0,38	41,5	0,39	23,8	59,5	12,9
15,5	712	24,5	0,40	38,0	0,45	23,1	49,3	11,8
16,0	712	24,5	0,43	41,0	0,40	23,1	58,0	12,1
16,5	712	21,0	0,48	41,0	0,35	18,6	58,0	10,4
17,0	712	20,0	0,53	39,0	0,37	17,5	52,1	9,1
17,5	712	18,5	0,57	41,0	0,33	16,0	58,0	9,1
18,0	712	17,5	0,60	40,5	0,30	15,0	56,4	7,2
18,5	712	17,0	0,65	41,5	0,29	14,5	59,5	7,1
19,0	712	16,0	0,70	39,0	0,30	13,6	52,0	5,5
19,5	712	15,5	0,75	40,0	0,26	13,2	54,9	3,9
20,0	712	15,0	0,80	40,0	0,26	12,8	54,9	3,6
20,5	712	14,0	0,83	42,5	0,21	12,0	62,7	2,9
21,0	712	14,0	0,80	43,0	0,24	12,0	64,4	5,3
21,5	712	14,0	0,77	44,0	0,20	12,0	67,8	3,9

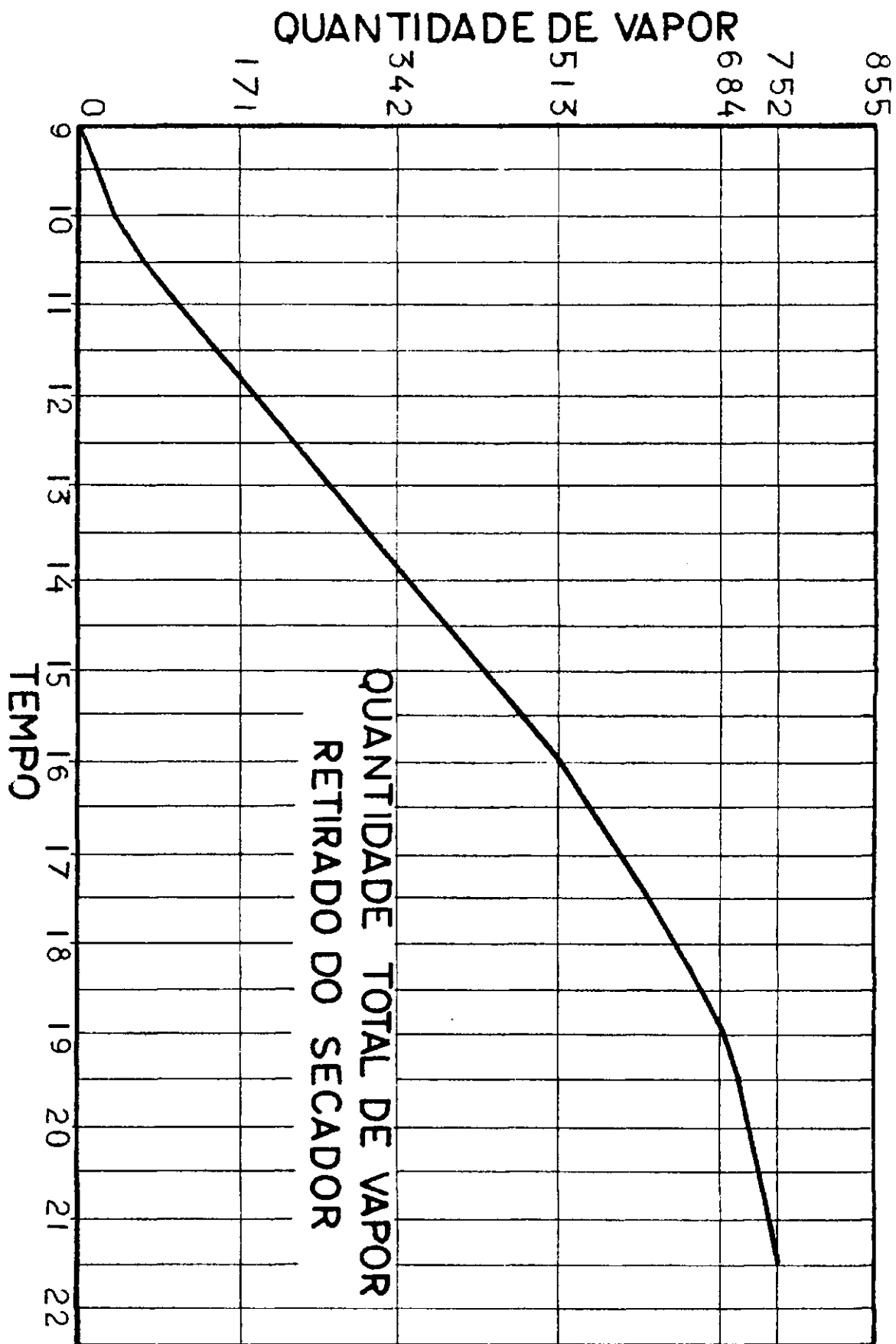
3.^a determinação :

resultado médio $p_{dm} = 2,1$

Admitindo-se como constante o valor de p_a e sendo igual a média dos três resultados determinados, temos :

$$p_a = \frac{2,7 + 1,3 + 2,1}{3} = 2,0 \text{ milímetros}$$

Comparando-se este resultado com o determinado nos ensaios de secagem de café ($p_a = 1,5$), nota-se que para a mamona a pressão di-



QUANTIDADE TOTAL DE VAPOR
RETIRADO DO SECADOR

Gráfico XVII

nâmica foi cêrca de 30% maior. A explicação dêste fato reside simplesmente na menor resistência à passagem do ar oferecida pela massa de mamona contida no secador. Sendo esta massa constituída por grãos maiores, é menos compacta e, conseqüentemente, oferece uma resistência menor à passagem do ar.

A quantidade Q de ar sêco entrada no secador, por segundo, é então :

$$Q_1 = 83.3 S \sqrt{2 \frac{(712-9)^2}{712(273+60)(9660-47)}}$$

$Q_1 \cong 1,9$ kg de ar sêco por segundo.

$$dp = K_1 \chi(\Theta) \cdot (p_{v2} - p_{v1}) d\Theta$$

$$dp = 1,9 (p_{v2} - p_{v1}) d\Theta$$

que é a quantidade de vapor d'água retirada por unidade de tempo. (veja gráfico XVI).

Finalmente, a quantidade total de vapor d'água retirada, durante o ensaio, é :

$$p = Q_1 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} (p_{v2} - p_{v1}) \cdot d\Theta$$

$$p = 1,9 \int_{9,0}^{21,5} (p_{v2} - p_{v1}) \cdot d\Theta$$

O valor desta integral, determinada grâficamente, está indicado no gráfico XVII e é :

$$p = 750 \text{ kg de vapor d'água}$$

Comparando-se êste resultado com o realmente obtido, que foi, página 91 :

$$p = 698,3 \text{ kg}$$

verificamos que o êrro cometido foi :

$$\Sigma = \frac{750 - 698,3}{698,3} < 7,5\%$$

7. O calor na secagem

A quantidade de calor entrada no secador, de acôrdo com o que já vimos, é :

$$q = 0,24t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} (0,50t_1 + 595)$$

ou, fazendo $\varphi_0 F_0 = f_0$ e lembrando-se que $H_0 = 712$:

$$q = 0,24t_1 + 0,623 \frac{f_0}{712 - f_0} (0,50 t_1 + 595)$$

temos então a seguinte tabela

tempo	temperatura de entrada do ar	tensão do vapor contido no ar de entrada	q
9,0	50°C	9,65	17,3
9,5	50	10,7	17,9
10,0	51	11,1	18,3
10,5	53	9,9	18,2
11,0	51	10,1	17,8
11,5	56	10,1	19,0
12,0	57	9,3	18,8
12,5	59	8,6	18,9
13,0	60	9,5	19,7
13,5	61	8,3	19,2
14,0	67	8,5	20,8
14,5	67	10,2	21,8
15,0	64	9,0	20,4
15,5	65	9,2	20,7
16,0	63	9,9	20,6
16,5	58	8,9	18,8
17,0	56,5	9,3	18,7
17,5	56	9,1	18,4
18,0	53,5	9,1	17,8
18,5	51	9,0	17,2
19,0	47	9,4	16,4
19,5	49	9,9	17,2
20,0	51	10,2	17,8
20,5	52,5	9,9	18,1
21,0	49	9,6	17,0
21,5	46	9,2	16,1

O gráfico XVIII foi construído com os valores de q. Multiplicando-se estes valores por 1,9, que é a quantidade de ar seco entrada no secador admitida como constante, vamos ter as quantidades de calor, em grandes calorias, entradas no secador, por unidade de tempo :

$$q_c = K_1 \Psi' (\Theta) = 1,9 \Psi' (\Theta)$$

$$dq_c = 1,9 \Psi' (\Theta) d\Theta$$

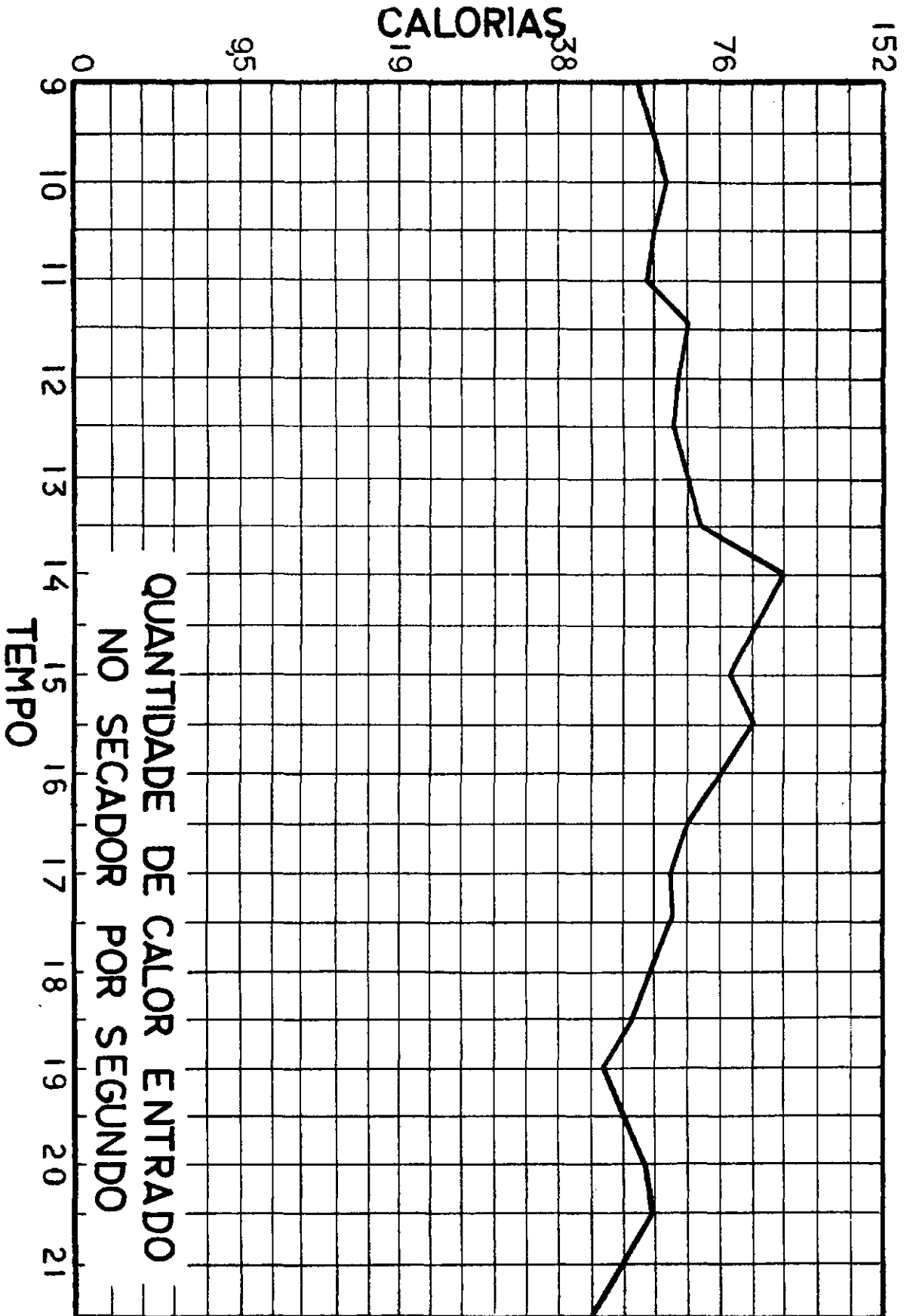


Gráfico XVIII

A quantidade total de calor entrada será, como já vimos :

$$Q_c = 1,9 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \Psi'(\Theta) d\Theta$$

$$Q_c = 1,9 \int_9^{21,5} \Psi'(\Theta) d\Theta$$

Esta integral, calculada gráficamente, representada no gráfico XIX, deu o seguinte valor total :

$$Q_c = 1539000 \text{ calorias}$$

Comparando-se este resultado com o obtido no ensaio de secagem de café vamos notar que a quantidade de calor entrada no secador foi aproximadamente a mesma nos dois casos, por unidade de tempo. Vejamos :

No primeiro ensaio, a secagem durou 5 horas e o secador absorveu 630000 grandes calorias, o que corresponde a 126000 calorias por hora. No ensaio de mamona temos $1539000/12,5 = 123000$ calorias por hora. Isto demonstra que o aquecedor trabalhou, mais ou menos, nas mesmas condições, nos dois casos, e, as condições do ambiente também foram, mais ou menos, as mesmas.

8. Rendimento do secador

Adotando-se a fórmula indicada na página 47, a quantidade de calor utilizada para evaporar os 698,3 kg de vapor, é :

$$Q_u = P [(c_2 t_m + 595) - 1 \times t_e]$$

Vamos admitir, embora comprometendo um pouco a exatidão, como constantes os valores :

$$c_2 = 0,45$$

$$t_m = 49$$

$$t_e = 20$$

donde :

$$Q_u = 698,3 [(0,45 \times 49 + 595) - 20]$$

$$Q_u = 416706 \text{ calorias}$$

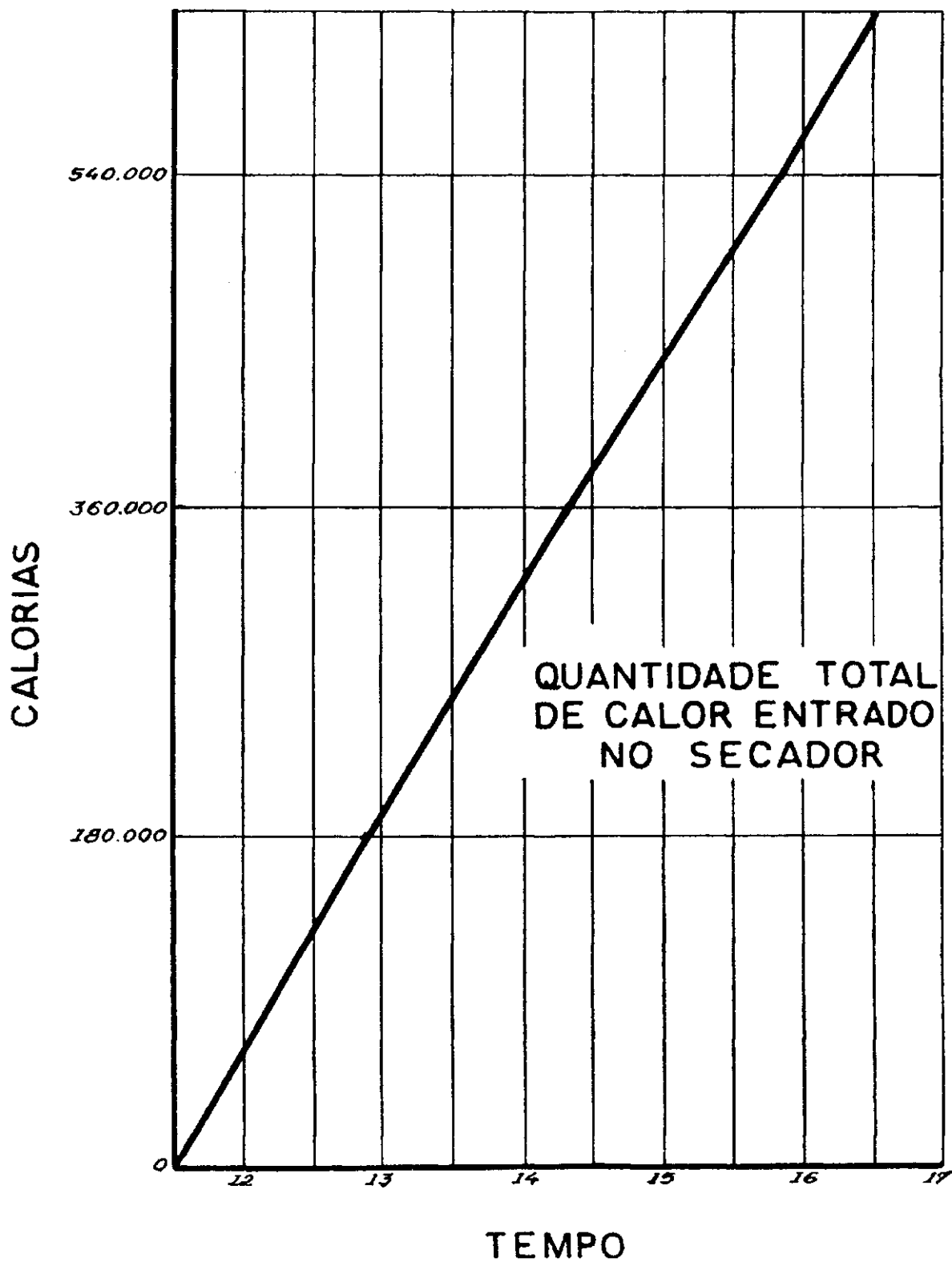


Gráfico XIX

Nestas condições, o rendimento do secador é :

$$\eta = \frac{416706}{1539000} = 0,27$$

Como se vê, o rendimento para a secagem da mamona foi bem maior que para a secagem do café. A explicação reside, principalmente, no fato de que a mamona possui não só maior quantidade de água como também esta se encontra em sua quase totalidade na forma de água livre e, portanto, muito mais fácil de ser retirada, visto que os outros fatores pouca variação tiveram em relação aos dois ensaios de secagem.

Repetindo o mesmo raciocínio da página 85, e admitindo como t_0 médio 20°C e φ_0 médio 0,58, vamos verificar que, nestas condições, o ar úmido contém cerca de 10 calorias por kg de ar seco, portanto o ar entrando no secador já levava consigo cerca de :

$$Q_1 = 1,9.3600.12,5.10 = 855000 \text{ grandes calorias}$$

As restantes $1539000 - 855000 = 684000$ foram absorvidas pelo aquecedor, e pelos motivos expostos na página 85, o rendimento que mais realmente mostra a eficiência do secador, nesta secagem é :

$$\eta = \frac{416706}{684000} = 0,60$$

CONCLUSÕES

1. Relativas à secagem em geral

a) A quantidade de vapor retirada, por kg de ar seco, quando H_1 pouco difere de H_0 é dada pela expressão :

$$p_{v2} - p_{v1} \cong 0,623 H_0 \frac{\varphi_2 F_2 - \varphi_0 F_0}{(H_0 - \varphi_0 F_0) (H_0 - \varphi_2 F_2)}$$

esta expressão é função de Θ e pode ser escrita assim :

$$p_{v2} - p_{v1} = K. \Psi^*(\Theta)$$

b) A quantidade de ar úmido entrada no secador, em cada instante, é dada pela expressão :

$$q = 0,236 S \sqrt{\frac{H_0 (273 + t)}{H_0 - 0,377 \varphi_0 F_0}}$$

c) A quantidade de ar sêco entrada no secador, em kg, é :

$$q = 83.3 \text{ S } \sqrt{\frac{(H_0 - \varphi_0 F_0)^2}{H_0 (273 + t_1) (H_0 - 0,377 \psi_0 F_0)}} \text{ pa}$$

esta expressão é função do tempo Θ , e pode ser escrita assim :

$$q = K. \chi (\Theta)$$

num tempo de $d\Theta$, a quantidade de ar sêco será :

$$dq = K_1. \chi (\Theta). d\Theta$$

d) A quantidade de vapor retirada do produto no instante Θ é :

$$dp = K_1. \chi (\Theta). (p_{v2} - p_{v1}). d\Theta$$

$$dp = K.K_1. \chi (\Theta). \Psi' (\Theta). d\Theta$$

e) A quantidade total de vapor retirada no intervalo $\Theta_2 - \Theta_1$ é :

$$p = K.K_1 \int_{\Theta_2}^{\Theta_1} \Psi' (\Theta). \chi (\Theta). d\Theta$$

f) A quantidade do calor entrada no secador, por kg de ar sêco, é :

$$q_c = c_1 t_1 + 0,623 \frac{\varphi_0 F_0}{H_0 - \varphi_0 F_0} (c_2 t_1 + 595)$$

esta expressão é função de Θ e pode ser escrita assim :

$$q_c = K_2. \Sigma (\Theta)$$

g) A quantidade total de calor entrada no secador, no intervalo $\Theta_2 - \Theta_1$ é :

$$Q_c = K_1 K_2 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \Sigma (\Theta). \chi (\Theta) d\Theta$$

h) Chamamos rendimento do secador a expressão :

$$\eta = \frac{p [c_2 t_m + 595 - 1 \times t_e]}{K_1 \cdot K_2 \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \Sigma(\Theta) \cdot \chi(\Theta) \cdot d\Theta}$$

Êste rendimento é tomado em relação à quantidade total de calor contida no ar que entrou no secador.

Quando se quer tomar o rendimento sòmente em relação ao calor fornecido ao ar pelo aquecedor, o denominador deve ser subtraído da quantidade de calor contida no mesmo volume de ar ambiente.

i) Chamamos rendimento teórico da secagem do grão ao quociente :

$$\eta_t = \frac{(606,5 - 0,695 t_2) m}{m_2 c_2 (t_2 - t_1) + (606,5 - 0,695 t_2) m}$$

j) O grau de umidade inicial, o pêso específico, o calor específico, a forma, as dimensões, a estrutura, a homogeneidade do produto influem nas condições de secagem do mesmo.

k) A temperatura é o fator mais importante na secagem. Cada produto possui uma temperatura limite de secagem, além da qual não se deve ultrapassar. Esta temperatura é função da própria natureza do produto, da percentagem de água nêle contida e das próprias condições de secagem.

2. Relativas à secagem do café

a) O calor específico médio do café em côco, completamente sêco, é de 0,33 ; êste valor é função da umidade contida no mesmo.

b) O rendimento teórico da secagem do café em côco é variável com o teor de umidade do mesmo e a temperatura de secagem, e vai de 0,80 a 0,90.

c) A percentagem de umidade total do café é muito variável e depende do seu estado de maturação. O café em côco tem comumente 50% em relação ao pêso sêco ou seja 33% em relação ao pêso úmido ; depois de sêco, essas percentagens são de 18 e 15, respectivamente. Beneficiado, o café tem de 12 a 15% e de 10,5 a 12,5% de umidade em relação ao pêso sêco e úmido, respectivamente.

d) A percentagem de água de constituição deve estar compreendida, presumivelmente, entre 20 a 25 em relação ao peso seco, ou 16,5 a 20 em relação ao peso úmido.

e) A temperatura limite de secagem para o café em casca é de 70°C.

f) A temperatura de secagem poderá ser tanto mais elevada quanto mais seco e homogêneo estiver o produto.

g) A secagem lenta e à baixa temperatura é melhor, principalmente quando se trata de produto muito úmido e heterogêneo.

h) O café em côco não deve ser entulhado com mais de 25% de umidade em relação ao peso seco, ou seja mais de 20% em relação ao peso úmido.

3. Relativas à secagem de mamona

a) O calor específico médio da mamona em casca, completamente seca, é de 0,41; este valor é função da umidade nela contida.

b) O rendimento teórico de secagem da mamona em casca é variável com o seu teor de umidade e com a temperatura de secagem e está entre os limites de 0,74 a 0,91.

c) A mamona em casca possui grande percentagem de água livre.

d) A temperatura limite de secagem para mamona em casca é de 80°C.

AGRADECIMENTOS

Nossos sinceros agradecimentos ao Dr. João Aloisi Sobrinho, que colaborou na execução dos ensaios de secagem de café e nos cálculos inseridos neste trabalho.

LITERATURA CITADA

1. **Dafert, F. W. e L. Rivinus.** A secagem do café I. Relatório do Instituto Agrônomico de Campinas, pg. 139, 1894/95.
2. **Choussy, F.** Estudos técnicos de la secada del café. El café en El Salvador : 585-620, 641-670. 1940.
3. **Anônimo.** Em Manual del Ingeniero (Academia Hutte de Berlim) 1 : 482. Ed. Gustavo Gile, Barcelona. 1926.
4. **Tosello, A.** A perda de umidade pelo resfriamento. Anuário da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Campinas, pg. 121. 1942.
5. **Tosello, A.** Ensaio preliminares sobre o Seletor de Café "Campinas". Revista do Instituto do Café nº. 1360 1940.