

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Classif.:	
Autogr.:	
V.:	
Forma BCX:	

SECAGEM DE FATIAS DE CEBOLA
EM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO

José Roberto Delalibera Finzer
Engenheiro Químico

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch

*Este exemplar corresponde a cópia
final da tese defendida por José
Roberto Delalibera Finzer e aprovada
pela Comissão Julgadora em 24.02.84,
Campinas, 24 de fevereiro de 1984.*

Theo Guenter Kieckbusch

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de "Mestre" em Engenharia de Alimentos.

Dedico este trabalho
aos meus pais, Mário e Hélia
à minha esposa, Sirlei
e as minhas filhas, Klívia e Lívia

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH, pela orientação segura, apoio e dedicação com que acompanhou as diversas etapas deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola (FEAA) da UNICAMP.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade concedida.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À professora MARIA AMÉLIA CHAIB (FEAA), pelas sugestões na realização do estudo sensorial.

À CELSO COSTA LOPES (FEAA), pela determinação das curvas de equilíbrio.

Ao professor RODMAR CARDINALI (UNICAMP), que realizou as medidas de amplitude de vibração.

Ao professor NIVALDO LEMOS CUPINI (UNICAMP), pelo empréstimo do sistema de vibração.

À todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Desenvolveu-se um protótipo de secador de leite vibro-fluidizado, que foi testado na desidratação de anéis de cebola. O equipamento reduz o tempo de secagem de cebola e melhora a qualidade do produto desidratado, quando comparado com secadores convencionais.

Foram determinados os parâmetros ótimos de vibração, visando consumir um mínimo de energia. Deu-se ênfase especial à descrição do comportamento fluido-dinâmico do leite vibro-fluidizado.

Verificou-se a influência das condições do ar e da cebola na secagem em leite estático e vibro-fluidizado. Os parâmetros investigados foram: velocidade e temperatura do ar, carga de cebola no leite e dimensões das fatias de cebola. Foram definidas as melhores condições de operação, visando principalmente um produto uniforme em forma e no conteúdo de umidade e obtido com reduzido tempo de secagem.

Efetuuou-se um estudo sensorial com a cebola reconstituída a fim de delimitar as melhores opções de operação, mantendo um compromisso de uma qualidade aceitável. Ensaios de reconstituição revelaram que a cebola desidratada sob influência vibracional, apresenta maior velocidade de rehidratação do que a obtida em leite estático.

Realizou-se uma análise matemática utilizando um modelo que relaciona a umidade residual da cebola com a difusividade. As equações obtidas permitem realizar simulação de secagem em diferentes condições de operação.

SUMMARY

A prototype of a vibro-fluidized bed dryer was developed and applied to the dehydration of onion rings. Compared to conventional drying methods, this equipment reduces the drying time and improves the quality of the final product.

The best vibrating parameters, in terms of energy consumption, were determined. Special attention is given to the description of the fluid dynamic behavior of the vibro-fluidized bed.

The influence of the conditions of the drying air and of the onions were determined. The parameters investigated were: air velocity and air temperature, onion-bed load and dimensions of the chopped onions. The best operation conditions were defined, seeking a product uniform in shape and in water content, obtained with a minimum drying time.

Sensorial evaluations were made on reconstituted onions in order to establish the options that ensure an acceptable quality. Reconstitution tests revealed that the onion produced under vibrations showed higher rehydration rate than the one obtained in static bed.

A mathematical analysis was made, making use of a diffusional model for water transport. The equations obtained can be used to simulate drying under different conditions.

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

- a_1 = área da seção da tubulação de admissão de ar (cm^2)
 a_2 = área da seção do medidor de orifício (cm^2)
 A = amplitude de vibração (L)
 A = fator de frequência (Eq. IV-1)
 b = altura barométrica local (mm Hg)
 c_p = calor específico médio do ar de secagem ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
 cs = cebola seca
 d_e = diâmetro equivalente da partícula (cm)
 d_1 = diâmetro da tubulação de admissão de ar (cm)
 d_2 = diâmetro do medidor de orifício (cm)
 d_p = diâmetro de uma partícula esférica
 D = difusividade de umidade no interior do sólido (m^2/s)
 D_{AB} = difusividade da água no ar (cm^2/s)
 e = excentricidade do camo (mm)
 E = energia de ativação (Eq. IV-1)
 E = energia requerida para vibração (Joule), (Eq. III-9)
 f = frequência de vibração (Hz)
 F_a = força atuante sobre a partícula devido ao atrito com o gás
 F_i = força de inércia (kgf)
 F_M = força externa da mola (kgf)
 F_v = força atuante sobre a partícula devido a vibração
 F_y = componente vertical da força resultante do seguidor atuando sobre o camo (kgf)

- g = aceleração da gravidade (L/T^2)
 Δh = queda de pressão através do medidor de orifício ($cm H_2O$)
 h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção ($kcal/h.m^2.^{\circ}C$)
 h_f = perda de energia devido ao atrito do ar na tubulação, acidentes e acessórios (m de coluna de ar).
 k_G = coeficiente de transferência de massa ($kmol/h.m^2.mm Hg$)
 \dot{m} = taxa de massa de ar (kg/s)
 M_A = massa molecular da água ($kg/kmol$)
 p_a = pressão estática do ar na entrada do ventilador (N/m^2)
 p_b = pressão estática do ar na saída do vaso de secagem (N/m^2)
 p_v = pressão parcial do vapor de água no ar, $mm Hg$
 p_v^* = pressão de vapor de água no ar saturado à temperatura T ($mm Hg$)
 p_w^* = pressão de vapor de água no ar saturado à temperatura de bulbo úmido T_w ($mm Hg$)
 P = carga sobre o camo (kgf), (Eq. III-5)
 P = potência consumida pelo ventilador ($energia/s$)
 P = pressão total do ar ($mm Hg$), (Eq. II-9)
 \dot{q} = taxa de calor ($kcal/s$)
 R = taxa de secagem ($T=T$)/taxa de secagem ($T=70^{\circ}C$), (Eq. IV-1)
 R = constante dos gases
 S = metade da espessura da placa (L)
 t = tempo de operação (s), (Cap. III)
 T = temperatura de bulbo seco do ar ($^{\circ}C$)
 T_0 = temperatura do ar de secagem na entrada do vaso ($^{\circ}C$)
 T_w = temperatura de bulbo úmido do ar ($^{\circ}C$)

ΔT = diferença de temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$)

u_G = velocidade do ar de operação (cm/s)

u_{mf} = velocidade mínima de fluidização das partículas pelo gás (cm/s).

u_{mv} = velocidade mínima de fluidização das partículas, sob ação do fluxo de gás e da componente vertical da força vibracional (cm/s)

v_a = velocidade do ar na entrada do ventilador (m/s)

v_b = velocidade do ar na saída do vaso de secagem (m/s)

v_0 = velocidade do ar na entrada do vaso de secagem (cm/s)

W = energia consumida na vibração (F.L), (Eq. III-6)

W = vazão em massa de ar (massa/tempo)

W_p = energia requerida para deslocar o ar (metros de coluna de ar), (Eq. III-1)

X = umidade da cebola (massa de água/massa de cebola seca)

X_0 = umidade inicial da cebola (massa de água/massa de cebola seca)

X_{eq} = umidade da cebola em equilíbrio com o ar de secagem (massa de água/massa de cebola seca)

$(X - X_{eq})$ = umidade livre da cebola (massa de água/massa de cebola seca)

$(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq})$ = umidade residual da cebola (adimensional)

y = deslocamento do seguidor (mm), (Eq. III-3)

y = distância medida na direção da difusão (m), (Eq. VI-1)

\ddot{y} = aceleração do seguidor (mm/s^2)

Y = umidade absoluta do ar (massa de água/massa de ar seco)

Z_a = carga estática do ar na entrada do ventilador (m)

Z_b = carga estática do ar na saída do vaso de secagem (m)

α = coeficiente de descarga

γ = peso específico do ar (N/m^3)

ϵ = coeficiente de compressibilidade

η = rendimento mecânico do ventilador

θ = ângulo do camo (rad), (Eq. III-3)

θ = tempo de secagem (min), (Cap. VI)

λ_w = calor latente de vaporização da água (kcal/kg)

ν = viscosidade cinemática do ar (m^2/s)

ρ_p = densidade do sólido (massa/volume)

ρ_G = densidade do gás (massa/volume)

ϕ = umidade relativa do ar

ω = velocidade angular (rad/s)

I N D I C E

	página
CAPÍTULO I . DESIDRATAÇÃO DE FATIAS DE CEBOLA.....	1
A . Introdução.....	1
B . Processos de desidratação de cebola.....	3
C . Cinética de secagem de fatias de cebola.....	7
D . Qualidade da cebola desidratada.....	12
E . Secagem da cebola em leito vibro-fluidizado.....	13
CAPÍTULO II . DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM PRO TÓTIPO DE SECADOR DE LABORATÓRIO DE LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF).....	15
A . Introdução.....	15
B . Secagem em leito vibratório.....	24
C . Desenvolvimento e construção do secador.....	28
D . Preparo da matéria prima.....	31
E . Operação do secador e técnicas experimentais.....	33
CAPÍTULO III . EFEITO DA VIBRAÇÃO DO LEITO NA DINÂMICA E CINÉTI CA DE SECAGEM DE FATIAS DE CEBOLA.....	38
A . Introdução.....	39
B . Distribuição de umidade no leito de cebola.....	39
C . Regimes de operação.....	40
D . Efeito da vibração no comportamento do leito.....	43
E . Efeito da vibração na cinética de secagem.....	45
F . Energia consumida na operação em leito estático e vi- bratório.....	53
1 . Energia de deslocamento do ar.....	54
2 . Energia de vibração.....	55
3 . Energia de aquecimento do ar de secagem.....	57

CAPÍTULO IV . INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES DO AR E DA CEBOLA NA SECAGEM EM LEITO ESTÁTICO E VIBRO-FLUIDIZADO.....	63
A . Efeito da velocidade do ar de secagem.....	63
B . Efeito da temperatura do ar de secagem.....	69
C . Efeito da carga de cebola na secagem.....	77
D . Efeito das dimensões das partículas de cebola na secagem.....	80
1 . Anéis com largura diferentes.....	82
2 . Anéis seccionados.....	88
E.. Otimização da operação de secagem.....	90
CAPÍTULO V . CARACTERIZAÇÃO COMPARATIVA DA QUALIDADE DO PRODUTO.....	100
A . Introdução.....	100
B . Análise sensorial.....	102
C . Rehidratação.....	106
D . Seleção de opções de operação.....	109
CAPÍTULO VI . ANÁLISE MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO.....	111
CAPÍTULO VII . CONCLUSÕES.....	119
CAPÍTULO VIII . SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
APÊNDICE A: Construção e calibração do medidor de orifício....	123
APÊNDICE B: Determinação da frequência e amplitude de vibração	126
APÊNDICE C: Umidade de equilíbrio cebola-ar úmido.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

CAPÍTULO I . DESIDRATAÇÃO DE FATIAS DE CEBOLA

A . Introdução

O período de safra de cebola em uma região é limitado, gerando problemas de armazenamento e regularização de abastecimento, com reflexos negativos no mercado. A situação é agravada em consequência da vida útil relativamente curta do produto "in natura" e também pela superposição das épocas de colheita de regiões produtoras que abastecem o mesmo mercado. Todos estes fatores contribuem para tornar a cebola o produto agrícola de maior oscilação de preços nos últimos cinco anos (GARCIA et al, 1982). Na região de Piedade, a maior produtora de cebola de São Paulo, a colheita é normalmente realizada nos meses de abril a junho (cebola de bulbinho) e de setembro a novembro (cebola de muda). A colheita da região sul do país, concentra-se nos meses de novembro a janeiro (IEA, 1982).

Logo após a colheita, os bulbos de cebola devem ser submetidos a um processo de cura que consiste essencialmente na secagem das camadas superficiais, pela exposição da cebola ao sol durante 2 a 3 dias. Isto torna estas camadas menos permeáveis a umidade e mais resistentes à penetração de microorganismos. Em época de chuva, as cebolas tendem a vir do campo com maior quantidade de umidade o que conduz a deteriorização acelerada dos bulbos pois favorece a brotação e o crescimento de raízes (BUFFINGTON et al, 1981).

A cebola quando armazenada em depósitos com boa ventilação natural, pode ser preservada por um período de aproximadamente 3 meses. Caso seja efetuada uma pré-secagem dos bulbos, utilizando

ventilação forçada a quente, a vida útil do produto pode se prolongar até 4 meses (LEITE et al, 1982).

Algumas tentativas tem sido realizadas no Brasil no sentido de retardar a brotação dos bulbos de cebola, mediante o uso de substâncias reguladoras de crescimento. Os resultados entretanto não foram favoráveis em termos de conservação por períodos prolongados (GARCIA et al, 1977).

A vida útil da cebola se estende até pouco mais de 6 meses, quando a armazenagem é realizada sob condições refrigeradas a uma temperatura na faixa de 0 - 4°C. Esta técnica entretanto exige um investimento relativamente alto, além de cuidados de manutenção (VAN ARSDEL, 1973).

Muitos países permitem o uso de radiação em baixas dosagens para inibir a germinação de bulbos de cebola. A dose de 8 Krad inibe completamente a brotação e reduz o crescimento microbiano sem alterar o sabor e a pungência. Radiação em alta dosagem, de 70 a 700 Krad, afeta a pungência da cebola (SILBERSTEIN et al, 1979). O Brasil não emprega radiação para conservação da cebola em escala industrial, devido ao custo elevado do processo e por não ser ainda legalizado (GARCIA et al, 1977).

Outra forma de preservação da vida útil da cebola é através da sua industrialização. O processo mais comum é a secagem de fatias de cebola. O produto desidratado pode ser armazenado por um período superior a 12 meses (CCC, 1944; PELEG et al, 1970). A cebola pode ser também transformada em pasta adicionada de sal e outros preservantes (JOSLYN & PETERSON, 1958) ou usada para obtenção de essências (ANÔNIMO, 1981 a e b).

As principais cultivares de cebola no Brasil são: Baia Perif_orme, Granex e Texas Grano (LEITE et al, 1982). As características da Baia Perif_orme são mais adequadas à industrialização que as da Texas e Granex. Apresenta um conteúdo de sólidos superior ao das outras cultivares. O produto desidratado apresenta maior retenção relativa de pungência. A matéria prima possui bulbos em forma de globos alongados, o que reduz perdas na preparação (AGUIRRE et al, 1982; STRINGHETA & BUSO, 1982).

B. Processos de desidratação de cebola

A indústria de cebola desidratada no Brasil está em franco desenvolvimento e as principais unidades em operação no país são: Progasa, Produtos Gaúchos; Liotécnica; Liobrás; Ital, Produtos Alimentares; Yabom, Vegetais Desidratados do Brasil e Linguanotto (LEITE et al, 1982).

As principais indústrias consumidoras de cebola desidratada no Brasil são: Refinações de Milho Brasil; Cia. Industrial e Comercial Brasileira (Nestlé) e Nutritional-Indústria de Produtos Alimentares. A merenda escolar, hospitais e o exército apresentam um consumo crescente deste produto, mas o domínio é das fábricas de sopas instantâneas desidratadas que absorvem cerca de 90% da cebola processada (LEITE et al, 1982). Grande parte da cebola desidratada é também utilizada como componente de manufaturados como ketchup (contém aproximadamente 1% em peso equivalente de cebola fresca), molhos (contém aproximadamente 4% de cebola), maionese, temperos combinados, condimentos de saladas, pikles e embutidos de carne.

As principais operações de preparo da matéria prima para o

processo de secagem são: seleção de cebolas grandes e intactas, lavagem para remoção de detritos, cortes para eliminação da raiz e do topo, descascamento com abrasivos ou por chama e finalmente o fatiamento, uma operação que afeta muito a qualidade do produto final. O fatiamento é efetuado perpendicularmente ao eixo vertical da cebola, com cortes de cerca de 3 mm de espessura. Para facilidade de manuseio, as fatias de cebola obtidas, recebem um corte transversal, transformando-as em meias rodela. Fatias obtidas de cortes paralelos ao eixo vertical da cebola secam mais devagar. As facas devem ser bem afiadas para evitar um exagerado esmagamento de células, nas quais se desencadearia reações enzimáticas, com resultados indesejáveis como o desenvolvimento de cor e perda de pungência (VAN ARSDEL, 1973). A cebola fatiada muitas vezes é submetida a sulfitação, mergulhando-a em solução de 2000 ppm de SO_2 , afim de preservar a cor do produto final (CARPI et al, 1977).

Segundo padronização internacional, a umidade máxima admissível da cebola desidratada é de 8% (I. O. S., 1981). A literatura técnica entretanto, recomenda umidades finais entre 4 e 5% (GOWDA & GUPTA, 1976; PELEG et al, 1970). Estes valores estão muito próximos ao conteúdo de umidade necessário para formar uma mono-camada de água e assim atingir condições de maior estabilidade (KAREL, 1980). Determinações do conteúdo de água correspondendo a mono-camada segundo o modelo BET indicam 4,71% de umidade (MAZZA & LeMAGUER, 1978).

A cebola é muito higroscópica, sendo difícil atingir a umidade final recomendada. Por outro lado, em experiências de secagem sob condições constantes do ar, são bem evidenciados dois períodos de velocidade de secagem decrescente. O segundo com caracte

terísticas de transporte de água sensivelmente inferior ao primeiro. Estes fatores exigem um prolongado tempo de residência no secador, diminuindo a capacidade do mesmo e podendo prejudicar a qualidade do produto final, devido a reações secundárias. Afim de evitar isto é comum iniciar a secagem com ar quente e dar um acabamento com ar seco em temperatura mais branda. Uma técnica alternativa foi sugerida por LEGAULT et al (1954), que promoveram a desorção final durante a estocagem, embalando o produto semi-seco com dissecantes. Os resultados foram excelentes em termos de preservação de qualidade, mas impraticáveis sob o ponto de vista econômico.

As antigas unidades secadoras de cebola, utilizavam circulação paralela do ar entre as bandejas. Isto conduzia a ciclos longos de secagem. Um secador de túnel de 2 estágios por exemplo, com o primeiro estágio funcionando em paralelo com ar de entrada à temperatura de 71 a 88°C e o segundo em contra-corrente com ar entrando a 54 - 60°C, necessitava 15 horas para completar a secagem (VAN ARSDEL, 1973).

Na atualidade a cebola é desidratada utilizando-se circulação do ar através do leito. No Brasil o secador mais usado é o de bandejas sobrepostas. As bandejas periodicamente são deslocadas para baixo em contra corrente com o ar de secagem. O acabamento é feito utilizando depósitos estacionários onde o conteúdo de umidade é reduzido para cerca de 4%, por percolação de ar seco a temperatura de 50°C. O tempo de operação situa-se na faixa de 12 - 30 horas, dependendo das dimensões das fatias, da umidade final desejada, da velocidade, temperatura e umidade do ar, da umidade inicial da cebola e da altura do material no depósito (VAN ARSDEL, 1973).

Maiores produções utilizam o secador transportador de correia em múltiplos estágios. Neles a temperatura do ar é reduzida gradualmente de 82°C para 54°C à medida que o produto se desloca através do secador. Após aproximadamente 6 horas de secagem o produto abandona o secador com um conteúdo de umidade de cerca de 6%. A altura da carga de cebola no leito, varia de 10 cm no início da operação de secagem, até 1,5 m no estágio final. O estágio final corresponde a um depósito que se movimenta lentamente e usa ar desumidificado (VAN ARSDEL, 1973).

Nos secadores descritos o material tende a aderir nas bandejas ou na correia, provocando perdas que podem alcançar 10% em peso do material processado. Periodicamente torna-se necessária a lavagem do equipamento para eliminação do material aderido, o que reduz o tempo de operação do equipamento. Operação em temperaturas elevadas intensifica os problemas mencionados (NOYES, 1969 ; TORREY, 1974).

Devido ao alto conteúdo de açúcar as cebolas desidratadas são muito higroscópicas e conseqüentemente as operações de peneiramento, desintegração e embalagem, devem ser realizadas em salas especiais, onde a umidade relativa do ar é mantida abaixo de 30% (VAN ARSDEL, 1973).

Os sistemas de secagem já descritos são os mais utilizados. A literatura de patentes registra variantes dos mesmos. No que diz respeito ao presente trabalho, convem mencionar dois secadores que promovem certa agitação do leito. Um deles (NOYES, 1969), consiste em várias esteiras rolantes inclinadas em série. A cebola é elevada pela esteira e rola, caindo no começo da esteira seguinte. A patente prevê a obtenção de um produto final com 2/3 da

densidade obtida por um secador convencional e um tempo de residência extremamente curto. O outro (TORREY, 1974), sugere um sistema de secagem com esteiras em dois estágios, sendo o primeiro vibratório (12 oscilações /s) e o segundo convencional. As temperaturas do ar são bastante elevadas (115°C no início do primeiro estágio), assim como a velocidade do ar (2,5 m/s). Não se tem informações sobre utilização industrial destes secadores.

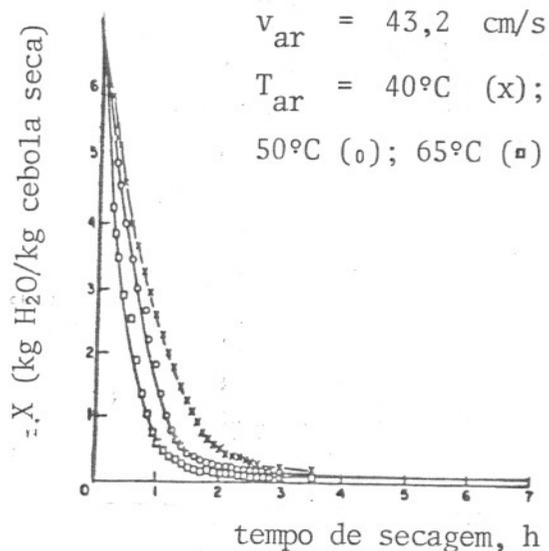
C - Cinética de secagem de fatias de cebola

Para determinar a capacidade de um equipamento ou o tempo de secagem para atingir uma umidade final desejada é necessário obter dados experimentais. Os resultados são apresentados na forma de gráficos, locando-se o conteúdo de umidade de cebola, X (massa de água / massa de cebola seca) versus o tempo de secagem, t . Uma maior generalização é obtida se a umidade livre da cebola for utilizada, isto é, $X - X_{eq}$, onde X_{eq} é a umidade das fatias de cebola em equilíbrio com o ar de secagem utilizado. Uma forma alternativa e mais racional é expressar o conteúdo de umidade pela razão adimensional $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$, onde X_0 é o conteúdo inicial de água na cebola. O quociente diferencial obtido por tangentes às curvas traçadas $[-d [(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})] / dt]$, fornece a velocidade de secagem. Curvas de velocidade de secagem são úteis para identificar a umidade crítica do sólido e o período de velocidade de secagem constante e também para o cálculo da difusividade de umidade através das fatias. Elas também são importantes para verificar a existência de diferentes mecanismos de transferência de massa entre a fase sólida e a gasosa.

O estudo mais completo relacionado com a cinética de secagem da cebola foi realizado por MAZZA & LeMAGUER (1980). Foi uti

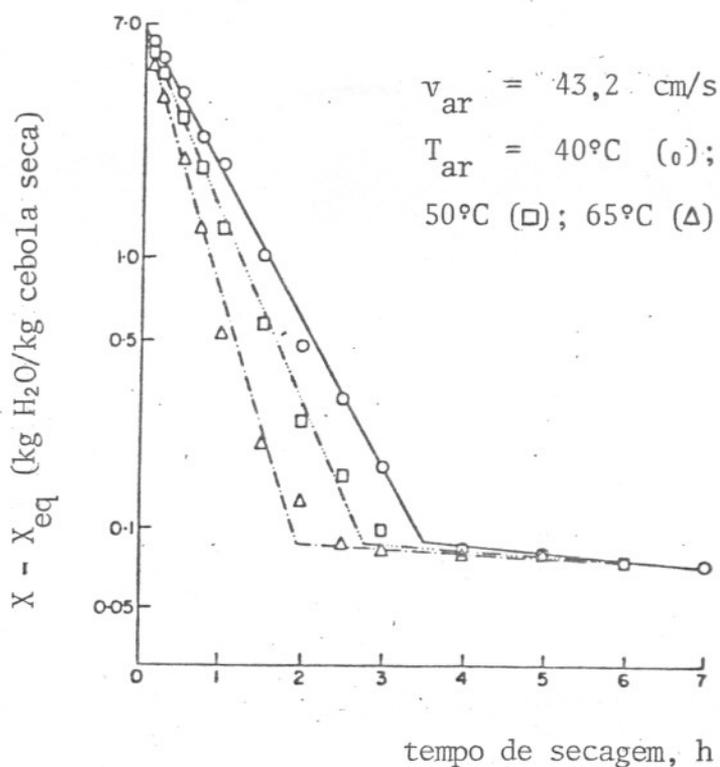
lizado um secador em leito vibro-fluidizado (Niro Atomizer), para efetuar ensaios de secagem com fatias de cebola (1,5 mm de espessura) da cultivar "Yellow Globe". Os autores se preocuparam sobretudo com o efeito da temperatura na taxa de secagem, operando com velocidade do ar de 29,3; 43,2 e 54,9 cm/s. Não se menciona a amplitude e frequência de vibração utilizada e nem refere-se ao comportamento dinâmico do leito.

A figura abaixo reproduz resultados obtidos por MAZZA e LeMAGUER e que evidenciam o efeito da temperatura do ar no tempo



de secagem. Verifica-se que a umidade de aproximadamente 8% (b.u), foi atingida após 2 - 3,5 horas de operação, dependendo da temperatura de secagem utilizada que variou de 40 a 65°C.

Os resultados experimentais quando graficados em um diagrama $\log (X - X_{eq})$. tempo de secagem, apresentou duas linhas retas bem definidas. A transição entre as duas retas ocorre a uma umidade em torno de 0,1(kg H_2O /kg cs). Baseando-se em um modelo de difusão de umidade que ignora a contração de volume e utilizando os coeficientes angulares das retas obtidas na figura a seguir, MAZZA & LeMAGUER calcularam os seguintes coeficientes de difusividade:



Temperatura, °C	Difusividade (m^2/s)	
	Primeiro Período	Segundo Período
40	$7,60 \cdot 10^{-11}$	$3,90 \cdot 10^{-12}$
50	$9,81 \cdot 10^{-11}$	$3,96 \cdot 10^{-12}$
65	$13,90 \cdot 10^{-11}$	$3,96 \cdot 10^{-12}$

Os resultados indicam que a difusividade de umidade no primeiro período de secagem aumenta com a temperatura, enquanto no segundo período permanece praticamente independente. Isto sugere que durante o período de alta taxa de desidratação, a velocidade foi sensível a mudanças de temperatura, enquanto que durante o segundo período, que corresponde a baixos conteúdos de umidade, a velocidade de secagem não é sensível a fatores externos.

Os mesmos autores também levantaram curvas de velocidade de

secagem onde não ficou evidenciado um período de velocidade de secagem constante. Isto pode ser atribuído, segundo os autores, à natureza coloidal e hidrofílica de muitos materiais alimentares, o que causa maior retenção de moléculas de água que em materiais inorgânicos.

No estudo não houve preocupação em otimizar os parâmetros de vibração (frequência e amplitude) e nem verificar o efeito da carga de cebola na taxa de secagem.

Utilizando um protótipo de secador vertical, com ar percolando o leito em sentido ascendente, GOWDA & GUPTA (1976), estudaram características de secagem de cebola da cultivar "Poona Red". Os bulbos foram reduzidos a fatias de 5 mm de largura, pré-tratadas com uma solução a 5% de cloreto de sódio e desidratadas com ar às temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C, sendo a velocidade superficial através das bandejas de 92 cm/s. Um resultado satisfatório com aceitável qualidade do produto, foi obtido utilizando ar a temperatura constante de 60°C e carga de 30 kg/m². Os melhores resultados em termos de qualidade, foram alcançados conduzindo a secagem em três níveis decrescentes de temperatura do ar, 77°C (0,5 h); 67°C (1 h) e 55°C (3,5 h), com carga de 20 kg de cebola /m².

Um estudo das características de secagem das cultivares de cebola mais comercializadas no Brasil (Baia Periforme, Granex e Texas) foi realizado por AGUIRRE et al (1982). Foi utilizado um secador de bandejas com circulação forçada de ar ambiente, aquecido a 75°C, com velocidade de 3 m/s, paralelamente as bandejas. A cebola reduzida a meias fatias, com largura de 4 mm, foi distribuída em bandejas à razão de 8 kg de cebola /m² de suporte, formando um leito de 12 mm de altura. A intervalos de 30 minutos o mate

rial era homogeneizado e efetuado um rodízio na posição das bandejas.

No estudo não houve preocupação em determinar as condições adequadas de secagem e sim comparar características de secagem entre as três cultivares.

O conteúdo de umidade da cebola de aproximadamente 5% foi atingido após cerca de 3 horas de secagem e era ligeiramente diferente para cada variedade.

Foi constatado que parte do produto desidratado apresentou tendência a ficar aderido na superfície das bandejas, dificultando a remoção e acarretando uma pequena perda de material.

A perda de matéria prima no descascamento e acabamento, foi superior a 10% para as cultivares processadas.

O rendimento do processo, expresso em quilos de matéria prima fresca, necessários para produzir 1 kg de cebola desidratada foi determinado para as três cultivares, obtendo-se: (14,7 : 1) Granex; (14,5 : 1) Texas e (12,6 : 1) Baia Periforme.

Analisando parâmetros de rendimento de produção da matéria prima por unidade de área plantada, STRINGHETA & BUSO (1982) verificaram que a cultivar Baia Periforme posicionou-se no segundo lugar entre 10 outras, atingindo a produtividade de 34 t/ha e rendimento industrial teórico 3808 kg de sólidos secos/ha.

Estes resultados evidenciam que a cultivar Baia Periforme possui características de produtividade e rendimento de processo,

adequados à utilização como matéria prima, na produção de cebola desidratada.

D . Qualidade da cebola desidratada

Durante a operação de secagem da cebola ocorre considerável perda de pungência (que é uma combinação de aroma e sabor). A qualidade da cebola desidratada em termos de mudanças de cor, pungência e textura é reduzida quando a temperatura do ar de secagem for maior que 60°C (GOWDA & GUPTA, 1976).

Quando a secagem é realizada sob condições adequadas, o complexo enzimático responsável pela formação de compostos aromáticos não é modificado (SCHWIMMER et al, 1964). Por outro lado constatou-se que a geração de voláteis é acompanhada pela formação de ácido pirúvico. Este fato tem sido aproveitado para quantificar o potencial enzimático remanescente na cebola processada.

No estudo de AGUIRRE et al (1982), foi verificado em amostras desidratadas da cultivar Baia, que o teor de ácido pirúvico produzido apresentou-se cerca de 6 vezes superior aos das outras variedades. Um estudo organoléptico comparativo entre a matéria prima e os produtos desidratados (recém-processados), revelou que para as cultivares Granex e Texas a matéria prima foi considerada muito melhor que o produto desidratado. Em relação a cultivar Baia, a matéria prima foi considerada ligeiramente melhor que o produto desidratado. O resultado do trabalho de STRINGHETA & BUSO (1982), posicionou a cultivar Baia em primeiro lugar em termos de teores de ácido pirúvico, entre 10 cultivares estudadas.

MAZZA e LeMAGUER (1979), constataram que a retenção dos com

postos voláteis da cebola é proporcional ao acréscimo da temperatura do ar de secagem. Isto pode ser explicado pelo aumento da solubilidade dos voláteis com a temperatura, que mantém o volátil na fase aquosa. Além disso, em temperaturas mais altas ocorre aumento da velocidade de secagem, que conduz à formação mais rápida de uma casca seca, diminuindo a difusão dos componentes responsáveis pela pungência para a superfície de evaporação.

Ao ser reconstituída a cebola atinge um conteúdo de água inferior ao da matéria prima original. Isto indica que existe uma perda irreversível da turgência da cebola na desidratação, devido a plasmólise que ocorre durante o processo. Este fenômeno acontece com muitos vegetais desidratados com ar quente.

No trabalho de STRINGHETA & BUSO (1982), a cultivar Baia Periforme após rehidratação, posicionou-se em 2º lugar, em termos de quantidade de água absorvida por unidade de massa da amostra, com relação as outras cultivares.

E . Secagem da cebola em leito vibro-fluidizado

O objetivo do presente trabalho, foi desenvolver e testar um protótipo de secador de leito vibro-fluidizado, adequado para desidratação de vegetais cortados e usa-lo para estabelecer e definir os parâmetros que afetam a secagem de cebola em fatias.

Na concepção original, procurou-se desenvolver um equipamento que permita uma uniformidade de tratamento do material processado e como consequência, melhore a qualidade do produto desidratado em termos de homogeneidade no conteúdo de umidade, na cor e na forma das partículas. A vibração visou também eliminar a ade-

rência do produto no equipamento, reduzindo perdas.

No trabalho, foi dada ênfase especial à determinação das condições ótimas de secagem, procurando reduzir a um mínimo o consumo combinado de energia de deslocamento e de aquecimento do ar e da energia necessária para a vibração, mantendo o compromisso de obtenção de cebola desidratada com padrões de qualidade especificados para o produto.

CAPÍTULO II . DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SECADOR DE LABORATÓRIO DE LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF)

A . Introdução

A aplicação de vibração mecânica para auxiliar a fluidização e aperfeiçoar características de transporte é um processo relativamente novo, que já encontra extensas aplicações industriais (MUJUMDAR, 1982). Os primeiros estudos, há cerca de 3 décadas, limitavam-se em promover pulsações de fase fluída, que por causar perturbações na camada limite, geralmente diminuíam a resistência à transferência de calor e massa (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980). As pesquisas atuais concentram-se na vibração da fase sólida para obter efeitos mais amplos. A aplicação de vibração pode facilitar a fluidização de materiais, sobretudo aqueles com ampla distribuição de tamanhos, pegajosos ou que possuem característica pastosa. Em alguns casos, um estado de fluidização que não se consegue atingir com o escoamento convencional do gás através do leito é alcançado com auxílio de vibração (GUPTA & MUJUMDAR, 1980).

Embora esta tecnologia seja mencionada na literatura aberta desde o princípio de 1955, a aplicação de vibração na prática, cresceu substancialmente durante as duas últimas décadas e a mais importante delas refere-se a secagem. Secadores de leito fluidizado instalados na Europa tem utilizado vibração, desde que o sólido manifeste característica adesiva quando úmido. Leitos vibratórios são igualmente usados como eficientes granuladores (frequentemente após um "spray-dryer" para instantaneidade do produto ao ser reconstituído ou como classificador de partículas (MUJUMDAR, 1982).

Algumas vantagens da utilização de vibração sobre os leitos fluidizados convencionais são: fácil controle da distribuição do tempo de residência das partículas por meio da variação da amplitude e frequência de vibração; reduzida quantidade de ar necessário e como consequência menor perda de pressão; tendência para separação dos aglomerados; alta taxa de transferência de calor e de matéria (GHPTA & MUJUMDAR, 1980 ; MUJUMDAR, 1982). A vibração proporciona um movimento suave do material através do secador, reduzindo o atrito entre as partículas e sendo portanto muito adequado ao tratamento do material frágil (DANIELSEN & HOVMAND, 1980).

A maior complexidade do equipamento e o acréscimo de consumo de energia elétrica devido a vibração, não são relevantes quando comparados com o capital fixo e custos de operação (MUJUMDAR , 1982).

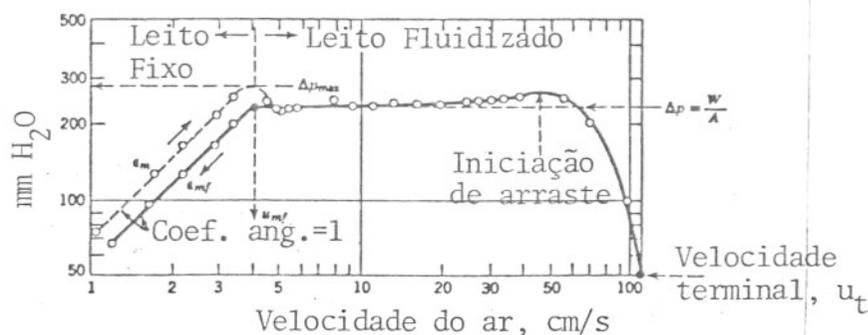
Grande parte da literatura disponível, relativa a pesquisas em leitos agitados por meio de vibração, encontra-se em língua não inglesa e geralmente pouco acessível. Duas extensas revisões da literatura sobre leitos vibro-fluidizados, foram efetuados por GUPTA & MUJUMDAR (1980) e por STRUMILLO & PAKOWSKI (1980).

Na revisão bibliográfica do presente capítulo, são indicadas as revisões citadas e os nomes dos pesquisadores reais. No final de cada parágrafo é indicada a referência da revisão original onde elas são citadas.

Nos parágrafos seguintes serão feitas considerações sobre fundamentos teóricos e correlações experimentais relativas a LVF. Quase a totalidade dos estudos feitos se limitam a leitos de partículas pequenas ($d_p < 1000 \mu\text{m}$) de preferência esféricas. Seria

precipitado supor, que os conceitos desenvolvidos se ajustem para um leito formado por anéis de cebola. Esta apresentação é entretanto oportuna e necessária, para definir tendências e identificar fenômenos. além disso, em alguns casos, constatou-se adequada consistência, entre as previsões baseadas em modelos simplificados e as observações no presente trabalho. O ajuste melhorava a medida que a secagem se desenvolvia, pois os sólidos tendem à forma esférica, como será visto no Capítulo IV.

Quando fluídos percolam no sentido ascendente leitos contendo pequenas partículas sólidas de tamanho uniforme, o comportamento do sistema depende da velocidade do fluído. À baixas velocidades do ar, as partículas permanecem estacionárias com uma porosidade ϵ e a perda de pressão do fluído varia diretamente com a velocidade superficial do gás, como mostra a figura abaixo. Com o



aumento da velocidade do gás a porosidade do leito aumenta de ϵ para ϵ_{mf} (porosidade do leito na condição menos compacta possível, mas existindo ainda o contato entre as partículas). Esta condição corresponde a u_{mf} (velocidade mínima de fluidização das partículas pelo gás). Para velocidade do gás maiores que u_{mf} o leito se expande e seu conteúdo assemelha-se a um líquido em ebulição, recebendo o nome de "leito fluidizado". Se após o início da fluidização a velocidade do gás é reduzida abaixo de u_{mf} , a queda de

pressão novamente corresponde a de um leito fixo, mas de magnitude diferente, como indica a figura anterior (KUNII & LEVENSPIEL, 1969).

Quando se inicia a fluidização, a força de arraste do fluido iguala-se ao peso das partículas. A força de arraste sobre uma esfera é dada por (McCABE & SMITH, 1976):

$$F_a = f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_f}{2} u_{mf}^2 \quad (\text{II-1})$$

Sendo: f = coeficiente de arraste; d_p = diâmetro da partícula e ρ_f = densidade do fluido. Então

$$f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_f}{2} u_{mf}^2 = mg$$

Onde: m = massa da partícula; g = aceleração da gravidade.

Desta expressão tira-se:

$$u_{mf}^2 = mg \left/ \left[f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_f}{2} \right] \right. \quad (\text{II-2})$$

Os leitos de partículas submetidas a influência de vibração comportam-se de maneira diferente e existe uma variedade de definições relacionadas aos diversos regimes que ocorrem. Estes regimes de comportamento são definidos por parâmetros característicos da vibração, sendo os mais importantes: A , semi amplitude de vibração do vaso; ω , frequência angular de vibração; $A\omega^2$, aceleração vibracional; F_a , força atuante sobre a partícula devido ao atrito com o gás; F_v , força atuante devido a vibração; u_{mv} , velocidade mínima de fluidização sob ação do fluxo de gás e da componente vertical da força vibracional; u_G , velocidade do ar de operação na entrada do leito. A classificação mais simples

e geral é: leito vibrado, quando não existe ar forçado externamente e vibro-fluidizado na presença de ar. No caso de ar forçado externamente, BRATO & JINESCU propuseram três regimes gerais, dependendo da relação de forças devido a vibração e ao fluxo de ar; vibrado, quando $F_a < F_v$; vibro-fluidizado, $F_a \approx F_v$ e vibrado fluidizado, $F_a > F_v$ (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980). A operação de secagem requer considerável fluxo de ar e situa-se geralmente no regime intermediário (GUPTA & MUJUMDAR, 1980). STRUMILLO & PAKOWSKI (1980), propuseram a seguinte classificação que está se popularizando: "vibrofluidized" (VF), leito vibro-fluidizado com ar forçado externamente, sendo a velocidade do ar $u_G < u_{mf}$; "vibrated fluidized", leito fluidizado vibrado, formado em condições tais que $u_G > u_{mf}$. Nestes dois casos estão incluídos todos possíveis leitos agitados por meio de vibração com fluxo de ar forçado.

O estado de fluidização ocorre no leito, quando a força gravitacional atuando sobre a partícula é exatamente equilibrada pela soma da força de arraste e pela componente vertical da força vibracional. Então,

$$mg = m A\omega^2 + f(\pi d_p^2/4) u_{mv}^2 (\rho_f/2)$$

De onde

$$u_{mv}^2 = mg(1 - A\omega^2/g) / [f(\pi d_p^2/4) (\rho_f/2)] \quad (II-3)$$

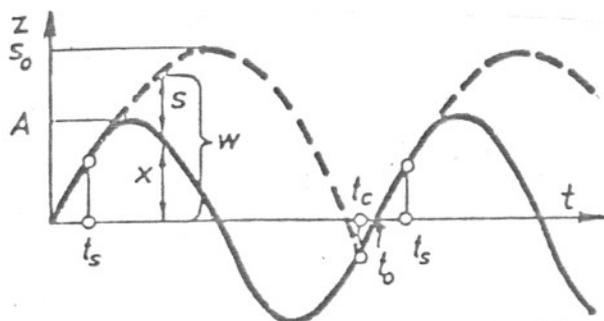
Substituindo a Equação II-2 na II-3

$$u_{mv}^2 = u_{mf}^2 (1 - A\omega^2/g) \quad (II-4)$$

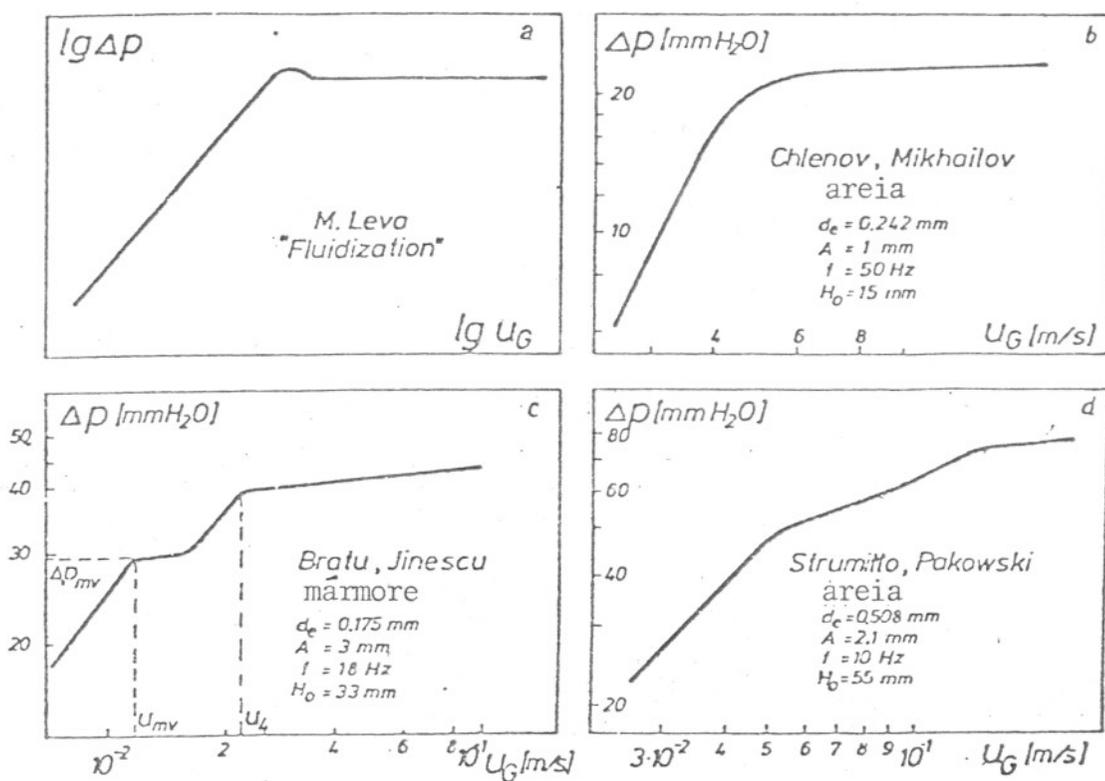
Conclui-se pela Equação II-4, que o efeito da vibração é no senti

do de diminuir a velocidade mínima de fluidização. Entretanto na prática a extensão desta redução é menor do que prevê esta relação, devido a atenuação de vibrações pela influência da altura do leito (GUPTA & MUJUMDAR, 1980).

Vários modelos matemáticos já foram desenvolvidos, procurando descrever a trajetória do leito de partículas, agitado por meio de ação vibracional. A descrição matemática é importante para previsão de outros parâmetros, como a perda de pressão no leito e a velocidade relativa gás-partícula. A figura abaixo mostra de forma simples, o movimento relativo entre o leito de partículas e o vaso de secagem (modelo da partícula individual, desprezando o efeito do ar). Partindo-se de um tempo t_0 , as partículas (----) acompanham a trajetória do vaso (——) até que no instante t_s , elas se projetam separando-se do suporte. No instante t_c elas tornam a atingir o suporte do vaso (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).



Curvas de perda de pressão em função da velocidade superficial do gás, em escalas logarítmicas, são diferentes das curvas correspondentes em leitos fluidizados convencionais. A forma da curva é dependente da relação entre as forças vibracionais e aerodinâmicas (F_v / F_a) atuando no leito. A figura a seguir exhibe as curvas de leitos agitados por vibração normalmente observadas.



Para baixa aceleração vibracional a curva é do tipo "a", que caracteriza a fluidização convencional. No caso de alta aceleração, o pico de pressão não é observado e também não ocorre histerese de fluidização, curva "b". Para valores intermediários de aceleração, as curvas são da forma "c" e "d". Quando a frequência aumenta, mantida constante a amplitude, o valor u_4 na curva "c" tende a velocidade mínima de fluidização, u_{mv} e a curva torna-se similar a "b" (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

A vibração contribui para reduzir a velocidade mínima de fluidização. O grau desta redução é dependente da aceleração vibracional. A correlação abaixo foi proposta por BRATO & JINESCU:

$$\frac{u_{mv}}{u_{mf}} = 1 - \frac{1+k}{2\pi j} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \quad (\text{II-5})$$

Sendo: k = fator de colisão e que varia de 0 - 1; j é um parâmetro que depende do valor de $A\omega^2/g$, valendo 1 para $A\omega^2/g$ menor que 4,5 e 2 quando $A\omega^2/g$ for maior que 4,5. Esta equação pode ser útil após estimativa experimental de k . Uma equação disponível para avaliação de u_{mv} é (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980; GUPTA & MUJUMDAR, 1980):

$$u_{mv} = 0,12 \left(\frac{\rho_p}{\rho_G} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{v_G} \right)^{0,33} (d_e)^{0,88} \left(1 - 0,095 \frac{A\omega^2}{g} \right) \quad (\text{II-6})$$

Onde: v_G é a viscosidade cinemática do gás, m^2/s ; d_e , o diâmetro equivalente da partícula, cm ; ρ_p e ρ_G as densidades do sólido e do gás, respectivamente.

Informações sobre a mistura em leito vibratório são necessárias para estimar a distribuição do tempo de residência em um equipamento contínuo de grande escala. Observações de KROLL evidenciam o tipo de fluxo circulatório esquematizado na Figura II-1, o que foi confirmado por BRETSZNAJDER, LÉSNIWICZ e PASIUK.

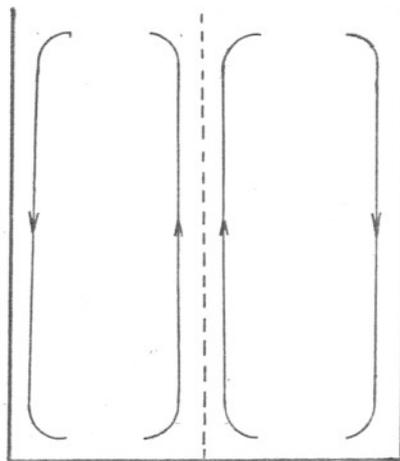


Figura II-1 - Circulação de partículas em leito vibratório

Este tipo de movimento circulatório é induzido por esforços de ci

zalhamento nas paredes. Esta circulação é mais intensa em equipamentos onde unicamente o suporte vibra. A velocidade destas correntes circulatórias é de aproximadamente 2 cm/s para muitos casos em que se utilizam partículas pequenas. Para leitos VF, especialmente quando a velocidade do ar aproxima-se de u_{mf} , esta circulação ordenada é reduzida predominando a circulação ao acaso (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

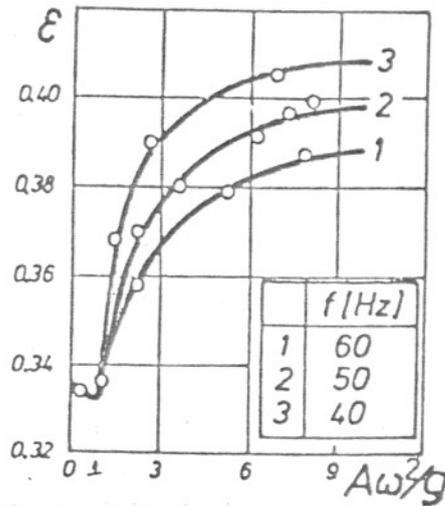
A velocidade de mistura na direção vertical foi determinada por KAVETSKII et al, fazendo experiências com partículas marcadas. A correlação obtida foi:

$$M = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \left(\frac{d_p}{H} \right)^{0,2} \quad (\text{II-7})$$

Onde: M é a velocidade de mistura $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; d_p o diâmetro da partícula e H a altura do leito. A influência dos parâmetros da Equação II-7, na velocidade de mistura, foi também confirmada por SUZUKI et al (1980a). Existe uma concordância geral que a homogeneidade do leito é melhorada como consequência da vibração. De acordo com MORSE, isto é verdadeiro unicamente para leito formado por partículas pequenas. Este efeito provavelmente surge do fato que alta frequência de vibração (10 - 50 Hz), impede a coalescência das bôlhas, resultando em um leito mais uniforme (GUPTA & MUJUMDAR, 1980).

Em leitos vibratórios, a vibração pode aumentar ou diminuir a porosidade do leito. Quando a aceleração vibracional é menor que a aceleração gravitacional ocorre compactação e quando é maior a porosidade aumenta. Este comportamento é ilustrado na figura a seguir, obtida com ensaios utilizando areia de quartzo, para uma altura inicial do leito de 40 mm. A expansão do leito é mais

dependente da amplitude de vibração do que da frequência. Para a-



celeração vibracional constante, maiores fatores de expansão podem ser obtidos para maiores amplitudes e menores frequências. Dentro do ciclo vibracional as variações da porosidade do leito são insignificantes. As influências de fatores individuais sobre a porosidade do leito são consideradas em uma equação proposta por BAKHMAN et al (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

B. Secagem em leito vibratório

A ação vibracional reduz as zonas estagnadas e causa a separação de grupos de partículas e com isso um acréscimo na taxa de remoção de umidade do sólido. O tempo de secagem é consideravelmente reduzido, quando comparado com secadores de leito estático ou secadores rotatórios. A distribuição do tempo de residência é mais uniforme e a degradação térmica em zonas estagnadas pode ser evitada (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

Uma característica importante da secagem em leito vibratório é a existência de um valor ótimo dos parâmetros de vibração, que propiciam uma alta velocidade de secagem. Muitas pesqui-

sas estão sendo desenvolvidas para obter condições ótimas de operação para materiais específicos. Entre elas, secagem de resina troca iônica (polystyrol), nos períodos de velocidade de secagem constante e decrescente (SUZUKI et al 1980 a e b); secagem de partículas de vidro com característica aglomerante (SUZUKI et al 1980 c); secagem de farelo de arroz (FITO et al 1975 e 1977; SANZ et al 1977). Tem-se encontrado velocidades de secagem em leito vibrado fluidizado de 1,5 a 2,5 vezes maiores que em leito fluidizado convencional (ZAITSEV et al). O efeito da vibração pode ser considerado equivalente a um aumento da velocidade do ar (SUGIYAMA et al). Uma frequência de excitação mínima é requerida para influenciar a velocidade de secagem em presença de forças adesivas entre as partículas (BUKAREVA et al). Esta tendência difere segundo o tipo do material (BRETSZNEJDER); (GUPTA & MUJUMDAR, 1980).

Existe uma grande variedade de equipamentos de secagem, associados com o método de fornecimento de calor, que utilizam vibração para aperfeiçoamento do processo. O calor transmitido para o sistema de secagem pode ser por contato, convecção e radiação. A transferência por contato é conseguida por intermédio de aquecedores imersos no leito (na posição horizontal ou vertical) ou através do fundo do leito (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , em leitos agitados por vibração, tem sido intensamente estudado. Para transmissão por contato, entre os trabalhos existentes destacam-se os de PAKOWSKI & MUJUMDAR e RINGER & MUJUMDAR, utilizando leitos de bolinhas de vidro de pequena espessura. Para leitos não aerados, o coeficiente de transferência de calor é cerca de 8 vezes maior, quando comparado com o valor do leito fixo. O efeito da vibração em h diminui com o aumento da velocidade do ar. Existe

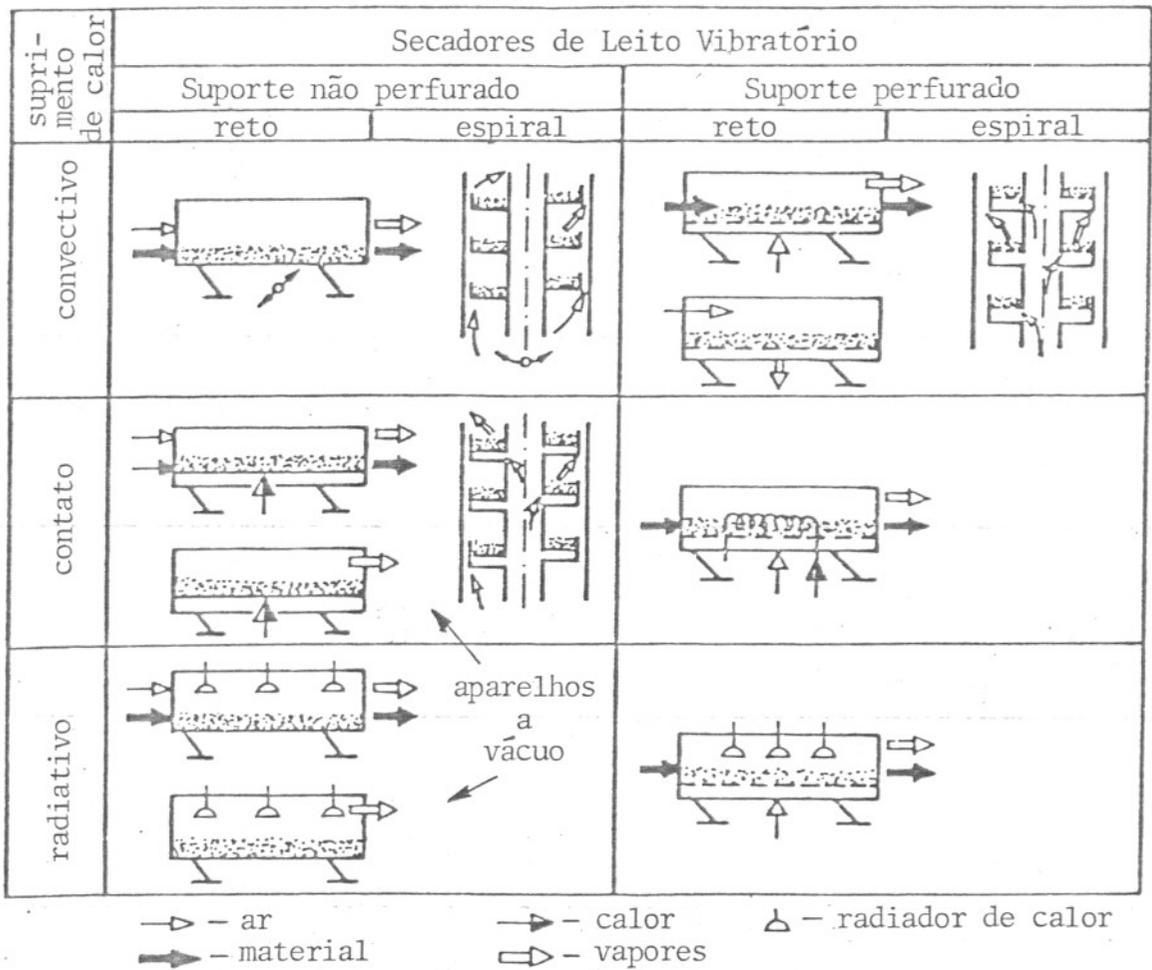
um valor ótimo de $A\omega^2/g$ (em torno da unidade) para o qual o coeficiente de transferência de calor é máximo. A redução do tamanho das partículas aumenta o valor de h (MUJUMDAR, 1982).

Dados experimentais acumulados mostram que os coeficientes de transferência de calor convectivos são muito menores que aqueles relativos a transmissão por contato. Apesar disso o primeiro tem sido mais utilizado. Uma das razões deve-se à aderência de partículas pegajosas em torno do aquecedor, podendo ocorrer degradação química ou térmica do produto se o gradiente de temperatura for alto. Correlações e gráficos tem sido levantados em termos do número de Nusselt, Nu , como função de outros grupos adimensionais. Os resultados mostram que a influência da vibração sobre o Nu é significativa para números de Reynolds inferiores a R_{mf} (que corresponde a u_{mf}), quando comparado com leitos fluidizados convencionais. Para condições vibracionais ótimas de secagem, KAVETSKII et al encontraram que Nu varia com o número de Reynolds segundo a potência unitária (GUPTA & MUJUMDAR, 1980). Em leitos estáticos, por outro lado, Nu é proporcional a $Re^{0,58}$ (SHERWOOD et al, 1975).

Resultados comparativos de secagem de carvão em secador de tambor e de leito vibro-fluidizado são mostrados na tabela abaixo (DAVIDSON & HARRISON, 1971).

Característica	Secador	
	Tambor	Leito vibro-fluidizado
tempo de secagem, min	20	4
consumo de energia, kwh/tonelada	2,21	1,77
umidade removida por m^2 , kg/h	0,61	2,66
consumo de calor, kcal/kg de umidade	1500	850

Esquemas de equipamentos mais frequentemente usados são apresentados na figura seguinte (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).



Um secador industrial do tipo vibro-fluidizado contínuo é ilustrado e descrito por DANIELSEN & HAVMOND (1980). Eles também esquematizam vários fluxogramas de instalações de secagem com utilização de vibração, para materiais com consistência pastosa e com ampla distribuição de tamanhos, em processos de aglomeração e instantaneidade. Secagem, revestimento, granulação e resfriamento podem ser alcançados em uma única unidade operando em estilo de múltiplos estágios (MUJUMDAR, 1982).

C . Desenvolvimento e construção do secador

Para realização dos ensaios experimentais de secagem de cebola em fatias, usando leito estático e vibro-fluidizado, foi desenhada e executada a instalação experimental descrita a seguir e esquematizada na Figura II-2. Sua característica básica é a simplicidade de operação e controle, bastando apenas um operador para efetuar as medidas experimentais.

Antes de chegar a forma definitiva foram testados outros sistemas de vibração, aquecimento e controle da vazão e temperatura do ar. O arranjo usado permite determinar rapidamente a umidade média de todo material do leito, desconectando e pesando o conjunto vaso de secagem e cebola. Este requisito é importante, pois a retirada periódica de amostras para acompanhamento da variação de umidade da cebola, durante a secagem, não seria representativa, devido a heterogeneidade do leito.

Os principais componentes do secador são: I) Suprimento do ar de secagem por um ventilador centrífugo (a), KONGSKILDE, tipo IRI 20, motor 1 Hp; II) Controle da vazão do ar até $1 \text{ m}^3/\text{min}$, efetuado por uma válvula de controle (b), construída em um Tê de PVC de 6 polegadas de diâmetro nominal. Em uma das saídas do Tê, foi acoplada uma válvula tipo gaveta, constituída por uma placa de madeira deslizável sobre guias; III) Tubulação de chapa galvanizada (c), com 16 cm de DI e 3 metros de comprimento. O perfil de velocidade do ar tende a se uniformizar a medida que o ar percorre a tubulação; IV) Medida da vazão de ar através de utilização de um medidor de orifício calibrado (e). Detalhes da construção e calibração do medidor de orifício são indicados no apêndice A; V) Aquecimento do ar de secagem por resistências elétricas de

níquel-cromo, com controle manual de temperatura até 100°C. Em um suporte de cimento amianto foram enroladas 3 resistências (h) em

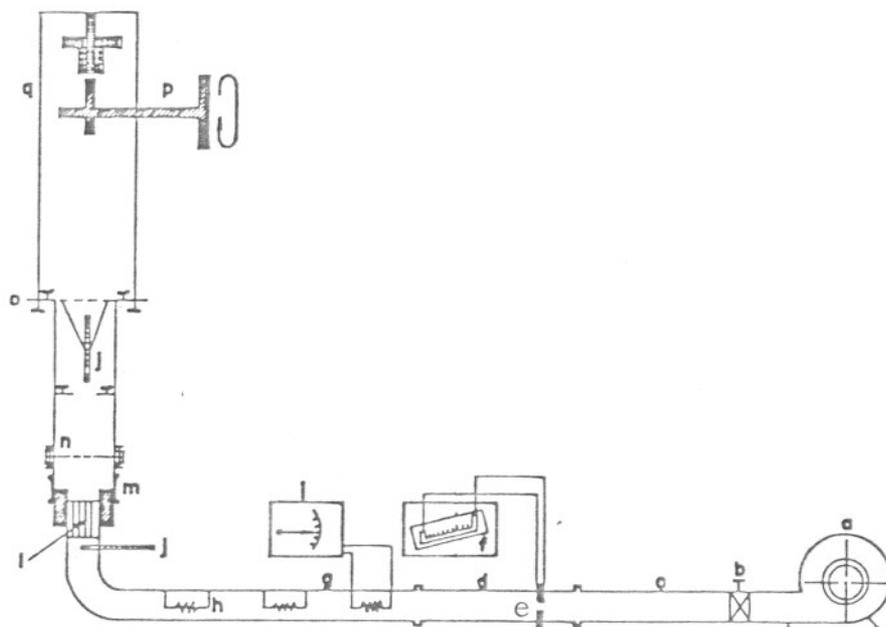


Figura II-2 - Esquema da Instalação de secagem

a) Ventilador Centrífugo; b) Válvula de Controle; c) Tubulação de Chapa Galvanizada; d) Tubulação de Aço; e) Medidor de Orifício; f) Manômetro; g) Tubulação de Cimento-Amianto; h) Resistências Elétricas; i) Regulador de Voltagem; j) Termômetro; l) Tubos de Cobre; m) Junta de Borracha; n) Vaso de Secagem; o) Borboleta de Fixação e Suporte; p) Sistema de Vibração; q) Conexões.

paralelo, com conexões independentes, cada uma constituída de aproximadamente 30 metros de fio de 2,122 ohm/m. O conjunto foi montado no interior da tubulação de cimento amianto (g). Uma resistência foi ligada em série com um transformador variável tipo Variac (i) (Entrada 220 V, saída 0 - 240 V, potência = 1800 W), para efetuar o controle da temperatura do ar. As outras duas resistências permaneceram desconectadas exercendo a função de reserva.

VI) Uniformizador do fluxo de ar (ℓ), constituído por 52 tubos de cobre (DE = 1,2 cm, espessura 0,15 cm), soldados entre si, constituindo uma colmeia e ocupando toda a seção transversal da tubulação vertical de cimento amianto. O aperfeiçoamento do perfil de velocidade foi verificado através de utilização de um tubo de Pitot, sendo as diferenças de pressões medidas por intermédio de um micro-manômetro, FURNESS CONTROL; VII) Junta flexível de borracha (m), conectando a parte fixa com a móvel do equipamento, sendo a vedação efetuada por duas abraçadeiras removíveis; VIII) Vaso de secagem (n), constituído por um tubo cilíndrico de plexiglass, com 14,5 cm de DI, espessura de parede 5 mm e 44 cm de altura. O fundo foi dotado de um flange para instalação do distribuidor do ar de secagem e suporte do leito, constituído por uma tela de aço inoxidável de 32 malhas. A boca do vaso de secagem foi coberta com uma tampa perfurada de plexiglass fixada por meio de parafusos tipo borboleta. O orifício central da tampa, com 7,5 cm de diâmetro, era dotado de uma tela de bronze de 100 malhas, para reter as partículas finas de material arrastado pelo ar durante a secagem. Um termômetro (j), INCOTHERM, com divisões de 1°C, foi instalado verticalmente na tampa do vaso de secagem com o bulbo voltado para baixo, para medida da temperatura do ar ao abandonar o leito de secagem. Um anel intermediário recortado de uma chapa de plexiglass de 0,3 cm de espessura, com 4 cm de DI, foi fixado com 3 parafusos (tipo borboleta) a um anel de 12,1 cm de DI cola-

do na parede do vaso de secagem a 20 cm do suporte do leito, para canalizar o ar, realizar um efeito de mistura e dirigir o fluxo de ar ao sensor do termômetro. Um suporte de madeira (o) de 2 cm de espessura, com forma hexagonal, foi colado ao topo do vaso de secagem e usado para fixar as conexões (q) por meio de 2 parafusos tipo borboleta e transmitir a vibração; IX) Sistema de vibração (p) tipo camo, com possibilidade de variação da amplitude e frequência de vibração. Para gerar a vibração utilizou-se o movimento de rotação de um motor, transmitido por meio de correia V. A correia foi acoplada a duas polias, uma motora (diâmetro interno 2,9 cm) e outra de transmissão (diâmetro interno 5,2 ou 7,3 cm). O movimento foi comunicado a um excêntrico substituível (os utilizados possuíam excentricidades totais de construção de 4,1; 6,8 e 8,3 mm), responsável pela vibração do vaso de secagem. O excêntrico foi mantido solidário à sapata das barras de conexão por intermédio de uma mola. O contato foi melhorado por meio de uma tira de borracha elástica, exercendo o mesmo efeito da mola no ponto de contato. Em intervalos de 1 hora o excêntrico era lubrificado com óleo para abrandar a geração de calor por atrito e reduzir o desgaste das peças. A Figura II-3 (MELLO, 1978) mostra o mecanismo de vibração utilizado. A armação (com dimensões 100 x 50 x 50 cm) onde foi instalado o mecanismo de vibração, ficou apoiada entre dois balcões, a 90 cm do solo.

D . Preparo da matéria prima

Foram utilizados bulbos de cebola da cultivar "Baia Perifor_{me}", da colheita realizada no primeiro semestre de 1982, proveniente do município de Piedade, S.P. Selecionou-se de forma aproximada as unidades com diâmetros superiores a 4,5 cm.

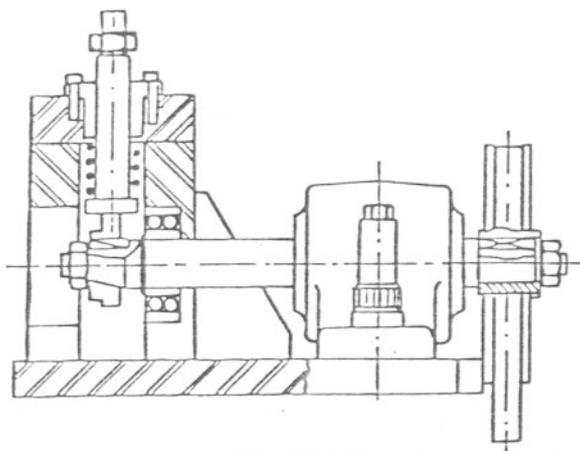


Figura II-3 - Mecanismo de Vibração

A redução de tamanho foi efetuada seccionando o vegetal perpendicularmente ao seu eixo principal, com um cortador de frios manual KORTEL, obtendo-se rodela de cebola que desagregadas forneceram os anéis. A casca foi separada após o corte e juntamente com raízes e pontas foram descartadas. Os anéis eram colocadas manualmente em um recipiente de plástico para determinação da massa desejada.

Periodicamente durante a execução dos ensaios foi realizado controle do "Brix" da cebola fresca (o que representa os teores de sólidos solúveis). Os bulbos foram desintegrados utilizando um liquidificador ARNO e a pasta obtida analisada em um refratômetro, CARL ZEISS 88293. Sabe-se que os teores de açúcares redutores, contidos na fração solúvel de uma fruta ou hortaliça, afetam sensivelmente a qualidade dos produtos desidratados em termos de sua coloração. As cultivares de cebola que apresentam maiores valores para sólidos solúveis, contêm menores teores de açúcares redutores, fornecendo um produto desidratado de melhor qualidade (STRINGHETA & BUSO, 1982). As cebolas utilizadas durante o período de realização dos ensaios apresentaram Brix variando entre 10 a 12,5. Após a desidratação não foram constatadas diferenças marcantes de coloração entre produtos provenientes de matéria prima

com Brix distintos (para as mesmas condições de operação).

E . Operação do secador e técnicas experimentais

Ao início de cada ensaio, ar na temperatura de operação circulava pela tubulação e pelo vaso de secagem vazio, até se atingir um estado estacionário. Esta etapa necessitava em torno de 30 minutos. Os anéis de cebola previamente pesados em uma balança METLER P3N (precisão de 1 grama), eram adicionados ao secador. Isto consumia em média 4 segundos. A re-colocação da tampa necessitava mais 5 segundos. O sistema de vibração era então acionado.

O aumento da resistência no circuito de secagem, devido a presença dos anéis de cebola, acarretava uma redução da vazão do ar e ocorria uma pequena variação na temperatura do ar de secagem (em torno de $0,5^{\circ}\text{C}$). Cerca de 1 a 1,5 minutos, após as devidas correções, eram novamente atingidos os valores pré-estabelecidos. Periodicamente, de 10 em 10 minutos, era feita uma leitura da temperatura do ar na saída do leito de secagem.

Em intervalos de 20 minutos, a abraçadeira que unia o vaso de secagem à junta flexível de borracha era afrouxada. A vibração era interrompida desligando-se o motor e rapidamente (cerca de 5 segundos) retirava-se os dois parafusos de conexão do vaso com o agitador vibratório. A pesagem do conjunto era realizada em cerca de 5 segundos. Este era o único intervalo de tempo no qual o material ficava sem contato com a ar de secagem. O conjunto era novamente conectado e re-iniciada a vibração. Nos ensaios agitados mecanicamente o vaso permanecia no máximo 20 segundos sem receber a influência vibracional.

Durante a secagem, a perda de umidade e modificações na forma dos anéis, redução da altura do leito, acúmulo de pequenas partículas arrastadas pelo ar na tela de bronze e variações nas condições do ar ambiente, alteravam a vazão e temperatura do ar. Os desvios máximos de temperatura do ar e queda de pressão no medidor de orifício, situavam-se em $0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,5$ mm de coluna de água e eram prontamente corrigidos.

No final da secagem, o vaso era desconectado e se retirava a tampa superior e o anel intermediário. As partículas de cebola desidratada eram desagregadas e desgarradas do leito (no caso de ensaios estáticos), retiradas por meio de um pegador manual de frios e colocadas em um becker de 1000 ml (sem compactação, mas com ligeira agitação manual para acomodação do material), sendo estimada a densidade aparente. Em seguida o produto era acondicionado em recipientes de vidro, perfeitamente vedados, para realização de estudos posteriores.

Após cada ensaio de secagem, duas amostras do material desidratado, com aproximadamente 4 gramas cada, foram colocadas em placas de petri e estas em uma estufa FANEM à temperatura de 50°C , sob vácuo de 27 polegadas de mercúrio durante 8 horas, para determinação da umidade final (MAZZA & LeMAGUER, 1978). As pesagens foram efetuadas com uma balança elétrica METLER P1210N, com precisão de 0,01 g. Amostras da matéria prima também foram desidratadas sob vácuo, segundo o método descrito, para determinação da umidade inicial.

Os termômetros antes de serem instalados, foram calibrados em um banho maria, com a temperatura ajustada desde 20°C até 70°C . Em toda faixa observou-se uma diferença constante de $0,5^{\circ}\text{C}$

entre a leitura dos dois termômetros que foi devidamente corrigida.

Afim de determinar as perdas de calor pelas paredes do recipiente, foram realizados ensaios com o vaso de secagem vazio e isolado externamente com uma camada de isopor de forma cilíndrica com 1,5 cm de espessura. O ar de entrada foi ajustado a 60°C. Foi determinada uma diferença real de temperatura entre os 2 termômetros de 0,8°C. O mesmo teste realizado sem o isolamento conduziu a sua variação da ordem de 1,5°C. A perda de calor ocorreu principalmente na junta de borracha e na parede de plexiglass do vaso. Estimou-se que a temperatura real do ar na entrada do leito deve situar-se nas proximidades de 59,5°C. Nos ensaios definitivos de secagem não foi utilizado o isolamento de isopor e a temperatura do ar de entrada foi considerada como a fornecida pelo termômetro colocado na tubulação. Preferiu-se esta aproximação por simplificar a operação e os controles visuais.

Durante as corridas as condições do ar ambiente (temperatura de bulbo seco e úmido) modificavam-se com o tempo. Em casos extremos as diferenças de temperatura atingiram a faixa de 2°C. Na determinação da umidade de equilíbrio da cebola, a condição do ar de secagem correspondeu as condições do ar ambiente no fim da operação, aquecido até a temperatura de entrada no vaso de secagem.

A umidade absoluta e relativa do ar ambiente foi calculada através das temperaturas de bulbo seco e úmido, medidas por um psicrômetro OWO SUISSE 564, dotado de ventoinha para deslocamento do ar pelos bulbos dos termômetros.

A teoria do bulbo úmido conduz a seguinte relação (TREYBAL,

1968).

$$(p_{\omega}^* - p_V) = \frac{h_c}{k_G M_A \lambda_{\omega}} (T - T_{\omega}) \quad (\text{II-8})$$

p_{ω}^* = pressão de vapor de água na temperatura de bulbo úmido,

mm Hg

p_V = pressão parcial do vapor de água no ar, mm Hg

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção,
kcal/h.m².°C

k_G = coeficiente de transferência de massa, kmol/h.m².mm Hg

M_A = peso molecular da água, kg/kmol

λ_{ω} = calor latente de vaporização da água, kcal/kg, à T_{ω}

T = temperatura do bulbo seco do ar, °C

T_{ω} = temperatura de bulbo úmido do ar, °C

Onde h_c/k_G , pode ser estimado pela correlação experimental (FOUST, 1982):

$$\frac{h_c}{k_G} = 8,5 \left(\frac{\nu}{D_{AB}} \right)^{0,56} \cdot P \quad (\text{II-9})$$

Sendo, P = pressão total do ar (mm Hg); ν = viscosidade cinemática do ar e D_{AB} = difusividade da água no ar.

A umidade absoluta (Y , kg H₂O/kg ar seco) e relativa (ϕ) do ar, são então calculadas (após a determinação de p_V pela Equação II-8) utilizando as equações II-10 e II-11,

$$Y = 0,62 \frac{P_V}{P - P_V} \quad (\text{II-10})$$

$$\phi = \frac{P_V}{P} \quad (\text{II-11})$$

p_v^* = pressão de vapor de água no ar saturado à temperatura T,
mm Hg

A pressão total utilizada nas relações foi de 715 mm Hg.

Os métodos utilizados para medida dos parâmetros vibracionais (frequência e amplitude de vibração) estão descritos no Apêndice B.

Dados de equilíbrio cebola - ar úmido utilizados, foram levantados por Celso Costa Lopes e estão resumidos no Apêndice C.

CAPÍTULO III . EFEITO DA VIBRAÇÃO DO LEITO NA DINÂMICA E CINÉTICA DE SECAGEM DE FATIAS DE CEBOLA

A . Introdução

Foram realizados testes preliminares para avaliar o efeito da vibração na dinâmica do leito de cebola. Considerando que a cebola fresca normalmente é consumida cortada em anéis com largura de até 5 mm, utilizou-se este valor como referência na execução dos ensaios de secagem.

Operando com ar a temperatura ambiente e velocidade de 34 cm/s, frequência de 18 Hz, amplitude de 2,60 mm e carga de 15 kg de cebola/m², não foi observado nenhum movimento relativo entre os anéis e o vaso de secagem e nem vibração das partículas. Operando com a mesma frequência, mas utilizando amplitudes de 4,33 e 5,63 mm e cargas de 15 e 30 kg/m², foi percebida uma circulação dos anéis de cebola de forma idêntica a representada na Figura II-1. O movimento e agitação das partículas parecia mais intenso na parte superior do leito. Aparentemente a intensidade do movimento circulatório não era afetada pela amplitude de vibração, embora a agitação no topo do leito fosse nitidamente maior com a amplitude de 5,63 mm. Ao aumentar a velocidade do ar para 50 cm/s observou-se o mesmo tipo de circulação de anéis, porém o movimento da parte superior do leito era atenuado. Provavelmente a força de arraste do ar atue no sentido de reduzir o efeito da vibração no topo do leito.

Foram efetuados ensaios preliminares de secagem afim de se familiarizar com a operação e definir as condições de trabalho. Operou-se nas seguintes condições: ar ambiente ($Y_1 = 0,010 \text{ kg H}_2\text{O/}$

kg ar seco) aquecido a 60°C ($Y_{\text{saturação adiabática}} = 0,023 \text{ kg H}_2\text{O/kg ar seco}$) e velocidade 50 cm/s, carga de 30 kg/m² de suporte, frequência e amplitude de vibração, 18 Hz e 5,63 mm. Estimou-se a través de extrapolação dos resultados experimentais que a água evaporada no início da secagem correspondia a menos de 8 g/min. Utilizando este valor, foi efetuado um balanço de massa para estimar a velocidade do ar ambiente, aquecido a 60°C, necessário para que o ar de saída no início do processo de secagem fique saturado com água. Definindo W como a vazão em massa de ar seco vem:

$$W \cdot Y_1 + 8/1000 = W \cdot Y_{\text{saturação adiabática}}$$

$$W = 0,62 \text{ kg ar seco/min}$$

$$W_{\text{ar úmido}} = 0,62 + 0,62 \cdot 0,010 = 0,63 \text{ kg/min}$$

Esta vazão correspondeu a uma velocidade do ar na entrada do leito de 64 cm/s, à temperatura de 60°C. Este valor foi então fixado como velocidade de operação nos ensaios de secagem.

B . Distribuição de umidade no leito de cebola

Foram realizados ensaios para verificar o efeito da vibração na uniformização e mistura do leito. Na realidade não se procurou quantificar diretamente os parâmetros de mistura mas sim verificar a perda de umidade da porção superior e inferior do leito, com e sem vibração. Utilizou-se carga de 30 kg/m² com $X_0 = 7 \text{ kg H}_2\text{O/kg cebola seca}$ e $X_{\text{eq}} = 0,010 \text{ kg H}_2\text{O/kg cebola seca}$. A velocidade do ar foi 64 cm/s e a temperatura 60°C. As condições de vibração foram, 18 Hz e 5,63 mm. Os resultados estão indicados na

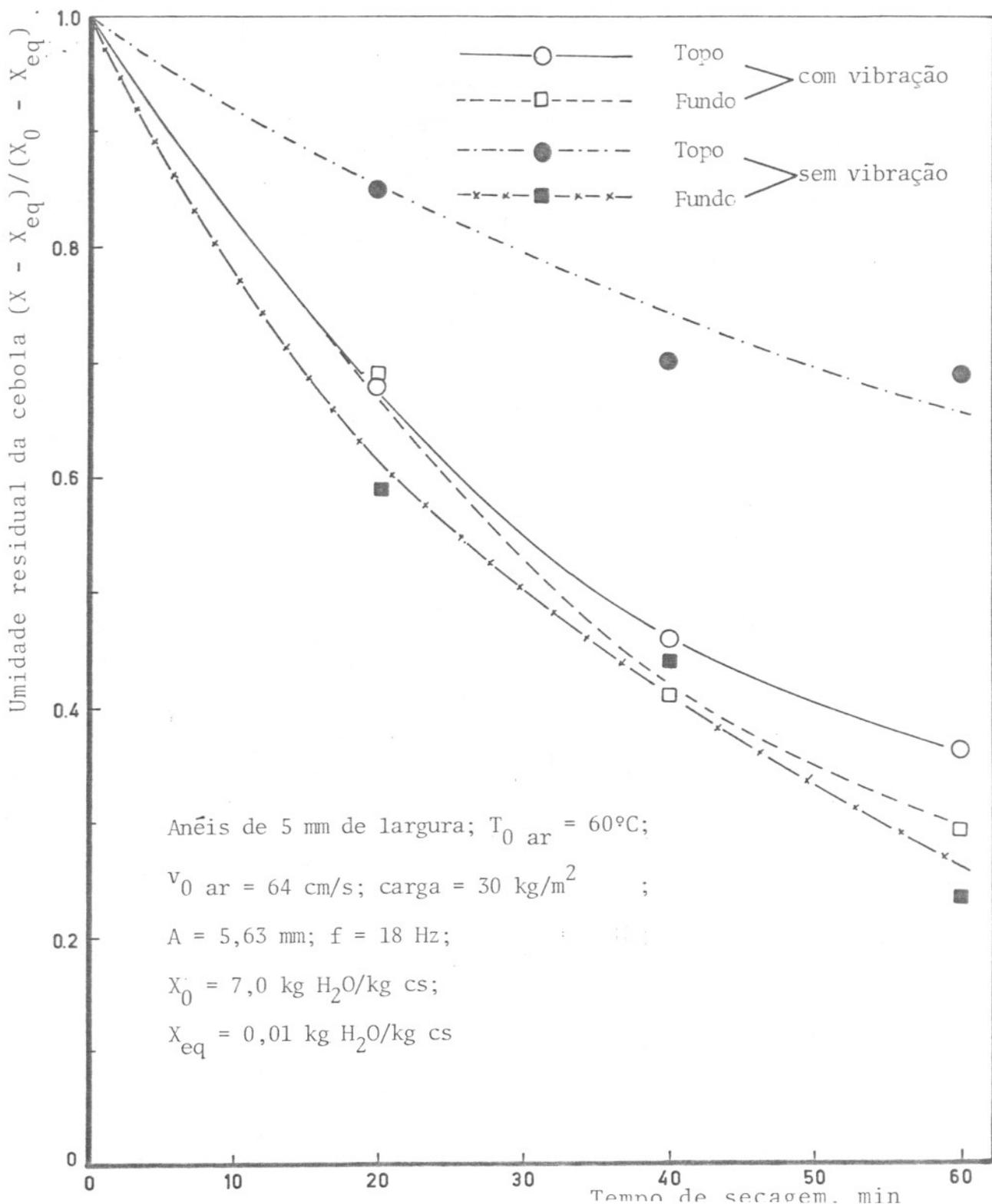
Figura III-1 e as curvas foram obtidas com amostras correspondendo a 1 cm de leito retiradas do topo e do fundo. Nela a variação de umidade está expressa pelo adimensional $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$.

O comportamento do sistema com vibração é bem diferente do sistema estático. Nesse último as 2 curvas são bem distintas, pois a porção superior do leito seca bem mais lentamente, uma vez que está submetida ao ar mais úmido. Já as curvas obtidas com leito sob vibração são bastante próximas, indicativo de boa uniformização do leito. Alguns valores não se ajustam em uma curva suave, devido a pequenas variações nas condições experimentais, uma vez que cada par de pontos corresponde a um ensaio, com nova matéria prima.

C . Regimes de operação

Os anéis de cebola utilizados, possuem dimensões apreciáveis e uma forma geométrica que impede a formação de um leito compacto. No início da secagem os anéis de diferentes tamanhos se entrelaçavam, restringindo o movimento individual dos mesmos e dificultando a fluidização do leito, mesmo sob forte intensidade vibracional. A situação era amenizada no final da secagem, pois o anel se contraía e dobrava, apresentando uma forma mais esférica.

Estas transformações tornam difícil caracterizar o regime de operação. De acordo com BRATO & JINESCO, ele no início se classificaria como leito vibrado, uma vez que $F_a < F_v$, pois foi observado movimento dos anéis ao operar com frequência de 18 Hz e amplitude de vibração de 5,63 mm, sem fluxo de ar e nenhum movimento ao submeter as partículas a velocidade de 64 cm/s, sem vibração. A carga de cebola no leito era 30 kg/m². Segundo a classi



ficação proposta por STRUMILLO, o regime de operação seria enquadrado como vibro-fluidizado (VF), uma vez que $U_G < U_{mf}$. Ao final da secagem (após cerca de 1 h e 40 minutos) a dinâmica das partículas era diferente. O leito tornava-se fluidizado sob vibração, mas não ocorria fluidização apenas com o fluxo de ar e portanto $U_G < U_{mf}$. De acordo com STRUMILLO, o regime de operação novamente classifica-se como vibro-fluidizado, apesar de não existir mais o deslocamento ordenado das partículas e predominar o movimento ao acaso.

Foi realizado um cálculo aproximado da velocidade mínima de fluidização, utilizando a Correlação (II-6), aplicável à pequenas partículas de forma esférica. A situação presente era muito diferente e o resultado portanto deve apenas servir como guia. Como diâmetro equivalente do anel de cebola, utilizou-se o diâmetro da esfera de volume igual ao do anel. Com as dimensões médias dos anéis utilizados (diâmetro 2,5 cm, espessura 2 mm e largura 5 mm), isto equivale a 1,2 cm. A densidade da cebola era $0,92 \text{ g/cm}^3$ e assim:

$$U_{MV} = 0,12 \left(\frac{0,92}{10^{-3}} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{0,19 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,33} 1,2^{0,88} \left[1 - 0,095 \frac{0,563 \cdot 113^2}{981} \right]$$

$$U_{MV} = 114 \text{ cm/s} > 64 \text{ cm/s} \text{ (igual a velocidade do gás de operação).}$$

O resultado concorda com observações experimentais do comportamento do leito, pois não foi constatado fluidização, mas apenas vibração do leito. Após cerca de 2 horas e 30 minutos de secagem a porcentagem de água na cebola é reduzida para cerca de 20% e estimando uma contração de volume dos anéis de aproximadamente 50%, a densidade das partículas reduz-se à $0,25 \text{ g/cm}^3$ e o diâmetro equi-

valente das partículas para 0,85 cm. A velocidade de fluidização agora calculada passa então para 38 cm/s, menor que a velocidade de operação. O que também concorda com observações experimentais do comportamento do leito, tendo ocorrido fluidização. Uma observação importante é que a altura do leito neste caso foi reduzida para cerca de 20% da altura do leito no início da secagem.

D . Efeito da vibração no comportamento do leito

Após estes estudos preliminares foram realizados ensaios para avaliar a influência da frequência e amplitude de vibração na secagem da cebola. As condições de operação mantidas constantes nos ensaios foram: temperatura e velocidade do ar, 60°C e 64 cm/s, largura dos anéis 5 mm e carga inicial de 30 kg de cebola/m² de suporte. Nos ensaios com vibração operou-se com frequência de 18 Hz e amplitudes de 2,60; 4,33 e 5,63 mm.

Nos ensaios sem vibração observou-se uma contração contínua do volume do material no leito, com uma diminuição da altura, ocorrendo o desenvolvimento de um espaço livre de forma anelar junto a parede do vaso, que ao final da secagem chegava a cerca de 5 mm. Esta região ficou livre para a passagem direta do ar, resultando em perda de energia de aquecimento e de deslocamento do ar. Ao final da secagem as fatias de cebola desidratadas constituíam uma massa de anéis ligeiramente entrelaçados. A separação ocorria facilmente quando manuseados. A adesão entre fatias e o suporte entretanto era mais severa.

O comportamento fluido mecânico do leito nos ensaios de secagem com vibração, operando com amplitude de 5,63 mm, era mais complexo. No início da operação os anéis se acomodavam com redu

ção da altura do leito, sendo observado circulação do tipo apresentado na Figura II-1. Quinze minutos após o início da secagem, começava o desprendimento da película que reveste a parte interna dos anéis de cebola e a formação de uma camada de aspecto oleoso, junto a parede interior do vaso de secagem. Este depósito permaneceu até o fim da secagem e parte das películas desprendidas dos anéis ficavam aderidas a êle. Após aproximadamente 1 hora de secagem ocorria um fenômeno inesperado: a maior parte dos anéis se compactava e se aglomerava em uma (ou mais) grande massa central vibratória. O movimento circulatório individual gradativamente desaparecia. A massa compacta subsistia por 20-25 minutos, após o que começava a se desagregar, necessitando para isso de 15 a 25 minutos. No final deste período, o conteúdo da umidade de cebola era de aproximadamente 40% (b.u) e a massa de material no leito tinha sido reduzida a menos de 20% da inicial. O leito passava a se comportar como um leito fluidizado com todo o material solto e se movimentando ao acaso.

O aspecto e forma do produto final, mostrou-se dependente das características da matéria prima. Quando os anéis de cebola são provenientes de bulbos com alta umidade inicial, cerca de 90%, eles tendem a se modificar drasticamente no período vibro-fluidizado e no final adquirem uma forma aproximadamente esférica, aumentando a densidade aparente. Utilizando cebola com menor conteúdo de água, cerca de 87 - 88%, o produto desidratado mantém a forma de anéis, mas muito deformados e contorcidos, com uma densidade aparente intermediária. A Figura III-2, a, b e c, mostra fotografias dos produtos desidratados, com e sem vibração, onde fica bem aparente o efeito da contração e enrolamento do anel. As partículas de pequenas dimensões detectadas ao final da secagem, são devidas principalmente as películas interiores dos anéis de cebo-

la que se desprenderam e posteriormente desintegraram. Na Figura III-2 aparecem algumas delas.

O comportamento geral do leito apresenta as mesmas características descritas acima, quando as condições de vibração são de menor intensidade, podendo entretanto haver uma variação nos tempos para os diversos períodos.

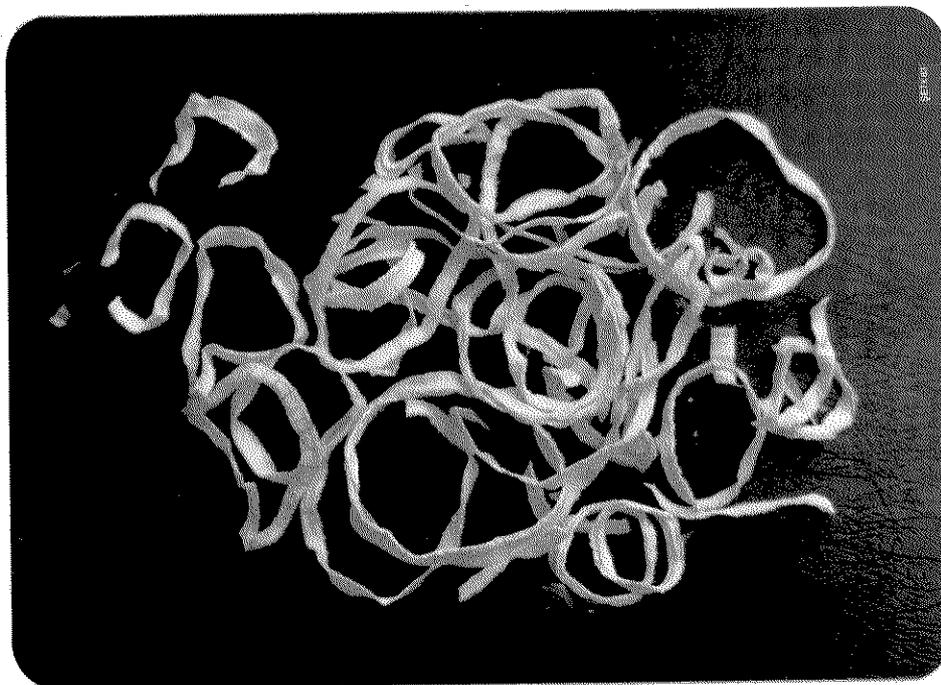


Figura III-2.a - Cebola desidratada em condições não vibratórias. Condições de operação: anéis de cebola de 5 mm de largura; temperatura e velocidade do ar, 60°C e 64 cm/s; carga = 30 kg/m²; umidade inicial dos anéis = 8,62 kg H₂O/kg cs; densidade aparente do produto desidratado = 0,070 g/ml.

E . Efeito da vibração na cinética de secagem

A influência da vibração na secagem foi verificada com experiências nas quais as condições do ar (velocidade = 64 cm/s e tem

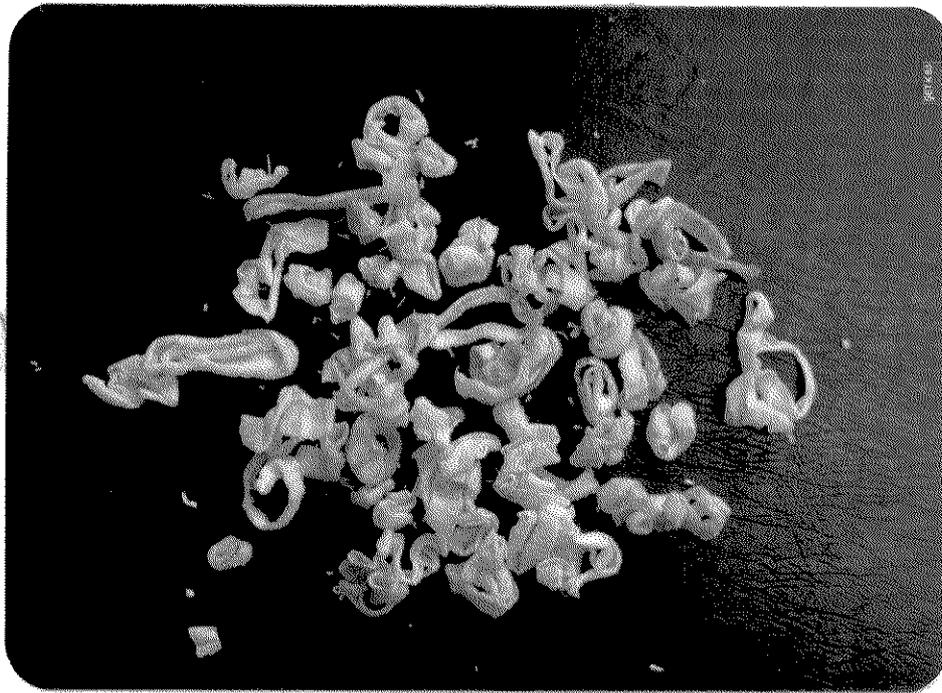


Figura III-2.b - Cebola desidratada em condições vibratórias. Condições de operação: anéis de cebola de 5 mm de largura; temperatura e velocidade do ar 60°C e 64 cm/s; carga = 30 kg/m²; amplitude e frequência de vibração 5,63 mm e 18 Hz; umidade inicial dos anéis = 7,20 kg H₂O/kg cs; densidade aparente do produto desidratado = 0,34 g/ml

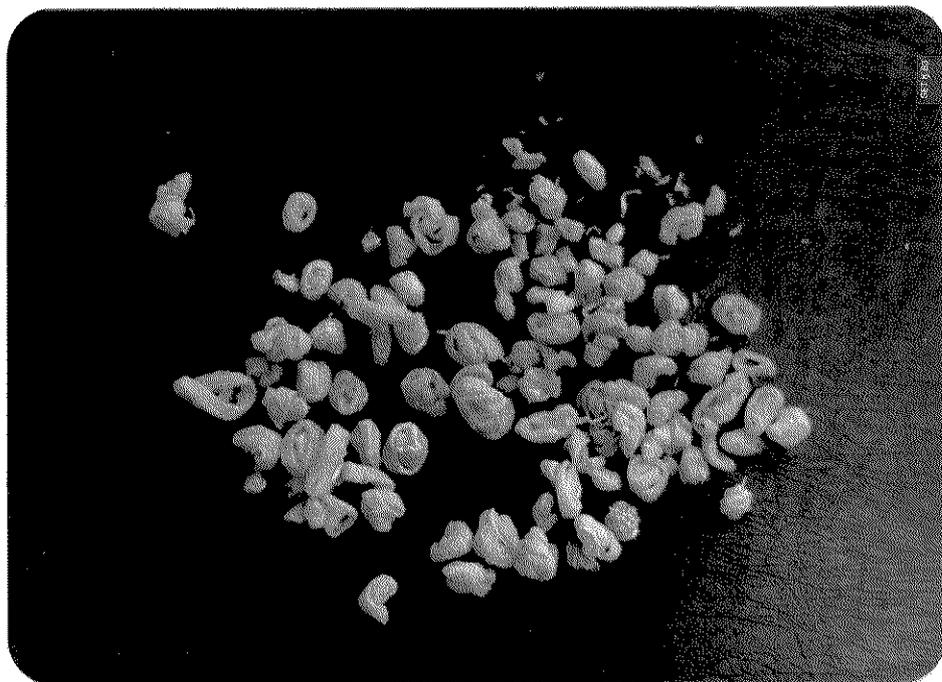


Figura III-2.c - Cebola desidratada em condições vibratórias. Condições de operação: anéis de cebola de 5 mm de largura; temperatura e velocidade do ar, 60°C e 64 cm/s; carga = 30 kg/m²; amplitude e frequência de vibração 5,63 mm e 18 Hz; umidade inicial dos anéis = 8,62 kg H₂O/kg cs; densidade aparente do produto desidratado = 0,53 g/ml.

tantes. A variação de umidade da cebola foi expressa por $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$ em função do tempo de secagem. As condições de vibração usadas eram, amplitude de 2,60; 4,33 e 5,63 mm e frequências de 13,3 e 18 Hz. A umidade inicial era, $X_0 = 8,62 \text{ kg H}_2\text{O/kg cs}$ e as umidades de equilíbrio da cebola com o ar nas condições de entrada no vaso, conforme a ordem crescente da numeração dos ensaios foram: 0,0091; 0,0106; 0,0106; 0,0105; 0,0098. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura III-3.

As curvas mostram que a vibração reduz o tempo de secagem quando comparado com a operação em leito estático. Observe-se que com o aumento de $A\omega^2/g$, mantendo constante a frequência, ocorre um aumento da velocidade de secagem. Os resultados experimentais dão a entender que para $A\omega^2/g$ acima de 5,60 este aumento é muito pequeno. Comparando-se as curvas dos ensaios 2 e 5, conclui-se que a amplitude é mais importante que a frequência de vibração. Isto porque apesar de $A\omega^2/g$ ser bem próximo para os dois ensaios, o menor tempo de secagem, para alcançar umidades finais iguais, correspondeu à utilização da maior amplitude de vibração. Uma tendência semelhante já foi mencionada por STRUMILLO & PAKOWSKI (1980).

A Figura III-4 mostra o efeito da frequência e da amplitude de vibração na taxa de secagem de fatias de cebola, $d \left[(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq}) \right] / d \theta \cdot (X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$. As derivadas foram obtidas através do traçado de tangentes às curvas da Figura III-3.

As curvas indicam que não foi encontrado um período de taxa de secagem constante. Das taxas de secagem iniciais, relativas a operação em leito vibratório, o caso extremo foi 28% superior a taxa correspondente ao leito estático.

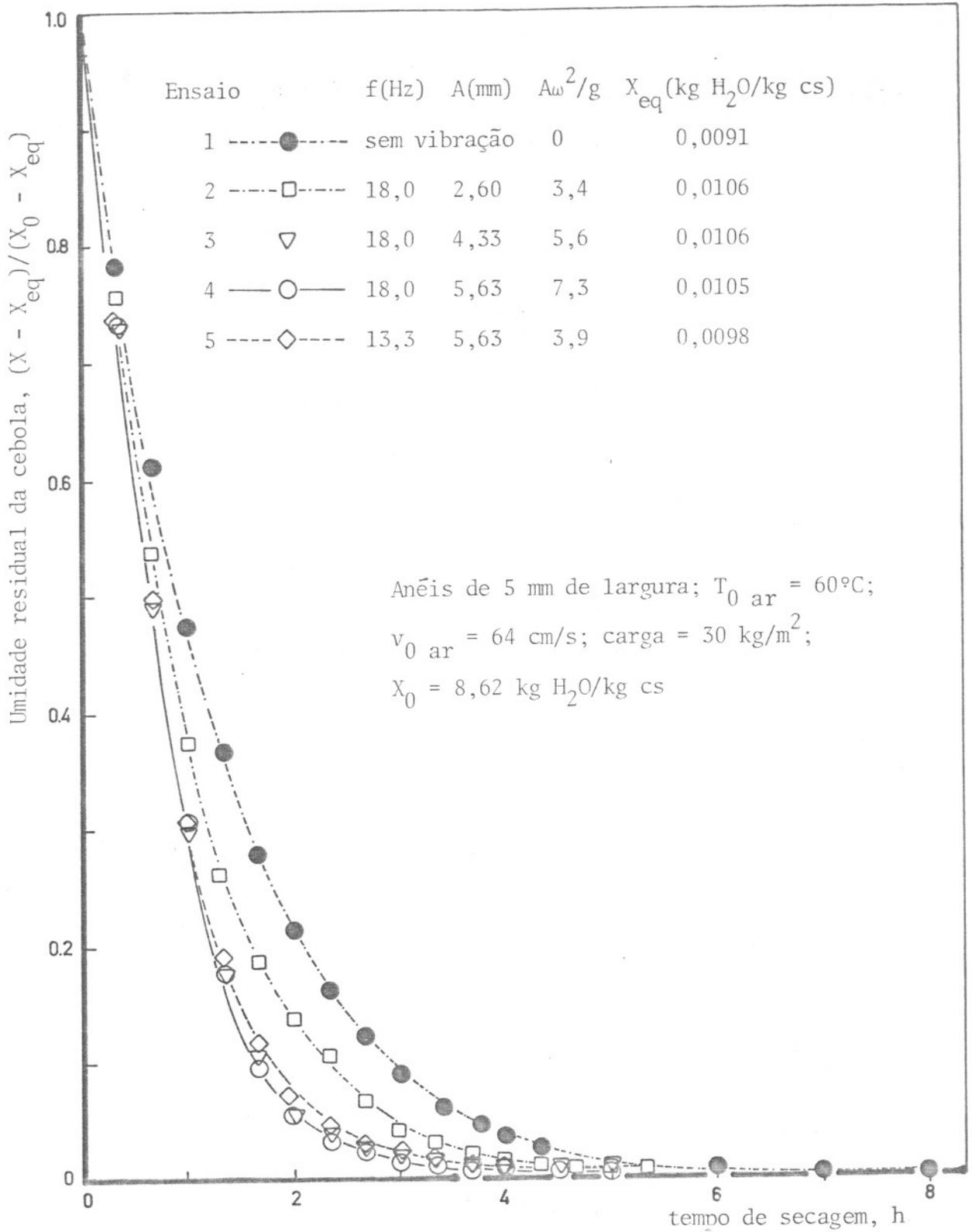


Figura III-3 . Efeito da vibração na secagem de anéis de cebola

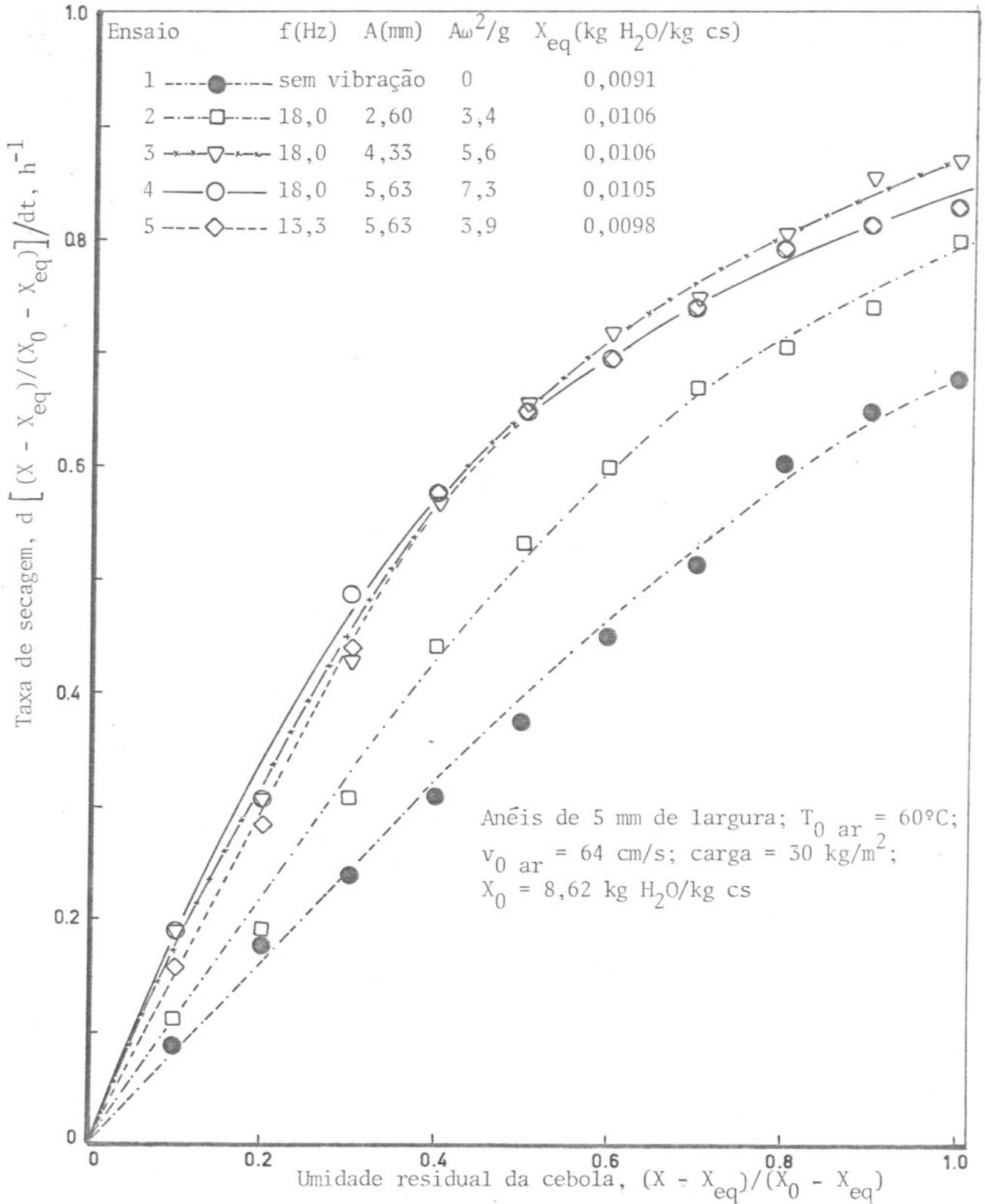


Figura III-4 . Efeito da vibração na taxa de secagem de anéis de cebola

A Figura III-5 é um rearranjo dos dados da Figura III-3 em escala semi-logarítmica. Nela os pontos experimentais podem ser a justadas a duas retas. A taxa de perda de umidade da cebola é reduzida bruscamente na transição da primeira reta para a segunda. Isto sugere dois regimes de secagem, conforme já observado por MAZZA (1980). Provavelmente no primeiro regime exista migração de umidade por capilaridade, através dos poros para a superfície de evaporação e no segundo a transferência de massa seja regida pelas leis da difusão, ocorrendo transporte de umidade em fase gasosa no interior da cebola. Por outro lado, a contração de volume também pode ter participação nesse fenômeno.

As densidades aparentes dos produtos desidratados nos ensaios 1 a 5 foram, 0,070; 0,22; 0,37; 0,53 e 0,46 g/ml, respectivamente. Isto indica que o volume ocupado pelo produto obtido com influência mais intensa de vibração é cerca de 7 vezes menor que o obtido em leito estático. A importância deste efeito está na redução de custos de armazenagem de produto.

A Figura III-6, apresenta curvas de perda de umidade, de variação da altura do leito e de variação da temperatura do ar ao abandonar o leito, em função do tempo de secagem. As condições de operação foram, velocidade e temperatura do ar 64 cm/s e 60°C, carga de 30 kg/m², amplitude de 5,63 mm e frequência de 18 Hz. As umidades foram, $X_0 = 7,33 \text{ kg H}_2\text{O/kg cs}$ e $X_{eq} = 0,0061 \text{ kg H}_2\text{O/kg cs}$ (leito estático), $X_{eq} = 0,0101$ (leito vibro-fluidizado).

Um exame da curva de variação da temperatura de saída do ar, em leito estático, indica que após 10 minutos de secagem, a temperatura atingida pelo ar foi de 33°C. O ar ambiente estava a 19°C com uma temperatura de bulbo úmido de 16°C. Se aquecido até 60°C

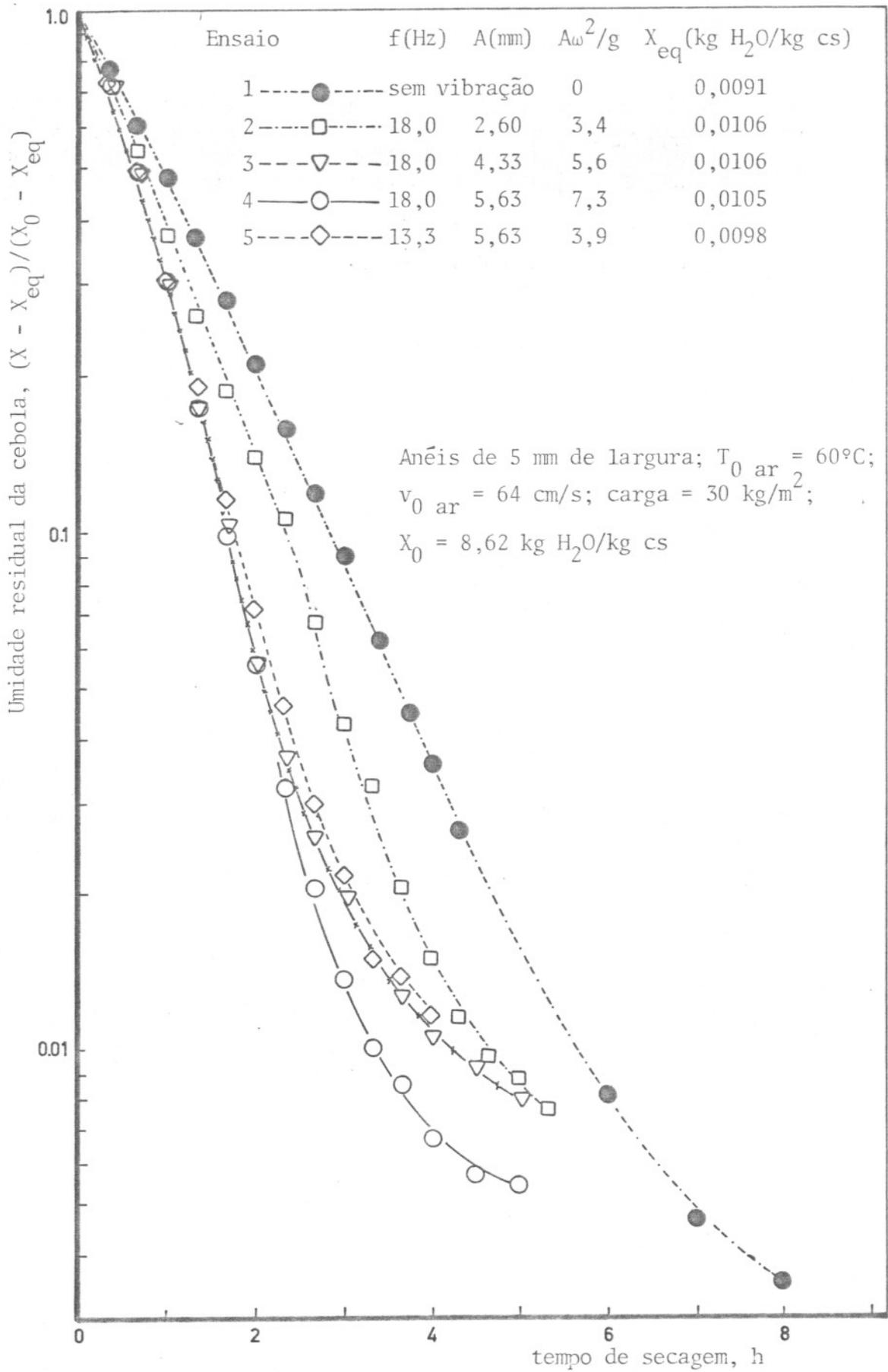


Figura III-5 : Efeito da vibração na secagem de anéis de cebola. Corresponde às curvas da Figura III-3, traçadas em escala semi-logarítmica

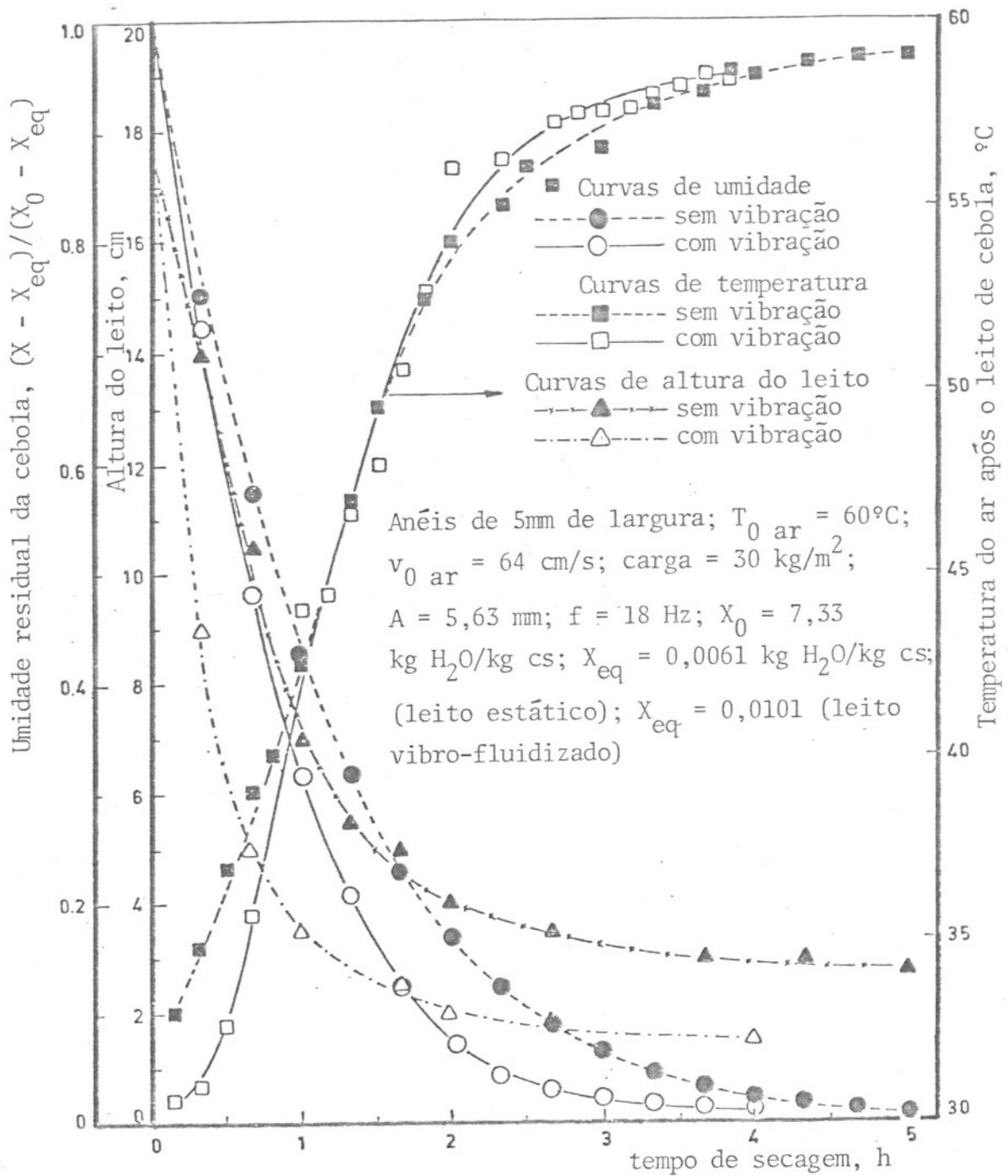


Figura III-6 . Variação da umidade, altura do leito e temperatura de saída do ar de secagem do leito, com o tempo

e assumindo secagem adiabática, este ar a 33°C. atingiria de acordo com a carta psicrométrica de São Paulo, uma umidade absoluta de 0,0227 kg H₂O/kg as (SILVA et al, 1966). Utilizando as equações II-10 e II-11, e uma pressão manométrica média para Campinas de 715 mm Hg, chega-se a uma saturação $\phi = 72\%$ do ar de saída. Estimando por extrapolação a temperatura de saída do ar do leito de secagem no tempo 0, em 32,1°C, obtém-se a umidade relativa de 77%.

Em condições vibratórias, também utilizando os resultados da Figura III-6, um raciocínio análogo ao anterior forneceu, após 10 minutos de secagem, $\phi = 80\%$. Extrapolando para o tempo 0, $\phi = 85\%$.

Realizando-se um balanço de massa envolvendo apenas a água evaporada, a umidade relativa alcançada pelo ar atinge valores inferiores ao desta análise. Isto pode ser explicado por estar a cebola no tempo zero à temperatura ambiente. Portanto a temperatura lida no termômetro, na saída do leito, inclui a troca de calor com a matéria prima além do efeito da transferência de massa.

F . Energia consumida na operação em leito estático e vibratório

A análise que segue, baseia-se nos ensaios de números 1 (sem vibração) e 4 (com vibração) locados na Figura III-3. As condições de vibração usadas foram, amplitude = 5,63 mm e frequência = 18 Hz.

A comparação da operação em leito estático e vibratório, em termos do consumo global de energia, é importante até que seja atingida a umidade da cebola em torno de 12% (b.u). É aconselhável realizar a secagem final em silos, onde é utilizado ar seco em

temperatura mais branda, alcançando-se uma umidade final de aproximadamente 5%, adequada para conservação prolongada do produto.

1) Energia de deslocamento do ar

Efetuada um balanço de energia mecânica e considerando um ponto "a" na entrada do ventilador e um ponto "b" na saída do vaso de secagem, tem-se:

$$\frac{p_a}{\gamma} + \frac{v_a^2}{2g} + Z_a + \eta W_p = \frac{p_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} + Z_b + h_f \quad (\text{III-1})$$

Todos os termos da equação III-1, estão expressos em metros de coluna de fluido e representam: p/γ = energia de pressão; considerando que no ventilador praticamente toda a energia admitida é convertida em energia de velocidade e quase nada em carga de pressão, $p_a \approx p_b$; $v^2/2g$ é a carga de velocidade, sendo $v_a = 0$ na entrada do ventilador (ar ambiente), no topo do vaso de secagem varia com a temperatura de saída, mas mantém-se próxima de 64 cm/s; Z é a carga estática, $Z_a = 0$, no centro do flange de sucção do ventilador (referência), $Z_b = 1$ m, na saída do vaso de secagem; h_f = perda de energia, devido ao atrito do ar na tubulação, nos acessórios e acidentes do equipamento de secagem, sendo estimada em 39 metros de coluna de ar. A energia total requerida para deslocar o ar, $(-\eta W_p) = 40$ metros, foi calculada pelo balanço global. Com a taxa de ar igual a 0,63 kg/min (que corresponde a velocidade de 64 cm/s na entrada do vaso de secagem) e estimando o coeficiente de rendimento do ventilador em 0,5, a potência necessária para movimentar o ar pode ser calculada.

$$P = \frac{(0,63/60) \cdot 40}{0,5} = 0,82 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 0,82 \cdot 9,8 = 8 \text{ Joules/s}$$

Desta maneira a energia consumida pelo ventilador pode ser calculada pela Equação III-2, abaixo:

$$\text{Energia de deslocamento do ar} = 8 \cdot t \quad \text{J} \quad (\text{III-2})$$

Sendo, t o tempo em segundos.

2) Energia de vibração

O sistema de vibração era constituído por um camo que atuava sobre um seguidor. A Figura III-7, esquematiza o conjunto e o deslocamento do seguidor durante um ciclo. O movimento produzido é descrito matematicamente pela Equação III-3.

$$y = e \cdot \text{sen } \theta \quad ; \quad \theta = \omega \cdot t \quad (\text{III-3})$$

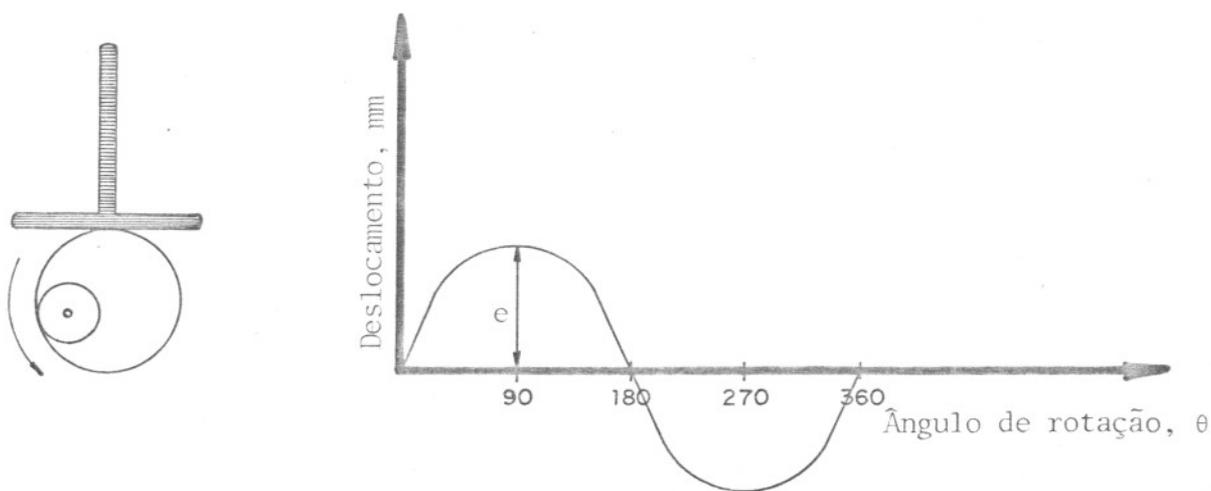


Figura III-7 . Esquema do camo e do seguidor e posições do seguidor durante um ciclo

A aceleração \ddot{y} do seguidor é:

$$\ddot{y} = -e \omega^2 \text{ sen } \theta \quad (\text{III-4})$$

F_y é a componente vertical da força resultante do seguidor atuando sobre o camo e determinada pela Equação III-5 (MELLO, 1978),

$$F_y = F_M + F_i + P \quad (\text{III-5})$$

onde:

F_M = força externa da mola = $-k(y_0 + y)$

k = constante da mola

y = deslocamento

y_0 = deslocamento inicial da mola

F_i = força de inércia = $-m \ddot{y} = -\frac{P}{g} \ddot{y}$

P = carga sobre o camo

A energia consumida pelo sistema pode ser calculada pela equação:

$$W = \int F_y \cdot dy$$

Fazendo as substituições e integrando de $-\pi/2$ até $\pi/2$, chega-se a:

$$W = -2 e [K y_0 + P] \quad (\text{III-6})$$

A potência consumida é determinada pela equação:

$$\text{Potência} = W \cdot \omega \quad (\text{III-7})$$

Onde: ω é a frequência de vibração (radianos/s). Conseqüentemente a energia de vibração pode ser calculada por:

$$\text{Energia de vibração} = \text{Potência} \cdot t \quad (\text{III-8})$$

Sendo t o tempo de vibração em segundos

A constante da mola utilizada foi de 0,22 kg/mm e $y_0 = 1$ mm, sendo utilizado ainda uma correia de borracha que auxiliou na manutenção do camo solidário ao seguidor. Para compensar esta resistência adicional y_0 foi suposto igual a 2 mm.

O peso do suporte (do vaso de secagem) foi de 0,86 kg e do vaso com os acessórios 2,45 kg. No início da operação existia 0,50 kg de cebola no leito. A soma das três cargas constitui a carga total sobre o camo (P), sendo a massa de cebola no leito variável com o tempo, devido a perda de umidade. Nos cálculos para determinação da energia requerida para vibração, utilizou-se o valor médio da massa de cebola existente no vaso, no intervalo de tempo considerado.

Substituindo os valores das grandezas conhecidas na Equação III-8, obtém-se:

$$E = -750 [0,44 + P] t \quad \text{J} \quad (\text{III-9})$$

Sendo: t o tempo de vibração em minutos e P em kg

3) Energia de aquecimento do ar de secagem

A quantidade de calor necessário para o aquecimento do ar

de secagem pode ser determinada pela equação:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{III-10})$$

onde:

\dot{m} = taxa de massa do ar, kg/s

\dot{q} = taxa de calor, kcal/s

C_p = calor específico médio do ar de secagem, kcal/kg.°C

ΔT = diferença de temperatura do ar de secagem, entre ap \bar{o} s e antes da resist \bar{e} ncia el \bar{e} trica de aquecimento (60 - 22) = 38°C.

Substituindo os valores:

$$\dot{q} = \frac{0,63}{60} \cdot 0,245 \cdot 38 = 0,098 \text{ kcal/s}$$

$$\dot{q} = 0,098 \cdot 4185 = 410 \text{ J/s}$$

Assim a energia de aquecimento \bar{e} calculada por:

$$\text{Energia de aquecimento} = 410 \cdot t \quad \text{J} \quad (\text{III-11})$$

Sendo t , o tempo de aquecimento em segundos.

Os resultados acumulativos da energia total consumida, calculados em intervalos de tempo de 20 minutos, est \bar{a} o indicados na Tabela III-1 para leito vibrat \bar{o} rio, na Tabela III-2 para leito es t \bar{a} tico e locados na Figura III-8.

A raz \bar{a} o entre o consumo de energia na secagem, em leito vi bro-fluidizado e est \bar{a} tico, para obter cebola desidratada com umi-

Tabela III-1. Energia consumida durante a secagem em leite vibro-fluidizado.

Tempo (min)	Energia de Deslocamen_ to (K·Joules)	Energia de Vibração (K·Joules)	Energia de Aquecimen- to do ar (K·Joules)	Energia Total (K·Joules)	X Umidade da cebola (kg H ₂ O/kg cs)
0	0	0	0	0	8,62
20	10	63	492	565	6,34
40	19	123	984	1126	4,30
60	29	180	1476	1685	2,56
80	38	235	1968	2241	1,53
100	48	291	2460	2799	0,87
120	58	346	2952	3356	0,49
140	67	402	3444	3913	0,29
160	77	459	3936	4472	0,19
180	86	516	4428	5030	0,13
200	96	573	4920	5589	0,10
220	106	630	5412	6148	0,085
240	115	687	5904	6706	0,069
260	125	744	6396	7265	0,065
280	134	801	6888	7823	0,062
300	144	858	7380	8382	0,058

Tabela III-2. Energia consumida durante a secagem em leite estático.

Tempo (min)	Energia de Deslocamen- to (K·Joules)	Energia de Aquecimen- to do Ar (K·Joules)	Energia Total (K·Joules)	X Umidade da cebo- la (kg H ₂ O/kg cs)
0	0	0	0	8,62
20	10	492	502	6,75
40	19	984	1003	5,28
60	29	1476	1505	4,10
80	38	1968	2006	3,17
100	48	2460	2508	2,42
120	58	2952	3010	1,86
140	67	3444	3511	1,41
160	77	3936	4013	1,06
180	86	4428	4514	0,78
200	96	4920	5016	0,63
220	106	5412	5518	0,47
240	115	5904	6019	0,32
260	125	6396	6521	0,24
280	134	6888	7022	0,21
300	144	7380	7524	0,18
360	173	8856	9029	0,08

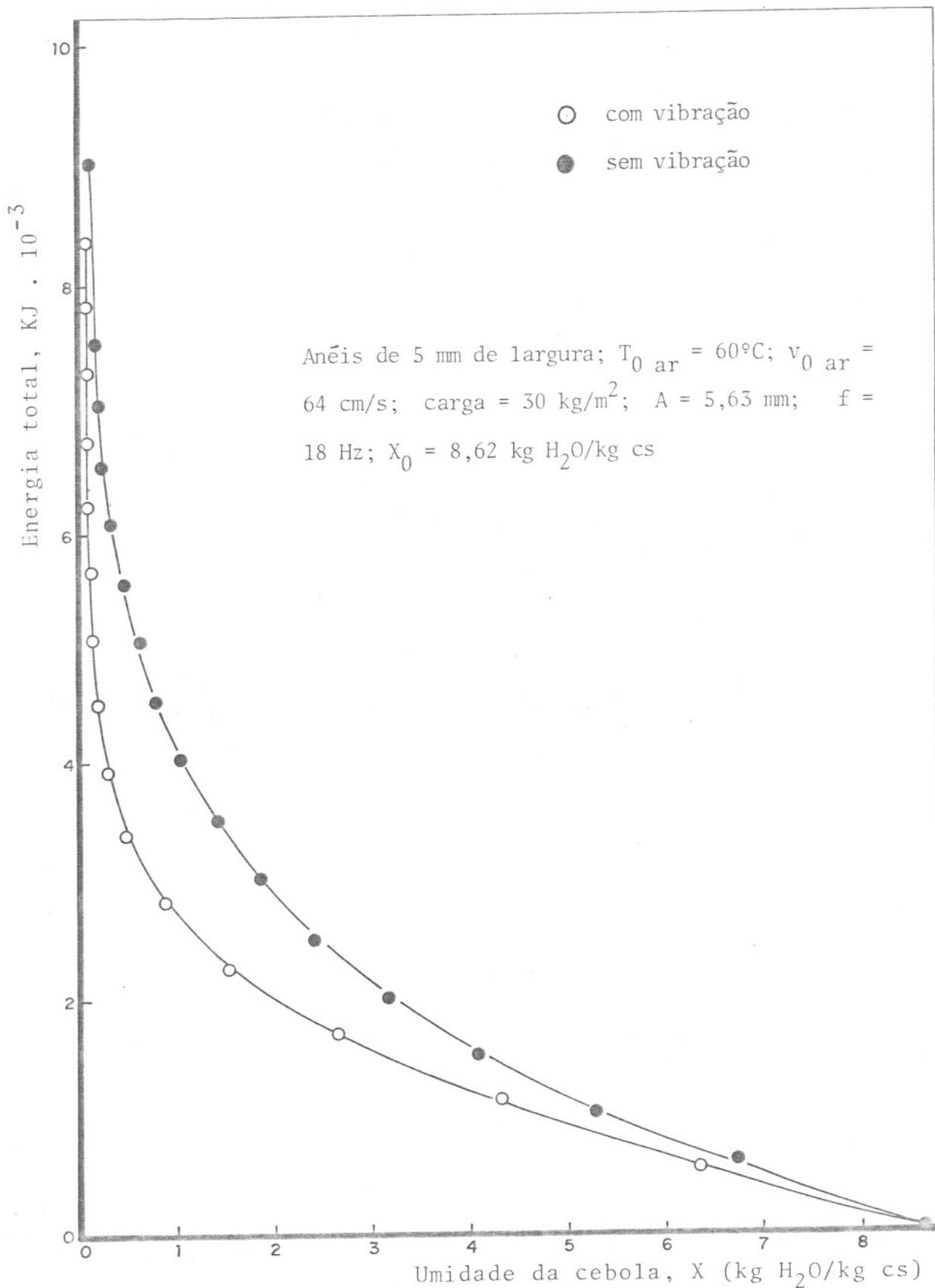


Figura III-8 . Consumo global de energia em função da umidade da cebola

dade de 12% (13,6% b.s) foi de:

$$R = \frac{5050}{8050} = 0,63$$

Este exemplo indica que a operação em leito vibro-fluidizado, exige muito menos energia, comparada ao leito estático, pois a energia adicional necessária para promover a vibração é compensada pelo menor tempo de processamento. Na realidade apenas parte do calor fornecido pelo ar de secagem é utilizado para evaporar a água. Uma possibilidade de melhorar a eficiência de operação (em leito vibro-fluidizado ou estático), seria reciclar parte do ar aquecido que abandona o topo do secador. Nestes casos o ganho energético com a vibração seria menor, mas ainda considerável.

CAPÍTULO IV . INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES DE AR E DA CEBOLA NA SECAGEM EM LEITO ESTÁTICO E VIBRO-FLUIDIZADO

A . Efeito da velocidade do ar na secagem

O aumento da velocidade do ar, mantidas constantes as demais condições de operação, deverá favorecer a taxa de secagem por dois motivos. O principal é consequência do aumento da turbulência na fase gasosa, que promoverá uma diminuição da resistência à convecção externa de massa. O outro resulta do aumento do potencial para a transferência de massa, uma vez que o vapor d'água formado ficará mais diluído quando uma maior vazão for usada e com isso a pressão média do vapor de água no ar de secagem aumentará menos ao longo do leito. Ambos os efeitos tendem a se atenuar a altas velocidades ou quando a transferência de massa passa a ser dominada pela resistência interna, regida pelas leis da difusão molecular. Em leitos vibratórios entretanto é possível que velocidades altas interfiram na dinâmica do leito.

Para identificar os limites de velocidades pertinentes ao processo em estudo, foram efetuados ensaios de secagem de anéis de cebola de 5 mm de largura, com $X_0 = 7,55 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ cebola seca. Operou-se com carga de 30 kg de cebola/ m^2 de suporte do leito e frequência e amplitude de vibração 18 Hz e $4,33 \text{ mm}$. A temperatura de admissão do ar nos ensaios realizados foi mantida em 60°C . As curvas de perda de umidade com o tempo estão traçadas na Figura IV-1. Analisando estas curvas, verifica-se um sensível aumento da taxa de perda de umidade pela cebola, com o acréscimo da velocidade do ar até 64 cm/s , mantidas constantes as outras variáveis. A partir deste valor a variação da taxa de secagem é menos pronunciada, indicando que este é aproximadamente o limite de influência

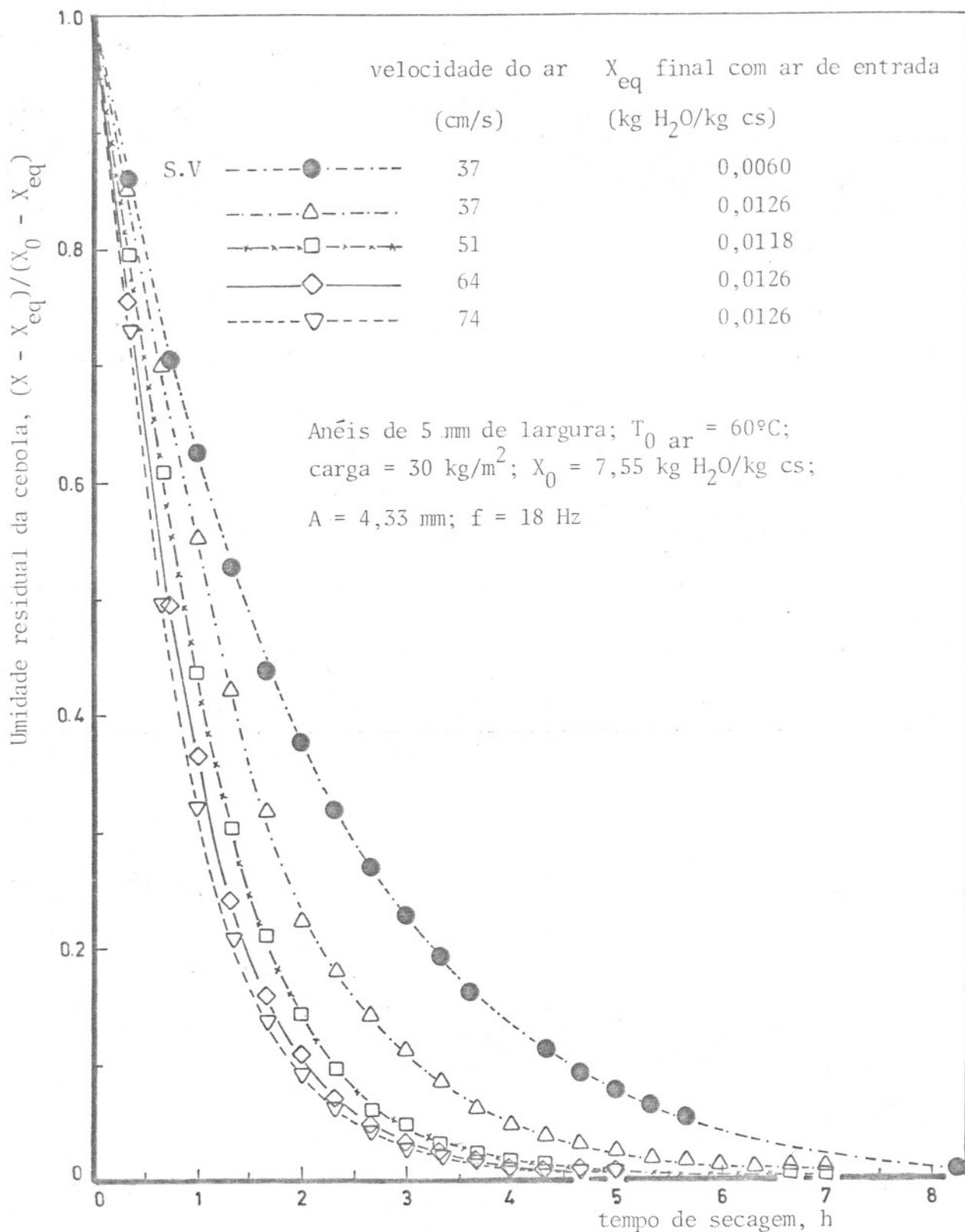


Figura IV-1 . Efeito de velocidade do ar na secagem de anéis de cebola

da velocidade. A ordenada da Figura IV-1, foi calculada com o valor da umidade de equilíbrio correspondente às condições de entrada do ar no vaso de secagem. A umidade absoluta do ar ambiente variou ao longo dos ensaios e as umidades de equilíbrio correspondentes foram: 0,0060 kg H₂O/kg cebola seca (37 cm/s), sem vibração e 0,0126 (37 cm/s); 0,0118 (51 cm/s); 0,0126 (64 cm/s); 0,0126 (74 cm/s), com vibração.

Para verificar o possível efeito da diminuição do potencial para transferência de massa, ao longo do leito, foram calculadas as condições médias do ar de secagem a cada 20 minutos. Para este fim utilizou-se a simples média aritmética entre as umidades de equilíbrio com o ar de entrada e de saída. As condições do ar de saída foram determinadas pela carta psicrométrica (SILVA, 1966), assumindo secagem adiabática e considerando a massa de água evaporada na umidade de tempo. As umidades de equilíbrio médias estão traçadas na Figura IV-2.

Observa-se que no início da secagem, a umidade de equilíbrio média foi consideravelmente mais alta do que a assumida na Figura IV-1. Além disso ela teve um efeito mais destacado para velocidade do ar de 37 cm/s. As curvas determinadas para as velocidades do ar de 51, 64 e 74 cm/s, resultaram razoavelmente próximas, indicando que os incrementos no potencial de transporte de umidade com o aumento do fluxo de gás são desprezíveis. Na realidade o acréscimo da velocidade do ar aumenta a taxa de secagem, mas o vapor de água se dilui em uma maior massa de ar, permanecendo X_{eqm} aproximadamente constante.

Utilizando os valores de X_{eqm} da Figura IV-2, foram traçadas as curvas de perda de umidade com o tempo de secagem

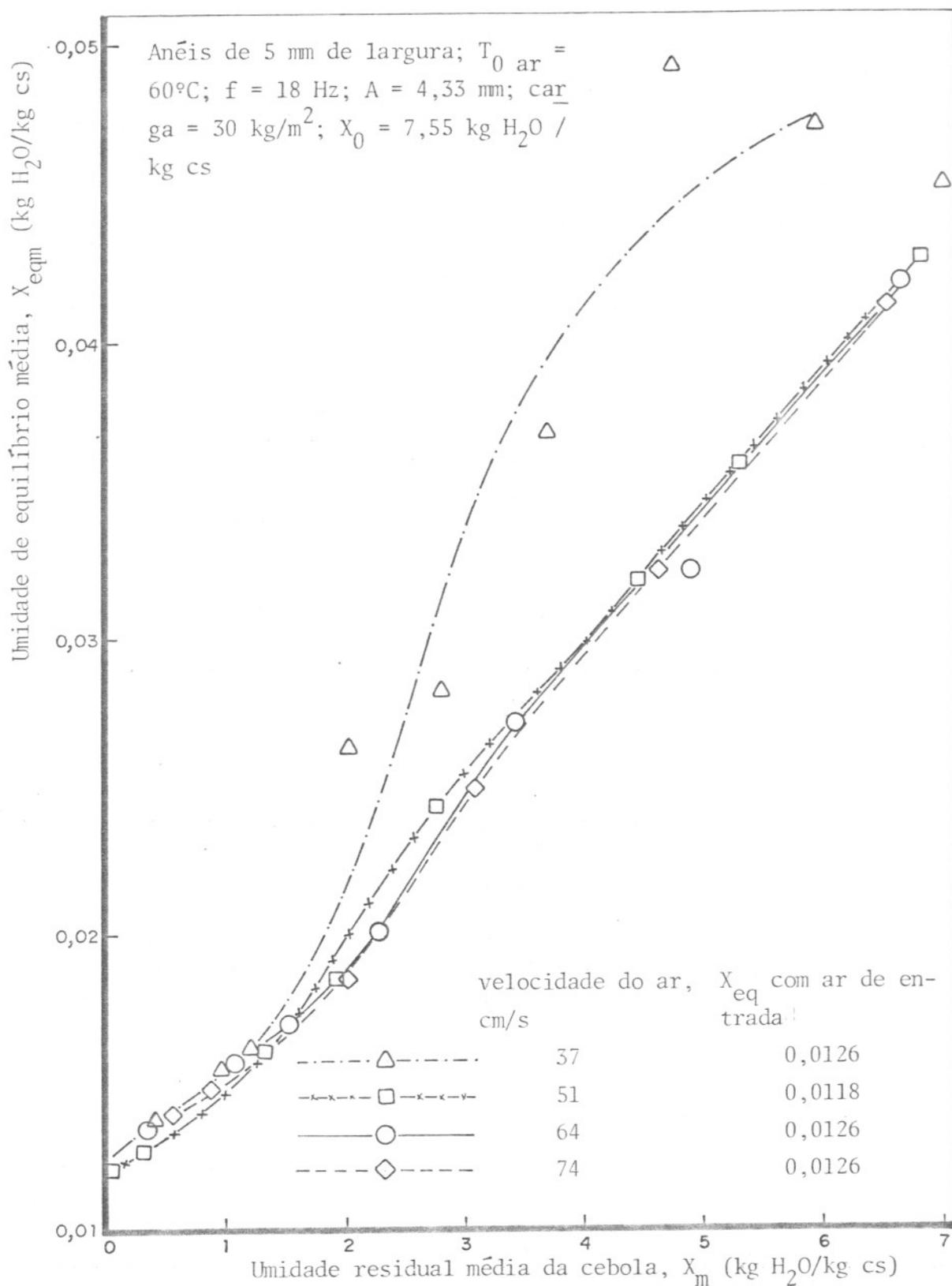


Figura IV-2 . Umidade de equilíbrio média da cebola em função da umidade média da cebola no leito

$\left[\frac{(X - X_{eqm})}{(X_0 - X_{eqm})} \right]$. tempo de secagem . Verificou-se que estas curvas coincidiram com as da Figura IV-1. Isto se deve ao fato de X_{eqm} ser alto apenas no início da secagem, quando são maiores os valores de X . No final da secagem X_{eqm} tende a X_{eq} calculado com as condições do ar na entrada do leito. Portanto dentro das limitações experimentais dos equipamentos usados é válido assumir X_{eq} constante na sistemática de cálculos, objetivando a construção de curvas de secagem.

O efeito combinado da turbulência e do potencial de transferência de massa foi quantificado determinando-se a razão:

$$R = \text{Taxa de secagem (v = v)} / \text{Taxa de secagem (v = 74 cm/s)}$$

As taxas de secagem $d \left[\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} \right] / dt$, foram calculadas medindo-se os coeficientes angulares das tangentes traçadas em pontos das curvas da Figura IV-1. Os resultados são apresentados na Tabela IV-1. Analisando seus valores, verifica-se que a redução de R com a diminuição do ar de secagem é significativa. Como o potencial para transferência de massa varia pouco com velocidades acima de 51 cm/s, pode-se concluir que o aumento da turbulência na convecção externa de massa deve ser o fator mais importante. Quando a umidade residual da cebola, expressa em $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})}$ se aproxima de 0,1, a variação percentual entre os valores de R para as velocidades de 74 e 64 cm/s é de 1%. Isto indica que a partir desta umidade o aumento da velocidade do ar na taxa de secagem não é significativo e a resistência interna à transferência de massa controla completamente o processo.

Não se conhecem correlações generalizadas para o coeficiente de transferência de massa por convecção, durante a secagem em

Tabela IV-1 . Razão R = Taxa de secagem (v = v) / Taxa de secagem (v = 74 cm/s)

$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$ v (cm/s)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	$\frac{v}{74}$	$\left(\frac{v}{74}\right)^{0,58}$
37*	0,49	0,49	0,49	0,48	0,46	0,45	0,40	0,37	0,40	0,42		
37	0,55	0,54	0,56	0,62	0,61	0,64	0,68	0,70	0,62	0,64	0,50	0,67
51	0,76	0,75	0,73	0,77	0,76	0,81	0,82	0,82	0,89	0,95	0,69	0,81
64	0,96	0,91	0,91	0,91	0,87	0,95	0,91	0,96	0,97	0,99	0,86	0,92
74	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

* leito estático

leito vibratório. GUPTA e MUJUMDAR (1980) citam um trabalho específico, no qual se constatou que estes coeficientes são diretamente proporcionais ao número de Reynolds. Em leitos estáticos, por outro lado, eles são proporcionais a $Re^{0,58}$ (SHERWOOD et al, 1975). Nas presentes condições de operação, a razão dos números de Reynolds corresponde ao quociente das velocidades. A Tabela IV-1 também inclui uma coluna com $(v/74)$ e outra com $(v/74)^{0,58}$ e pode-se observar que os valores de R calculados tendem a se enquadrar entre os valores destas duas colunas. Isto é válido sobretudo durante o início da secagem, o que é coerente uma vez que só quando o sólido for muito úmido é que a resistência externa a transferência de massa tem importância.

B . Efeito da temperatura do ar na secagem

Foram realizados ensaios com diferentes temperaturas do ar, procurando um compromisso entre um tempo mínimo de secagem e a conservação de fatores de qualidade especificados para o produto. Utilizou-se anéis de cebola de 5 mm de largura, sendo $X_0 = 7,13$ kg H_2O /kg cebola seca. Operou-se com 30 kg de cebola/m² de suporte do leito, frequência de 18 Hz e amplitude de vibração 5,63 mm. Em cada ensaio a temperatura de entrada do ar no vaso foi mantida em 40°C, 50°C, 60°C ou 70°C e a taxa de ar fixada em 0,63 kg/min. As velocidades do ar na entrada do vaso, segundo os quatro níveis crescentes de temperatura foram, 60,2; 62,1; 64,0 e 65,9 cm/s. As umidades de equilíbrio da cebola com o ar de entrada, também conforme o aumento de temperatura foram: 0,0045; 0,0087; 0,016; 0,032 (sem vibração) e 0,0045; 0,012, 0,025; 0,032 (com vibração). Estes valores foram utilizados no cálculo da umidade residual da cebola.

A Figura IV-3, apresenta as curvas de secagem obtidas, operando em leito estático e vibratório. Observa-se um significativo efeito da temperatura na rapidez de perda de umidade da cebola. A Figura IV-4 mostra as mesmas curvas da Figura IV-3, porém traçadas em escala semi-log.

Um resultado inesperado ocorreu com o conteúdo de umidade da cebola no período final de secagem. Verificou-se um cruzamento das curvas de umidade da cebola em leito estático e vibratório, para um mesmo nível de temperatura. Este ponto comum acontece a umidades mais altas se a temperatura for alta, mas sempre na faixa de 0,01 a 0,02 de umidade residual. A formação de uma casca endurecida "case hardening", devido a evaporação inicial mais rápida no sistema vibrado, poderia explicar este fenômeno. A diferença na taxa de secagem inicial entretanto não é tão grande que justifique uma maior resistência à difusão. O mais provável é que as deformações e enrolamentos que ocorrem com o produto ao final da secagem empregando vibração, prejudiquem a migração de água à superfície, além de diminuir a área externa livre.

Foram calculadas as condições do ar na saída do leito, no início da operação, para verificar se era atingida a saturação. Para isto as taxas de secagem no tempo zero foram determinadas por tangentes às curvas de X (umidade residual da cebola), em função do tempo de secagem. Balanços de massa fornecerem as umidades absolutas do ar. Em cada caso, a temperatura de saída do ar foi estimada utilizando o diagrama psicrométrico de São Paulo (SILVA, 1966), supondo ocorrência de operação adiabática. Com as Equações II-10 e II-11, foram determinadas as seguintes porcentagens de saturação do ar, $\phi = 92\%$ (40°C); $\phi = 58\%$ (50°C); $\phi = 60\%$ (60°C); $\phi = 72\%$ (70°C).

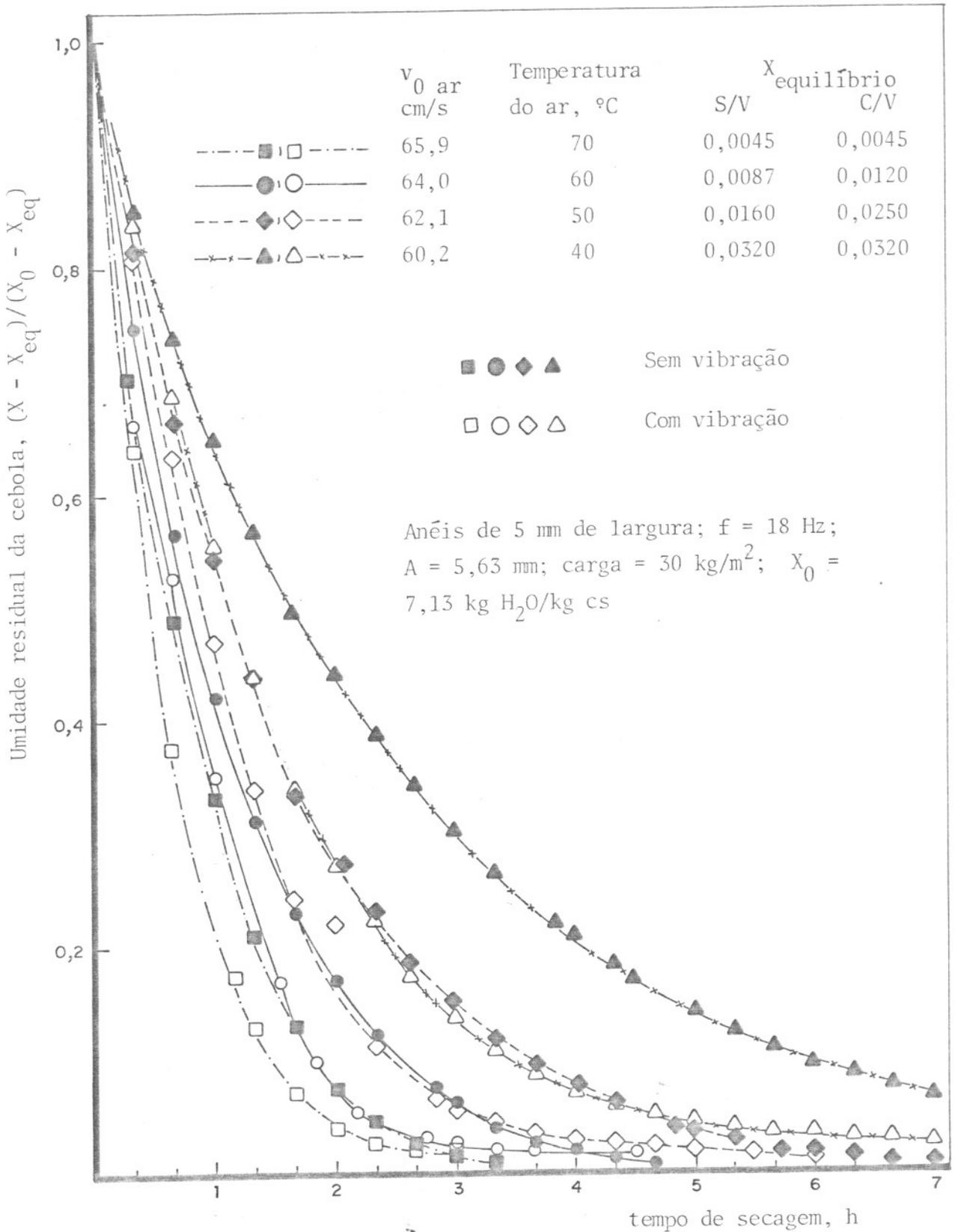


Figura IV-3 . Efeito da temperatura do ar na secagem de anéis de cebola

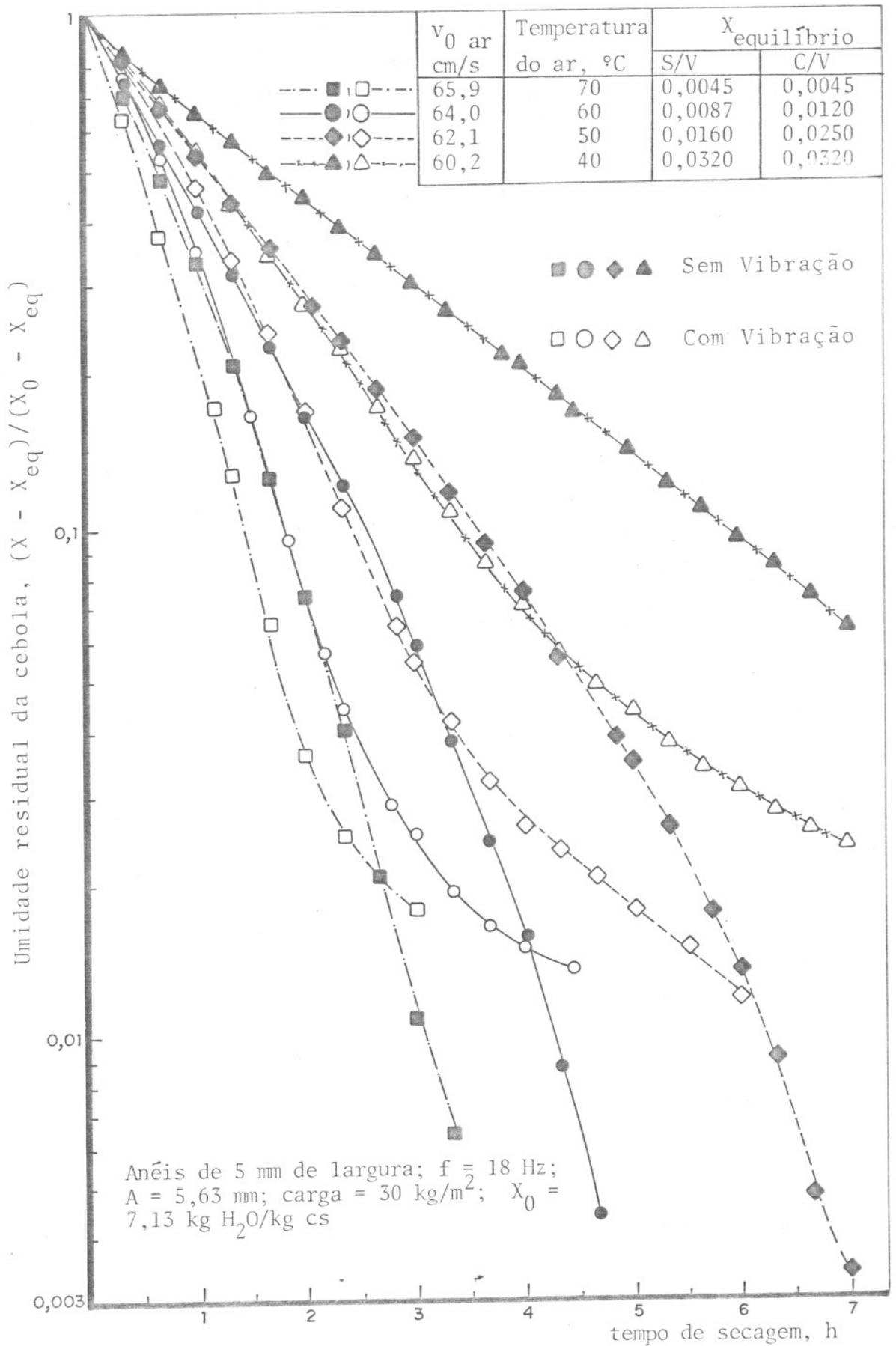


Figura IV-4 . Efeito da temperatura do ar na secagem de anéis de cebola (escala semi-logarítmica)

O ar de saída apresentou maiores saturações para as temperaturas extremas. Para o ensaio de 40°C, isto é explicado pela menor quantidade de água capaz de satura-lo. Neste ensaio a temperatura do ar na saída do leito (estimada para o tempo zero) foi de 25,4°C. Para temperatura de 70°C, o aumento da pressão de vapor de água na saída do leito (pela maior quantidade de água evaporada), foi mais significativo que o valor atingido pela pressão de vapor da água na saturação. Neste caso a temperatura do ar após o leito de cebola, no tempo zero, era 34°C. Os resultados equivalentes para os outros ensaios em função da temperatura do ar de entrada foram, 33°C (50°C) e 35°C (60°C). Nestes últimos casos, as saturações de saída situaram-se em posições intermediárias.

Foram traçadas tangentes às curvas da Figura IV-3 e determinadas as taxas de secagem. O efeito da temperatura na eliminação de umidade foi verificado determinando-se a razão:

$$R = \text{Taxa de secagem (T = T)} / \text{Taxa de secagem (T = 70°C)}$$

Os resultados são apresentados na Tabela IV-2 e IV-3, para leito vibro-fluidizado e estático, respectivamente.

Fazendo uma comparação entre os valores das 2 tabelas, verifica-se que para maiores umidades residuais da cebola (na faixa de 1 até aproximadamente 0,7), a razão "R" apresenta-se maior para secagem em leito estático, do que em leito vibratório. Isto indica que neste intervalo de umidades, as taxas de secagem na temperatura "T" se aproximam mais das taxas de secagem na temperatura de 70°C (na operação em leito estático), que o equivalente em leito vibratório. Após o intervalo citado, ocorre uma inversão da razão "R" para operação em leito estático e vibro-fluidizado.

Tabela IV-2 . Razão, $R = \text{Taxa de secagem } (T = T) / \text{Taxa de secagem } (T = 70^\circ\text{C})$, operação em leito vibro-fluidizado.

$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$ T_0 ($^\circ\text{C}$)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
40	0,38	0,40	0,43	0,46	0,47	0,44	0,50	0,43	0,41	0,37
50	0,50	0,45	0,53	0,57	0,62	0,64	0,72	0,64	0,66	0,65
60	0,61	0,63	0,70	0,76	0,78	0,84	0,92	0,89	0,83	0,90
70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela IV-3 . Razão, R = Taxa de secagem (T = T) / Taxa de secagem (T = 70°C), operação em leite estático

$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$ T_0 °C	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
40	0,45	0,45	0,42	0,38	0,36	0,34	0,34	0,29	0,26	-
50	0,61	0,60	0,57	0,58	0,57	0,54	0,52	0,52	0,46	0,40
60	0,81	0,86	0,81	0,79	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,66
70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Foi realizado um estudo buscando uma função matemática que governe a variação de "R" com a temperatura. Para isto as médias aritméticas de "R" foram graficadas em escala semi-logaritma, em função do inverso da temperatura absoluta do ar de secagem. Na realidade pesquisou-se uma função exponencial da forma da equação de Arrhenius:

$$\ln R = - E/RT + \ln A \quad (\text{IV-1})$$

Os resultados finais estão na Figura IV-5. Verifica-se que duas

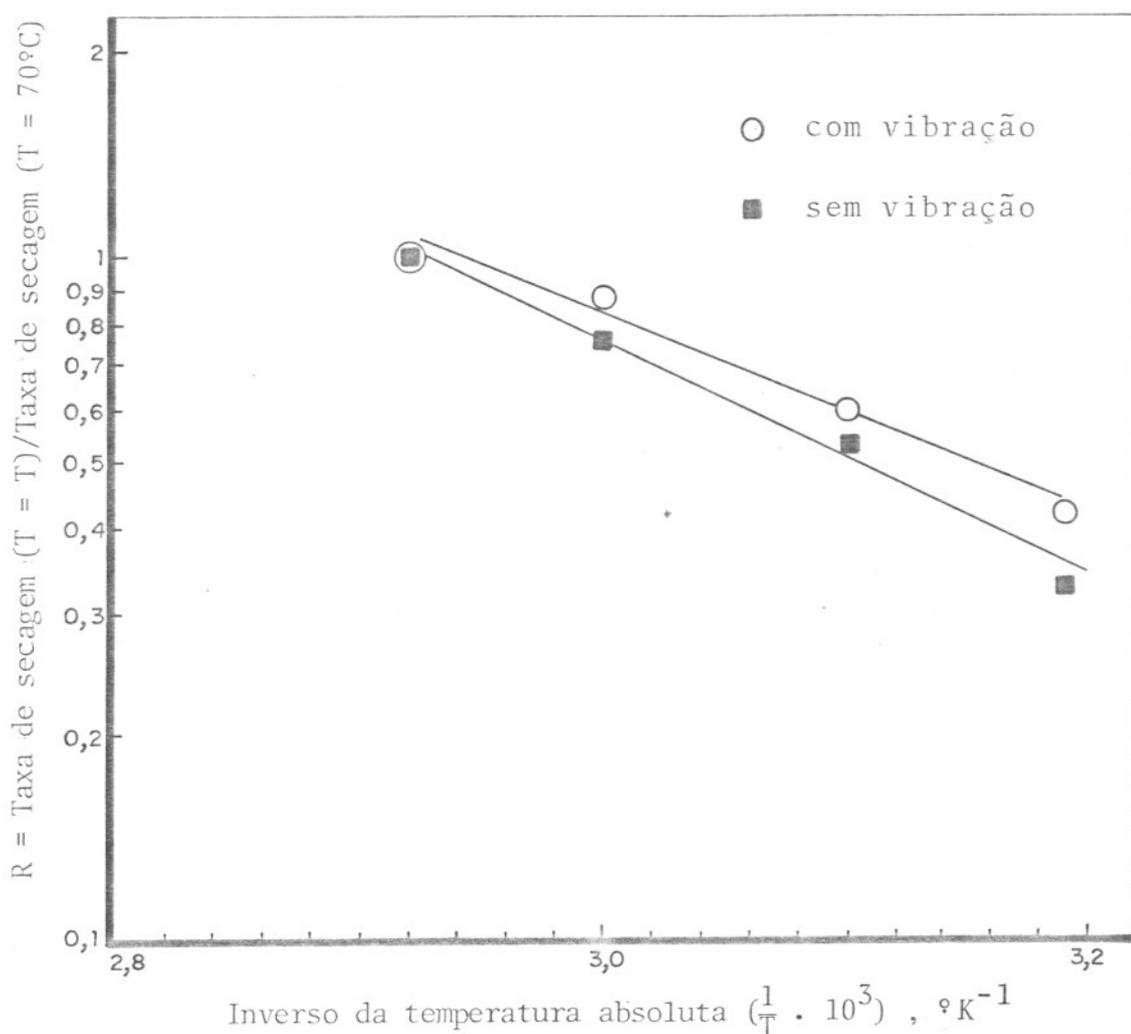


Figura IV-5 . Efeito da temperatura na razão da taxa de secagem

retas se ajustaram razoavelmente bem aos valores experimentais (para operação em leito estático e vibro-fluidizado). Isto sugere uma técnica de cálculo da energia de ativação requerida na desorção de umidade de fatias de cebola, utilizando os coeficientes angulares das retas. Note-se que a inclinação da reta proveniente de operação com vibração é menor do que a resultante de leito estático. Isto indica que, em condições vibracionais é requerida uma menor energia de ativação para desencadear o processo de secagem, comparado com a operação em leito estático e mantidas constantes as outras variáveis.

C . Efeito da carga de cebola na secagem

Conforme já relatado em III-A, ocorreu considerável circulação dos anéis no interior do vaso de secagem, ao operar com cargas até 30 kg de cebola/m² de suporte. Para carga inicial de 60 kg/m², observou-se que apenas cerca da metade superior dos anéis tendia a se movimentar e mesmo esta parte não chegava a realizar efetivamente o movimento circulatório completo, do tipo indicado na Figura II -1.

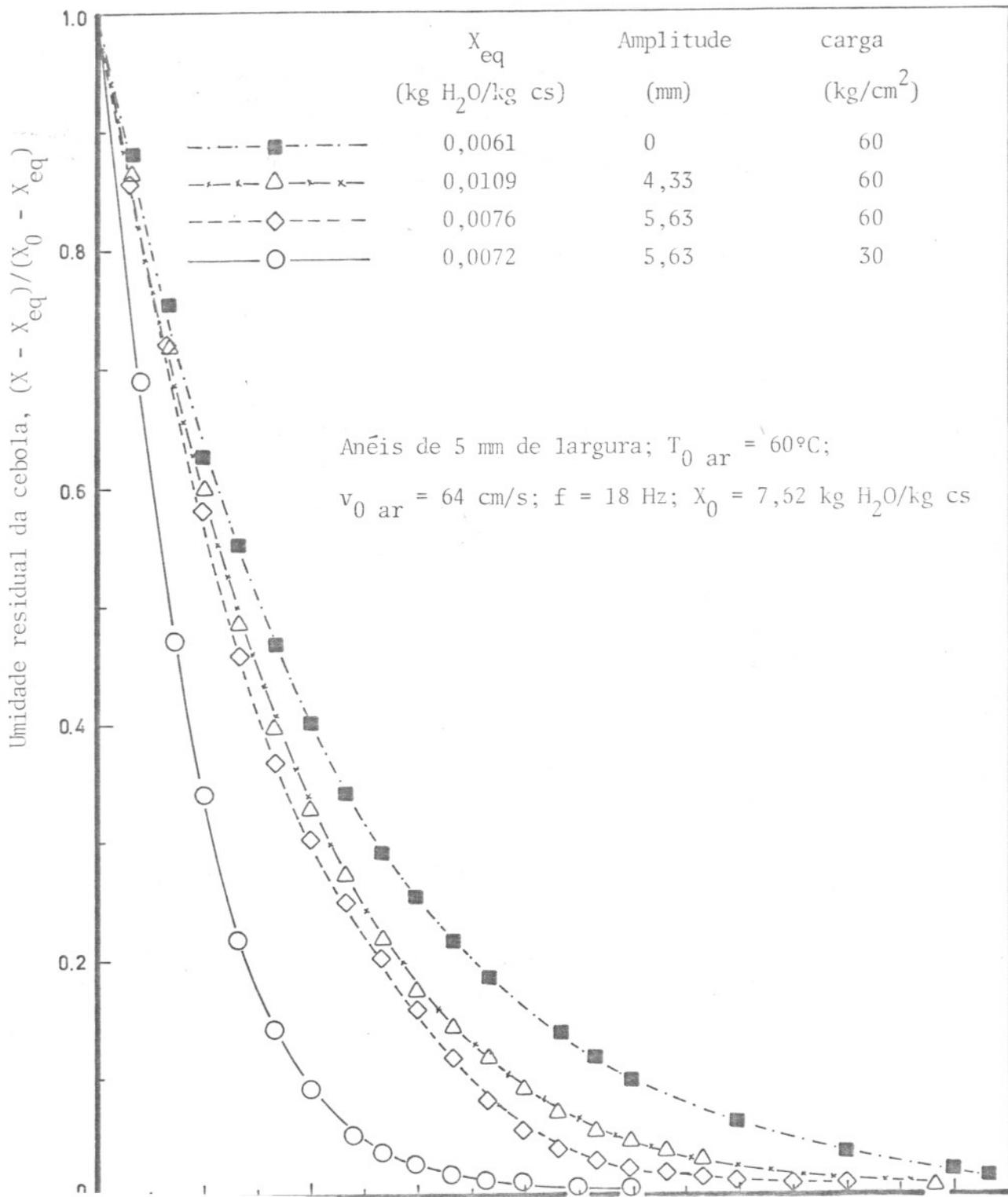
Para pesquisar o efeito do acréscimo da massa de cebola na velocidade de secagem, foram efetuados experimentos com cargas de 30 kg e 60 kg de cebola/m². Os parâmetros vibracionais utilizados foram, amplitude 4,33 e 5,63 mm, frequência 18 Hz. A cebola utilizada nos ensaios em forma de anéis de 5 mm de largura, apresentou X_0 igual a 7,62 kg H₂O/kg cs. A velocidade e a temperatura do ar de secagem foram controladas em 64 cm/s e 60°C.

Nas cargas de 60 kg de cebola/m² (nos dois níveis de vibração), observou-se condensação de água na parte superior da parede

do vaso de plexiglass, durante cerca dos 50 primeiros minutos de operação. Isto ocorreu por estar o ar externo a baixa temperatura cerca de 20°C durante os ensaios e também pela geometria do vaso de secagem que favorece a formação de uma região interna de ar estagnado na sua parte superior. Outro fator importante é a ocorrência de troca de calor entre o ar quente e a massa de cebola que encontrava-se à temperatura ambiente no início da operação. Ao término do processo, em torno de 50% dos anéis permaneceram aglomerados, formando grupamentos envolvendo várias partículas. As fatias que permaneceram desagregadas ao final da secagem, apresentaram a forma de anéis deformados. A distribuição do conteúdo de umidade da cebola no leito mostrou-se bem heterogênea, devido a ausência de circulação de grande parte das partículas e pela formação de aglomerados.

As curvas da Figura IV-6, exibem o efeito da carga de anéis de cebola durante a secagem. Para fins de comparação é apresentado o resultado de um ensaio com carga de 30 kg/m². A duplicação da carga do leito, mantendo constantes as outras condições de operação, fez com que a umidade das fatias diminuisse mais lentamente, com ligeira tendência as condições de operação em leito estático, principalmente durante as primeiras horas de secagem. As taxas iniciais de perda de umidade e a saturação do ar de saída, foram calculados conforme relatado em IV-B e determinadas as seguintes porcentagens de saturação do ar: 50% (■); 54% (Δ); 57% (◇); 48% (○). Operando com cargas de 60 kg/m², a massa absoluta de água eliminada foi maior do que com carga de 30 kg/m², mas não compensou a maior massa inicial de cebola.

Através de tangentes às curvas da Figura IV-6, que foram ampliadas para melhorar a precisão dos resultados, obteve-se valo



res da taxa de secagem que foram locadas em função da umidade residual da cebola na Figura IV-7. A taxa de secagem para cargas de 60 kg/m^2 , aumenta com o acréscimo da intensidade vibracional. Na mesma Figura IV-7 foi traçada a curva do ensaio realizado a 37 cm/s (∇) com carga inicial de 30 kg/m^2 , correspondente a Figura IV-1 (amplitude de $4,33 \text{ mm}$), sendo mantidas constantes as outras variáveis. Em termos da relação (vazão de ar/carga), a secagem com carga de 60 kg/m^2 e velocidade de 64 cm/s , deve ser equivalente a operação com carga de 30 kg/m^2 e velocidade de 32 cm/s . Este último caso entretanto é prejudicado pela velocidade mais baixa e portanto maior resistência externa a transferência de massa. No entanto, observa-se que a taxa de secagem para leitos com carga de 30 kg/m^2 e velocidade de 37 cm/s é superior a do leito de 60 kg/m^2 com velocidade de 64 cm/s . Isto apesar de no primeiro caso a intensidade vibracional ter sido menos intensa. Esta diferença pode ser atribuída ao efeito mais pronunciado da vibração sobre a carga menor.

Cargas elevadas na formação do leito, resultam em um produto de qualidade indesejável e provavelmente apresentando características inadequadas à desidratação final em silos, devido a aglomeração e má distribuição de umidade. Não se procurou verificar se a carga de 30 kg/m^2 corresponde ao valor ótimo, uma vez que ela já tinha sido fixada em experiências anteriores e corresponde a um limite superior prático usado na indústria (GOWDA, 1976).

D . Efeito das dimensões das partículas de cebola na secagem

Para verificar a influência das dimensões das partículas de cebola na secagem, foram realizados ensaios utilizando anéis in

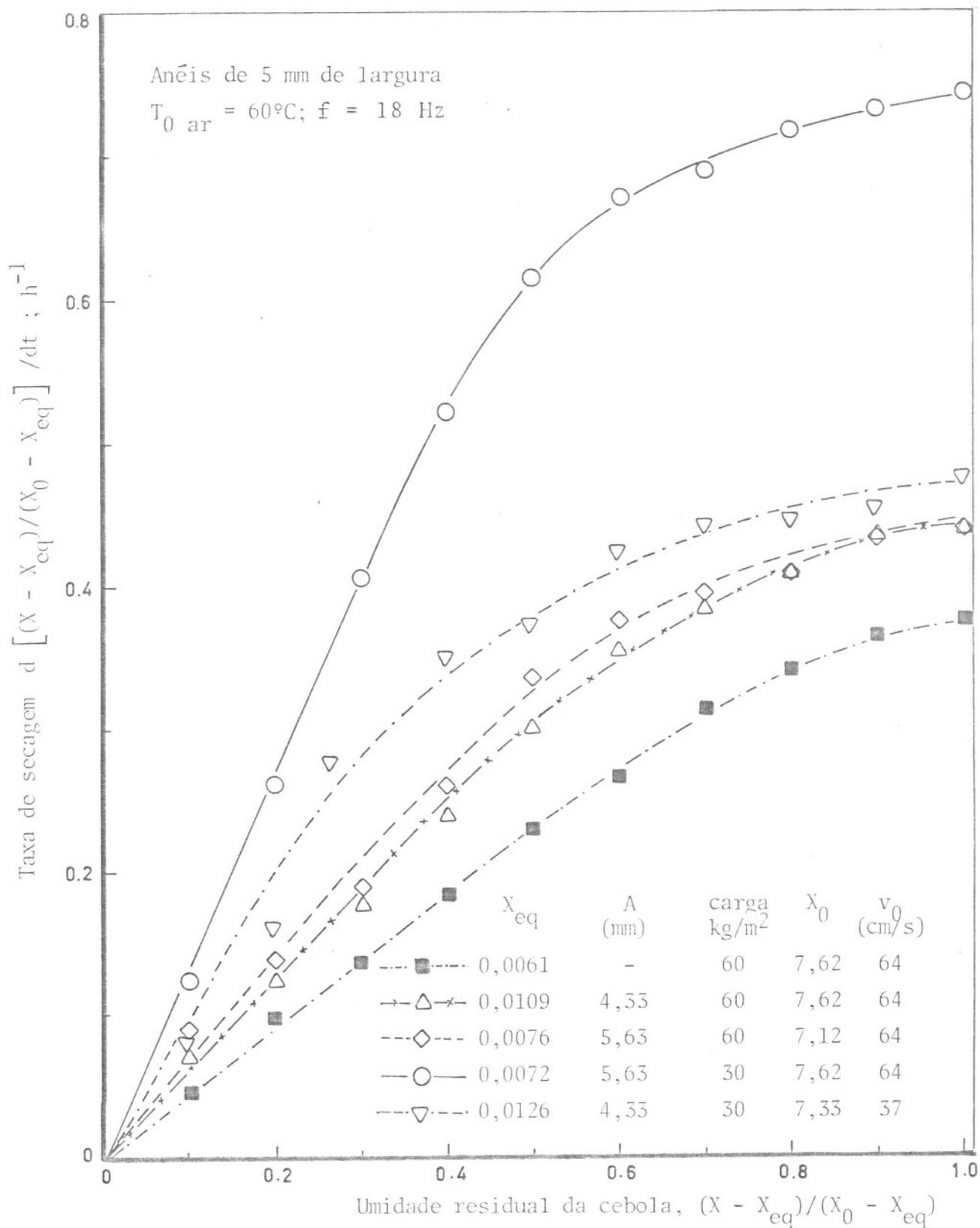


Figura IV-7 . Efeito da carga da cebola na taxa de secagem

teiros com largura variável e anéis de 5 mm de largura seccionados em fatias de diferentes comprimentos, operando em leito estático e vibro-fluidizado. Em todos os casos operou-se com ar à temperatura de 60°C e velocidade de 64 cm/s, com cargas de 30 kg/m². Na operação em leito vibro-fluidizado a intensidade vibracional foi mantida constante com frequência de 18 Hz e amplitude de 5,63 mm.

D . 1 . Anéis com larguras diferentes

No primeiro caso foram utilizados anéis com larguras e 1, 3, 5, 8 e 10 mm em cada ensaio. A umidade inicial da cebola utilizada nos testes foi de 7,33 kg H₂O/kg cs, para larguras de anéis de 1 a 5 mm e de 7,00 kg H₂O/kg cs, para larguras de 8 e 10 mm.

Nas operações em condições estáticas observou-se que os anéis de 1 a 3 mm de largura ficavam aderidos às paredes do vaso de secagem e principalmente ao suporte do leito. Este comportamento se traduz em perdas de produto e dificuldades na distribuição do ar nos equipamentos. O efeito foi mais pronunciado com anéis de 1 mm. A altura final do leito de cebola desidratada foi maior para anéis de largura maiores.

Em condições vibratórias foram efetuadas importantes observações referentes a dinâmica do leito de cebola. Com anéis de cebola de 1 mm de largura ocorreu intensa aderência às paredes, no início da secagem. O produto final apresentou-se em forma de um único aglomerado de partículas de cebola, não ocorrendo a desagregação após a etapa de aglomeração. A distribuição de umidade no leito se mostrou muito heterogênea. O mesmo efeito ocorreu com anéis de 3 mm, mas com menor intensidade, existindo um menor núme

ro de partículas aderidas às paredes do vaso. Ao final da secagem várias fatias de cebola apresentam-se deformadas e outras formando pequenos aglomerados envolvendo várias unidades. Alguns dos ensaios nos quais utilizou-se anéis de 5 mm de largura, resultaram em aglomerados que permaneceram unidos até o final da secagem, mas na maioria dos casos ocorreu desagregação total. Provavelmente o efeito de aglomeração final esteja relacionado com a matéria prima e com o conteúdo inicial de umidade. Na secagem de anéis de 8 e 10 mm de largura o tempo de aglomeração, compactação e desagregação das partículas foi reduzido em relação a operação com fatias de 5 mm e as unidades apresentaram-se totalmente separadas ao final da secagem.

As curvas das Figuras IV-8 e IV-9, mostram o efeito da largura dos anéis na secagem, em leito estático e vibro-fluidizado, respectivamente. As umidades de equilíbrio da cebola com o ar de secagem nas condições de entrada do leito foram, para leito estático: 0,010 kg H₂O/kg cs (■); 0,0065 (▲); 0,0061 (●); 0,0060 (◆); 0,0117 (▼) e para leito vibro-fluidizado: 0,0112 kg H₂O/kg cs (□); 0,0097 (△); 0,0101 (○); 0,0089 (◇); 0,0117 (▽). Na Tabela IV-2, apresenta-se a razão:

$$R = \text{Taxa de secagem (L = L)} / \text{Taxa de secagem (L = 5 mm)}$$

As taxas de secagem foram calculadas por tangentes traçadas em pontos das curvas da Figura IV-8.

Uma análise da Figura IV-8 e da Tabela IV-2 indica que, com exceção das partículas de 1 mm, o aumento da largura dos anéis atua de modo coerente, isto é, de reduzir a velocidade de secagem. O maior afastamento das curvas de 8 e 10 mm das demais, provavel-

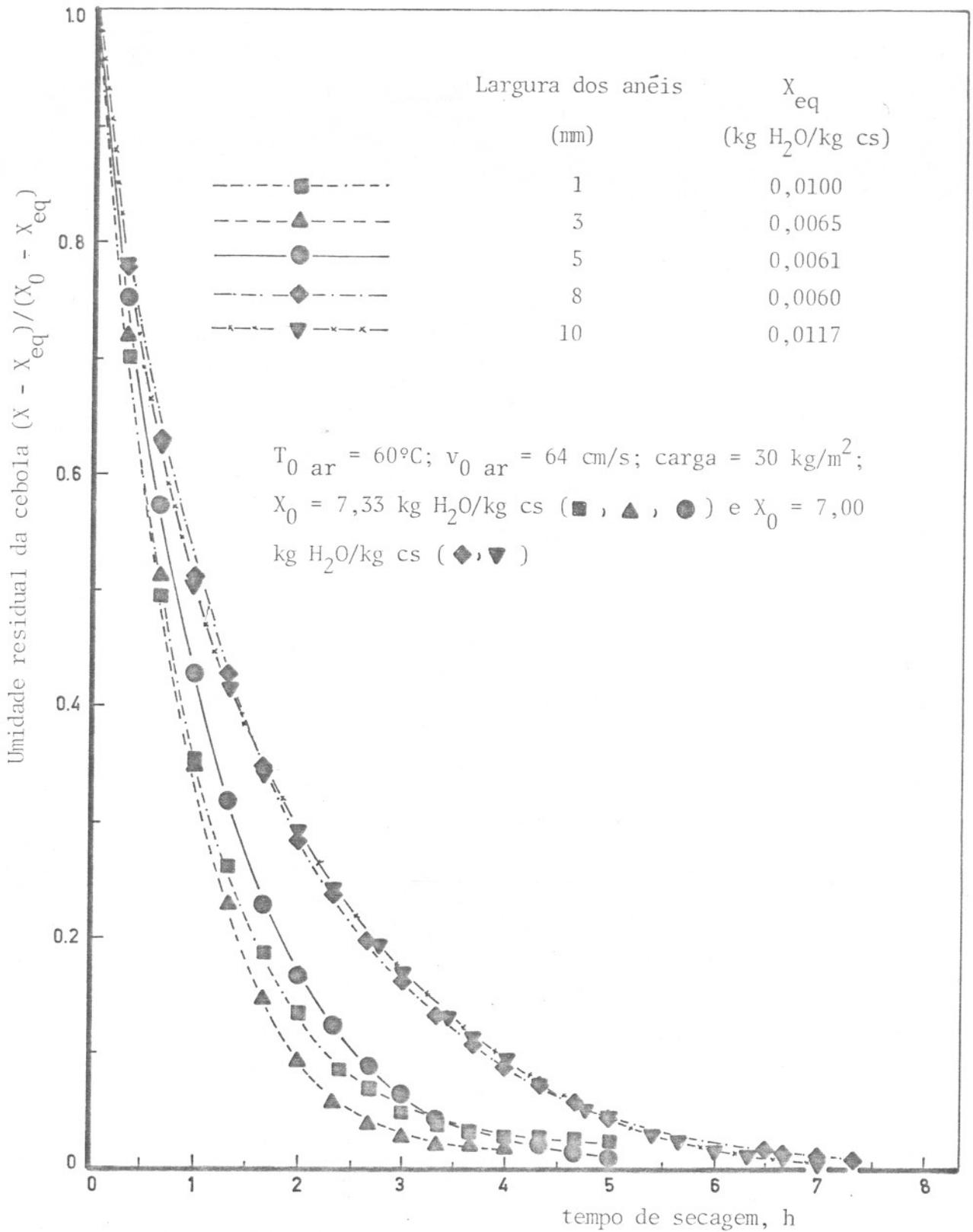


Figura IV-8 . Efeito da largura de anéis de cebola na secagem em leito estático

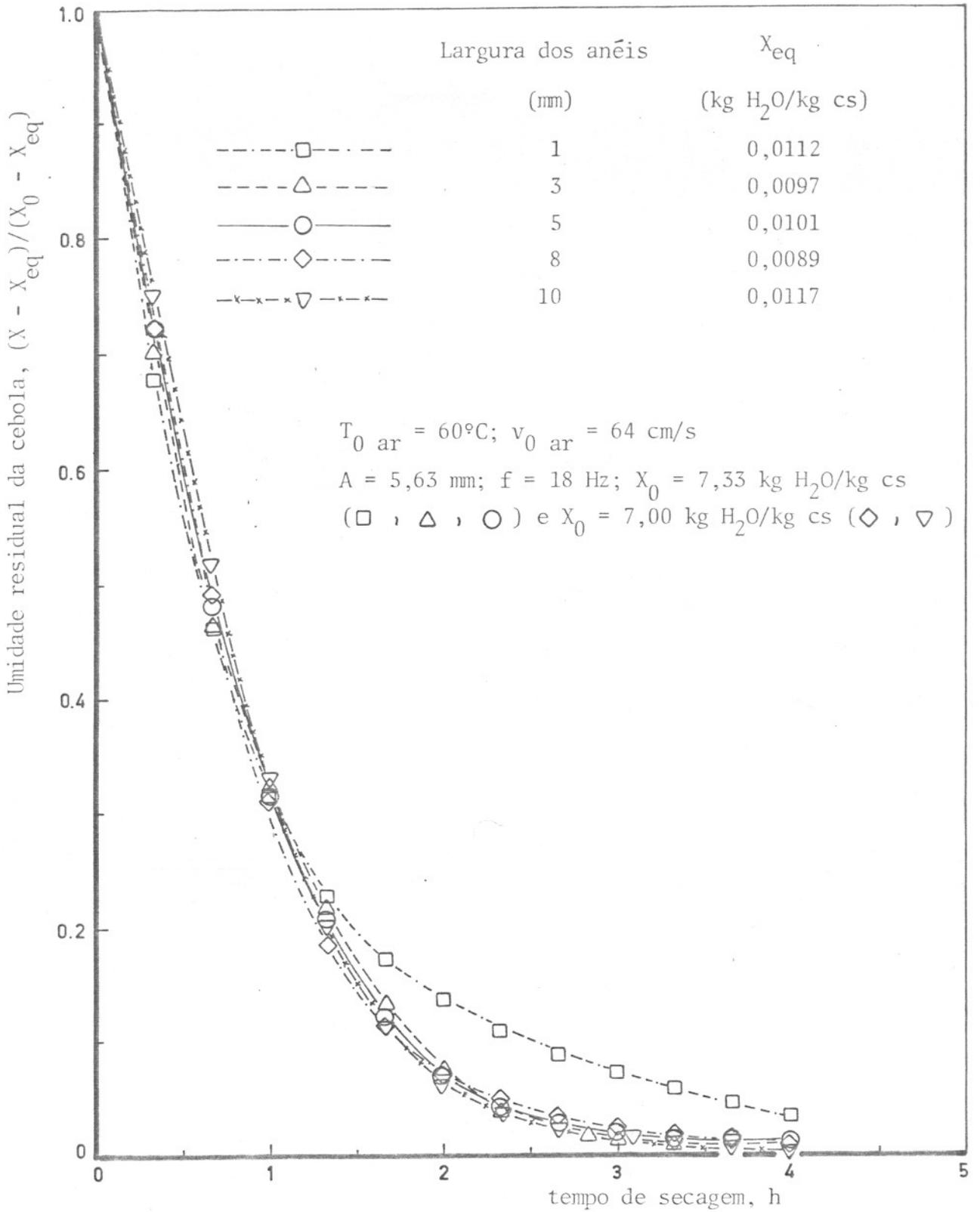


Figura IV-9 . Efeito da largura dos anéis de cebola na secagem em leito vibratório

Tabela IV-2 . Razão "R", entre a taxa de secagem para anéis de largura L e a taxa de secagem de anéis de 5 mm, em função da umidade residual da cebola (para leitões estáticos).

Largura dos anéis (mm)	$\frac{L = 5}{L = L}$	$\left(\frac{L = 5}{L = L}\right)^2$	Umidade residual da cebola									
			1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
1	5,0	25	1,27	1,28	1,25	1,27	1,24	1,10	1,09	0,97	1,17	0,96
3	1,7	2,8	1,26	1,25	1,21	1,25	1,21	1,26	1,28	1,38	1,57	1,51
5	1,0	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,6	0,39	0,82	0,87	0,80	0,81	0,76	0,66	0,64	0,60	0,64	0,59
10	0,5	0,25	0,92	0,95	0,88	0,80	0,83	0,69	0,65	0,69	0,68	0,57

mente é devido a diferença na matéria prima. Se o mecanismo de secagem for difusional sob condições externas constantes e assumindo que a saída de água ocorra somente pelas faces cortadas, pode-se esperar que o efeito depende inversamente do quadrado da largura do anel (forma integrada da 2ª lei de Fick). Para servir de comparação a Tabela IV-2 também contém uma coluna de $(5 \text{ mm/L})^2$. Uma análise indica imediatamente que parece não existir nenhuma relação entre os valores desta coluna e as demais, nem mesmo ao final da secagem, quando o processo de migração de água deve ser difusional. Os valores experimentais de R são mais próximos da unidade e com exceção das partículas de 1 mm, eles tendem a simples razão entre as dimensões. Isto poderia significar que a resistência externa controla completamente o processo ou que a migração interna ocorra por capilaridade. Ambos mecanismos entretanto não devem ser tão importantes no presente caso, baseado em evidências experimentais com outros produtos vegetais (BRUIN & LUYBEN, 1980). O mais provável é que as grandes contrações que ocorrem devido a perda de água, tenham amortecido o efeito da dimensão característica.

Com anéis de 1 mm, provavelmente a aderência do material no vaso e formação de uma massa compacta, dificultou a percolação do ar através do leito, com prejuízo na taxa de secagem. Os ensaios que alcançaram menor umidade residual ao final da secagem (para um mesmo tempo de operação), foram aqueles nos quais se utilizou anéis de 3 e 5 mm.

As curvas de Figura IV-9 indicam que a vibração atuou no sentido de eliminar a influência da largura dos anéis de cebola na taxa de perda de umidade. As curvas se confundem, exceto quando a largura dos anéis foi de 1 mm, que seca mais lentamente em con-

sequência da intensa aglomeração e aderência destas partículas. Este resultado é surpreendente e desejável, uma vez que partículas maiores retêm maior potencial de aromas. Observa-se entretanto que nos primeiros 40 minutos a ordem das curvas está na sequência esperada. A diferença é pequena, provavelmente porque a limitação está na capacidade de evaporação do ar que tende a sair quase saturado. A partir de 1 hora de secagem os valores se superpõem e as diferenças estão dentro das limitações de erro experimental. Isto pode ser devido ao enrugamento e torções que já começam a ocorrer, anulando o efeito da menor dimensão e também do endurecimento superficial (case hardening). O efeito da vibração sobre a velocidade de secagem é mais acentuado nas partículas mais largas.

D . 2 . Anéis seccionados

Nos ensaios com anéis de 5 mm de largura, seccionados, utilizou-se quartos e segmentos cortadas com comprimento de 1 e 2 cm, além de anéis inteiros para fins de comparação dos resultados. A umidade inicial da cebola utilizada foi de 7,20 kg H₂O/kg cs para fatias e 7,33 kg H₂O/kg cs para os anéis inteiros.

Ao operar em condição estática observou-se inúmeras fatias aderidas ao vaso no início da secagem e muitos delas permaneceram aderidas até o final da operação. Quanto menor o comprimento das fatias maior foi a quantidade aderida no vaso.

Com relação a dinâmica do leito vibro-fluidizado notou-se intenso movimento das fatias no interior do vaso. A aderência nas paredes foi mais significativa com partículas de 1 cm e menos intensas com partículas de 2 cm. Com quartos de anéis praticamente não ocorreu aderência e todo produto apresentou-se desagregado ao

final da secagem. Também trabalhou-se com metades de anéis, que a presentou um comportamento semelhante ao dos quartos de anéis. Os resultados da perda de umidade obtidos estão apresentados na Figura IV-10 e em escala logaritma na Figura IV-11. As umidades de equilíbrio da cebola com o ar de secagem nas condições de entrada do leito foram, para leito estático: 0,0100 (\blacktriangle); 0,0120 (\blacklozenge) ; 0,0123 (\blacksquare); 0,0061 (\bullet) e para leito vibro-fluidizado: 0,0114 (\triangle); 0,0124 (\diamond); 0,0120 (\square); 0,0101 (\circ). Observa-se uma nítida superioridade da secagem com vibração sobre a estática. Além disso as curvas estão em uma sequência coerente, isto é, os pedaços menores são os que secam mais rapidamente. No leito estático os quartos de anéis secam com velocidade ligeiramente superior aos pedaços de 2 cm. A ordem é inversa nos leitos vibrados. Provavelmente isto ocorre porque a vibração favorece modificações de forma nos quartos maiores, enrolando-os e dificultando a saída de umidade. Pode-se observar ainda, sobretudo na Figura IV-11, que a tendência ao cruzamento das curvas com e sem agitação é muito pequena e se ocorresse, isto se daria a umidades inferiores a curva de 60°C da Figura IV-4. É possível que este fato seja consequência do corte dos anéis, mais é bem mais provável que ele reflita uma condição morfológica ligeiramente diferente da matéria prima.

O seccionamento dos anéis, ao contrário do caso anterior, não influi no comprimento característico da difusão. Desta maneira é lícito esperar que a taxa de secagem vá ser influenciada apenas pela nova área criada.

Nas Tabelas IV-3 e IV-4 é apresentada a razão (sem e com vibração, respectivamente):

$$R = \frac{\text{Taxa de secagem de fatias (ou anéis)}}{\text{Taxa de secagem de anéis com } L = 5 \text{ mm}}$$

As tabelas contêm ainda uma coluna com a relação entre uma estimativa da área total de corte dos pedaços de anéis sobre a estimativa da área de corte correspondente a anéis inteiros de 5 mm de largura. Pelas tabelas observa-se que existe uma certa correspondência entre a razão das áreas e os valores de R, sobretudo no fim da secagem, enquanto no início as razões das taxas de secagem são mais próximas da unidade em decorrência do ar tender à saturação.

Por outro lado, comparando-se as 2 tabelas entre si, observa-se que a vibração tende também a atenuar o efeito do seccionamento dos anéis, pois os valores de R são mais próximos da unidade na Tabela IV-4 do que na Tabela IV-3.

As tabelas apresentam também densidades aparentes dos produtos obtidos. Em leite vibro-fluidizado a cebola desidratada apresenta maior densidade aparente (principalmente com anéis cortados), o que se traduz em menor volume por unidade de massa, reduzindo custos de embalagem.

E . Otimização da operação de secagem

Até o momento, os resultados apresentados cobrem experiências nas quais as condições de secagem permaneceram constantes durante todo o ensaio. Na presente seção serão introduzidos ensaios nos quais se tentou otimizar a operação pela variação da temperatura ou velocidade do ar durante o processo de secagem, visando obter anéis de cebola desidratados de boa qualidade em um tempo

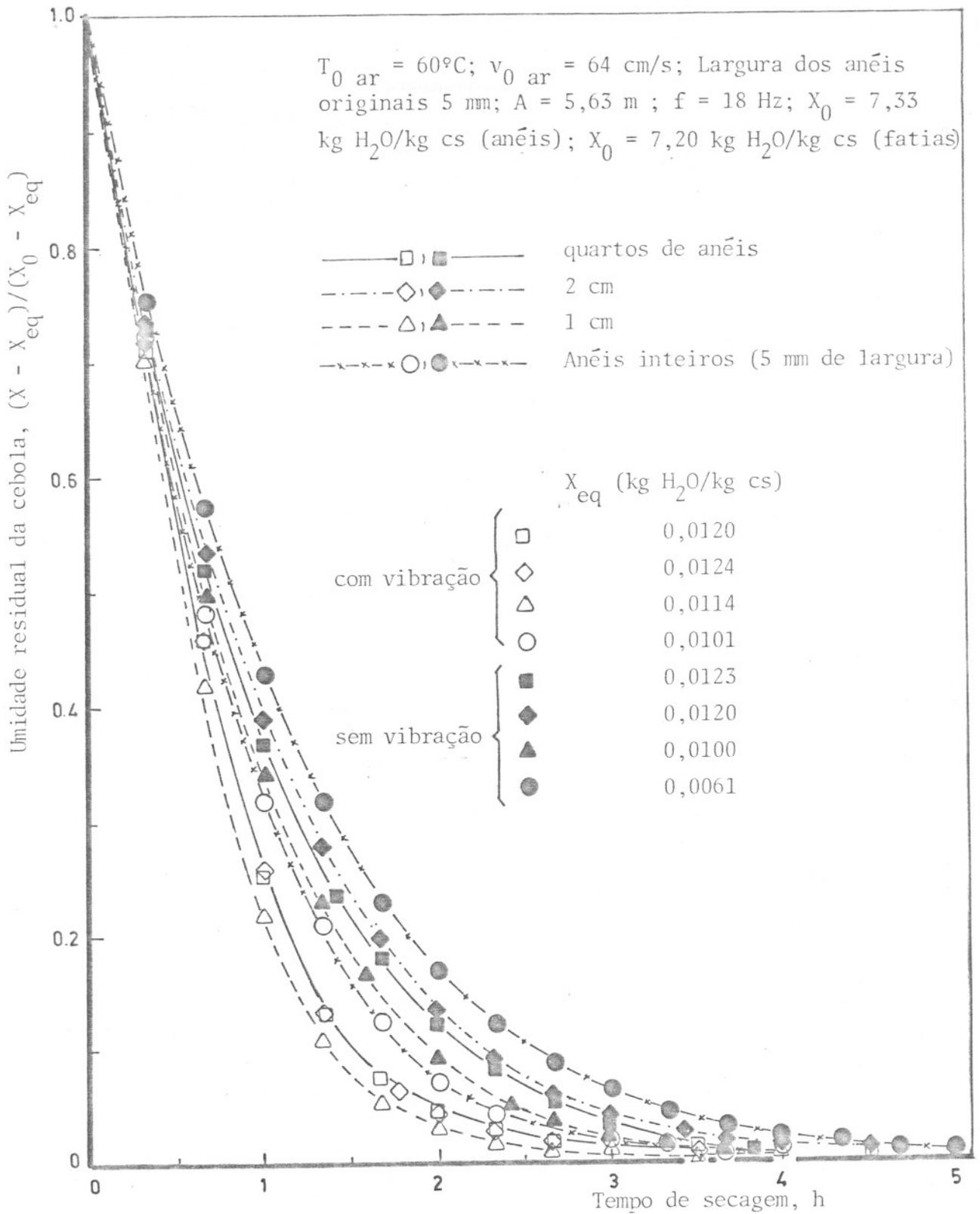


Figura IV-10 . Efeito do tamanho das fatias de cebola na secagem

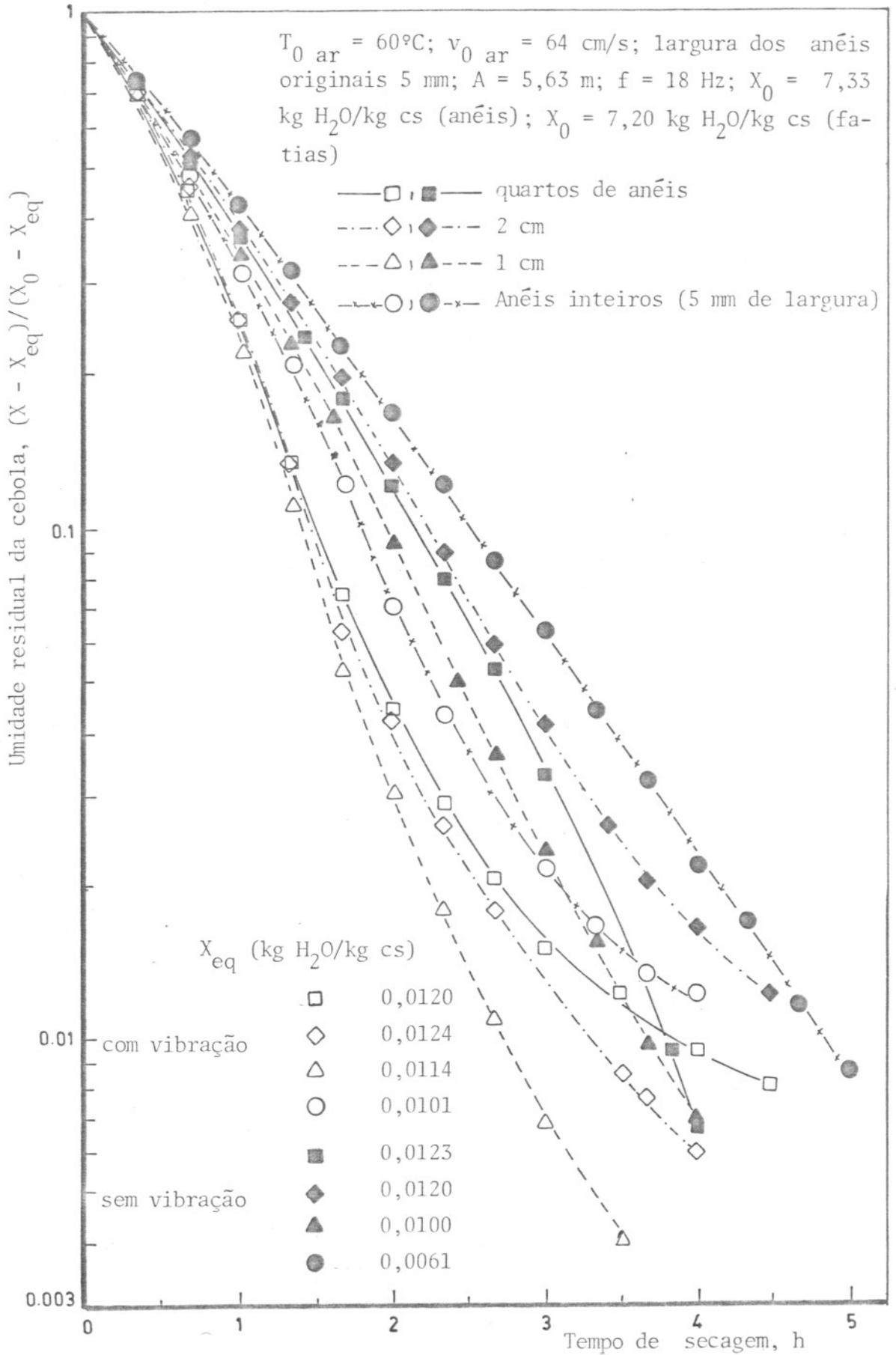


Figura IV-11 . Efeito do tamanho das fatias de cebola na secagem (escala semi-logarítmica)

Tabela IV-3 . Razão, R = Taxa de secagem de fatias (ou anéis)/Taxa de secagem de anéis de 5 mm de largura (sem vibração)

Fatias de cebola	r	densidade aparente do produto desidratado (g cebola/cm ³)	Umidade residual da cebola										
			1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	
Anéis	1,00	0,064	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Quartos de anéis	1,27	0,140	1,11	1,15	1,13	1,21	1,20	1,15	1,24	1,12	1,26	1,22	
2 cm	1,25	0,190	1,12	1,16	1,13	1,14	1,17	1,04	1,08	1,09	1,14	1,13	
1 cm	1,50	0,190	1,20	1,27	1,22	1,32	1,29	1,20	1,28	1,25	1,40	1,40	

$$r = \frac{\text{Área lateral e transversal de fatias (devido ao corte)}}{\text{Área lateral dos anéis}}$$

Área lateral do anel de 5 mm de largura, com espessura média de 2 mm e diâmetro médio 2,4 cm = 3,02 cm²

$$\text{Quarto de anel} = 3,02 + 4 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 3,82 \text{ cm}^2$$

$$\text{Fatias de 2 cm} = 3,02 + \frac{7,54}{2} \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 3,77 \text{ cm}^2$$

$$\text{Fatias de 1 cm} = 3,02 + 7,54 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 4,53 \text{ cm}^2$$

Tabela IV-4 . Razão, R = Taxa de secagem de fatias (ou anéis)/Taxa de secagem de anéis de 5 mm de largura (com vibração)

Fatias de cebola	Vibração amplitude, mm (Frequência, Hz)	r	Densidade aparente do produto desidratado (g cebola/cm ³)	Umidade residual da cebola									
				1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Anéis	0 (0)	1,00	0,064	0,88	0,84	0,79	0,73	0,72	0,72	0,70	0,77	0,57	0,58
Anéis	5,63 (18)	1,00	0,220	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Quartos de anéis	5,63 (18)	1,27	0,650	1,06	1,05	1,02	1,03	1,07	1,10	1,23	1,48	1,22	1,21
2 cm	5,63 (18)	1,25	0,640	1,06	1,05	1,02	1,03	1,07	1,10	1,23	1,48	1,22	1,21
1 cm	5,63 (18)	1,50	0,530	1,07	1,10	1,07	1,13	1,18	1,27	1,39	1,45	1,29	1,12

$$r = \frac{\text{Área lateral e transversal de fatias (devido ao corte)}}{\text{Área lateral dos anéis}}$$

Área lateral do anel de 5 mm de largura, com espessura média de 2 mm e diâmetro médio 2,4 cm = 3,02 cm²

$$\text{Quarto de anel} = 3,02 + 4 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 3,82 \text{ cm}^2$$

$$\text{Fatias de 2 cm} = 3,02 + \frac{7,54}{2} \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 3,77 \text{ cm}^2$$

$$\text{Fatias de 1 cm} = 3,02 + 7,54 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 4,53 \text{ cm}^2$$

minímo de secagem e com um consumo reduzido de energia. Foi evitada a operação prolongada em temperatura acima de 60°C por razões de exigência de qualidade do produto, conforme justificado no Capítulo V.

Em todos os testes a carga de cebola inicial no leito foi mantida em 30 kg/m², com anéis de 5 mm de largura e as condições vibratórias em 18 Hz e 5,63 mm. As umidades residuais da cebola em função do tempo de secagem estão representadas na Figura IV-12 e as taxas de secagem correspondentes na Figura IV-13. As umidades de equilíbrio da cebola com o ar de secagem nas condições de entrada do leito foram: 0,0101 (○); 0,0100 (□); 0,0117 (◇) e 0,0102 (△).

Dos ensaios realizados, a menor umidade residual para iguais tempos de secagem, foi alcançada operando nos primeiros 30 minutos com a temperatura do ar igual a 70°C e então reduzindo-a para 60°C, mantendo a taxa de massa de ar constante durante toda a operação (0,63 kg/min), correspondendo a velocidades efetivas do ar na entrada do leito de 64 cm/s (60°C) e 65,9 cm/s (70°C). Com cerca de 3 horas e 5 minutos de secagem a umidade residual atingida pela cebola foi cerca de 12% (b.u). Comparando o resultado com o da operação à temperatura de 60°C (durante toda a secagem), o procedimento anterior reduz o tempo de secagem de aproximadamente 3 h e 20 min para 3 horas e 5 minutos, sem aparente efeito na qualidade do produto. No caso de quartos ou metades de anéis, desidratados segundo a técnica empregada, o tempo de secagem para atingir a umidade desejada deverá se situar na faixa de 2 horas e 30 minutos.

Foi realizado um balanço de energia para verificar a econo-

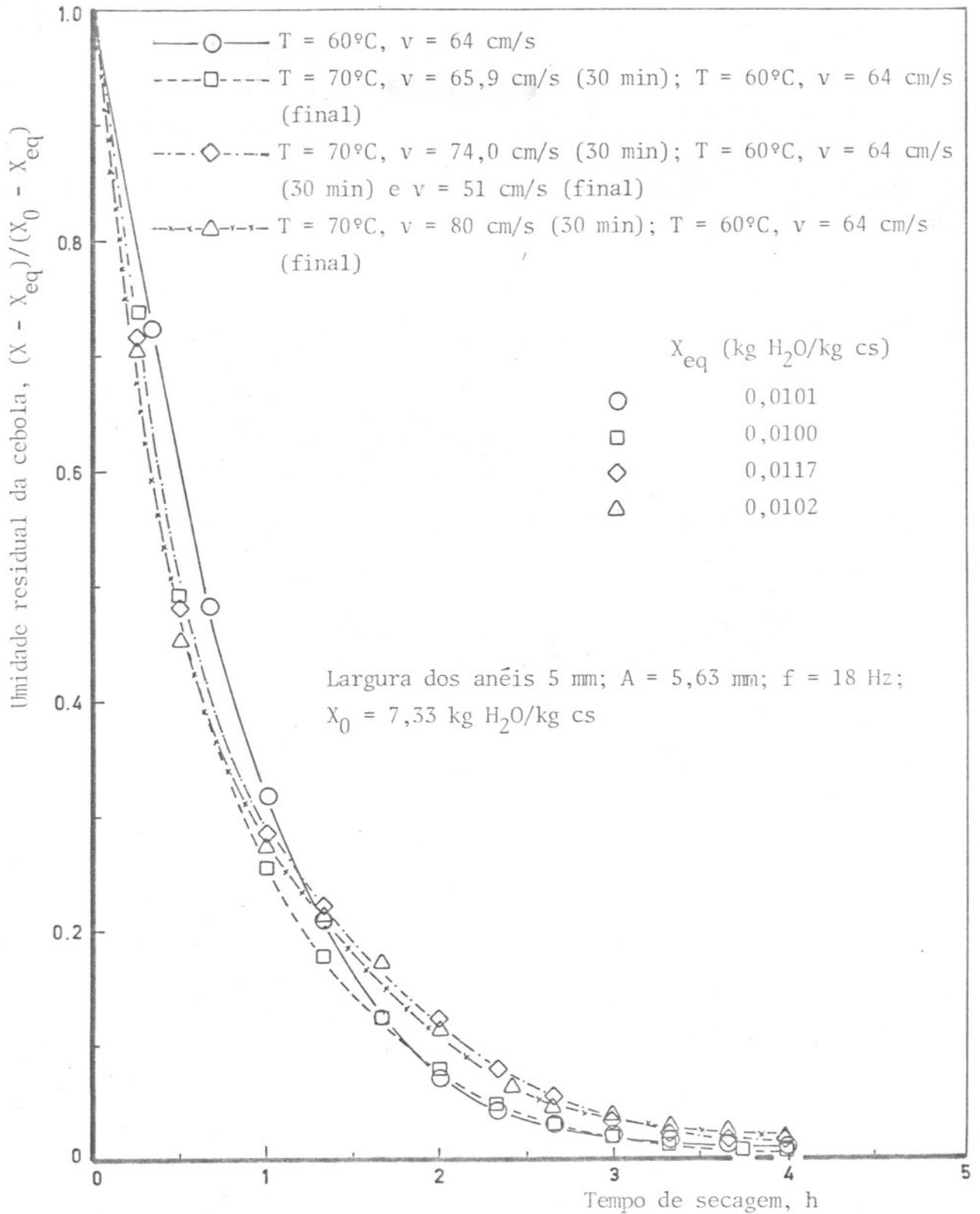


Figura IV-12 . Influência das condições de operação na secagem de anéis de cebola

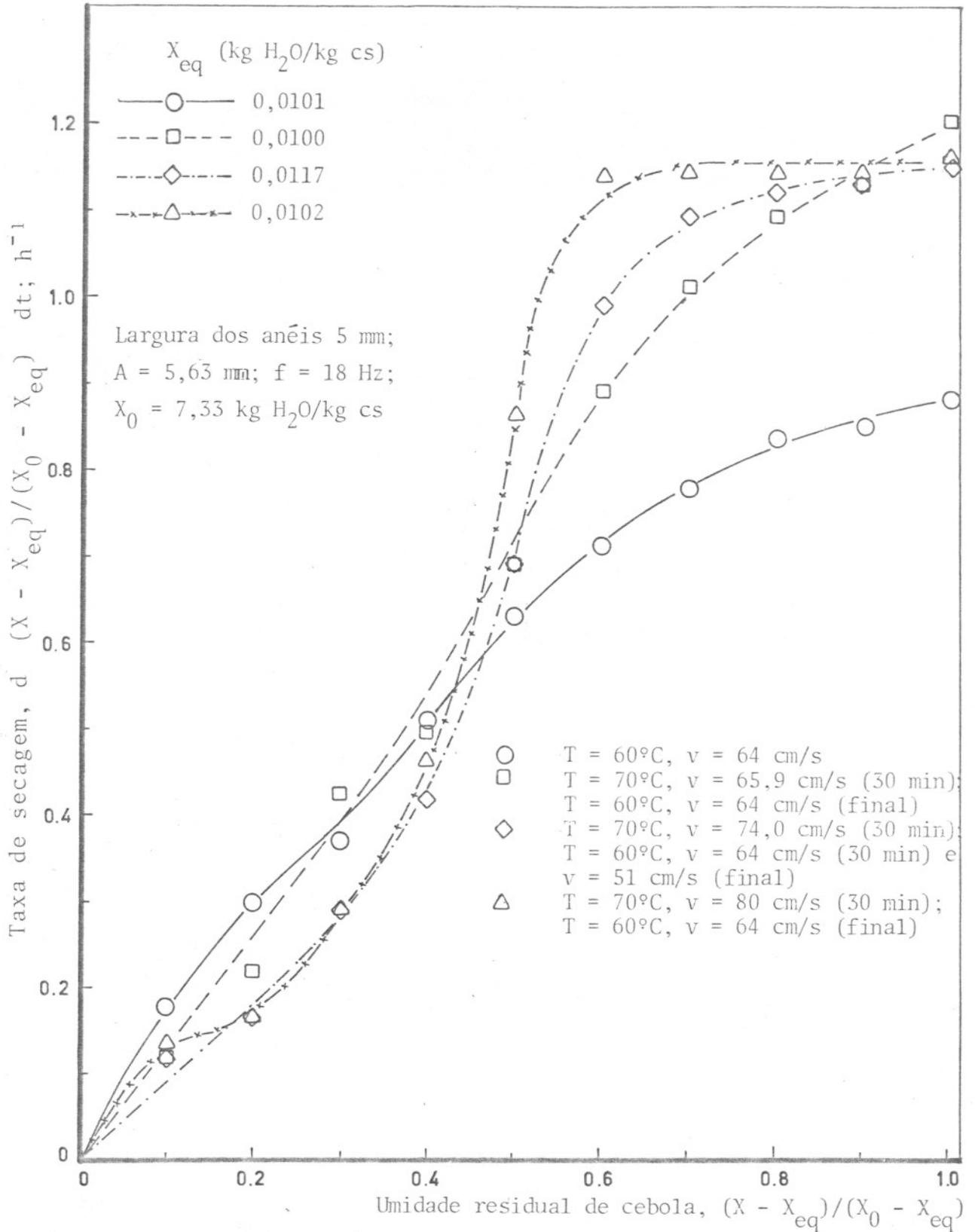


Figura IV-13 . Influência das condições de operação na taxa de secagem de anéis de cebola

mia com as condições de operação dos ensaios da Figura IV-12. Nos cálculos considerou-se que a contribuição da vibração e do deslocamento de ar situa-se na faixa de 14% (o que foi determinado utilizando os resultados da Tabela III-1). Os aumentos percentuais de gasto de energia em relação a operação de menor consumo foram: 4% (operação com temperatura do ar constante igual a 60°C); 5% (ensaio utilizando três níveis de velocidade do ar); 38% (secagem iniciada à velocidade do ar de 80 cm/s).

A tentativa de acelerar a difusão de umidade por aumento da velocidade do ar parece não ter sido eficaz. No início da secagem ocorreu apreciável aumento da perda de umidade, mas no transcorrer da mesma a taxa de secagem caiu a valores muito baixos, inferiores aos normais. Este comportamento é típico em alimentos que apresentam o fenômeno de casca endurecida ou "case hardening" (POTTER, 1978).

Foram realizadas outras experiências com as condições citadas abaixo (para $f = 18$ Hz e $A = 5,63$ mm, quando existia vibração), na tentativa de otimizar a operação e verificar se em determinadas etapas a vibração não era importante.

1) ($v = 65,2$ cm/s, $T = 70^\circ\text{C}$, 30 min, C V); (64 cm/s, $T = 60^\circ\text{C}$, 90 min, C V); (51 cm/s, $T = 60^\circ\text{C}$, 120 min, em intervalos de 10 em 10 min o vaso de secagem era submetido a vibração durante 10 s)

2) ($v = 74$ cm/s, $T = 70^\circ\text{C}$, 30 min, C V); ($v = 64$ cm/s, $T = 60^\circ\text{C}$, 45 min, C V); ($v = 51$ cm/s; $T = 60^\circ\text{C}$; 165 min, C V)

3) ($v = 65,2$ cm/s, $T = 70^\circ\text{C}$, 30 min, C V); ($v = 64$ cm/s, $T = 60^\circ\text{C}$, 90 min); ($v = 64$ cm/s; $T = 60^\circ\text{C}$, 60 min, S V); ($v = 64$ cm/s, $T =$

60°C, 60 min, CV)

4) ($v = 64$ cm/s; $T = 60^\circ\text{C}$, 15 min, S V); ($v = 64$ cm/s, $T = 60^\circ\text{C}$ a
tê o final da secagem, C V)

Em todos os casos a umidade final foi inferior a do ensaio (\square) da
Figura IV-12, para um mesmo tempo de operação.

CAPÍTULO V . CARACTERIZAÇÃO COMPARATIVA DA QUALIDADE DO PRODUTOA . Introdução

Tecnicamente, sabor é a propriedade de um material que no interior da boca estimula os órgãos sensoriais. A sensação resultante que se chama sabor é um efeito misto que inclui gosto, odor, temperatura e outras sensações. Normalmente uma pessoa pode distinguir quatro gostos básicos, doce, ácido, salgado e amargo e para cada um podem ser percebidos 20 a 30 níveis de intensidade. O sentido olfato é muito mais complexo e sujeito a muitas variáveis, tais como fadiga e adaptação. Um provador treinado pode distinguir até 20 níveis de intensidade de um odor de determinada qualidade (CHAIB & GARRUTI, 1974).

BC/5394
Uma maneira de avaliar a qualidade de um produto desidratado é reconstituí-lo com água e efetuar testes comparativos de odor e sabor, com a matéria prima original. Avaliações organolépticas realizadas com diferentes cultivares de cebola, indicaram que para as cultivares Texas e Granex a matéria prima é muito melhor que o produto reconstituído. Para a cultivar Baia, a matéria prima foi considerada ligeiramente melhor que a cebola desidratada (AGUIRRE et al, 1982)

A cebola fresca contém sulfóxido de S - propenil - L - cisteína, precursor da formação do composto lacrimogêneo. Submetendo a cebola a secagem, ocorre parcial destruição do complexo enzimático e conversão do precursor a cicloaliina. O precursor é reduzido mas não totalmente eliminado. Após reconstituição com água o substrato remanescente pode ser convertido enzimaticamente a ácido pirúvico e odor. A medida do teor deste ácido pode ser utilizada como uma a-

valiação da pungência da cebola (SCHWIMMER et al, 1964). A concentração de ácido pirúvico na cultivar Baia Periforme desidratada é mais alta que os teores observados em outras cultivares desidratadas (STRINGHETA & BUSO, 1982).

A quantidade de água de rehidratação de uma cebola desidratada, pode ser determinada adicionando-se uma amostra de massa conhecida em água a uma temperatura adequada. Após um intervalo de tempo pré-estabelecido, drena-se o excesso de água e após pesagem, a água de rehidratação pode ser determinada. Para as cultivares Texas, Granex e Baia, as razões entre as massas de água de rehidratação pelas das amostras desidratadas, foram determinadas iguais a 4,13; 3,90 e 3,33, respectivamente (AGUIRRE et al, 1982). Rehidratação da cultivar Baia à temperatura de 25°C resultou em 5,2 g H₂O/g cs (STRINGHETA & BUSO, 1982).

Existem evidências, que a rehidratação de cebola desidratada é função do regime de desidratação. Fatias de cebola da cultivar "White Globe" desidratadas a alta, média e baixa temperatura e por liofilização, após rehidratação apresentam diferenças em termos da umidade de reconstituição. A cebola desidratada a baixa temperatura, após rehidratação, apresenta conteúdo de umidade ligeiramente superior a desidratada a média e alta temperatura. A cebola desidratada pela técnica de liofilização, após reconstituição, apresenta umidade cerca de 50% superior a da cebola processada a baixa temperatura, além de ser mais rápida a absorção de umidade. Isto provavelmente é devido a presença de vários capilares ampliados no tecido do produto desidratado, causados pela expansão de cristais de gelo na etapa de congelamento (SHIMAZU et al, 1965).

B . Análise sensorial

No presente trabalho, bulbos de cebola foram cortados em anéis de 5 mm, com exceção da amostra denominada V, cujos anéis foram de 8 mm. A matéria prima foi desidratada sob diferentes condições de operação, afim de ser submetida à avaliação organoléptica. Experiências preliminares, indicaram que até temperaturas de 60°C, não eram perceptíveis alterações no produto final. Para testes sensoriais, escolheu-se portanto temperaturas de 60 e 70°C.

Os ensaios de desidratação foram efetuados ao longo de 4 dias obtendo-se 6 amostras. As condições de vibração usadas foram 18 Hz e 5,63 mm de amplitude. A carga inicial de cebola utilizada na obtenção de cada amostra foi de 30 kg/m². Utilizou-se ar com velocidade de 64 cm/s ao operar-se a 60°C e 65,9 cm/s à temperatura de 70°C. Em todos os casos, a secagem foi realizada até conseguir-se uma umidade final da cebola de aproximadamente 8% (b u). Na Tabela V-1, são descritos as procedências das amostras. As amostras I e II, foram provenientes de um mesmo ensaio e a massa de cebola situada no centro do vaso foi descartada.

A análise sensorial foi realizada em 5 dias consecutivos. Durante esse tempo, os produtos foram acondicionados em recipientes de vidro completamente vedados e mantidos a temperatura de cerca de 5°C. Na avaliação organoléptica, cada amostra foi testada 5 vezes pelos provadores. As amostras foram preparadas da seguinte maneira. Oito gramas de cebola foram submergidas em 64 cm³ de água destilada à temperatura ambiente durante 5 minutos. A água em excesso foi drenada utilizando-se uma peneira de 24 malhas. A seguir os produtos foram servidos aos provadores. Cada provador recebeu 3 pratos contendo amostras de cebola reconstituída

Tabela V-1 . Amostras de cebola desidratadas utilizadas na execução da análise sensorial.

Amostra	Temperatura de operação, °C	Leito	Região de retirada das amostras.
I	60°C	Estático	No espaço a cerca de 1 cm a partir da superfície livre do leito.
II	60°C	Estático	No espaço a cerca de 1 cm a partir da base do leito
III	70°C (30 min), 60°C (até final da secagem)	Vibro-fluidizado	Devido a ocorrência de fluidização ao final da secagem, não existia distinção entre porções retiradas de várias posições no leito.
IV	70°C	Vibro-fluidizado	
V	70°C (30 min), 60°C (até final da secagem)	Vibro-fluidizado	
VI (padrão)	60°C	Vibro-fluidizado	

para serem avaliados em uma escala de 1 a 10. O odor era identificado pelo olfato e o sabor submetendo as amostras a mastigação. Os resultados finais estão indicados na Tabela V-2, onde cada valor representa a média aritmética das avaliações de cada amostra, atribuídas pelos 6 provadores. Em relação a significância estatística dos resultados, na pesquisa de aceitabilidade do produto, pode ser necessária uma estimativa do comportamento global de uma população de consumidores.

As amostras I e II, que correspondem a secagem sem vibração, absorveram menor quantidade de água que as outras durante a prepa

ração para análise sensorial. Testes iniciais com estes produtos revelaram uma textura mais firme à mastigação. Os resultados da análise sensorial revelaram que a ordem decrescente de preferência das amostras pelos provadores foi:

Tabela V-2 - Resultados da análise sensorial

Odor						
Amostras						
	I	II	III	IV	V	VI
	5,18	4,73	5,32	5,78	3,52	6,63
	5,62	6,03	5,60	4,24	5,66	3,18
	7,47	4,74	3,91	5,41	5,02	5,33
	3,71	6,48	4,06	4,23	6,57	5,91
	6,07	4,34	6,34	4,73	6,14	5,88
Σ	28,05	26,32	25,23	24,39	26,91	26,93
\bar{X}	5,61	5,26	5,05	4,88	5,38	5,39

Odor						
Amostras						
	I	II	III	IV	V	VI
	5,83	5,38	4,02	4,51	3,38	6,38
	5,95	6,54	4,56	4,70	5,61	3,58
	6,37	5,56	4,41	5,29	5,89	5,59
	4,18	6,56	2,89	5,07	5,88	4,80
	7,22	5,12	5,73	5,76	7,00	6,30
Σ	29,55	29,16	21,61	25,33	27,76	26,65
\bar{X}	5,91	5,83	4,32	5,07	5,55	5,33

ODOR	I	VI	V	II	III	IV
------	---	----	---	----	-----	----

SABOR	I	II	V	VI	IV	III
-------	---	----	---	----	----	-----

A amostra I foi a preferida pelos provadores, pelo fato do

material ter permanecido durante a secagem no topo do leito, sendo portanto submetida a temperaturas mais baixas. Sua umidade final não foi determinada, mas é provável que ela tenha sido superior as demais amostras. A amostra II apesar de ter sido classificada na quarta posição em relação ao odor, alcançou a segunda na avaliação do sabor. Provavelmente neste último caso, os provadores tenham dado preferência a um produto com textura mais firme ao submetê-lo a mastigação. As amostras III e IV, com largura original de 5 mm, submetidas a temperaturas de 70°C, apresentaram os últimos lugares em preferência. Este resultado já era esperado, pois a aparência das mesmas já era comprometida por acentuada coloração escura. Este fato confirma que temperaturas do ar de secagem acima de 60°C, afetam sensivelmente a qualidade do produto. A amostra V correspondendo a fatias de 8 mm, apesar de ter sido submetida a temperatura de 70°C no início da secagem, classificou-se em 3º lugar tanto em odor como em sabor. Isto indica que provavelmente ocorreu maior retenção das substâncias responsáveis pela pungência, do que nas amostras III e IV, por influência da maior largura do anel original. A amostra VI foi classificada em segundo lugar na avaliação do odor, devido a temperatura do ar de secagem ser favorável a retenção dos potenciais responsáveis pela pungência da cebola. Em relação ao sabor, ela se posicionou após os anéis de largura de 8 mm, provavelmente devido a efeitos favoráveis da espessura na mastigação e conservação da pungência.

No estudo comparativo utilizou-se apenas os produtos reconstituídos. Uma avaliação mais ampla pode incluir a matéria prima original como uma das amostras. Um estudo mais aprimorado, pode ainda levantar as distribuições de frequência com que os provadores preferem determinados produtos (uma faixa pode preferir um produto com sabor de cebola tostada). Outra opção para comparação se-

ria a preparação de produtos que incluem a cebola como matéria prima, utilizando o material reconstituído e o original (por exemplo: molhos, sopas, ketchup, bifés, etc).

C . Rehidratação

Na rehidratação da cebola, a determinação da água de reconstituição com o tempo, foi determinada utilizando amostras de diversas dimensões. Os bulbos de cebola foram seccionados em anéis com larguras de 1, 3, 5, 8 e 10 mm. A umidade inicial da cebola era 7,0 kg H₂O/kg cs, para anéis com largura de 8 e 10 mm; 7,13 kg H₂O/kg cs para largura de 5 mm e 7,33 kg H₂O/kg cs para 1 e 3 mm. A secagem foi conduzida com ar a temperatura de 60°C e velocidade de 64 cm/s. A carga inicial de cebola no leito de secagem foi de 30 kg/m². As condições vibracionais utilizadas foram 18 Hz e 5,63 mm.

As amostras de cebola desidratadas foram armazenadas em recipientes de vidro completamente vedados. Pesou-se amostras de cerca de 5 gramas em becker de 50 ml, que foram colocados em estufa à temperatura de 50°C durante 30 minutos. O procedimento visou a eliminação da umidade que provavelmente tenha sido adsorvida do ar existente no interior do recipiente. Cada amostra foi transferida para um becker de 200 ml que estava colocado no interior de um banho maria, contando 200 ml de água previamente ajustada à temperatura de 30°C. Efetou-se uma agitação suave da cebola por intermedio de um bastão de vidro no início do teste de rehidratação e periodicamente a cada 2 - 4 minutos. Ao atingir o tempo de contato desejado, o conteúdo de cada becker foi rapidamente transferido para uma peneira de 24 malhas e o excesso de água foi eliminado por drenagem, através de oscilação do conjunto.

As amostras reconstituídas foram pesadas e calculou-se a massa de água de rehidratação. Nos cálculos foi considerada a umidade final da cebola desidratada. Os resultados finais estão locados na Figura V-1.

A velocidade de rehidratação e a umidade final da cebola proveniente da secagem em leito estático, mostrou-se inversamente proporcional a largura dos anéis. Diminuindo o tamanho das partículas, aumenta a área exposta disponível à transferência de massa e conseqüentemente aumenta a velocidade de hidratação. Assim o resultado experimental obtido foi o esperado. Para as partículas provenientes de anéis de 8 e 10 mm os resultados experimentais estiveram bem próximos. Tal comportamento é coerente, uma vez que existe pequena diferença porcentual entre as dimensões das partículas. A variação entre as umidades finais para o intervalo de dimensões de partículas testadas, situou-se na faixa de 4,2 - 5,7 kg H₂O/kg cs.

Para as amostras provenientes da secagem em leito vibro-fluidizado, os pontos experimentais da Figura V-1 apresentaram-se bem próximos para todas as amostras. Não foi encontrada nenhuma explicação adequada para este comportamento. Um resultado surpreendente foi que após a reconstituição, as umidades finais apresentaram-se aproximadamente constantes, em torno de 5 kg H₂O/kg cs. Para as maiores partículas, provenientes de secagem com vibração, a velocidade de hidratação foi mais alta que nos ensaios sem vibração. As umidades finais da cebola rehidratada, proveniente de leito estático e vibro-fluidizado, foram inferiores a da matéria prima original, isto também foi encontrado por outros pesquisadores.

Outros ensaios de rehidratação foram realizados com água a

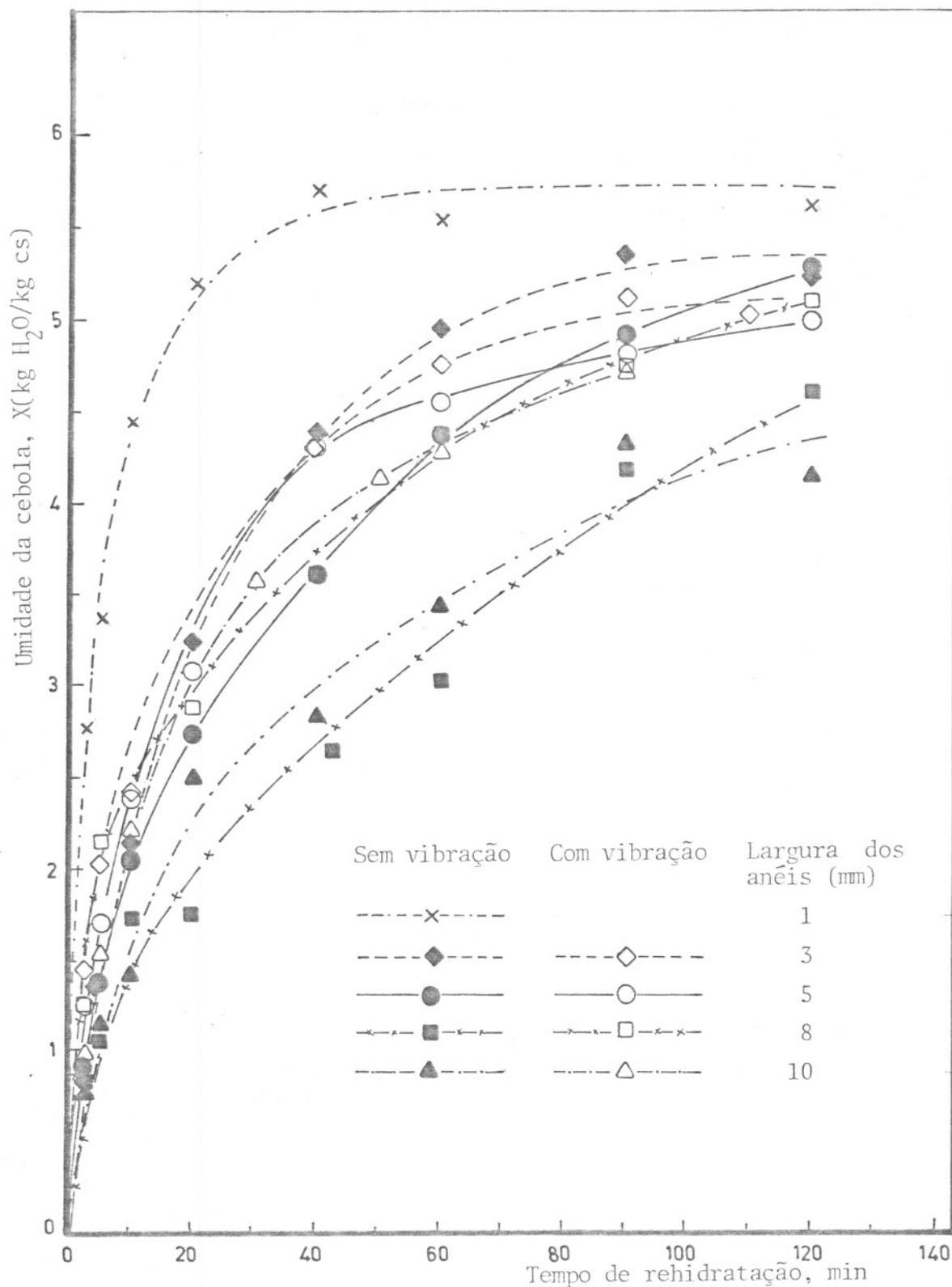


Figura V-1 . Efeito da largura dos anéis de cebola na rehidratação, condições de secagem: $T_{0 \text{ ar}} = 60^\circ\text{C}$, $v_{0 \text{ ar}} = 64 \text{ cm/s}$, $f = 18 \text{ Hz}$, $A = 5,63 \text{ mm}$, $X_0 = 7,00 \text{ kg } H_2O/\text{kg cs}$ (Δ , \blacktriangle , \square , \blacksquare), $X_0 = 7,13$ (\circ , \bullet) e $X_0 = 7,33$ (\diamond , \blacklozenge , \times), temperatura da água de rehidratação = 30°C .

diferentes temperaturas. Utilizou-se produtos provenientes de secagem em leito vibro-fluidizado. As condições de secagem da matéria prima foram as mesmas da cebola utilizada na reconstituição a 30°C e a largura dos anéis originais 5 mm. Utilizando água a 50°C, alcançou-se uma umidade final de aproximadamente 5 kg H₂O/kg cs. À temperatura de cerca de 100°C, em 40 minutos de tempo de contato a cebola atingiu uma umidade de 4 kg H₂O/kg cs. Nesta condição a cebola se fragmenta facilmente comportando-se como um vegetal cozido.

D . Seleção de opções de operação

Os resultados da análise sensorial sugerem que a cebola não deve ser desidratada em temperaturas acima de 60°C, por razões de qualidade do produto.

Desejando-se cebola seca com possibilidades de reconstituir o anel, a melhor opção é utilizar a matéria prima seccionada em fatias de 8 mm. O processamento deve ser efetuado à temperatura de 60°C (o que retém maior porcentagem de substâncias responsáveis pela pungência) e velocidade de 64 cm/s, com os parâmetros vibracionais, A = 5,63 mm e f = 18 Hz. A velocidade de secagem e a umidade final da cebola reconstituída (a temperatura de 30°C, durante 2 horas) é praticamente a mesma dos anéis de 5 mm (ver Figuras IV-9 e V-1).

Se for desejável a obtenção de cebola desidratada em fatias cortadas, as melhores opções relacionam-se com o processamento de quartos ou metades de anéis. Para estas partículas, com largura \geq 5 mm, durante a secagem não ocorre aderência nas paredes e nem no suporte do vaso de secagem. Também são maiores as velocidades de

secagem e de rehidratação, devido aos cortes transversais dos anéis.

As piores opções correspondem aos anéis de 5 mm submetidos (mesmo por pouco tempo) a temperatura de 70°C.

Na secagem em leito estático de anéis com larguras originais de 8 ou 10 mm, necessita-se maior tempo para atingir a umidade residual desejada. O produto é reidratado a menor velocidade, necessitando-se um maior tempo de contato com a água para alcançar o nível final de reconstituição.

CAPÍTULO VI . ANÁLISE MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO

Os sólidos que secam lentamente, apresentam características de mecanismo de perda de umidade por difusão. A resistência à transferência de vapor de água, da superfície do sólido para o ar, usualmente é desprezível e a difusão no interior do sólido controla a velocidade de secagem. Como a difusividade aumenta com a temperatura, a elevação da temperatura dos sólidos acelera a velocidade de secagem (McCABE & SMITH, 1976).

A taxa de difusão pode ser representada pela segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (\text{VI-1})$$

X = massa de água/massa de sólido seco

D = difusividade, geralmente uma função importante do conteúdo de umidade

y = distância medida na direção da difusão

θ = tempo de secagem

Para condições constantes do ar de secagem e assumindo uma difusividade constante, pode-se integrar a Equação VI-1, para sólidos com densidade, tamanho e forma, também invariáveis. O resultado final para placas planas, apresenta-se em forma de uma série. Para a maioria das situações de secagem, ela pode ser truncada após o primeiro termo e torna-se:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{-a_1^2 Fo} \quad (\text{VI-2})$$

$$a_1 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 ; \quad Fo = \frac{De}{S^2}$$

S = metade da espessura da placa

A Equação VI-2 indica que, caso as simplificações introduzidas sejam válidas, o gráfico de $(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq})$, em função do tempo de secagem, deve ser linear em escala semi-logarítmica. Deve ser enfatizado que a análise dos resultados é preliminar, pois na simplificação será utilizada apenas a forma da função exponencial, correspondente a Equação VI-2. Rigorosamente mesmo a equação completa não seria aplicável, em parte pela modificação dos anéis de cebola durante a secagem e pela grande profundidade do leito. A vazão limitada de ar faz com que as condições externas variem no tempo e ao longo do leito.

O grande mérito da Equação VI-2 é sua simplicidade. Além disso, um maior grau de sofisticação é supérfluo, uma vez que os resultados experimentais mostraram-se muito dependentes da composição e grau de maturação da cebola usada.

No presente trabalho, as dimensões dos anéis de cebola modificam-se com o tempo, devido a contração pela perda de água e a deformação por efeitos vibracionais (nos ensaios vibro-fluidizados). A Figura III-6 por sua vez, mostra que nas duas primeiras horas de processamento, a temperatura de saída do ar é muito diferente da entrada, invalidando portanto a suposição de condições constantes de secagem.

Analisando os resultados das Figuras III-5, IV-4 e IV-11, verifica-se um ajuste dos pontos experimentais a duas linhas retas,

de inclinações diferentes. Procurou-se com os dados experimentais determinar os parâmetros de uma equação do tipo VI-3.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = b e^{-a \theta} \quad (\text{VI-3})$$

Onde "a" é um valor médio que engloba as variáveis definidas na Equação VI-2 e "b" uma constante a determinar.

A secagem da cebola geralmente é realizada com a temperatura do ar em torno de 60°C. Para a análise matemática, optou-se por utilizar os resultados dos ensaios em leito vibro-fluidizado às temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C. A Figura VI-1, apresenta os resultados experimentais da secagem dos anéis de cebola a 50°C, 60°C e 70°C, que são os mesmos da Figura IV-4.

Para o primeiro período de secagem (primeira reta), foram determinados os coeficientes angulares e lineares das retas, correspondentes as temperaturas em estudo. O limite inferior $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$, foi em torno de 0,028. Os resultados foram graficados em função da temperatura de operação. Avaliando o coeficiente angular e linear da reta por regressão linear, foram obtidos as seguintes funções da variação de "a" e "b" com a temperatura:

$$a = 0,0005615.T - 0,01130 \quad (\text{VI-4})$$

$$b = 1,361 - 0,003500.T \quad (\text{VI-5})$$

Substituindo estes parâmetros na Equação VI-3, obteve-se para o primeiro período de secagem:

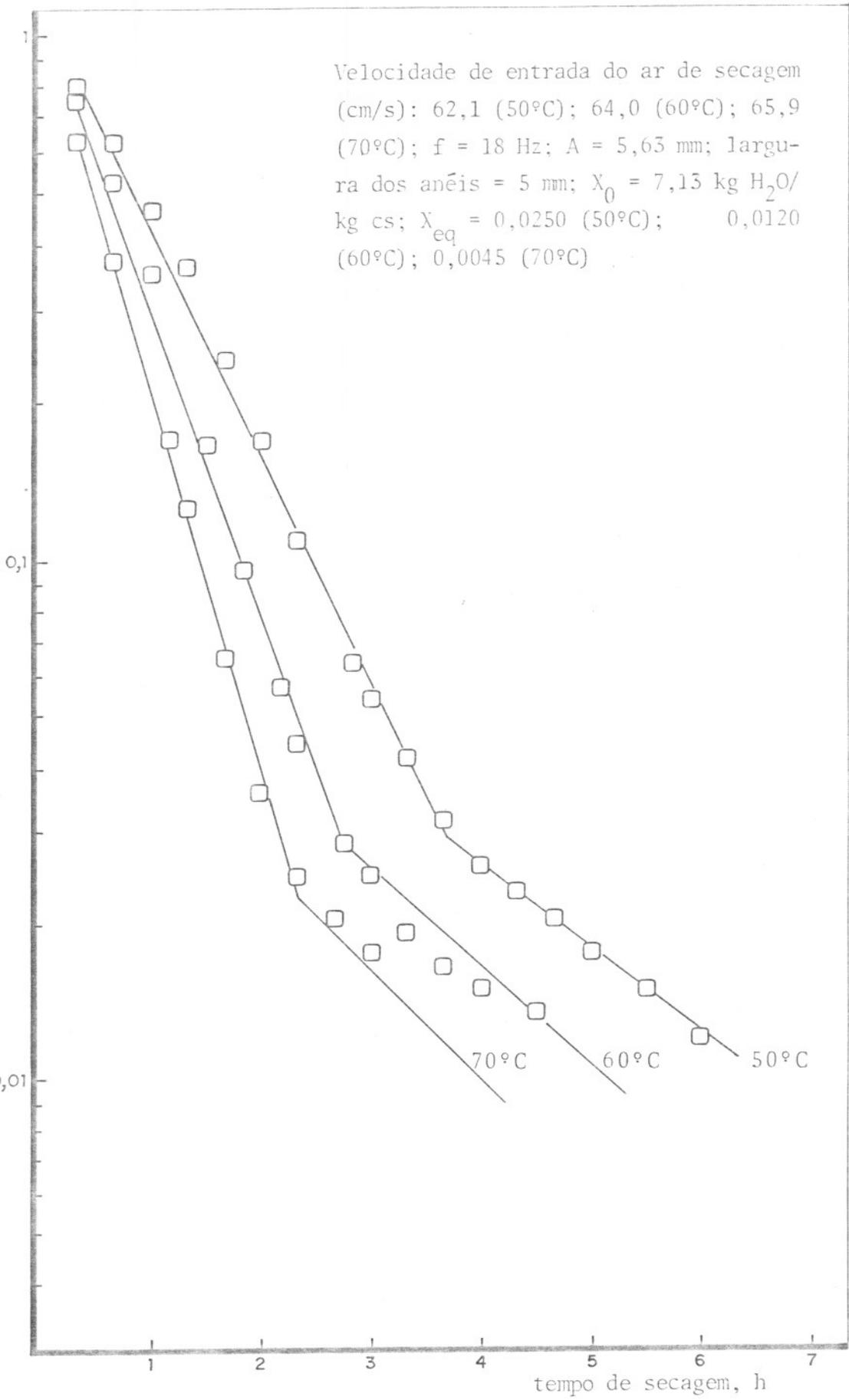


Figura VI-1 . Comparação entre resultados experimentais (□) e simulação matemática (—), para secagem de anéis de cebola a 50, 60 e 70°C

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = (1,361 - 0,003500.T) e^{(0,01130 - 0,0005615.T)\theta} \quad (\text{VI-6})$$

Aplicável para $\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \geq 0,028$; $T(^{\circ}\text{C})$; $\theta(\text{min})$

Utilizando o mesmo procedimento para o segundo período de secagem, determinou-se também o coeficiente angular e linear em função da temperatura. Foram obtidas as seguintes funções:

$$a = 0,001542 + 0,00009280.T \quad (\text{VI-7})$$

$$b = 0,2321 - 0,002330.T \quad (\text{VI-8})$$

Substituindo na Equação VI-3, vem:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = (0,2321 - 0,002330.T) e^{-(0,001542 + 0,00009280.T)\theta} \quad (\text{VI-9})$$

Aplicável para $(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq}) \leq 0,028$; $T(^{\circ}\text{C})$; $\theta(\text{min})$

Explicitando o tempo de secagem das Equações VI-6 e VI-9, obtem-se:

$$\theta = \frac{\ln \left[\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) \frac{1}{(1,361 - 0,003500.T)} \right]}{(0,01130 - 0,0005615.T)} \quad (\text{VI-10})$$

Válida para $(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq}) \geq 0,028$; $T(^{\circ}\text{C})$; $\theta(\text{min})$

$$\theta = \frac{\ln \left[\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) \frac{1}{(0,2321 - 0,002330.T)} \right]}{-(0,001542 + 0,00009280.T)} \quad (\text{VI-11})$$

Válida para $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq}) \leq 0,028$; $T(^{\circ}\text{C})$; $\theta(\text{min})$

Na Figura VI-1 são também mostrados os resultados da simulação matemática (—) nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, correspondentes as Equações VI-6 e VI-9 ou VI-10 e VI-11.

Foram calculados os erros absolutos percentuais, entre os resultados experimentais e a simulação matemática. As médias aritméticas dos erros percentuais para os três níveis de temperaturas foram: 4,3% (50°C); 8,9% (60°C) e 5,2% (70°C).

Nas proximidades do tempo zero, a umidade residual da cebola (relativa a simulação), se afasta do valor inicial $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq}) = 1$. Isto se deve provavelmente a condição do ar (no interior do leito), ser variável em maior grau no princípio da secagem e também pela cebola se encontrar à temperatura ambiente no início da operação.

A curvatura em relação as retas observadas no alinhamento dos pontos experimentais, correspondentes ao início da operação, provavelmente é resultante da resistência externa a transferência da massa (convecção) que, conforme demonstrado em IV-A, é importante no princípio da secagem. Outro fator é a saturação do ar que aumenta o X_{eq} . A influência destes fatores tende a diminuir no decorrer da secagem, o que justifica a forma concava da curvatura no início da operação. Por outro lado, há uma diminuição da área de corte devido a contração do sólido e a difusividade de massa diminui muito no final da secagem, quando a umidade residual da cebola é baixa.

Comparando os resultados obtidos com os de MAZZA & LeMAGUER

(1980), que também observaram a existência de dois regimes de secagem, verifica-se que a transição dos regimes de secagem ocorrem a uma umidade residual da cebola inferior a encontrada neste trabalho. Após a transição, a diminuição da umidade com o tempo é muito mais lenta do que na presente pesquisa. Esta é apenas uma comparação qualitativa, uma vez que as cultivares utilizadas e as condições de operação são diferentes nos dois processos.

As difusividades médias de umidade no interior da cebola (relativas a Figura IV-4 em condições vibratórias), foram calculadas utilizando os coeficientes angulares das retas médias, em cada temperatura, obtidos por regressão linear dos pontos experimentais. Como dimensão característica "S" da Equação VI-2, utilizou-se a metade da largura dos anéis (2,5 mm), para avaliação das difusividades. A espessura inicial dos anéis de cebola usados, foi de aproximadamente 2 mm. Os resultados são apresentados na Tabela VI-1. Observa-se que no primeiro período de secagem, a

Tabela VI-1. Difusividade média de umidade de anéis de cebola de 5 mm de largura secados em diferentes temperaturas.

T (°C)	DIFUSIVIDADE (m ² /s)	
	1º PERÍODO	2º PERÍODO
50	7,00 . 10 ⁻¹⁰	2,75 . 10 ⁻¹⁰
60	9,62 . 10 ⁻¹⁰	2,72 . 10 ⁻¹⁰
70	11,70 . 10 ⁻¹⁰	3,53 . 10 ⁻¹⁰

da difusividade com a temperatura é mais significativa que no segundo período.

Comparando as difusividades obtidas na secagem conduzida a

50°C, com a apresentada por MAZZA & LeMAGUER (1980), foram determinadas as seguintes relações para os dois períodos:

$$\left(\frac{D}{D_{\text{MAZZA}}} \right)_{1^\circ \text{ periodo}} = 7,1 \quad ; \quad \left(\frac{D}{D_{\text{MAZZA}}} \right)_{2^\circ \text{ periodo}} = 73,1$$

Estes resultados mostram que as condições de operação utilizadas neste trabalho, foram mais eficazes que as empregadas no de MAZZA & LeMAGUER. Provavelmente o efeito das condições vibracionais utilizadas ($A = 5,63 \text{ mm}$, $f = 18 \text{ Hz}$), tenham sido mais importantes, uma vez que foram determinadas as melhores condições destes parâmetros no Capítulo III (os valores correspondentes destas grandezas não são indicadas no trabalho de MAZZA & LeMAGUER).

Os resultados do efeito do corte na secagem, são muito diferentes da expectativa por difusão. As Figuras IV-9 e IV-10, mostram efeitos distintos das dimensões das partículas na umidade residual da cebola, ao modificar-se a largura dos anéis e os tamanhos das fatias, respectivamente. Por isso não houve preocupação em procurar modelos matemáticos que considerem as diferentes dimensões. Este fato também implica que o valor da difusividade calculada pelo modelo é afetado pela largura do anel. Isto pode explicar a grande diferença entre a difusividade determinada no presente trabalho e a de MAZZA & LeMAGUER (1980).

CAPÍTULO VII . CONCLUSÕES

1) O modelo de secador desenvolvido, operando em leito vibro-fluidizado, reduz o tempo de secagem de anéis de cebola, quando comparado com secagem em leito estático e elimina perdas por aderência do produto às paredes e no suporte do leito.

2) O produto desidratado sob condições vibratórias apresenta maior densidade aparente e as partículas se aproximam da forma esférica.

3) O efeito da intensidade vibracional no aumento da taxa de secagem não é importante para $A\omega^2/g$ maior que aproximadamente 4,3 , operando com frequência de 18 Hz.

4) A velocidade de secagem é mais dependente da amplitude de vibração. Trabalhando com valores próximos de $A\omega^2/g$, os melhores resultados foram obtidos ao operar com a maior amplitude.

5) A relação entre o consumo de energia em leito vibro-fluidizado e estático foi 0,63 para alcançar a umidade final de 12%.

6) Operando em leito vibro-fluidizado é pouco pronunciado o efeito da velocidade do ar acima de 64 cm/s na taxa de secagem. No início do processo, para velocidades superiores do ar ocorre apreciável aumento na perda de umidade, mas ao final a taxa de secagem cai a valores baixos, inferiores aos normais. O comportamento é típico de alimentos que apresentam o fenômeno de casca endurecida ou "case hardening".

7) O acréscimo da temperatura do ar de secagem aumenta a ta

xa de perda de umidade dos anéis de cebola.

8) Em condições vibracionais é requerida uma menor energia de ativação para desencadear o processo de secagem, quando comparado com a operação em leito estático.

9) A duplicação da carga de anéis de cebola no leito de secagem (30 para 60 kg/m²), resultou na ausência de circulação das partículas. Isto fez com que a umidade das fatias diminuísse mais lentamente com ligeira tendência as condições de operação em leito estático.

10) Na secagem de anéis de cebola com largura ≤ 3 mm, foi observado aderência do material às paredes e no suporte do leito de secagem (em leito estático e vibrado). O efeito foi mais pronunciado com anéis de 1 mm. Utilizando anéis com largura igual ou superior a 5 mm ($f = 18$ Hz ; $A = 5,63$ mm), praticamente foi eliminada esta aderência.

11) Operando em leito estático, o aumento da largura dos anéis atua no sentido de reduzir a velocidade de secagem.

12) A vibração atuou no sentido de eliminar a influência da largura dos anéis de cebola na taxa de perda de umidade.

13) O melhor resultado com variação da temperatura e (ou) velocidade do ar durante a secagem (onde procurou-se reduzir o tempo de processamento), correspondeu à operação nos 30 primeiros minutos com a temperatura de 70°C, reduzindo-a então para 60°C e mantendo a taxa do ar constante (0,63 kg/min), durante toda a operação.

14) Na secagem de anéis partidos em fatias ocorreu intensa aderência na parede e no suporte do leito, para partículas ≤ 2 cm, em leito estático e vibrado. Em condições vibratórias ($f = 18$ Hz; $A = 5,63$ mm), na secagem de quartos e metades de anéis, praticamente não ocorreu aderência. Na operação em leito estático e vibro-fluidizado, a redução nas dimensões das fatias aumentou a taxa de secagem.

15) O estudo sensorial dos produtos obtidos com testes organolépticos de gosto e sabor, posicionou os submetidos a temperatura de 70°C (largura inicial dos anéis de 5 mm), nos últimos lugares de preferência pelos provadores. A aceitabilidade da cebola desidratada em leito vibro-fluidizado à temperatura de 60°C , situou-se entre a da porção superior e inferior do leito estacionário, para a mesma temperatura de operação.

16) Ensaio de reconstituição com água indicaram maior velocidade de rehidratação para a cebola obtida em leito vibro-fluidizado. As umidades finais apresentaram-se aproximadamente constantes em torno de $5 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ cebola seca e independentes da largura dos anéis.

17) As umidades finais da cebola rehidratada, proveniente de leito estático e vibro-fluidizado, foram inferiores a da matéria prima original.

18) As equações obtidas da análise matemática permitem realizar simulação de secagem de anéis de cebola, para temperatura de admissão do ar entre 50°C a 70°C .

CAPÍTULO VIII . SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Secagem de fatias de cebola utilizando vibração em um sistema integrado com múltiplos estágios e efetuando reciclo do ar para economia de energia.

2) Efetuar análises químicas de ácido pirúvico e de outros constituintes da cebola.

3) Verificar o efeito da umidade inicial da cebola em conjunto com a intensidade vibracional e determinar faixas em que o produto desidratado apresenta a forma esférica.

4) Efetuar análise sensorial envolvendo a cebola desidratada, a matéria prima original e produtos que na preparação incluem a cebola, com o objetivo de obter informações sólidas sobre a aceitação do vegetal industrializado.

5) Estudar alternativas de preparação da matéria prima para secagem, visando a obtenção de produtos desidratados de melhor qualidade em termos de cor e pungência.

APÊNDICE A

Construção e calibração do medidor do orifício

A vazão do ar de secagem foi determinada por um medidor de orifício, instalado entre o ventilador e o aquecedor e construído segundo padrões recomendados (OWER, 1977; NORMAS DIN, 1965). As dimensões utilizadas são mostradas na Figura A-1. A placa era de aço-carbono e as diferenças de pressão através do orifício eram medidas através de um anel piezométrico de 3 pontos com um manômetro de ramo inclinado, DWYER, com divisões de 0,5 mm H₂O.

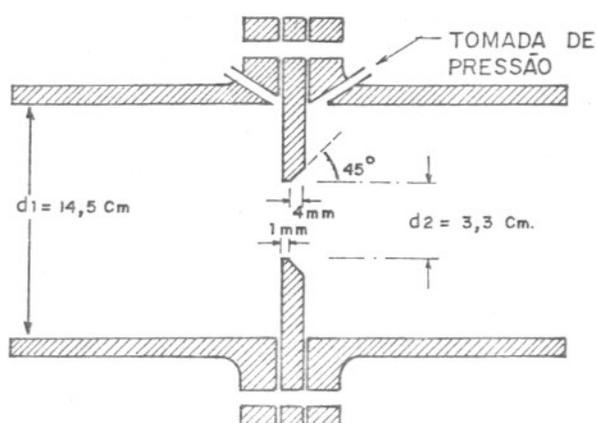


Figura A-1 . Dimensões do medidor de orifício

A forma prática da equação recomendada para cálculo do fluxo de ar em um medidor de orifício, segundo OWER, 1977 é a seguinte:

$$W = 0,0573 \cdot \epsilon \cdot \alpha \cdot a_2 \sqrt{\frac{1}{1-m^2} (h_1 - h_2) \frac{b}{T}}, \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (\text{A-1})$$

a_1 = área da secção da tubulação de admissão do ar (cm²)

a_2 = área do orifício (cm²)

$m = a_2/a_1$

$h_1 - h_2$ = queda de pressão através do medidor (cm H₂O)

T = temperatura do ar antes do medidor (°K)

b = altura barométrica local (mm Hg)

α = coeficiente de descarga

ϵ = coeficiente de compressibilidade

Substituindo os valores conhecidos e desprezando a correção resultante da compressibilidade do ar devido a baixa diferença de pressão de operação, a Equação A-1 é reduzida a:

$$W = 0,49 \alpha \sqrt{\Delta h \frac{b}{T}}, \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (\text{A-2})$$

Os valores do coeficiente de descarga, α , foram obtidos experimentalmente utilizando-se um medidor de fluxo de ar calibrado (Meriam Laminar Flow Elements, model 50MC2-6) colocado em série, a montante do medidor de orifício. Variou-se a vazão do ar de 0,080 a 0,93 m³/min e os valores de α encontrados estão indicados na Figura A-2. Eles estão muito próximos dos valores da literatura (OWER, 1977). Para uma rápida estimativa, a Figura A-2 apresenta também a relação entre o fluxo de massa e Δh , para as condições médias de Campinas (T = 25°C, b = 715 mm Hg).

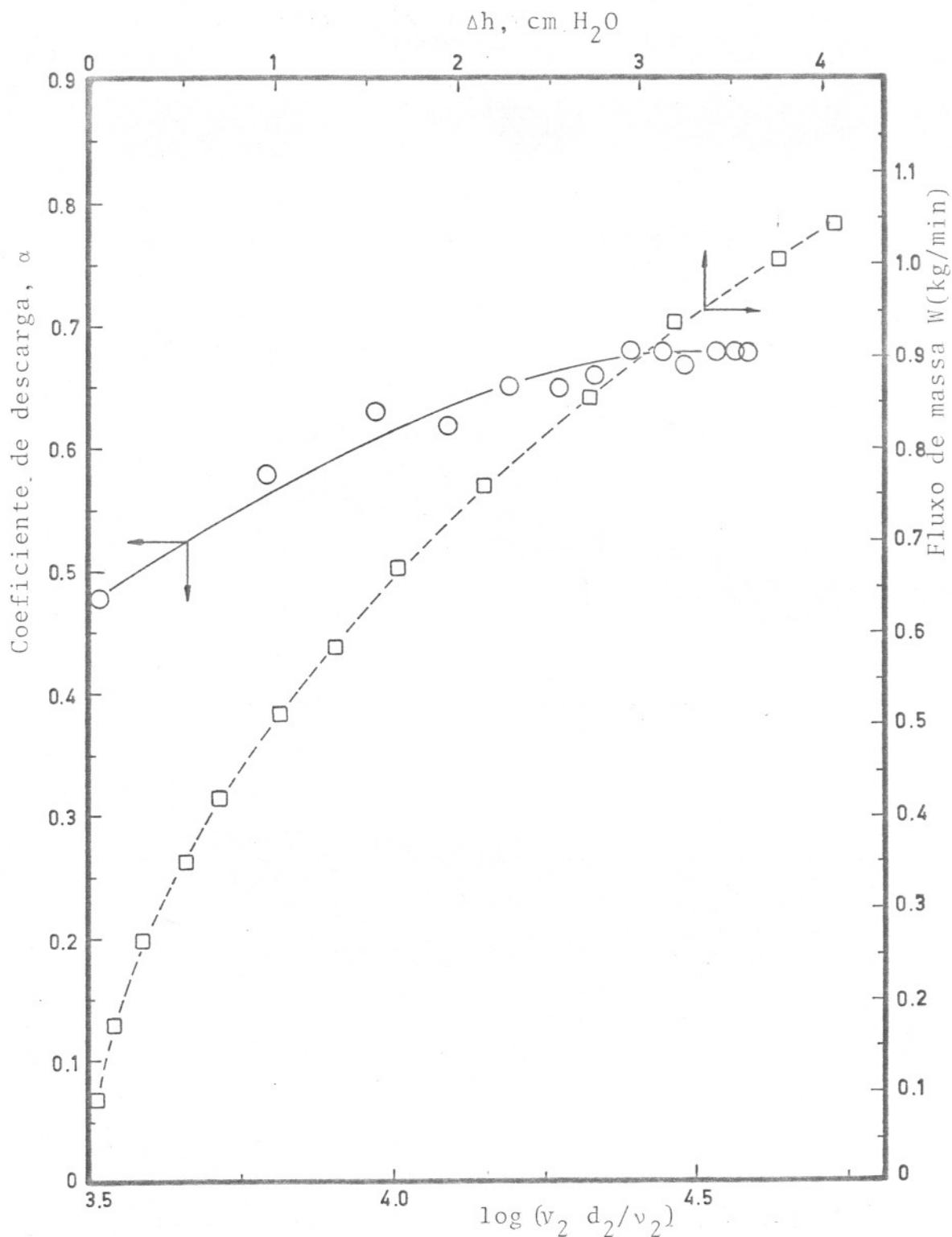


Figura A-2 . Coeficiente de descarga do medidor de orifício e fluxo de massa de ar através da tubulação

APÊNDICE BDeterminação da frequência e amplitude de vibração1 - Frequência

O sistema de transmissão do movimento do motor era composto por uma correia e três polias, uma motora A, diâmetro externo 2 in e duas redutoras, B diâmetro externo 3 in e C diâmetro externo 4 in, estando sempre acoplada apenas uma das últimas.

Os resultados da medida de rotação, utilizando-se um tacômetro (DEUMO) foram:

A	-----	1740 rpm
B	-----	1080 rpm
C	-----	795 rpm

A frequência em Hz é obtida ao dividir por 60 os resultados anteriores.

2 - Amplitude

A amplitude de vibração foi determinada por meio de um acelerometro (Accelerometer, BRUEL & KJAER type 4344), com um sensor tipo piezoresistivo acoplado com cera ao flange do distribuidor de ar do secador. Para eliminar interferência da frequência da rede e reduzir o erro de medida foi conectado um amplificador-condicionador (Conditioning Amplifier, BRUEL & KJAER). O sinal elétrico gerado foi lido por um osciloscópio digital (Oscilloscope

TEKTRONIK). O osciloscópio forneceu a aceleração máxima do sistema igual a média quadrática das ondas multiplicada por um fator de escala.

A amplitude é calculada utilizando a Equação B-1 (VIERCK, 1967):

$$A_{\text{máx}} = A \cdot \omega^2 \quad (\text{B-1})$$

$A_{\text{máx}}$ = aceleração máxima do sistema, mm (rd/s)²

A = Amplitude de vibração, mm

$\omega = 2\pi f$, velocidade angular, rd/s

$f = \frac{1080}{60}$, frequência, Hz

Obs. Ao efetuar as medidas utilizou-se a polia redutora B.

Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela B-1.

Tabela B-1 . Amplitude de vibração de fabricação e efetiva

Excêntrico	Amplitude de Fabricação (mm)	Amplitude Efetiva, A (mm)	Deslocamento Total (mm)	Diferença entre a amplitude efetiva e de fabricação (%)
A	4,1	2,60	5,20	21,2
B	6,8	4,33	8,66	21,5
C	8,3	5,63	11,26	26,3

O desvio constatado entre a amplitude efetiva e de fabricação é devido, provavelmente, a vibração do suporte e bancada utilizados na montagem do sistema e características de deformação da mola e da tira de borracha elástica, utilizadas para manter o excêntrico solidário com o pino de transmissão da vibração para o equipamento de secagem.

APÊNDICE C

Umidade de Equilíbrio Cebola - Ar Úmido

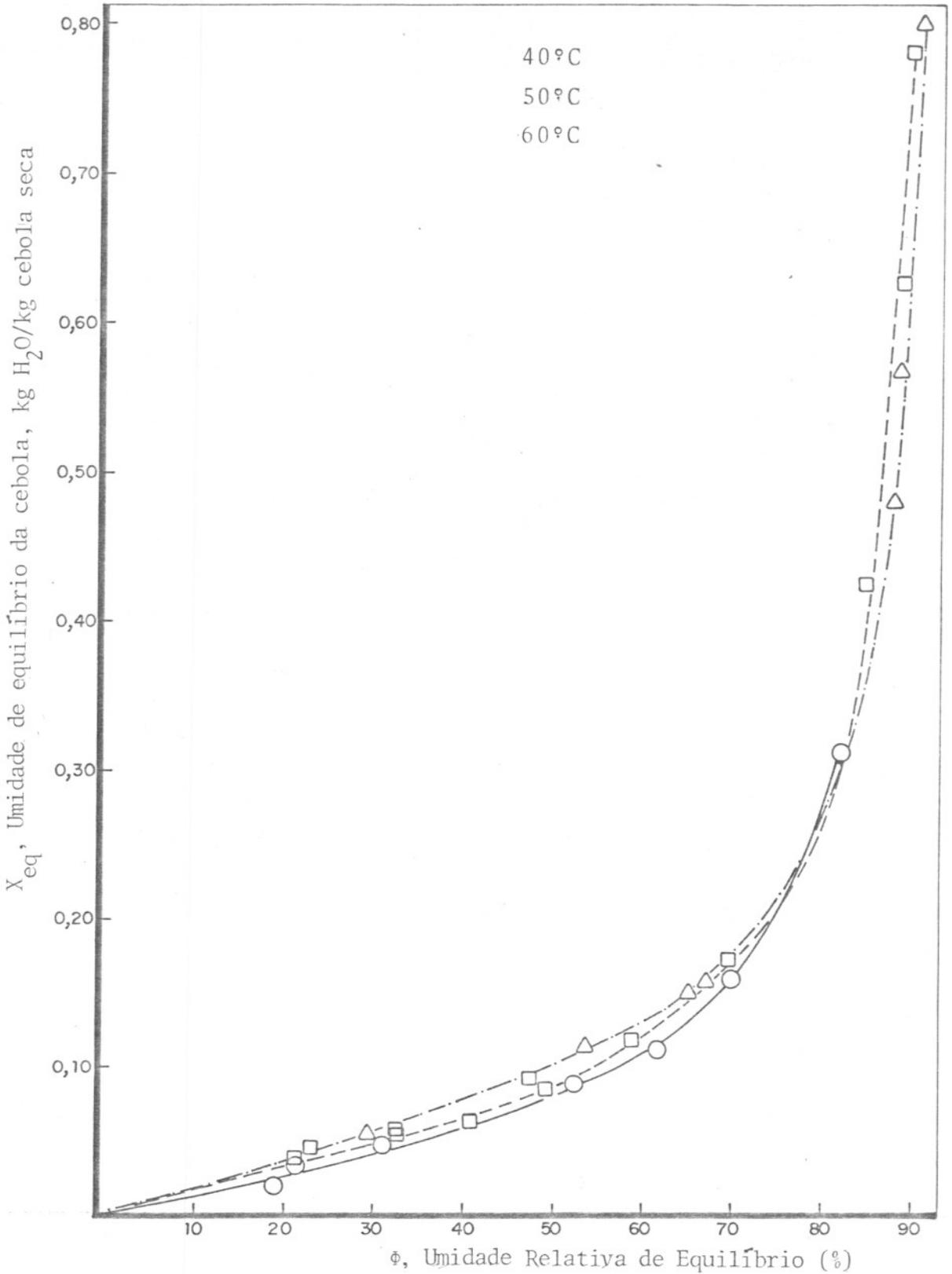


Figura C-1 . Isotermas de umidade de equilíbrio de fatias de cebola, cultivar Baia Periforme. Umidade inicial da cebola 88% (b.u); sólidos solúveis, 11,5 Brix (LOPES, 1982)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - AGUIRRE et al, J. M. Características de secagem das cultivares de cebola mais comercializadas no Brasil. Boletim do Ital, Campinas, 19(2): 133 - 150, 1982.
- 2 - ANÔNIMO, CCC. New facts about packaging and storing dehydrated foods. Food Industries 16: 815 - 817, 1944.
- 3 - ANÔNIMO. New BBA plant offers total onion flavour product. Food Trade Review. 51(6): 290 - 291, 1981 a.
- 4 - ANÔNIMO. The onion story. Food Processing Industry. 50(6) : 22 - 23, 1981 b.
- 5 - BRUIN S & LUYBEN, K. Drying of food materials: A review on recent developments. Advances in Drying. Ed. A.S. Mujumdar, Hemisphere Publishing, New York, vol 1, 1980.
- 6 - BUFFINGTON, D. E. et al. Artificial curing and storage of Florida onions. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 782 - 788, 1981.
- 7 - CARPI, G. Prove di essiccazione di ortoggi con flusso d'aria in aspirazione. Industria conserve. 52(3): 215 - 220, 1977.
- 8 - CHAIB, B. A. & GARRUTI, R. S. Manual de laboratório - análise sensorial. UNICAMP-FEAA, 1974. 53 p.
- 9 - DANIELSEN, S & HOVMAND, S. Drying of granulated product in a vibrated fluid bed. Drying 80. Ed. A. S. Mujumdar,

Hemisphere Publishing Co., NY. 1: 194 - 199, 1980.

- 10- DAVIDSON, J. F. & HARRISON, D. Fluidization. London. Academic Press - 1971, 847 p.
- 11- DIN. Normas para medidores de vazão do tipo orifício (Tradução VIEIRA, R.C.C.). USP-SC . 1965.
- 12- FITO, P. J. et al. Secado de salvado de arroz en lecho vibrofluidizado. I. Estudio de la fluidización. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos. 15(2): 220 - 226, 1975.
- 13- FITO, P. J. et al. Secado de salvado de arroz en lecho vibrofluidizado. III. Período de velocidade de secado decreciente. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos. 17 (1): 140 - 147, 1977.
- 14- FOUST, A. S. et al. Princípios das operações unitárias. 2. ed. Rio de Janeiro, Guanabara, 1982. 670 p.
- 15- GARCIA, J. L. M. et al. Comportamento das variedades de cebola de maior comercialização do Brasil quanto ao armazenamento. Coletânea do Ital, Campinas, 8: 27 - 53, 1977.
- 16- GOWDA, S. J. & GUPTA, C. P. Design and development of a cabinet dehydrator based on dehydration characteristics of onions. 1º Int. Congress on Engineering & Food. Session 13. Processes and Processing Equipment. Boston, 127. 1976.
- 17- GUPTA, R. & MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds - a review. Drying

80. Ed. A. S. MUJUMDAR, Hemisphere Publishing, New York, 1: 141 - 150, 1980.
- 18- IEA - Instituto de Economia Agrícola. Prognóstico, São Paulo, 1982.
- 19- International organization for standardization. Dehydrated Onion-Specfication. International Standard, ISO 5559, 2313-2319, 1981.
- 20- JOSLYN, M. A. & PETERSON, R. G. Reddening of white onion bulb purees. Agricultural and Food Chemistry. 6(10): 754-764, 1958.
- 21- KAREL, M. et al. Principles of food science, Part II. Physical Principles of Food Preservation. N.Y., DEKKER, 1975. 474 p.
- 22- KUNII, D & LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering. USA, John Wiley, 1969. 534 p.
- 23- LEGAULT, R. R. et al. Retention of quality in dehydrated vegetables through in-package desiccation. Food Technology. 8: 143 - 149, 1954.
- 24- LEITE, R. S. S. L. et al. Estudo econômico para implantação de uma unidade industrial para produção de cebola e pimenta desidratadas. Estudos Econômicos - Alimentos Processados. Ital, Campinas, 15: 1982. 80 p.
- 25- LOPES, C. C. Comunicação Pessoal. UNICAMP-FEAA, 1982.

- 26- MAZZA, G. & LeMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. J. Fd. Technol. 15: 181 - 194, 1980.
- 27- MAZZA, G. & LeMAGUER, M. Volatiles retention during the dehydration of onion (*Allium cepa* L.). Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 12(6): 333 - 337, 1979.
- 28- MAZZA, G. & LeMAGUER, M. Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium cepa* L.). Can. Inst. Food Sci. Technol. J. 11(4): 189 - 193, 1978.
- 29- MELLO, J. D. B. Efeito da vibração mecânica na estrutura de peças fundidas. UNICAMP-FEC - Tese de mestrado, 1978. 128 p.
- 30- McCABE, W. L. & SMITH, J. C. Unit Operations of Chemical Engineering. 3. ed. USA, McGraw-Hill, 1976. 1028 p.
- 31- MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics, heat transfer and drying in vibrated fluid beds. Latin American Heat and Mass Transfer Conference, Argentina. Nov, 1982. 20 p.
- 32- NOYES, R. Dehydration process for convenience foods. Food Processing Review nº 2. N. J., Noyes Development Corporation. 245 - 250, 1969.
- 33- OWER, E. & PANKHURST, R. C. The Measurement of Air Flow. 5.ed. London, Pergamon Press, 1977. 363 p.
- 34- PELEG, Y. et al. Changes in quality of dehydrated kibbled onions during storage. Journal of Food Science. 35: 513-517, 1970.
-

- 35- POTTER, Norman. Food Science. 1. ed. USA, AVI, 1978.
- 36- SANZ, F. J. et al. Secado de salvado de arroz em lecho vibro-fluidizado. II. Estudio de la cinética del secado en el período de velocidad de secado constante. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos. 17(1): 131 - 139, 1977.
- 37- SCHWIMMER, S. et al. Relation between pyruvate content and odor strength of reconstituted onion powder. Food Technology. 18(8): 121 - 124, 1964.
- 38- SHERWOOD, T. K. et al. Mass Transfer: 1. ed. USA, McGraw-Hill, 1975. 677 p.
- 39- SHIMAZU, F. et al. Rehydration in onion as a function of dehydration regime. Journal Food Science. 30: 742-746, 1965.
- 40- SILBERSTEIN; O. et al. Irradiation of onion powder: Effects on taste and aroma characteristics. Journal of Food Science, 44: 971 - 974, 1979.
- 41- SILVA, R. B. et al. Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor. USP-SP. Departamento de Engenharia Mecânica. 1966.
- 42- STRINGHETA, P. C. & BUSO, J. A. Influência das características da matéria prima sobre a qualidade da cebola desidratada. Bol. SBCTA, Campinas, 16(4): 317 - 335, 1982.
- 43- STRUMILLO, C. & PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibro-fluidized beds. Drying 80. Ed. A. S. MUJUMDAR, Hemisphere Publishing, New York, 1: 211 - 226, 1980.

- 44- SUZUKI, K. et al. Characteristics of vibro-fluidized bed for drying of wetted and agglomerated particles. Journal of Chemical Engineering of Japan, 13(6): 495 - 498, 1980 c.
- 45- SUZUKI, K. et al. Drying Characteristics of particles in a constant drying rate period in vibro-fluidized bed. Journal of Chemical Engineering of Japan, 13(2): 117 - 122, 1980 a.
- 46- SUZUKI, K. et al. Some investigations of falling rate period of vibro-fluidized bed drying. Journal of Chemical Engineering of Japan, 13(6): 493 - 495, 1980 b.
- 47- TORREY, M. Dehydration of fruits and vegetables. Food Technology Review n° 13. N. J., Noyes, 160 - 171, 1971.
- 48- TREYBAL, R. E. Mass Transfer Operations. 2. ed. USA, McGraw-Hill. 1968.
- 49- VAN ARSDEL, W. B. et al. Food Dehydration. USA, AVI, 1973.
- 50- VIERCK, R. K. Vibration Analysis. 1. ed. USA, Textbook Company, 1967.