

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

JOSÉ ROBERTO DELALIBERA FINZER

Engenheiro Químico

Orientador

Prof. Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH

DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR
DE LEITO VIBRO-JORRADO

Parcer

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por José Roberto Delalibera Finzer e aprovada pela Comissão Julgadora em 20.03.89

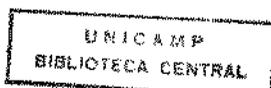
Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de "Doutor" em Engenharia de Alimentos.

06/89

Campinas, 20 de março de 1989.

Imk

Presidente da Banca
Campinas, 1989



Aos meus pais, Mário e Hêlia

À minha esposa, Sirlei

Às minhas filhas, Klívia e Lívia

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH, pela orientação dedicada, segura e organização permanente das idéias durante todas as etapas deste trabalho.

Aos professores componentes da pré-banca pelas valiosas sugestões para a versão final da tese: Dr. ALFREDO DE ALMEIDA VITALI; Dr. CESAR COSTAPINTO SANTANA; Dr^a FLORÊNCIA CECÍLIA MENEGALLI; Dr. JOSÉ TEIXEIRA FREIRE; Dr. KIL JIN PARK e Dr. LEONARDO GOLDSTEIN Jr.

Ao professor Dr. FRANCISCO LÉPORE NETO pela contribuição na interpretação dos resultados de vibração.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

À Universidade Federal de Uberlândia, através do Departamento de Engenharia Química, pela oportunidade concedida.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À ABIA, Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos, pelas cópias deste trabalho.

À JOSÉ HENRIQUE BORGES pela execução do serviço de datilografia.

À todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A configuração do leito vibro-jorrado (LVJ) é semelhante a do leito de jorro convencional, mas a taxa de circulação das partículas é controlada por uma vibração vertical imposta às mesmas. Como consequência, todo o leito escoa em regime de fase densa e a velocidade do ar no leito é definida de acordo com a exigência da secagem.

Um secador com capacidade para 6,5 litros de material foi concebido e desenvolvido neste trabalho. Ele consiste em uma câmara cilíndrica com fundo cônico (diâmetro 145 mm, altura 390 mm), com opção de fixação de um tubo interno central, e equipado com uma base perfurada móvel, que vibra a amplitudes definidas (2, 3, 4 e 5 mm) e frequências na faixa de 0 a 18 Hz.

Ensaio indicaram que o escoamento interno das partículas seguia o modelo pistonado com baixo grau de dispersão e que a taxa de circulação das mesmas tornava-se máxima sob condições de ressonância.

O secador de LVJ foi ensaiado com dois materiais de elasticidade diferentes: cubos de batata e grãos de soja. Estes experimentos definiram os parâmetros geométricos e as condições de vibração mais favoráveis em termos de perda de pressão, taxa de circulação das partículas e cinética de secagem. Foram feitas comparações com sistemas não vibrados.

A soja também foi ensaiada no secador LVJ equipado com um aquecedor elétrico de forma cilíndrica (50 mm DI), imerso no leito (aquecimento indireto).

Uma análise do consumo de energia total do secador de LVJ com e sem aquecimento indireto, comprovou a maior eficiência do mesmo, comparado com um secador de leito estático.

Foram desenvolvidos modelos específicos visando simular a cinética de secagem através de curvas características. Estes modelos correlacionaram com sucesso, os resultados de secagem da batata e da soja.

Este trabalho foi complementado com uma formulação de mudança de escala, baseado em correlações provenientes de um balanço de tensões no leito.

ABSTRACT

The configuration of the vibro-spouted bed dryer (VSB) resembles that of a conventional spouted bed, but the rate of circulation of the particles is controlled by a vertical vibration imposed to them. As a consequence all the bed flows in a dense phase regime and the air velocity inside the bed is defined according to drying requirements alone.

A 6,5 liters capacity dryer was conceived and developed in this work. It consists of a cylindrical chamber with conical bottom (diameter 145 mm, height 390 mm), with optional fixation of a central draft tube, equipped with a perforated movable base, that vibrated at defined amplitudes (2, 3, 4 and 5 mm) and frequency ranging from 0 to 18 Hz.

Tests indicated that the internal flow of the particles follows a plug-flow model with low degree of dispersion and the rate of circulation passes through maxima at resonance conditions.

The VSB dryer was tested with two materials of different elasticity: potato cubes and soya beans. These experiments defined the most favorable geometrical and vibration conditions in terms of pressure loss, rate of circulation of the particles, and drying kinetics. Comparisons with non-vibrating systems were made.

Soya beans were also dried in a VSB dryer equipped with a

cylindrical electrical heater (50 mm ID), immersed inside the bed (indirect heating).

Analysis of the total energy consumption in the VSB dryer, with and without indirect heating, pointed out its higher efficiency, compared to static bed dryer.

Specific models were developed in order to simulate the drying kinetic through characteristics curves. These models correlated the drying results for potatoes and soya with success.

This work was complemented with a scale-up formulation, based on correlations derived from tension balances inside the bed.

INDICE

	página
I , INTRODUÇÃO.....	1
II , COMPORTAMENTO DE LEITOS PARTICULADOS AGITADOS POR UM GÁS E POR EFEITOS VIBRACIONAIS.....	5
A . INTRODUÇÃO.....	5
B . FLUIDIZAÇÃO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	5
B-1 . Perda de pressão no leito e regimes de escoamento..	5
B-2 . Classificação das partículas.....	7
C . LEITO DE JORRO.....	10
C-1 . Introdução.....	10
C-2 . Velocidade do ar no interior do leito de jorro.....	13
C-3 . Taxa de escoamento e velocidade dos sólidos no leito de jorro.....	15
C-4 . Perda de pressão no leito de jorro.....	18
C-5 . Transferência de calor em leito de jorro.....	21
Introdução.....	21
Transferência de calor, gás-leito.....	21
Transferência de calor, leito de jorro-parede.....	24
Transferência de calor, leito-aquecedor submerso...	28
C-6 . Secagem em leito de jorro.....	32
C-7 . Projeto de secadores em leito de jorro.....	34

C-8 . Outras aplicações do leito de jorro.....	35
C-9 . Modificações do leito de jorro convencional..	36
D . LEITOS AGITADOS SOB INFLUÊNCIA VIBRACIONAL.....	39
D-1 . Introdução.....	39
D-2 . Descrição do movimento do leito.....	44
D-3 . Perda de pressão em leitos submetidos à vibra ção.....	47
D-4 . Velocidade incipiente de vibro-fluidização...	50
D-5 . Mistura no leito e tempo de residência das partículas.....	53
D-6 . Influência da vibração no escoamento de sólidos.....	54
D-7 . Transferência de calor em leitos agitados sob vibração.....	57
Transferência de calor, gás-partículas.....	57
Transferência de calor leito-aquecedor submerso....	59
D-8 . Secagem em leito vibratório.....	65
E . LEITO VIBRO-JORRADO.....	67
E-1 . Introdução.....	67
E-2 . Mecanismo de transmissão de quantidade de mo- vimento.....	70
III . DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO.....	74
A . INTRODUÇÃO.....	74

B . DESENHO E CONSTRUÇÃO DO SECADOR DE LEITO VIBRO- JORRADO.....	78
C . TÉCNICAS EXPERIMENTAIS.....	85
C-1 . Ensaio para estudar o movimento dos sólidos no leito.....	85
C-2 . Preparo da matéria prima.....	86
D . OPERAÇÃO DO SECADOR.....	87
 IV , EFEITO DA VIBRAÇÃO DO SUPORTE DO LEITO NA DINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO.....	 90
A . INTRODUÇÃO.....	90
B . TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	90
C . COMPORTAMENTO DAS PARTÍCULAS NO LVJ.....	92
D . PERDA DE PRESSÃO E TAXA DE CIRCULAÇÃO DAS PARTÍ- CULAS.....	98
E . EFEITO DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO TEMPO DE <u>RE</u> SIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS.....	104
F . EFEITO DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO NO MOVIMENTO DO SISTEMA.....	106
 V , SECAGEM DE CUBOS DE BATATA.....	 113
A . INTRODUÇÃO.....	113
B . MECANISMOS DE SECAGEM.....	115
C . INFLUÊNCIA DO DESENHO DA CÂMARA DE SECAGEM.....	117

D . UNIFORMIDADE DE TEMPERATURA E DE UMIDADE NO LEI TO VIBRO-JORRADO.....	119
E . CONTRAÇÃO DOS CUBOS DE BATATA.....	123
F . VERIFICAÇÃO DO MODELO DA SECAGEM UNIFORME.....	124
G . EFEITO DA VIBRAÇÃO NA CINÉTICA DE SECAGEM.....	129
H . CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM.....	135
H-1 . Modelo de Fornell.....	135
H-2 . Aplicabilidade do modelo de Fornell.....	138
H-3 . Resultados e discussão.....	142
I . OPERAÇÃO DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO COM TUBO CENTRAL.....	148
J . AUMENTO DA CARGA DE CUBOS DE BATATA OPERANDO EM LVJ SEM TUBO CENTRAL.....	153
VI . SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA COM AQUECIMENTO INDIRETO EM LEITO VIBRO-JORRADO.....	155
A . SECADORES COM AQUECIMENTO INDIRETO DO LEITO....	155
B . TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO.....	156
C . A SOJA E SUA SECAGEM.....	159
D . ENSAIOS DE SECAGEM EM LVJ COM AQUECIMENTO INDI- RETO.....	161
D-1 . Secagem de soja com 30% de umidade inicial...	161
D-2 . Secagem com aquecimento indireto de soja com 16% de umidade inicial.....	169

E . OPERAÇÃO DO SECADOR DE LVJ COM AQUECIMENTO SI- MULTÂNEO DO LEITO DE SECAGEM, DIRETO E INDIRETO....	172
F . ENERGIA CONSUMIDA NA OPERAÇÃO EM LVJ E LE.....	172
F-1 . Energia de deslocamento do ar de secagem.....	174
F-2 . Energia de aquecimento do ar de secagem.....	175
F-3 . Energia vibracional.....	176
F-4 . Energia elétrica dissipada.....	179
F-5 . Energia total consumida na secagem em LE e LVJ.....	179
G . SIMULAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM EM LVJ.....	186
VII . PARÂMETROS DE PROJETO.....	194
A . COM RELAÇÃO A OPÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO TUBO INTER NO CENTRAL.....	194
B . COM RELAÇÃO AS DIMENSÕES DO SECADOR DE LEITO VI BRO-JORRADO.....	195
C . COM RELAÇÃO A SELEÇÃO DA FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO.....	197
D . COM RELAÇÃO A UTILIZAÇÃO DE AQUECIMENTO DIRETO OU INDIRETO DO LEITO DE SECAGEM.....	198
E . COM RELAÇÃO AS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS SÓLIDOS.....	199
F . COM RELAÇÃO A ESTUDOS INICIAIS DE MUDANÇA DE ES CALA.....	200
F-1 . Introdução.....	200

F-2 . Equações da mecânica de materiais granulares	201
F-3 . Ampliação do secador de leite vibro-jorrado.	208
F-4 . Frequência e amplitude de vibração no protó- tipo.....	208
F-5 . Tempo de residência e vazão volumétrica de esferas de vidro no protótipo.....	210
VIII . CONCLUSÕES.....	211
A . COM RELAÇÃO A DINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO.	211
B . COM RELAÇÃO A SECAGEM COM AQUECIMENTO DIRETO DE CUBOS DE BATATA.....	213
C . COM RELAÇÃO A SECAGEM COM AQUECIMENTO INDIRETO DE GRÃOS DE SOJA.....	214
APÊNDICES	
A . DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DA MISTURA SATURADA AR-VAPOR DE ÁGUA.....	216
B . DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PSICROMÉTRICOS DO AR DE SECAGEM.....	224
C . UMIDADES DE EQUILÍBRIO DE CUBOS DE BATATA.....	231
D . DETERMINAÇÃO DA ENTALPIA ESPECÍFICA DO AR ÚMI- DO.....	232
E . DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA.....	236
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	238

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

A	amplitude de vibração	mm
A, A _o	áreas superficiais de cubos de batata	m ²
A _w	área da parede da coluna	m ²
B _{aa}	segundo coeficiente virial para o ar seco	
B _{ww}	segundo coeficiente virial para o vapor de água	
B _{aw}	segundo coeficiente virial cruzado, interação entre uma molécula de ar com uma de água	
B _m	segundo coeficiente virial para a mistura ar-água	
c _p	calor específico de soja	J/kg K
C _{aaa}	terceiro coeficiente virial para o ar seco	
C _{www}	terceiro coeficiente virial para o vapor de água	
C _{aaw}	terceiro coeficiente virial cruzado, interação entre duas moléculas de ar com uma de água	
C _{aww}	terceiro coeficiente virial cruzado, interação entre uma molécula de ar com duas de água	
D _{AB}	difusividade da água no ar	m ² / s
D _c	diâmetro da seção cilíndrica do secador	m
D _i	diâmetro do tubo alimentador de gás	m
d _i	diâmetro do tubo interno central	m
d _p	diâmetro de uma partícula	mm
E	energia consumida no secador	J
E	coeficiente de dispersão (Eq. II-12)	cm ² / s
E(t)	= d F(t)/dt	
f	frequência de vibração	Hertz

f	fator de correção da não idealidade da mistura vapor de água-ar	
F_a	força atuante sobre uma partícula devido ao atrito com o gás	N
F_i	força de inércia	N
F_m	força externa da mola	N
$F(t)$	fração em peso do material que permanece no equipamento em um intervalo de tempo $\leq t$	kg/kg
F_v	força atuante sobre uma partícula devido a vibração	N
F_y	componente vertical da força resultante do seguidor atuando sobre o camo	N
g	aceleração da gravidade	m/s ²
h	coeficiente convectivo de transferência de calor (Eq. V-9)	W/m ² K
\bar{h}	entalpia molar do ar e da água	J/kmol
h_{ef}	coeficiente global efetivo de transferência de calor (Eq. VI-1)	W/m ² K
$(h_{ef})_m$	coeficiente global efetivo médio de transferência de calor (Eq. VI-2)	W/m ² K
h_f	coeficiente de transferência de calor leite-aquecedor submerso	W/m ² K
h_f	perda de energia devido ao atrito do ar (Eq. VI-3)	mca
h_{fv}	coeficiente de transferência de calor leite vibrado-aquecedor submerso (Eq. II-15)	W/m ² K
h_p	coeficiente convectivo de transferência de calor, gas-partícula	W/m ² K
h_w	coeficiente de transferência de calor, leite-parede	W/m ² K

H	altura total do leito	m
H _c	altura da seção cilíndrica do leito de jorro	m
ΔH	entalpia requerida na evaporação de cada kg de água	J/kg
I	intensidade de corrente elétrica	A
k	constante da lei de Henry (Eq. A-3)	atm/fracção molar
k _G	coeficiente de transferência de massa	$\frac{\text{kmol}}{\text{h m}^2 (\text{kgf/cm}^2)}$
L	distância do tubo interno ao pistão vibratório no LVJ	m
ℓ	dimensão de comprimento representativa de um sistema, (Capítulo VII, Seção B).	m
M _A	massa molecular da água	kg/kmol
m _s	massa de soja no leito de secagem (Eq. VI-15)	kg
m _{H₂O}	massa de água no leito de secagem (Eq. VI-15)	kg
n	taxa de evaporação de água	kg H ₂ O/kg ss h
n ₁	taxa de evaporação da água no primeiro período de secagem	kg H ₂ O/kg ss h
P	pressão total do ar (Eq. B-2)	kgf/cm ²
P	potência consumida pelo soprador	J/s
P	carga sobre o camo (Eq. VI-8)	N
P _v	pressão parcial de vapor de água no ar (Eq. B-1)	kgf/cm ²
P _w	pressão do vapor de água na temperatura de bulbo úmido do ar (Eq. B-1)	kgf/cm ²
Q	vazão de sólidos (Eq. VII-13)	m ³ /s
R	taxa instantânea de secagem (Eq. VI-1)	kg H ₂ O/m ² s
R _c	taxa inicial de secagem (Eq. V-15)	kg H ₂ O/m ² s
r	$\frac{\text{volume do leito}}{\text{area da seção transversal da base do leito submetida à vibração}}$	m
R _m	taxa de secagem global média (Eq. VI-2)	kg H ₂ O/m ² s
t	tempo	s

\bar{t}	tempo de residência médio das partículas no seca- dor	s
t_o	tempo representativo para um sistema	s
T	temperatura do ar	k
T_h	temperatura de uma superfície aquecida	k
T_s	temperatura dos sólidos	k
T_∞	temperatura de ar de secagem, alimentação	k
T_{bu}	temperatura do ar de secagem, bulbo úmido	k
" ΔT "	média das diferenças de temperaturas entre o ar e o sólido no leito (Eq. V-14)	k
u, u_g	velocidade do ar, de operação	m/s
u_{mb}	velocidade crítica do gás, acima da qual não se consegue uma expansão homogênea de leito	m/s
u_{mf}	velocidade mínima de fluidização	m/s
u_{mvf}	velocidade incipiente de vibro-fluidização	m/s
u_{mj}	velocidade mínima de jorro	m/s
u_{mvf}^*	velocidade mínima adimensional de vibro-fluidização	
U_o	velocidade representativa do sistema (Capítulo VII)	m/s
V	diferença de potencial elétrico	v
V	massa de sólidos no leito (Eq. IV-2)	kg
\bar{v}_c	volume molar da fase líquida (Eq. A-3)	m ³ /kmol
\bar{v}	volume molar do ar úmido (Eq. D-4)	m ³ /kmol
v^g	volume de uma fase gasosa (Eq. A-2)	m ³
v^l	volume de uma fase líquida (Eq. A-2)	m ³
x_a	fração molar do ar, na mistura gasosa	kmol/kmol
x_w	fração molar da água na mistura gasosa	kmol/kmol
X	conteúdo de umidade da batata ou da soja	kg/kg
X_o	conteúdo de umidade inicial da batata ou da soja	kg/kg
X_{eq}	conteúdo de umidade do sólido em equilíbrio com o ar de secagem	kg/kg

X^o	$= (X - X_{eq}) / (X_o - X_{eq})$	
w	massa de água eliminada do sólido (Eq. VI-1)	kg
\dot{W}	descarga de sólidos que sai do equipamento (Eq. IV-2)	kg/s
W_s	massa de sólidos secos no leito de secagem	kg
W_p	energia requerida para movimentar o ar no <u>seca</u> dor (Eq. VI-3)	mca
y	movimento de um corpo submetido a um movimento oscilatório	
\ddot{y}	aceleração do seguidor (Eq. VI-7)	mm/s ²
z	distância medida à partir do fundo do leito de jorro	m
z_a	carga estática de ar na entrada do ventilador (Eq. VI-3)	m
z_b	carga estática do ar na saída do ventilador (Eq. VI-3)	m
α	ângulo interno do cone do secador de leito de jorro e de LVJ	grau
γ	peso específico do ar (Eq. VI-3)	N/m ³
Γ	relação entre aceleração vibracional e gravitacional	
ϵ	porosidade do leito	m ³ /m ³
ϵ_o	porosidade do leito em um estado padrão	m ³ /m ³
ϵ_{mf}	porosidade mínima de fluidização	m ³ /m ³
μ_w	potencial químico da água (Eq. A-1)	J/kg
μ	viscosidade dinâmica do ar	N/m ² .s
ν	viscosidade cinemática do ar	m ² /s
ρ_o	densidade absoluta inicial da matéria prima	kg/m ³
ρ_a	densidade absoluta do ar	kg/m ³

ρ_g	densidade absoluta do gás	kg/m ³
ρ_p	densidade absoluta das partículas	kg/m ³
ρ'	densidade aparente das partículas	kg/m ³
σ	tensão normal ou de cisalhamento no interior de um leito	N/m ²
σ_o	pressão no topo ou no fundo de um leito	N/m ²
τ	período de oscilação (Eq. II-4)	s
ω	frequência angular de vibração	rd/s
ω_o	frequência angular de vibração do suporte vibratório (Eq. VII-14)	rd/s

Grupos adimensionais

Ar	Número de Arquimedes
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A decisão de dirigir a pesquisa atual para o desenvolvimento de um secador que associasse vibração a leito de jorro, amadureceu após a constatação do movimento singular das partículas em um secador de leito vibro-fluidizado (FINZER, 1984; FINZER e KIECKBUSCH, 1983 e 1986 B). A circulação das partículas no vaso assemelhava-se a de um leito de jorro, mas dependia mais da ação vibracional do que do arraste pelo ar de secagem.

Existem diversos tipos de secadores, cada um com aplicabilidades específicas. No processamento de alimentos, a retenção de qualidade do produto constitui o principal critério de seleção. Menos ênfase é dada à otimização energética, sobretudo quando o objetivo é obter produtos homogêneos que apresentam conteúdo de umidade uniforme.

Entre os secadores com partículas agitadas por um gás, em fase densa, os de maior importância industrial são os de leito fluidizado e de jorro. Os dois sistemas apresentam certas peculiaridades e que serão enumeradas a seguir, pois são importantes para o contexto geral deste trabalho (KUNII e LEVENSPIEL, 1962; MATHUR e EPSTEIN, 1974; RIETEMA, 1984). 1) Eles operam apenas com velocidade do ar acima da mínima de fluidização (ou de jorro); 2) O fluxo de gás é governado pela exigência de fluidização ou de formação do jorro e não pela necessidade de transferência de calor ou massa; 3) A existência de uma ampla distribuição de tamanho das partículas dificulta a seleção da velocidade de operação;

4) O movimento rápido das partículas pode conduzir a dispersão do tempo de residência das mesmas; 5) A perda de umidade pelos sólidos no leito de jorro, ocorre principalmente na região anular; 6) Na região central onde situa-se o jorro (de fase diluída), o tempo de residência dos sólidos é uma fração desprezível da média no leito; 7) No leito fluidizado com partículas de diâmetro maior que 1 mm, formam-se bolhas que ascendem no leito, o que representa ineficiência no contato gás-sólido; 8) Para partículas com diâmetro inferior a 1 mm a capacidade máxima de um leito de jorro, geralmente, é inferior a de um leito fluidizado; 9) Para um leito de jorro com geometria fixa, existe uma altura máxima de leito além da qual não ocorre um jorro estável. A velocidade mínima de jorro para este leito pode ser 50% maior que a correspondente à velocidade mínima de fluidização.

O objetivo central do presente trabalho foi desenvolver um sistema que promovesse uma agitação suave e contínua do leito de secagem, operando com ar de secagem à baixa velocidade e sem ação de agitadores mecânicos imersos no leito, que geralmente promovem o desgaste e fratura das partículas.

Em sua essência o secador de leito vibro-jorrado desenvolvido na UNICAMP, consiste na aplicação de vibração vertical ao leito de um secador de jorro convencional, com ou sem tubo central, para desta maneira aperfeiçoar o desempenho deste equipamento. Ele opera satisfatoriamente com velocidade do ar reduzida (abaixo da mínima de jorro e da fluidização). A operação nesta faixa de velocidade é importante em termos de economia energética, nos casos onde a taxa de secagem é controlada pela difusão (normalmente no período de velocidade de secagem decrescente), o que corresponde a números de Biot de mas-

sa elevados. O tempo de residência das partículas nas diversas regiões do equipamento é fixado modificando-se a frequência e a amplitude de vibração. Devido ao movimento suave das partículas a secagem é uniforme em todo o espaço do leito, inclusive no interior do tubo cilíndrico, que nesse equipamento é uma região de fase concentrada, o que representa maior capacidade do mesmo, comparado com o leito fluidizado e de jorro tradicional.

Nas operações em regime de taxa de secagem constante, quando a secagem é controlada pelo coeficiente de transferência de massa por convecção, o secador de leito vibro-jorrado pode operar com velocidade do ar mais elevada e nesses casos os efeitos de agitação mecânica (devido a vibração) e a agitação promovida pelo ar de secagem são combinados. Mesmo nesta situação a velocidade do ar de secagem apresenta-se inferior à mínima de jorro.

No presente trabalho foi dada ênfase especial aos seguintes aspectos:

- A determinação dos parâmetros geométricos e das condições de vibração ótimos, com vistas a melhor agitação do leito de secagem.

- O estudo da dinâmica do leito vibro-jorrado.

- O estudo da influência na secagem, da operação com aquecimento direto e indireto do leito.

- O cálculo da energia consumida na secagem em leito vibro-jorrado e a comparação com o consumo energético da operação em leito estático.

- A aplicação e desenvolvimento de modelos matemáticos com vistas à simulação da cinética de secagem. Foi elaborado um modelo para a secagem de grãos de soja, com aquecimento indireto do leito, por intermédio de um dissipador de calor imerso no mes-

mo.

- Ao estudo que fornece subsídios para realização da mudança de escala do secador de leite vibro-jorrado.

A denominação "vibro-jorrado" resultou de uma analogia com "vibro-fluidizado". Convém ressaltar que somente ao final da execução da parte experimental do presente trabalho, encontrou-se referência ao leite vibro-jorrado na literatura. Trata-se de um trabalho de tese de doutorado realizado na Hungria em 1975, citado em RÁTKAI (1986) e em RÁTKAI e TOROS (1986). O conteúdo do trabalho é de análise preponderantemente teórica sobre o equipamento, sem nenhuma menção à secagem.

Acredita-se portanto que a presente pesquisa constitui-se no trabalho mais abrangente sobre o assunto, sendo a primeira vez que se aplica um sistema vibrado à secagem em leite de jorro.

CAPÍTULO II

COMPORTAMENTO DE LEITOS PARTICULADOS AGITADOS POR UM GAS E POR EFEITOS VIBRACIONAIS

A. INTRODUÇÃO

Neste capítulo tenciona-se fundamentar os conceitos e conhecimentos básicos utilizados no desenvolvimento do secador. Ele restringe-se a aspectos relativos a vibração aplicadas à secagem, uma vez que os mecanismos de secagem (migração de água) tendem a ser mais intuitivos ao engenheiro de alimentos. A apresentação da secagem como processamento de alimentos acompanha separadamente o capítulo correspondente (Capítulo V, batata e Capítulo VI, soja).

Os leitos vibro-jorrados tem um comportamento distinto dos observados no leito fluidizado e de jorro. Para melhor compreensão, acompanhando inclusive a sequência de desenvolvimento, faz-se um breve relato da fluidização na Seção B. Em seguida na Seção C, é apresentada uma revisão mais profunda dos leitos de jorro, salientando-se aspectos de transferência de calor, para então nas Seções C e D, conjugar a vibração a esses processo.

B . FLUIDIZAÇÃO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

B-1 , PERDA DE PRESSÃO NO LEITO E REGIMES DE ESCOAMENTO

Quando fluidos percolam no sentido ascendente leitos de seção transversal constante, contendo pequenas partículas sólidas de tamanho uniforme, o comportamento do sistema depende da velocidade do fluido. À baixas velocidades do ar, as partículas permane

com estacionárias, a porosidade do leito não modifica-se e a perda de pressão do fluido varia diretamente com a velocidade superficial do gás, como indica a Figura II-1. Com o aumento da velocidade do gás, o leito começa a expandir-se e sua porosidade aumenta de ϵ para ϵ_{mf} (porosidade do leito na condição menos compacta possível, existindo ainda o contato entre as partículas). Esta condição corresponde a u_{mf} (velocidade mínima de fluidização das partículas pelo gás), e a uma perda de pressão máxima. Para velocidades do gás maiores que u_{mf} , o comportamento do leito assemelha-se ao de 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 grandeza diferente, como observa-se na Figura II-1 (KUNII e LEVENSPIEL, 1969).

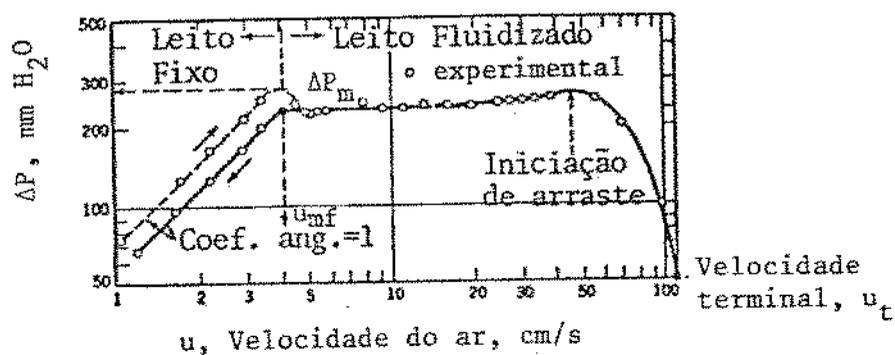


Figura II-1. Perda de pressão em função da velocidade do ar em um leito formado por partículas de areia (KUNII e LEVENSPIEL, 1969).

Na Figura II-2, esquematiza-se os principais regimes de escoamento bifásico observados ao ultrapassar-se a velocidade mínima de fluidização (GRACE, 1986).

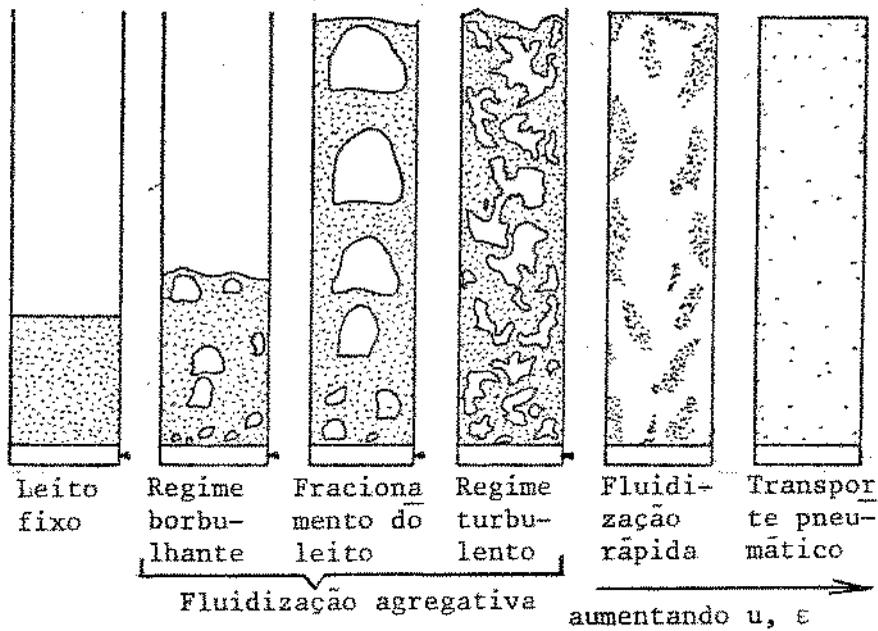


Figura II-2 . Regimes de escoamento resultantes da percolação de gás em um leito de material particulado (GRACE, 1986).

B-2 . CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Baseado no comportamento dos sólidos quando fluidizados, as partículas foram classificadas nos tipos denominados A, B, C e D, mostrados na Figura II-3 (GELDART et alii, 1984). Na figura, a ordenada representa a diferença entre as densidades da partícula e do gás, e a abscissa o diâmetro da partícula.

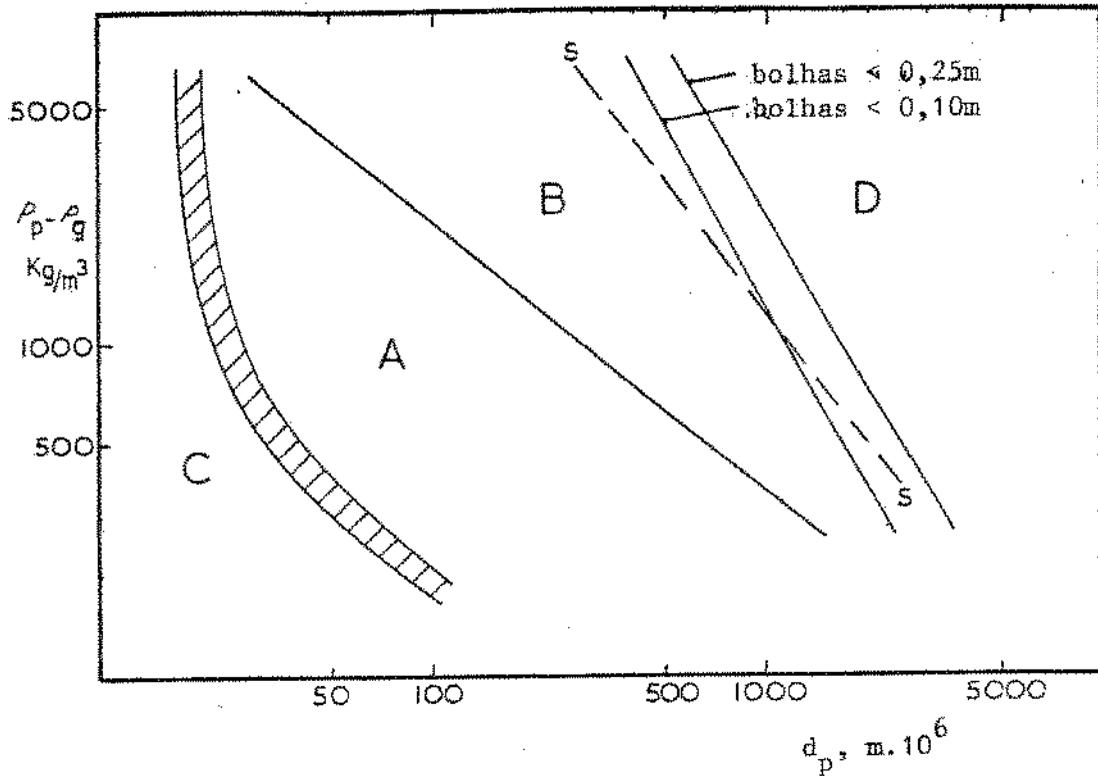


Figura II-3 . Diagrama de classificação de partículas (GELDART et alii, 1984).

Para um leito formado por partículas de classe A, aumentando-se a velocidade do ar ligeiramente acima da mínima de fluidização, ocorre uma expansão homogênea do leito. Aumentos sucessivos na velocidade do ar, conduzem a outra velocidade crítica, u_{mb} , acima da qual não é mais possível uma expansão homogênea. Uma fração do ar percola o leito em forma de bolhas, que deslocam-se ra-

pidamente para o topo do leito. As partículas do tipo B, geralmente são maiores que as anteriores e não fluidizam homogeneamente. Logo que u_{mf} é excedida, surgem bolhas que ascendem para o topo do leito. As partículas classificadas como C são menores que as do tipo A e são caracterizadas por forte coesão entre si. Logo que a velocidade mínima de fluidização é excedida, surgem fraturas quase horizontais no leito, conectadas por canais verticais irregulares, através dos quais escoam o excesso de ar. Raramente observa-se agitação no leito. As partículas D são maiores que as anteriores e em muitos casos apresentam diâmetros superiores a 1 mm. Operando sob alta velocidade do ar, o excesso de gás desloca-se no leito segundo uma sequência de bolhas que coalescem facilmente em canais verticais. No topo do leito as partículas são lançadas para o alto, em forma de um jorro devido ao arraste pelo ar, e retornam ao leito (RIETEMA, 1984). O controle do tamanho das bolhas pode ser efetuado com a instalação de peneiras no interior do leito fluidizado (JOGRA et alii, 1979).

Os equipamentos industriais operam com mais eficácia no caso de leitos formados por partículas com faixa estreita de tamanhos. A Figura II-4, relaciona a dependência da velocidade superficial adimensional do gás, u^* , em função do diâmetro adimensional da partícula, dp^* , para suspensões gás-sólido (GRACE, 1986). A figura limita regiões de operação para sistemas particulados distintos. A região de operação do leito de jorro situa-se à direita superior do gráfico, onde localizam-se as partículas dos tipos B e D, da classificação de Geldart. A figura indica que no processamento de partículas maiores, como no caso de grãos, o leito de jorro pode operar com menor velocidade do ar de secagem do que no leito fluidizado. Isto torna o leito de jorro mais econômico, inclusive porque no leito fluidizado a eficiência de contato gás-sólido é mais reduzida

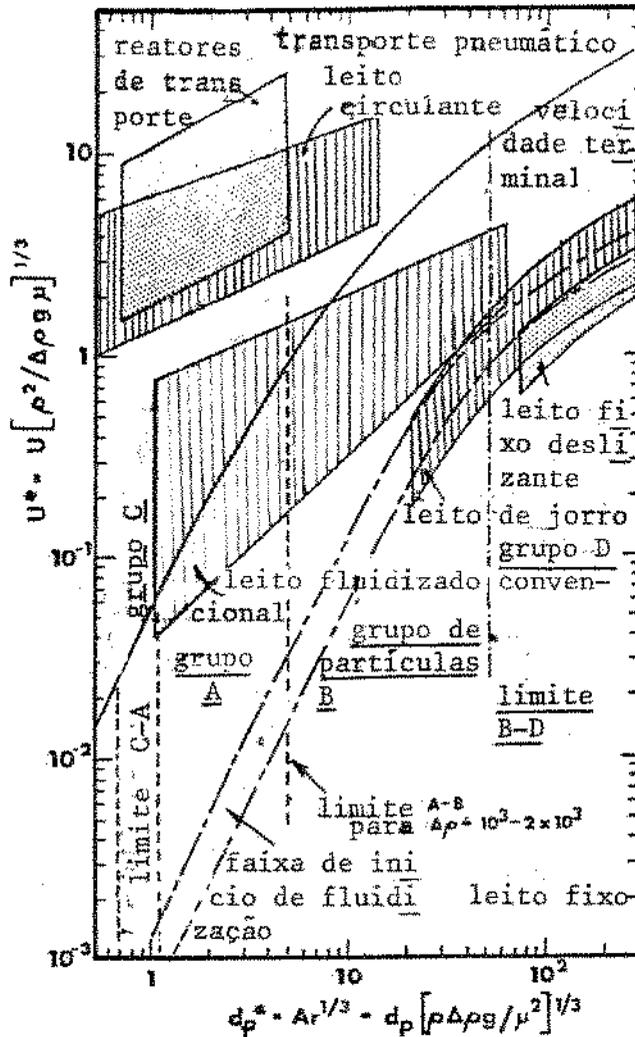


Figura II-4 . Regiões de operação de equipamentos industriais (GRACE, 1986).

devido ao escoamento do gás em forma de bolhas grandes através do leito.

C . LEITO DE JORRO

C-1 . INTRODUÇÃO

A Figura II-5 mostra a configuração clássica de um leito de jorro, que é caracterizado por uma seção superior cilíndrica e uma inferior cônica com o vértice truncado. Um jato de gás escoado pelo vértice do cone e arrasta os sólidos para o topo do leito,

por uma região central denominada jorro. Na superfície livre do leito, devido ao aumento brusco da área da secção transversal disponível ao escoamento do gás, a força resistiva do gás que atua sobre as partículas reduz-se e a trajetória descrita pelos sólidos assemelha-se a uma fonte. As partículas deslocam-se para o espaço anular do leito e escoam progressivamente para o fundo do vaso.

Na Figura II-5 também indica-se a notação a ser usada neste texto, onde z representa a distância medida a partir do fundo do leito, e H a altura total do leito. D_c é o diâmetro da secção ci-

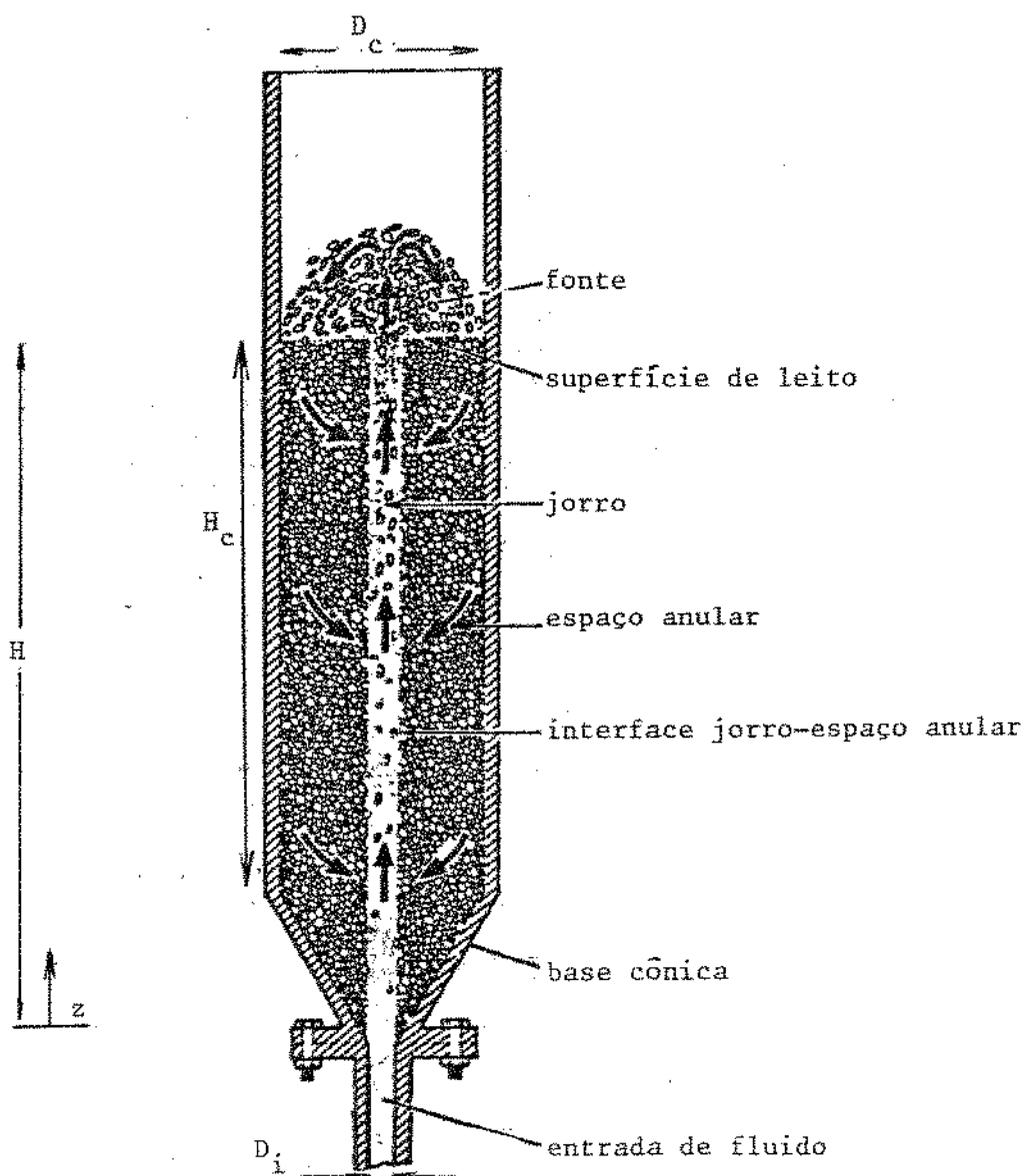


Figura II-5 . Diagrama esquemático de um leito de jorro, com indicação da direção do movimento dos sólidos.

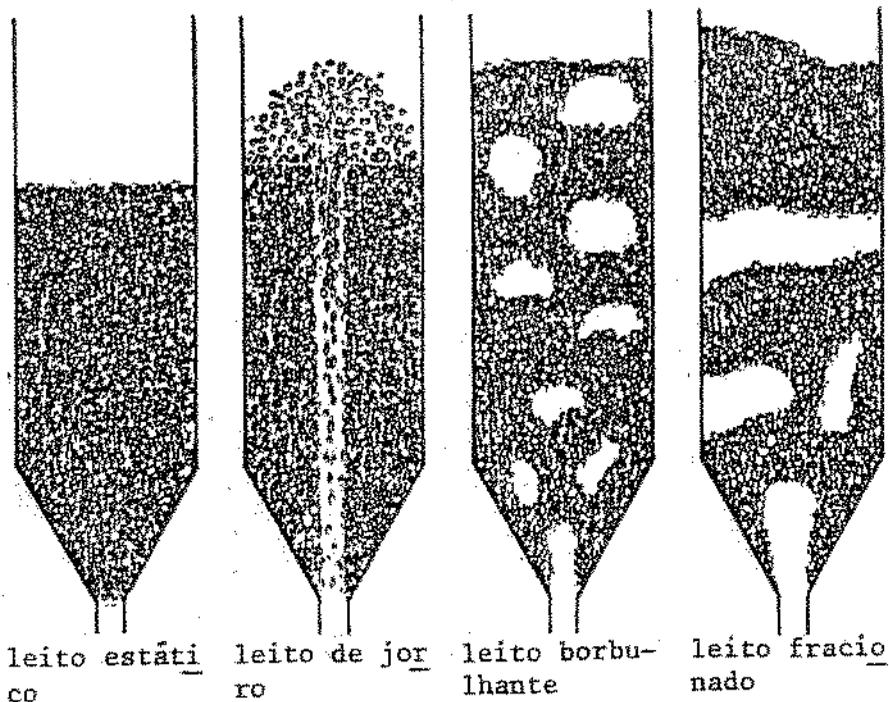


Figura II-6 . Transição de fases com o aumento da vazão do gás

lândrica e D_i o diâmetro do tubo alimentador do gás.

A Figura II-6 ilustra os regimes de escoamento visualmente observados ao aumentar a vazão do ar (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Uma circulação uniforme das partículas em um leito de jorro só é conseguida para diâmetro superior a 1 ou 2 mm (NÉMETH et alii, 1983 A).

Na realidade, a caracterização dos regimes denotados na Figura II-6, depende de parâmetros geométricos, além da vazão do gás. Para uma dada combinação de fluido, sólido e configuração do vaso, as transições entre os regimes podem ser representados por um diagrama, em função da altura do leito e da velocidade do gás. A Figura II-7, constitui uma destas representações. Reduzindo a velocidade do gás, ocorre o colapso do jorro, originando o leito estático. Isto é mostrado, na figura, por uma linha que delimita os dois regimes e que representa a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , para várias alturas do leito.

Abaixo de um valor crítico, da razão entre o diâmetro da

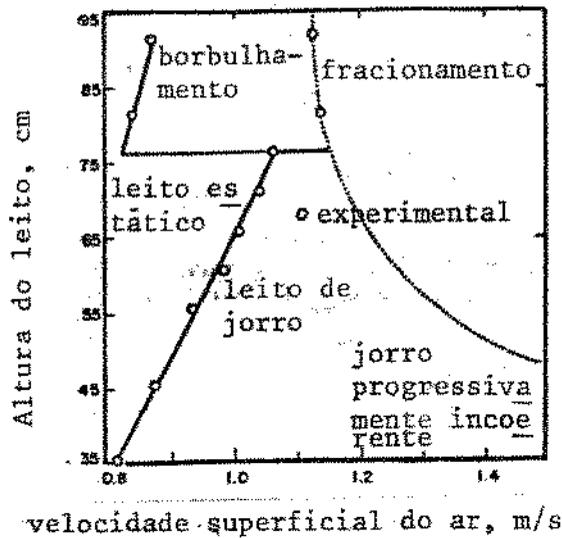


Figura II-7 . Diagrama de fases para grãos de trigo (EPSTEIN e GRACE, 1984)

coluna e o diâmetro do orifício de entrada do gás, não existe o regime de leito de jorro. Nesta situação aumentando a velocidade do gás o leito muda diretamente de estático para o estado de fluidização agregativa (EPSTEIN e GRACE, 1984).

C-2 . VELOCIDADE DO AR NO INTERIOR DO LEITO DE JORRO

A geometria e a distribuição de porosidade no leito de jorro já evidenciam que o gás flui preferencialmente pelo jorro central. Perfis típicos de velocidade radial do ar estão traçados na Figura II-8 (MATHUR, 1971).

A porosidade no leito de jorro é distinta, nas diversas regiões. Na região anular a porosidade se aproxima da mínima de fluidização, ϵ_{mf} , e as partículas formam um leito de consistência frouxa. A região do jorro apresenta uma porosidade variável. Imediatamente acima do orifício de entrada do ar, a porosidade aproxima-se de 100%. As partículas na região de jorro são transportadas em fase diluída e a porosidade da suspensão reduz-se com a al

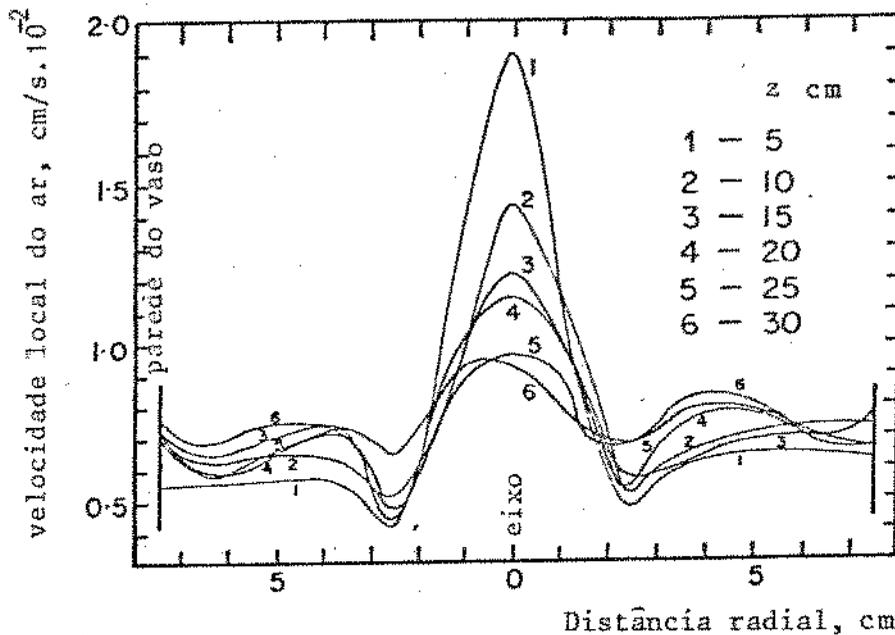


Figura II-8 . Perfis radiais de velocidade do ar em um leito de jorro formado com grãos de trigo de diversas espessuras. Velocidade superficial do ar 105 cm/s (MATHUR, 1971)

tura do leito (MATHUR e EPSTEIN, 1974; EPSTEIN e GRACE, 1984).

As curvas da Figura II-8 mostram que uma substancial fração do gás escoo para o interior do espaço anular nas proximidades da entrada do gás. Esta fração aumenta com a altura do leito. Normalmente a massa de gás que desloca-se pelo espaço anular ultrapassa a metade da vazão total admitida. Em um leito de jorro a vazão de ar é determinada pela dinâmica do leito e não pela necessidade de transferência de calor ou massa (NÉMETH et alii, 1983 B).

Linhas de corrente típicas do espaço anular são indicadas na Figura II-9. A figura indica que novos tubos de corrente são formados a medida que sobe-se no leito, resultantes da parcela do gás que migra do jorro para a região anular (EPSTEIN e GRACE, 1984; ROVERO et alii, 1983).

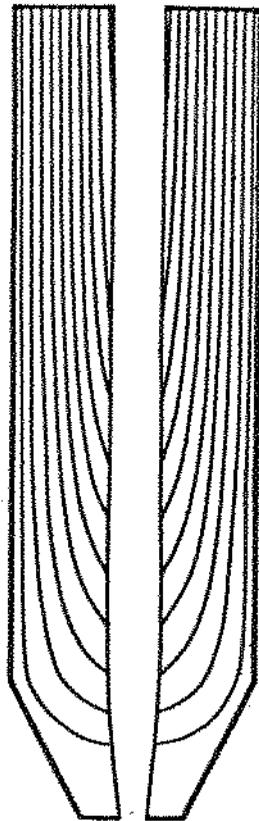


Figura II-9 . Linhas de corrente em um leito de jorro formado por partículas de poliestireno (EPSTEIN e GRACE, 1984)

C-3 . TAXA DE ESCOAMENTO E VELOCIDADE DOS SÓLIDOS NO LEITO DE JORRO

No espaço anular as partículas sólidas movem-se axialmente para baixo e radialmente em direção ao centro até atingirem a região de jorro, conforme esquematizado na Figura II-10 (SULLIVAN et alii, 1987). Como consequência desta progressiva migração das partículas, do espaço anular para o jorro central, a taxa de escoamento dos sólidos, \dot{W} , no espaço anular se reduz com a redução de z . Isto é mostrado na Figura II-11 para duas colunas de diâmetros distintos (EPSTEIN e GRACE, 1984).

As partículas no fundo do espaço anular, apresentam uma

Seção longi-
tudinal de
um leito de
jorro

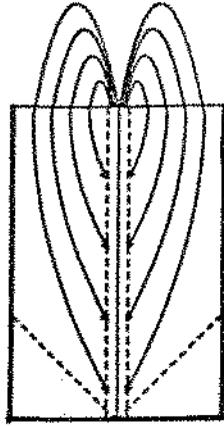


Figura II-10 . Escoamento de sólidos em um leito de jorro (SULLIVAN et alii, 1987)

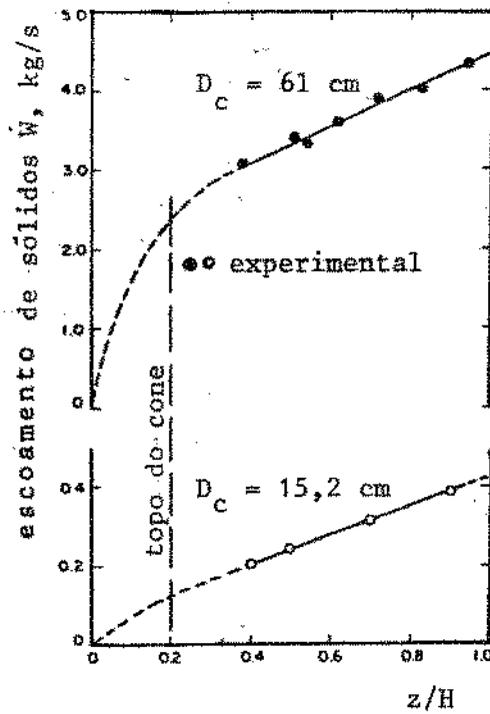


Figura II-11 . Escoamento de sólidos no espaço anular de um leito de jorro em função da altura adimensional do leito (EPSTEIN e GRACE, 1984)

componente vertical de velocidade nula. Quando deslocam-se em direção ao eixo, são aceleradas pela ação do gás, atingem uma velocidade máxima, sendo a seguir desaceleradas até atingir uma velocidade nula no topo da fonte. Segue-se uma inversão do sentido do movimento e as partículas passam a deslocar-se para baixo. A Figura II-12, apresenta a variação na velocidade de grãos de trigo ao longo da altura do jorro. O ponto do topo da fonte, onde a velocidade das partículas é nula, está indicado na figura (EPSTEIN e GRACE, 1984).

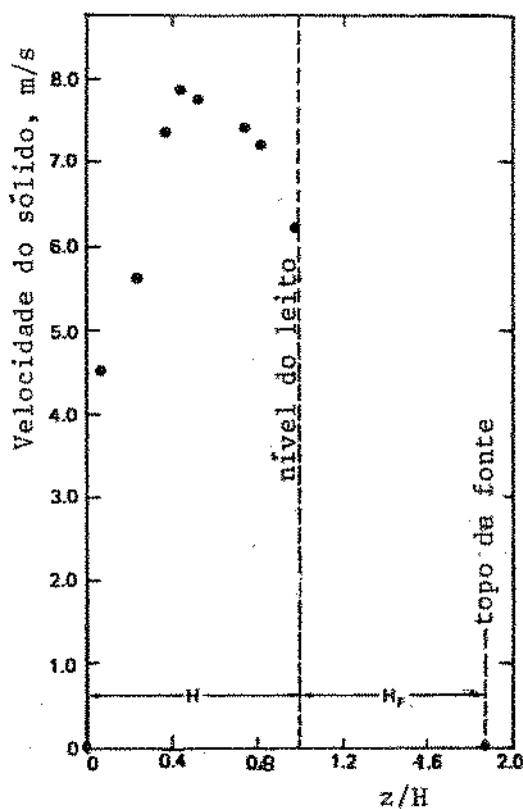


Figura II-12 . Valores experimentais de velocidades de grãos de trigo ao longo do eixo de um leito de jorro (EPSTEIN e GRACE, 1984)

Durante o movimento ascendente, as partículas colidem entre si na região de jorro e contra a parede que delimita o espaço anular. A fase sólida que passa pelo jorro, em alta velocidade, pode desgastar-se por abrasão ou no caso de partículas frágeis, partir-se devido a absorção de energia cinética nos choques com outras partículas. A intensidade do processo de fratura varia de acordo com o tamanho, geometria e conteúdo de umidade das partículas (BEMROSE e BRIDGWATER, 1987 ; RAY et alii, 1987). Quando o leito de jorro é dotado de um tubo central, como será discutido posteriormente, a energia cinética das partículas pode causar erosão na parede interna do tubo, devido à alta velocidade atingida (KONO et alii, 1987).

C-4 . PERDA DE PRESSÃO NO LEITO DE JORRO

O mecanismo de transição de um leito estático a um leito de jorro, pode ser acompanhado usando o gráfico da perda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás, Figura II-13. Observa-se as seguintes etapas: 1) Quando a velocidade do gás é baixa as partículas permanecem estacionárias no leito; 2) A uma certa velocidade do ar ocorre uma compressão das partículas, gerando uma cavidade sem partículas, em forma convexa, exatamente acima da entrada do gás. Apesar da existência da cavidade, a perda de pressão no leito continua a aumentar com o acréscimo da velocidade do ar; 3) Aumentando mais a velocidade do ar, a cavidade aumenta e surge um jorro interno ao leito. A perda de pressão atinge então seu valor máximo ($-\Delta p_m$); 4) Aumentando a velocidade do ar além do ponto máximo, B, o jorro interno torna-se grande comparado com a região de leito estático situado no topo do leito. A perda de pressão decresce ao longo de BC. Quando a condição se aproxima do ponto C, ocorre uma

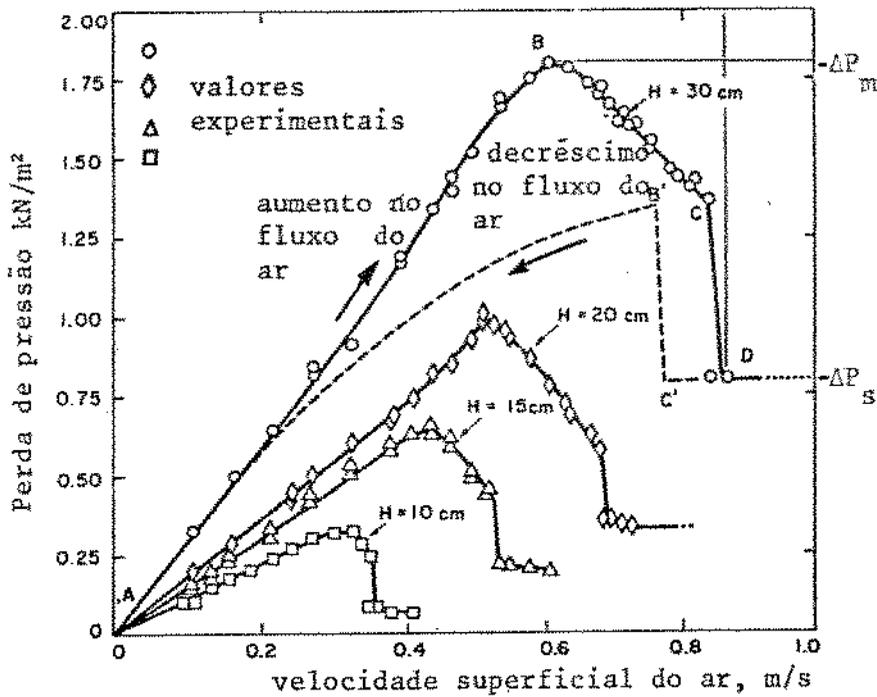


Figura II-13 . Curvas típicas de perda de pressão em função da velocidade superficial do ar, para leitos de diferentes alturas formados por grãos de trigos (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

notável expansão do leito; 5) Com um pequeno acréscimo na velocidade do ar além do ponto C, que é chamado de ponto incipiente de jorro, o jorro interno rompe através da superfície do leito. Entretanto esta é uma condição instável de operação. Quando isto acontece, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno decresce bruscamente, causando uma repentina redução na perda de pressão até o ponto D, e todo leito torna-se móvel, formando-se um jorro uniforme. O ponto D representa o ponto de início de jorro; 6) Com aumentos adicionais da vazão de gás, o excesso do mesmo escoava através da região de jorro, que constitui o trajeto de menor resistência, causando um aumento na extensão da fonte no topo do leito, sem efeitos significativos na perda de pressão total.

Na prática, a velocidade incipiente de jorro (C) e a velo-

cidade de início de jorro (D), não apresentam reprodutibilidade. Um valor de velocidade mais reprodutível, é a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , obtida reduzindo-se vagarosamente a vazão de gás. O leito permanece no estado de jorro até o ponto, c' , que representa a condição mínima de jorro (MATHUR E EPSTEIN, 1974),

A existência do pico de perda de pressão que antecede a formação do jorro estável, Figura II-13, implica na necessidade de investimento fixo adicional, na instalação do equipamento, pois o soprador deve ser dimensionado para atender a esta solicitação de partida (NÉMETH et alii, 1983 B).

A Figura II-14 apresenta curvas de pressão manométrica, tomadas na proximidade da parede do vaso, no espaço anular, em função da posição, para leitos de diferentes alturas. Observa-se que o valor máximo da pressão situa-se nas proximidades do fundo da seção cônica (ROVERO et alii, 1983).

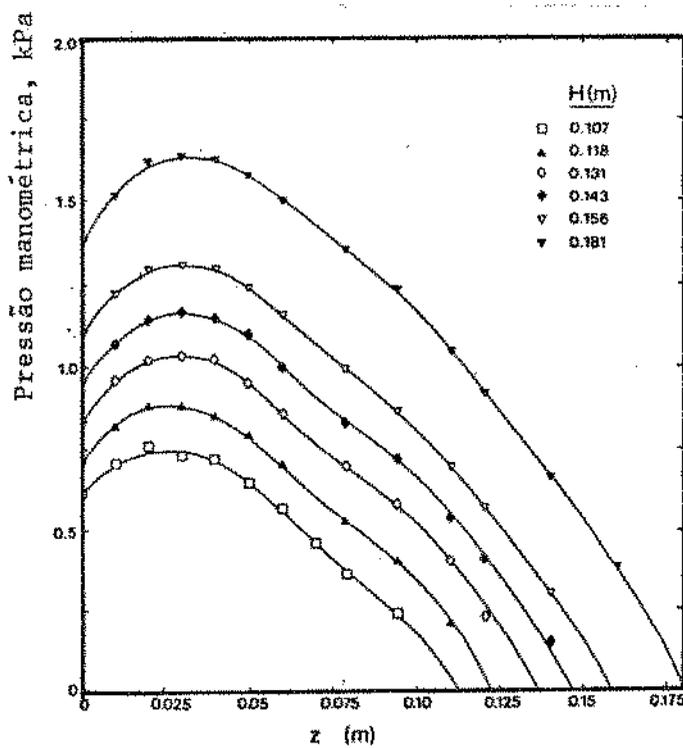


Figura II-14 . Perfis de pressão manométrica (ROVERO et alii, 1983)

C-5 . TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO DE JORRO

INTRODUÇÃO

Na operação em leito de jorro, devido à dinâmica peculiar do sistema fluido-partículas, os mecanismos de transferência de calor são complexos e envolvem os contatos entre gás-partículas, leito-parede e eventualmente leito-aquecedor submerso. A interação gás-partículas pode envolver transferência de calor simultânea com transferência de massa ou acompanhada de reação química (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O aquecimento indireto (aquecedor submerso-leito) é o método geralmente utilizado para fornecer calor aos leitos de fase densa, como por exemplo nos leitos vibrados, discutidos no fim deste capítulo.

Nos secadores em leito de jorro, a velocidade superficial média do gás no jorro, é cerca de duas vezes maior que a do espaço anular, enquanto a concentração das partículas é próxima da quinta parte daquela observada nesse espaço. O comportamento dos sólidos no espaço anular é o de um leito empacotado móvel. No jorro, devido a alta velocidade do gás, o tempo de permanência das partículas é uma fração insignificante daquele observado no espaço anular. Como o regime de escoamento dos sólidos no espaço anular é em fase densa, esta é a localização ideal para instalar trocadores de calor (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

TRANSFERÊNCIA DE CALOR, GÁS-LEITO

Quando um fluido aquecido, escoar em torno de uma partícula individual, um coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula é bem caracterizado. Entretanto nos leitos formados

por um grande número de partículas, geralmente existem muitas influências que afetam o coeficiente de transferência de calor, como por exemplo, possibilidades de ocorrer recirculação do gás, contato partícula-partícula e a ocorrência de tubulência. Portanto nestas situações um coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partículas caracteriza na realidade uma interação gás-leito.

Em leito de jorro é difícil determinar adequadamente, a grandeza do coeficiente convectivo de transferência de calor gás-leito, devido a dificuldade de medir um potencial de temperatura apropriado e uma área de troca de calor correspondente. Geralmente a temperatura dos sólidos não varia apreciavelmente ao longo do leito, mas o gás sofre maior alteração de temperatura, principalmente no fundo do leito. Isto é indicado na Figura II-15, pelos perfis de temperatura em um leito de jorro, formado por grãos de trigo, no qual ar é alimentado à temperatura de 70 °C. O estado estacionário é alcançado pela manutenção de alimentação e descarga contínua dos sólidos. Na figura as ordenadas representam a razão entre a temperatura local pela do ar alimentado e as abscissas indicam adimensionais de posições radiais e verticais. A figura destaca ainda que para uma mesma posição vertical, a queda de temperatura é mais intensa em pontos radialmente afastados do eixo do jorro. Isto é devido a redução da velocidade do gás e ao aumento da concentração das partículas (MATHUR, 1971).

Com a finalidade de estabelecer-se a ordem de grandeza dos coeficientes convectivos de transferência de calor, no jorro e no espaço anular, pode-se utilizar correlações da literatura tais como as indicadas a seguir (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Para a região de jorro que apresenta número de Reynolds e porosidade altos, aplica-se a Equação II-1.

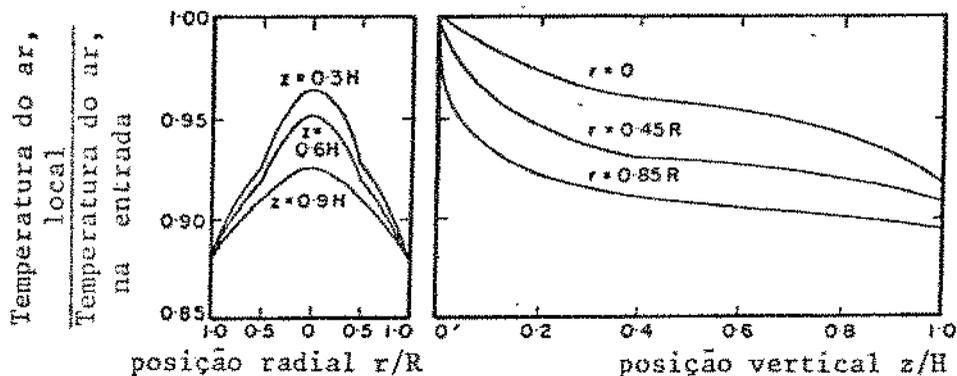


Figura II-15 . Perfis típicos de temperatura em um leito de jorro percolado por ar quente. A coluna usada possui 9,2 cm de diâmetro, sendo 12-15 cm a altura do leito (MATHUR, 1971).

$$Nu = A + B Pr^{1/3} Re_p^{0,55} \quad (Re_p > 1000) \quad (II-1)$$

onde: $A = 2/[1 - (1 - \epsilon)^{1/3}]$; $B = 2/3\epsilon$

No espaço anular, que tem comportamento de leito empacotado, vale:

$$Nu = 0,42 + 0,35 Re_p^{0,8} \quad (Re_p < 100) \quad (II-2)$$

Nestas equações Re_p é o número de Reynolds referido ao diâmetro das partículas, calculado usando-se a velocidade média do gás na região.

Para um leito de jorro formado por partículas esféricas e percolado por ar sob condições usuais de operação as Equações (II-1 e II-2), conduzem aos valores; $h_p = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$, para a região de jorro e $h_p = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o espaço anular.

Estes valores dão idéia da ordem de grandeza de h_p , pois variações consideráveis podem ocorrer dependendo do material que constitui o leito, da velocidade do ar e dos parâmetros geométricos de leito (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Apesar do pequeno valor do coeficiente convectivo de transferência de calor no espaço anular, o mesmo exerce uma influência notável no processo de transferência de calor em leite de jorro. A função do espaço anular é importante, porém indireta. Isto é melhor elucidado considerando o histórico da temperatura de uma partícula que circula no leite, mantendo contato com gás quente em escoamento. Enquanto o tempo de permanência de uma partícula no jorro é uma fração insignificante daquele observado no espaço anular, o período anterior transcorre sob influência de um coeficiente convectivo de transferência de calor alto e de um potencial de temperatura igualmente alto. Portanto as partículas ao abandonarem o jorro encontram-se aquecidas e transferem calor para o leite empacotado móvel do espaço anular. Esta transferência de calor ocorre parcialmente por contato para as partículas dos arredores e por convecção para o gás que escoava através do espaço anular. O gás, no espaço anular, transfere considerável quantidade de calor para as partículas nas imediações do fundo de leite e no topo do leite encontra-se a uma menor temperatura, o que propicia uma absorção de calor das partículas aquecidas. Apesar de ocorrer apenas um pequeno aumento na temperatura das partículas, durante cada passagem através do jorro, a transmissão de calor por este mecanismo chega a ser considerável, pelo fato da operação em leite de jorro propiciar uma alta taxa de circulação dos sólidos (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

TRANSFERÊNCIA DE CALOR, LEITO DE JORRO - PAREDE

A parede externa do secador por se manter em contato permanente com o leite móvel, localizado no espaço anular e que escoava progressivamente para o fundo do vaso, pode ser utilizada para su

prir ou retirar calor do leito.

Ao longo da parede do leito de jorro é identificada uma camada limite térmica, conforme a ilustração da Figura II-16, e a espessura dessa camada exerce grande influência na transferência de calor. Na figura são indicados também perfis de temperatura ao longo da altura do leito.

Por ter uma área de transferência de calor fácil de ser medida, um coeficiente de transferência de calor, h_w , pode ser definido usando a lei de esfriamento de Newton, expressa pela

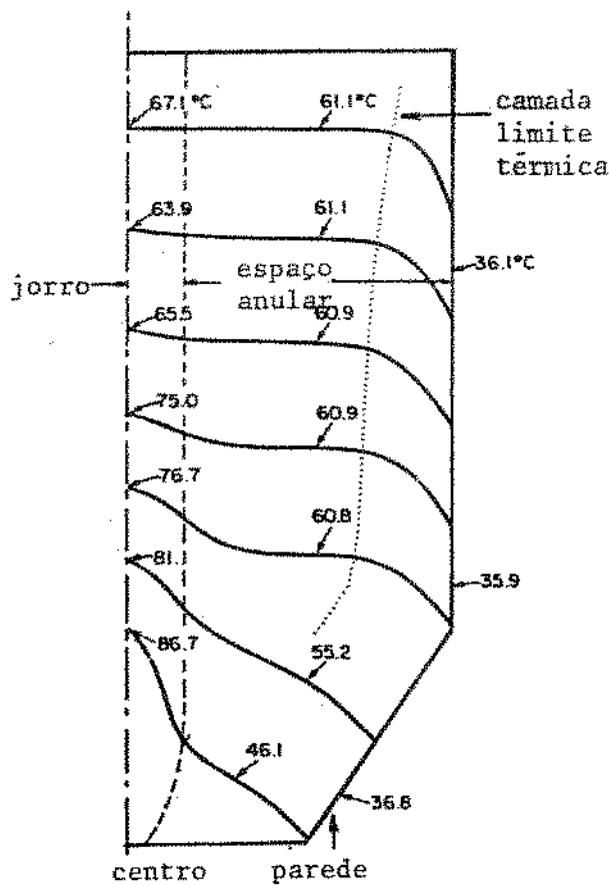


Figura II-16 . Perfis de temperatura local do gás no interior de um leito de jorro, estando a parede resfriada e aspecto da camada limite térmica (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

Equação (II-3).

$$q = h_w A_w \Delta T \quad (II-3)$$

Onde: q é a taxa de transferência de calor através da área da parede da coluna, A_w ; $\Delta T = T_w - T_b$, sendo T_w e T_b as temperaturas representativas da parede e do leito. Para leitos de jorro percolados por ar e constituídos por partículas com diâmetro entre 1 e 4 mm, o coeficiente de transferência de calor varia entre 50 - 140 W/m²K (MATHUR, 1971; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A transição de leito fixo para a condição de leito de jorro é acompanhada de um aumento considerável em h_w . Isto é bem destacado na Figura II-17, onde também verifica-se que operando com velocidade mássica de ar, um pouco superior a mínima de jorro, h_w permanece constante ou decresce ligeiramente.

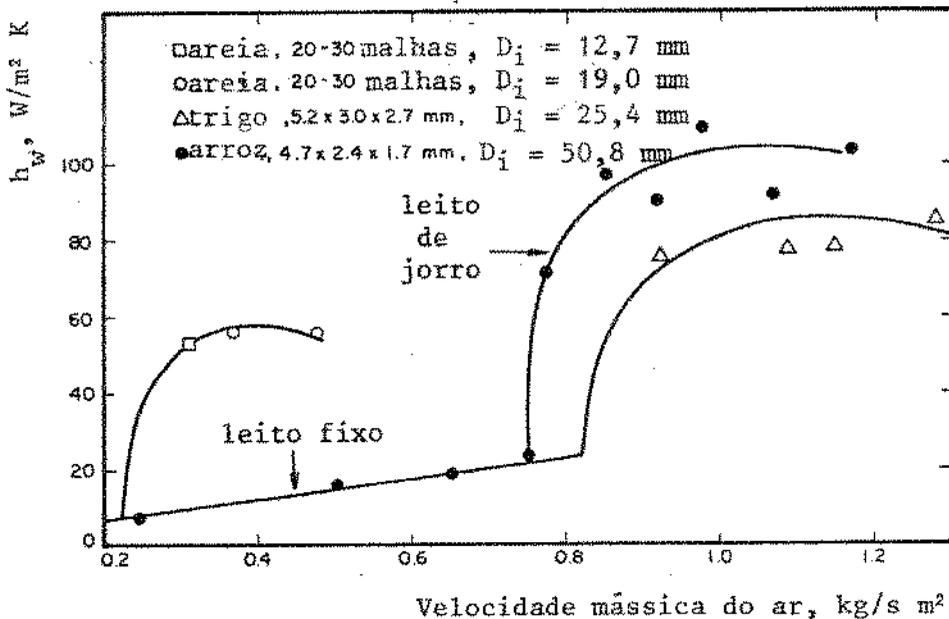


Figura II-17 . Efeito da velocidade mássica do ar sobre o coeficiente de transferência de calor parede-leito. $D_c = 30,5$ cm e $H = 122$ cm (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

O coeficiente de troca de calor, h_w , aumenta com o acréscimo do diâmetro das partículas do leito e este comportamento é oposto ao observado na fluidização de partículas conforme levantamento apresentado na Figura II-18. A diferença entre os dois coeficientes reduz-se ao aumentar o diâmetro das partículas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

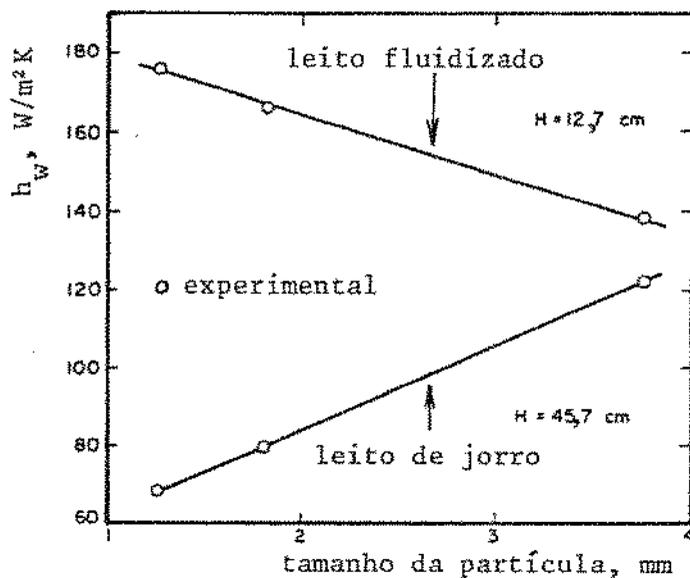


Figura II-18 . Efeito do tamanho da partícula sobre o coeficiente de transferência de calor leito-parede. Material, trigo; $D_c = 15,2$ cm (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O coeficiente médio de troca de calor de todo o leito, decresce com o aumento da altura do leito. Para um leito de altura fixa, o valor localizado de h_w aumenta da base para o topo do leito; esta última situação está indicada na Figura II-19.

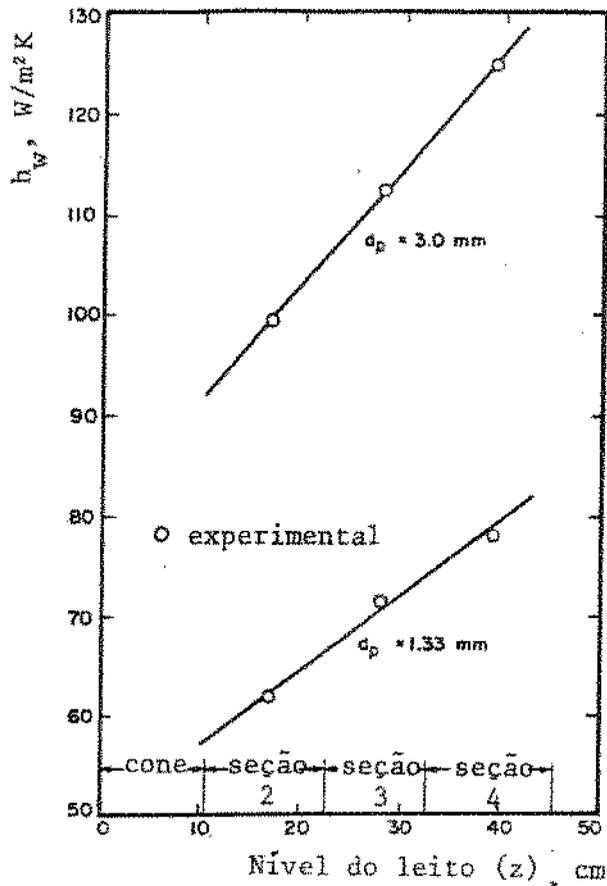


Figura II-19 . Coeficiente local de transferência de calor. Material, poliestireno; $D_c = 15,2$ cm; $H = 45,7$ cm. A jaqueta de aquecimento é constituída por três seções individuais (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

TRANSFERÊNCIA DE CALOR, LEITO - AQUECEDOR SUBMERSO

A transferência de calor, quando se usa um elemento sólido de aquecimento, submerso no leito, é complexa e ocorre por diversos mecanismos. Uma parte transfere-se por convecção forçada ao gás, devido ao escoamento do mesmo em torno do objeto submerso. Em paralelo ocorre a condução de calor para as partículas durante seu período de contato com o objeto. As partes aquecidas (gás e partículas) em seguida se misturam com o resto do leito, completando a transferência de calor. O mecanismo que prevalece em cada uma dessas fases depende da localização do aquecedor, da velocidade

de do gás e da porosidade do leito. Na região de jorro a grandeza dos coeficientes de troca de calor é da ordem da de leitos fluidizados, enquanto que no espaço anular os coeficientes são superiores aos quantificados junto às paredes do leito de jorro.

Os resultados das pesquisas não foram ainda bem correlacionados, mas algumas tendências já se definem. Um resumo é apresentado aqui para servir de base para compreender a transferência de calor em leitos de fase densa vibrados (Seção D-7) e explicar alguns resultados encontrados nos experimentos.

A Figura II-20 destaca perfis radiais do coeficiente de troca de calor, leito-aquecedor submerso, h_f . O aquecedor é constituído por um cilindro posicionado verticalmente em leitos formados por partículas de sílica gel. As curvas indicam que o valor

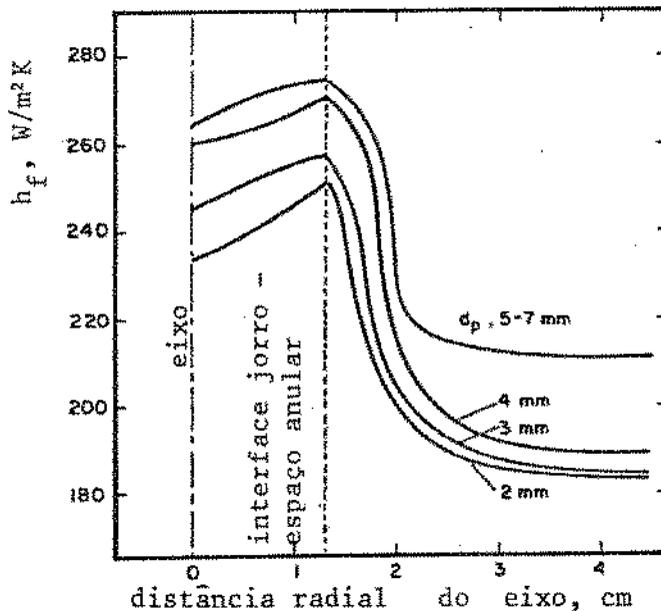


Figura II-20 . Perfis radiais de coeficientes de transferência de calor leito-aquecedor submerso, relativos a seção superior do leito. Um aquecedor cilíndrico foi colocado verticalmente no interior de leitos de sílica gel. Parâmetros geométricos: $D_c = 9,4$ cm; $H = 10$ cm; $D_i = 1,5$ cm (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

máximo de h_f , corresponde a interface jorro - espaço anular e o valor deste coeficiente reduz-se apreciavelmente no interior do espaço anular, quando além de 1 cm da interface. No eixo do jorro, h_f é cerca de 4 - 8% menor do que na interface. O valor mais elevado de h_f na interface é devido provavelmente ao aumento da concentração das partículas nesta região, que deve contrabalançar o efeito negativo da redução na velocidade do gás e das partículas na mesma região. A figura indica ainda que, assim como aconteceu no contato com a parede do leito de jorro, h_f aumenta com o tamanho das partículas.

Na operação em leito fluidizado, o coeficiente de troca de calor, leito - aquecedor submerso, também aumenta com o tamanho das partículas, desde que a velocidade de operação do ar de secagem, u , não seja excessivamente maior que a velocidade mínima de fluidização das partículas, u_{mf} . Isto é indicado na Figura II-21 em função do adimensional, u/u_{mf} . Segundo esta ten-

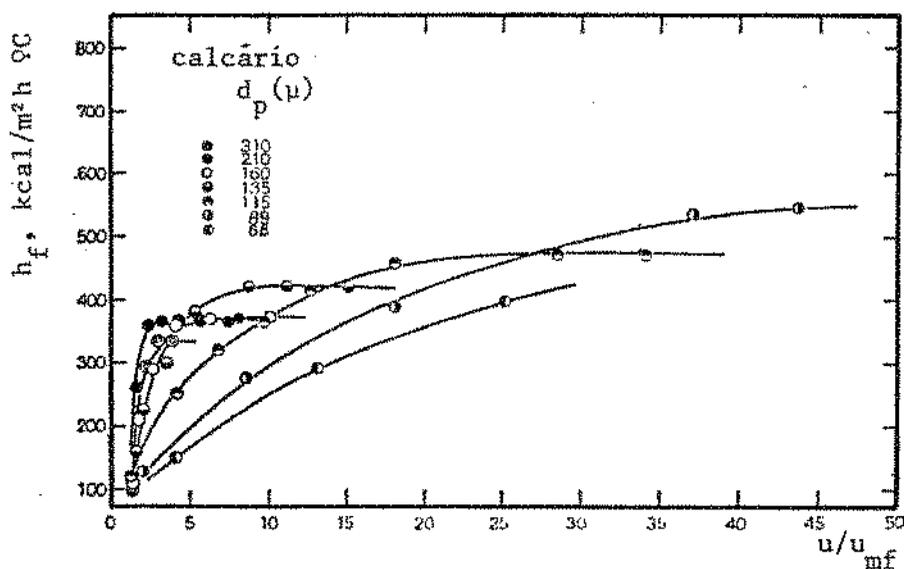


Figura II-21. Coeficiente de transferência de calor, leito fluidizado - aquecedor esférico com diâmetro de 12 mm (YAMAZAKI e JIMBO, 1970).

dência, a dissipação de calor para um meio formado por partículas grandes pode ser significativa, mesmo operando com baixa velocidade de do ar de secagem (YAMAZAKI e JIMBO, 1970).

A agitação do leito é a principal responsável pela boa transferência de calor já que experiências com um leito de partículas estático, mostraram que com o aumento do diâmetro das partículas ocorre redução da temperatura das mesmas nas proximidades da parede aquecida (CHENG, 1986).

Em um leito de jorro, o coeficiente de troca de calor, no interior do jorro, reduz-se a medida que o aquecedor distancia-se do fundo do leito, conforme pode ser visto na Figura II-22. É provável que o efeito da redução da velocidade do ar predomina sobre o aumento da concentração das partículas. A mesma figura indica

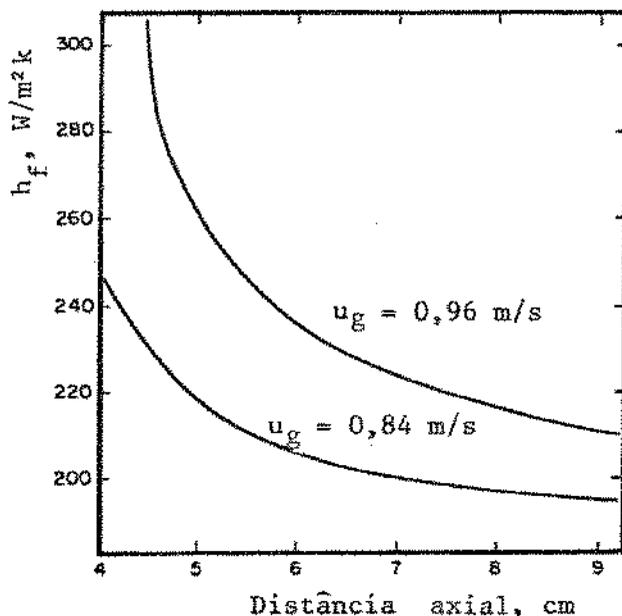


Figura II-22 . Perfis verticais de coeficientes de transferência de calor leito-aquecedor, medidos com um cilindro aquecido, imerso na posição horizontal no interior do jorro. Parâmetros geométricos: $D_c = 9,4$ cm ; $H = 10$ cm ; $D_i = 1,5$ cm. Material: sílica gel com $d_p = 2$ mm (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

que o coeficiente de troca de calor aumenta com o acréscimo da velocidade do ar (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

C-6 , SECAGEM EM LEITO DE JORRO

A secagem de produtos agrícolas e de grânulos de fertilizantes para os quais o leito de jorro tem se mostrado muito popular transcorre frequentemente no período de taxa de secagem decrescente.

Em termos práticos, a secagem de sólidos no período de taxa de secagem decrescente é controlada pela difusão interna. Teoricamente o critério para o controle interno é tal que para número de Biot de massa alto, a taxa de secagem torna-se dependente a penas do número de Fourier (MATHUR e EPSTEIN, 1974; VANECEK et alii, 1966).

A sequência de etapas de secagem em leito de jorro, e a importância de cada uma delas pode ser deduzida pelos perfis de temperatura do gás e do sólido. A Figura II-23, mostra esses perfis obtidos na secagem contínua de grãos de trigo e indica que a maior parte do calor transferido, do ar de secagem para os grãos, ocorre na base do leito. A temperatura do ar no jorro continua a baixar ao longo do leito, apesar de estar em contato com partículas quentes, provavelmente pelo fato de ocorrer migração de muitas partículas do espaço anular para o jorro.

Na secagem com controle difusional, a maior perda de água ocorre durante o lento escoamento dos sólidos pelo espaço anular e parte do calor consumido na secagem é proveniente do próprio sólido, que foi previamente aquecido na passagem pelo jorro. No espaço anular os sólidos sofrem uma redução na temperatura superior

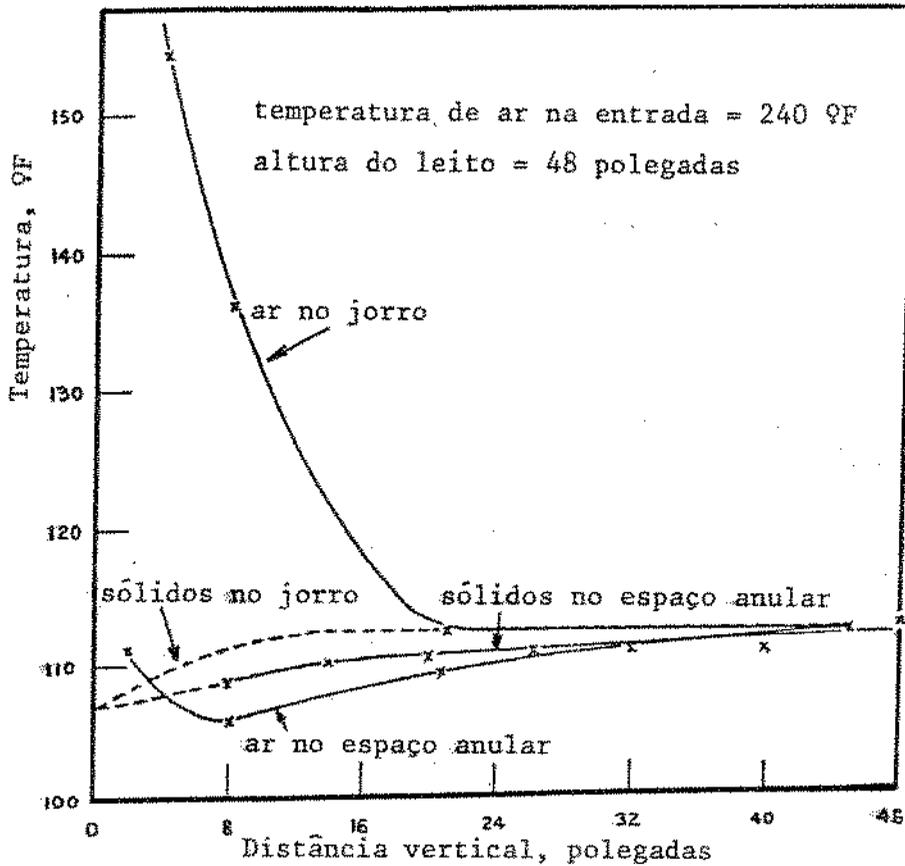


Figura II-23 . Perfis de temperatura do ar e do sólido em um leito de jorro , durante a secagem contínua de grãos de trigo (MATHUR, 1971).

a 89F, desde sua posição no topo até o fundo do leito. Medidas de perfis de umidade no leito confirmam a existência deste mecanismo (MATHUR, 1971 ; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

No secador de leito de jorro as partículas são expostas ao ambiente de jorro, de alta eficiência de troca de calor, por um curto período do ciclo total. Desta maneira, o ar de secagem pode ser admitido à alta temperatura, sem grande risco de deterioração térmica do produto (KHOE e VAN BRAKEL, 1983; VISWANATHAN et alii, 1986).

C-7 , PROJETO DE SECADORES EM LEITO DE JORRO

No secador de leite de jorro, as variáveis geométricas mais importantes de projeto são : D_c (diâmetro da coluna); D_i (diâmetro do orifício de admissão do gás); H_c (altura da seção cilíndrica) e α (ângulo do cone), (veja Figura II-5).

A altura da seção cilíndrica do equipamento depende da altura do leite, não sendo portanto uma variável independente. As outras três variáveis geométricas são independentes.

Normalmente o ângulo do cone de 60° é adequado para a maior parte dos materiais processados em leite de jorro.

Para um dado D_c , em princípio não existe um limite inferior para D_i . Reduzindo D_i , a altura do leite pode ser aumentada, o que é equivalente a aumentar o tempo de residência dos sólidos no secador. Entretanto não é conveniente reduzir D_i abaixo de um valor ótimo, devido aos seguintes motivos: 1) ocorre alta perda de pressão quando um gás escoar à alta velocidade por um orifício de diâmetro reduzido; 2) o tempo de contato entre as partículas e o gás é diminuído, quando o gás escoar em alta velocidade na região de jorro; 3) quando D_i é pequeno, também é pequena a razão entre o fluxo de ar, que escoar no espaço anular, pelo fluxo total alimentado (NÉMETH et alii, 1983 A).

Para projetar um secador de leite de jorro, existem correlações e informações práticas na literatura, que fornecem parâmetros em função de dimensões geométricas do leite e, de propriedades físicas do gás e do sólido, como: 1) a razão D_c/D_i ; 2) a razão D_c/d_p , onde d_p é o diâmetro da partícula; 3) a velocidade mínima de jorro; 4) a altura máxima de leite de jorro; 5) a distribuição do ar no jorro e no espaço anular; 6) a queda de pressão

no leito; 7) coeficiente de troca de calor no leito (MATHUR, 1971 ; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

C-8 . OUTRAS APLICAÇÕES DO LEITO DE JORRO

A técnica de leito de jorro é também amplamente usada para operações como: mistura de sólidos; craqueamento térmico de óleos; combustão e gaseificação de carvão; granulação e revestimento de partículas (MARKOWSKI e KAMINSKI, 1983); (KUCHARSKI e KMIEC, 1983). Entre as aplicações industriais de revestimento em leito de jorro, destaca-se o encapsulamento de grânulos de fertilizantes muito solúveis em água, com recobrimento de baixa permeabilidade. Isto retarda a dissolução do grânulo, permitindo que a planta tenha mais tempo para assimilação (WEISS e MEISEN, 1983).

A secagem de suspensões, soluções e pastas, pode ser efetuada em um leito formado por partículas inertes e que servem de suporte para o material viscoso a ser secado. O produto seco é removido pela abrasão entre os inertes e as paredes do leito de jorro (MARKOWSKI e KAMINSKI, 1983); (MROWIEC e CIESIELCZYK, 1977). Entre as aplicações desta técnica situam-se: secagem de sangue animal (PHAN, 1983; RÊ e FREIRE, 1986); desidratação de purê de banana (HUFENUESSLER e KACHAN, 1986).

A granulação de partículas finas pode ser efetuada em leito de jorro usando duas técnicas: 1) uma corrente gasosa, contendo partículas pequenas suspensas, é forçada a escoar através de um leito de jorro formado por partículas maiores que apresentam a superfície fundida devido ao efeito da temperatura do gás. As partículas menores fixam-se então a superfície aglomerante das partículas maiores; 2) a granulação ocorre em um leito de partículas fi-

nas, tal que parte delas apresentam temperatura de fusão abaixo da temperatura do gás que percola o leito. As partículas com a superfície parcialmente fundidas servem de núcleo para aglomeração dos sólidos (DOLIDOVICH e EFREMTSEV, 1983 A). Granulação de pó de rocha fosfática pode ser realizada em leito de jorro, usando amido de milho como agente auxiliar de fixação das partículas sólidas (PAVARINI e COURY, 1987).

C-9 , MODIFICAÇÕES DO LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

O leito de jorro convencional promove uma boa mistura das partículas. Contudo não é um equipamento adequado para processos contínuos onde a história de uma partícula individual deve ser rigorosamente controlada. O uso de um tubo cilíndrico no interior do leito, atua no sentido de controlar o tempo de residência das partículas.

No leito de jorro modificado com um tubo interno , "draft tube", a interface jorro - espaço anular é substituída pela parede do tubo, Figura II-24, exceto na parte inferior do cone. As partículas são forçadas a um movimento que se aproxima do escoamento pistonado (CLAFLIN e FANE, 1983 e 1984). O gás flui pela região de jorro sem oportunidade de migrar para o espaço anular, com excessão da curta distância situada entre a entrada do gás e a base do tubo. No leito de jorro com tubo interno a perda de pressão é menor que no convencional, a altura do leito pode ser aumentada e a vazão de ar requerida para circular os sólidos reduz-se. O uso do tubo interno torna o equipamento mais flexível, devido a introdução de parâmetros geométricos adicionais (LAW-KWET-CHEONG et alii, 1986; KHOE e VAN BRAKEL, 1983).

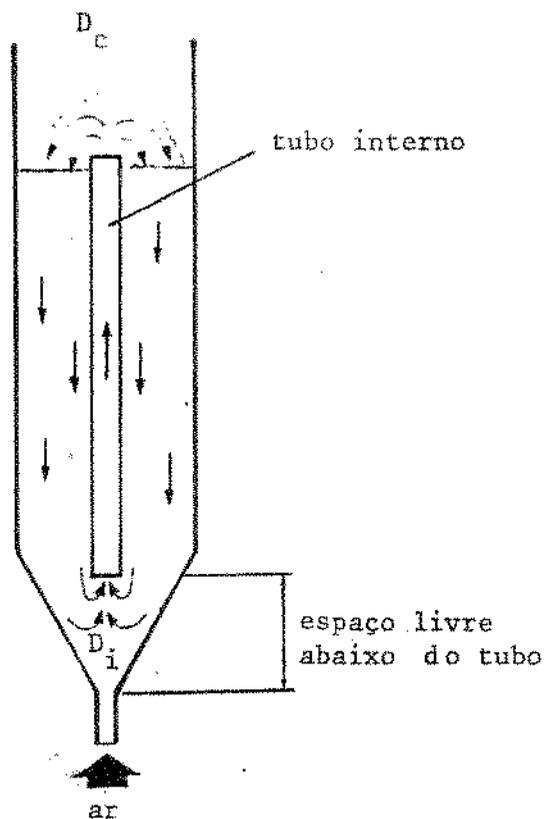


Figura II-24 . Leito de jorro com tubo interno.

Quando o gás é responsável pelo aquecimento do leito ou então é um reagente, o leito de jorro com tubo interno não é recomendável, pois o tubo evita a percolação do gás do jorro pelo espaço anular. Nestes casos pode-se usar um tubo interno poroso, ou com apenas uma secção porosa, que controla a trajetória das partículas mas permite o escoamento radial do gás (CLEAFLIN e FANE, 1983).

A circulação dos sólidos e a distribuição do ar podem também ser melhoradas usando um tubo interno com aberturas retangulares ou trapezoidais localizadas nas proximidades da secção inferior do tubo. Na operação contínua os sólidos são alimentados no espaço anular, em uma posição situada entre duas aberturas, para minimizar a passagem direta de sólidos para o jorro (VISWANATHAN, et alii, 1986).

O aproveitamento da energia interna do gás, que escoar em um leito de jorro, pode ser melhorado reduzindo a relação D_c/D_i (veja Figura II-5), que nos equipamentos convencionais é maior que 4. Esta modificação reduz o volume e a estabilidade do leito no espaço anular. Os perfis de velocidade no leito são uniformizados e o arraste de partículas menores é minimizado (DOLIDOVICH e EFREMTSEV, 1983 B).

O equipamento esquematizado na Figura II-25, elimina a ne-

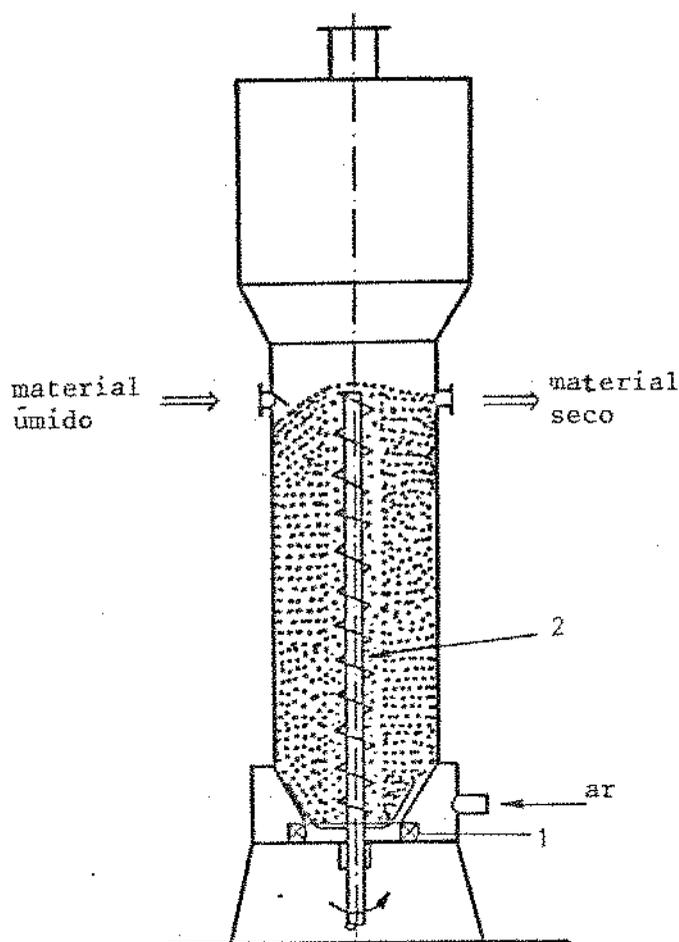


Figura II-25 . Leito de jorro, com alimentação tangencial do ar(1) e com transmissor de rosca interno(2) (PETER et alii, 1982).

cessidade da pressão adicional do gás, requerida na partida, devido à ação de um transportador de rosca instalado axialmente no vaso (PETER et alii, 1982). O ar de secagem é alimentado tangencialmente pelo fundo da secção cônica do equipamento. O movimento dos sólidos é promovido pelo transportador, e portanto é possível selecionar a quantidade de ar realmente necessária para a secagem independente da dinâmica do leito. A velocidade de circulação dos sólidos no leito pode ser regulada modificando a velocidade de rotação do transportador de rosca. O equipamento pode operar com o tubo interno envolvendo o transportador (PETER et alii, 1982) ; (NÉMETH et alii, 1983 B).

Apesar do equipamento apresentar as vantagens citadas, seu uso é restrito e o principal inconveniente está relacionado com a dificuldade de limpeza do mesmo, devido a maior complexidade interna. Além disso os transportadores de rosca também promovem um efeito de esmagamento nas partículas, principalmente se trabalharem dentro de um tubo ou canal.

D . LEITOS AGITADOS SOB INFLUÊNCIA VIBRACIONAL

D-1 , INTRODUÇÃO

A aplicação de vibração mecânica, para aperfeiçoar o escoamento de materiais granulares, possui extensas aplicações industriais: carga e descarga de silos, mistura e aglomeração de sólidos, separação de materiais granulares por meio de peneiras vibratórias e sobre planos inclinados. Neste último as partículas de formas distintas deslocam-se em direções diferentes pelo efeito vibracional (AKIYAMA et alii, 1986; ENDOH, 1987). A vibração pode eliminar a formação de bolhas em leitos fluidizados,

isto é útil na filtração de aerossóis, pois quando o material fica disperso nas bolhas não é retido pelo meio filtrante (BEECKMANS e MACWILLIAM, 1986). A vibração de elementos de filtros industriais aumenta a taxa de filtrado e auxilia na descarga da torta (MELLOWES, 1985).

Nas últimas duas décadas o uso de vibração em equipamentos de processamento aumentou substancialmente, por intensificar a transferência de calor e massa (MUJUMDAR, 1982).

A vibração de materiais granulares é conseguida sob excitação de forças externas. Quando a excitação é oscilatória, o sistema é obrigado a vibrar na frequência da oscilação. Se o movimento oscilatório repete-se a intervalos de tempo iguais, ele é denominado movimento periódico. O tempo de repetição τ é denominado período da oscilação e o seu recíproco, $f = 1/\tau$, é denominado frequência.

A Figura II-26 mostra a oscilação de uma pequena massa suspensa em uma mola. O movimento periódico observado é denominado harmônico. Fixando à massa, uma pequena fonte luminosa, o seu movimento pode ser registrado numa tira de filme sensível à luz, que se move com velocidade constante. O movimento registrado no filme, mostrado na Figura II-26, é expresso pela Equação (II-4).

$$y = A \text{ sen } 2\pi \frac{t}{\tau} \quad (\text{II-4})$$

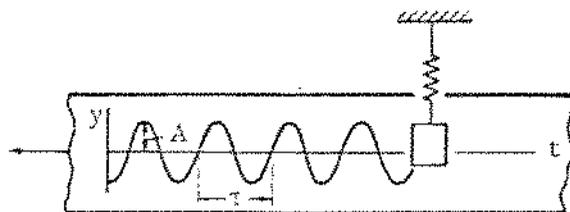


Figura II-26 . Registro do movimento harmônico.

onde A é a amplitude da oscilação, medida a partir da posição de equilíbrio da massa e τ é o período. O movimento é repetido quando $t = \tau$.

O movimento harmônico é muitas vezes representado como a projeção numa linha reta, de um ponto que se move numa circunferência à velocidade constante, como é indicado na Figura II-27. Designando por ω , a frequência angular da linha OP , em radianos por segundo, o deslocamento y é expresso pela Equação (II-5). Uma

$$y = A \text{ sen } \omega t \quad (\text{II-5})$$

vez que o movimento se repete a cada 2π radianos, a frequência angular é expressa pela Equação (II-6), (THOMSON, 1972).

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f \quad (\text{II-6})$$

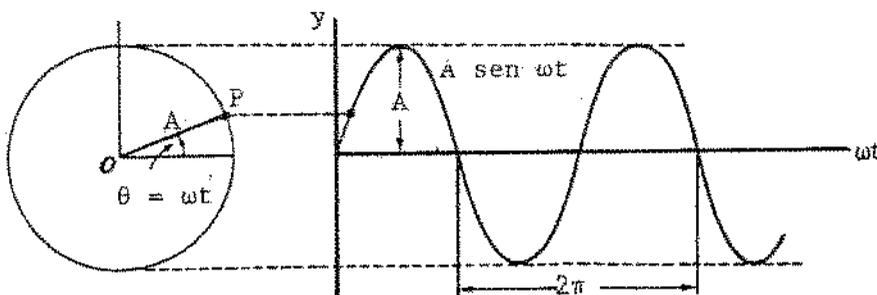


Figura II-27 . Movimento harmônico com projeção de um ponto que se move numa circunferência.

É conhecido que todo corpo que possui massa e elasticidade é capaz de vibrar. As vibrações são classificadas em duas classes gerais: livre ou forçada. A vibração livre existe quando um corpo

oscila sob ação de forças inerentes ao próprio sistema (na ausência de forças externas), como por exemplo as oscilações que ocorrem quando um corpo é deslocado de sua posição de equilíbrio e a seguir solto. O sistema sob vibração irá vibrar em uma ou mais de suas frequências naturais. A vibração que ocorre sob excitação de forças externas é chamada vibração forçada. O sistema é forçado a vibrar na frequência da excitação. Se a frequência de excitação, coincidir com uma das frequências naturais do sistema, é atingida uma condição denominada ressonância. Nesta situação o sistema vibra com uma amplitude máxima, pois ocorre a absorção máxima de energia do sistema excitador. Por outro lado, os sistemas oscilatórios estão sujeitos a um amortecimento, devido a dissipação de energia por atrito ou por forças internas. A energia é dissipada em forma de calor. Este amortecimento modifica as frequências naturais do sistema. Quanto maior for o amortecimento, menor será a amplitude de vibração na frequência de ressonância (THOMSON, 1972).

Entre os vários tipos de vibradores utilizados nos equipamentos industriais para promoção da vibração, destacam-se o eletro-mecânico e o eletromagnético. O primeiro usa um motor elétrico com uma massa excêntrica fixada ao eixo de rotação, o que produz a vibração, o segundo utiliza princípios de eletromagnetismo (CARROL e COLIJN, 1975).

Os leitos de partículas, submetidos à influência de vibração na direção vertical, apresentam uma variedade de regimes de comportamento. Se a aceleração vibracional aplicada ao leito de partículas for suficientemente alta, pode ser atingido um estado que corresponde à fluidização particulada. Este regime de operação é chamado *leito vibrado*, (A). O leito pode ser desidratado usando

aquecedores de contato ou radiação infra-vermelha, ou com vazão reduzida de ar quente. Se o leito for submetido a vibração e percolado com ar no sentido ascendente, sendo a velocidade de operação do ar $u_g > u_{mf}$, o comportamento é denominado *leito fluidizado vibrado*, (C). Quando, $u_g < u_{mf}$, mas for superior a velocidade incipiente de vibro-fluidização (o que será discutido à frente), o sistema é classificado como *leito vibro-fluidizado*, (B). Os dois últimos regimes foram propostos por Brato e Jinescu (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980; PAKOWSKI et alii, 1984).

A Figura II-28, mostra esquematicamente os limites da classificação anterior, usando um gráfico da perda de pressão no leito em função da velocidade do ar. Na figura u_{mvf} é a velocidade incipiente de vibro-fluidização.

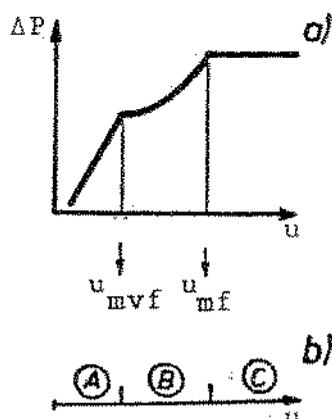


Figura II-28 . Classificação dos regimes de leitos submetidos à vibração: a) curva de vibro-fluidização; b) classificação dos regimes.

Quando um leito de partículas é submetido a uma aceleração vibracional baixa, tal que, $A\omega^2/g \leq 1$, onde g é a aceleração da gravidade, ocorre compactação do leito ao invés de expansão. Este

efeito é usado na compactação de pós. A Figura II-29 salienta este comportamento: Na região I ocorre compactação do leito e na região II expansão. A linha que divide as duas regiões corresponde a $A\omega^2 = g$ (Chlenov e Mikhailov, em PAKOWSKI et alii, 1984).

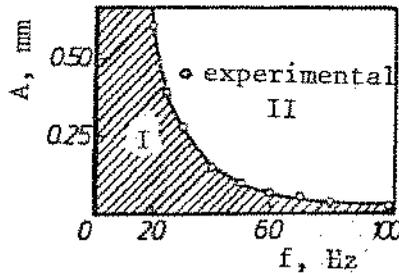


Figura II-29 . Transição de regimes de vibração, para areia de quartzo. I) Compactação do leito; II) Expansão do leito.

D-2 , DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO DO LEITO

A Figura II-30, indica de forma simplificada, o movimento relativo entre um leito de partículas e o vaso de secagem que está submetido a uma vibração senoidal externa. Partindo-se de um tempo, t_0 , as partículas acompanham a trajetória do vaso até que no instante, t_s , elas projetam-se como um corpo único separando-

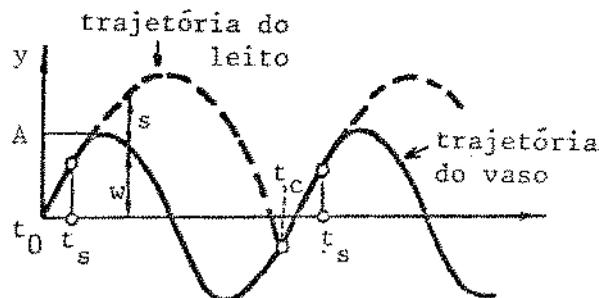


Figura II-30 . Trajetória do leito e do vaso durante o período de vibração.

se do suporte. No instante, t_c , elas tornam a atingir o suporte do vaso (PAKOWSKI et alii, 1984).

Quando o leito é lançado para cima e separa-se do suporte, surge uma pequena região livre de partículas, situada entre a base do leito e o suporte do vaso. Este espaço vazio cresce em uma parte do ciclo, atinge um valor máximo, e decresce novamente, até ocorrer a colisão do leito com o vaso (GUTMAN, 1976 A). A variação da pressão absoluta no espaço vazio é típica. No momento de sua expansão cria-se um "vácuo" e a pressão é inferior à das regiões adjacentes. Como consequência o ar escoar, através do leito em direção ao vazio, revertendo-se o sentido do escoamento. Quando o leito desloca-se novamente para o suporte do vaso, a pressão no espaço vazio aumenta, e o gás é novamente forçado a um deslocamento para cima através do leito. Esta reversão do escoamento de ar no leito, várias vezes por segundo, tem uma influência considerável sobre a circulação de sólidos no leito. A Figura II-31, mostra medidas experimentais instantâneas de pressão manométrica no espaço vazio, em função do ângulo de fase, para partículas com diâmetros situados entre (-20+30) malhas (THOMAS et alii, 1987 e 1988).

A mecânica da colisão de um corpo com outra estrutura rígida é determinado pelo coeficiente de restituição desse corpo. Se o coeficiente de restituição é nulo, isto é, no caso da colisão completamente plástica, não existe retrocesso do corpo. Observações cinematográficas a alta velocidade, mostram que o leito de partículas não apresenta retrocesso após a colisão com o suporte do vaso. Isto sugere que a energia de impacto é dissipada no interior do leito. Desde que o leito mova-se como uma massa única e a colisão for plástica, o leito pode ser modelado como sendo um único corpo poroso plástico. Entretanto a validade desta modelagem é

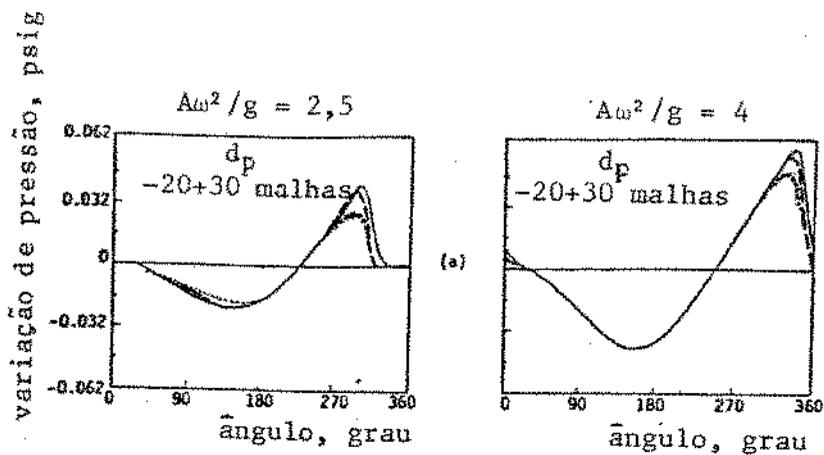


Figura II-31 . Resultado típicos de variação de pressão em leitos vibrados. (—) centro do leito; (.....) proximidade da parede; (-----) entre o centro do leito e a parede (THOMAS et alii, 1987)

função da altura, da permeabilidade do leito e da amplitude e frequência de vibração (THOMAS et alii, 1987).

Existem vários modelos que descrevem a posição do leito durante o ciclo de vibração, normalmente divididos em dois grupos: modelos em que as propriedades do leito são independente do tempo e aqueles nos quais as propriedades dependem do tempo, isto é, quando é considerada a expansão e a contração do leito durante o ciclo de vibração. Os modelos matemáticos citados podem ser utilizados para o cálculo de parâmetros tais como, queda de pressão no leito e velocidade relativa gás-partícula (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

Deve ser bem enfatizado que a expansão do leito, a taxa de circulação dos sólidos e os coeficientes de troca de calor superfície-leito, são médias temporais, uma vez que estas grandezas são normalmente medidas durante um longo período de tempo, quando comparado com o período de vibração (THOMAS et alii, 1987).

D-3 . PERDA DE PRESSÃO EM LEITOS SUBMETIDOS À VIBRAÇÃO

A técnica tradicionalmente usada para analisar a fluidodinâmica da interação gás-leito faz uso da curva de fluidização, ou seja, da relação entre a perda de pressão do gás que escoou através de um leito e a velocidade do gás. Os experimentos realizados nas duas últimas décadas, indicaram que a forma da curva de fluidização é dependente dos parâmetros de vibração.

Bratu e Jinescu (1969-1971), foram os primeiros a publicar curvas de fluidização de leitos submetidos à ação vibracional para uma faixa ampla de velocidade do ar. A Figura II-32 apresenta curvas típicas de fluidização, normalmente observadas (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

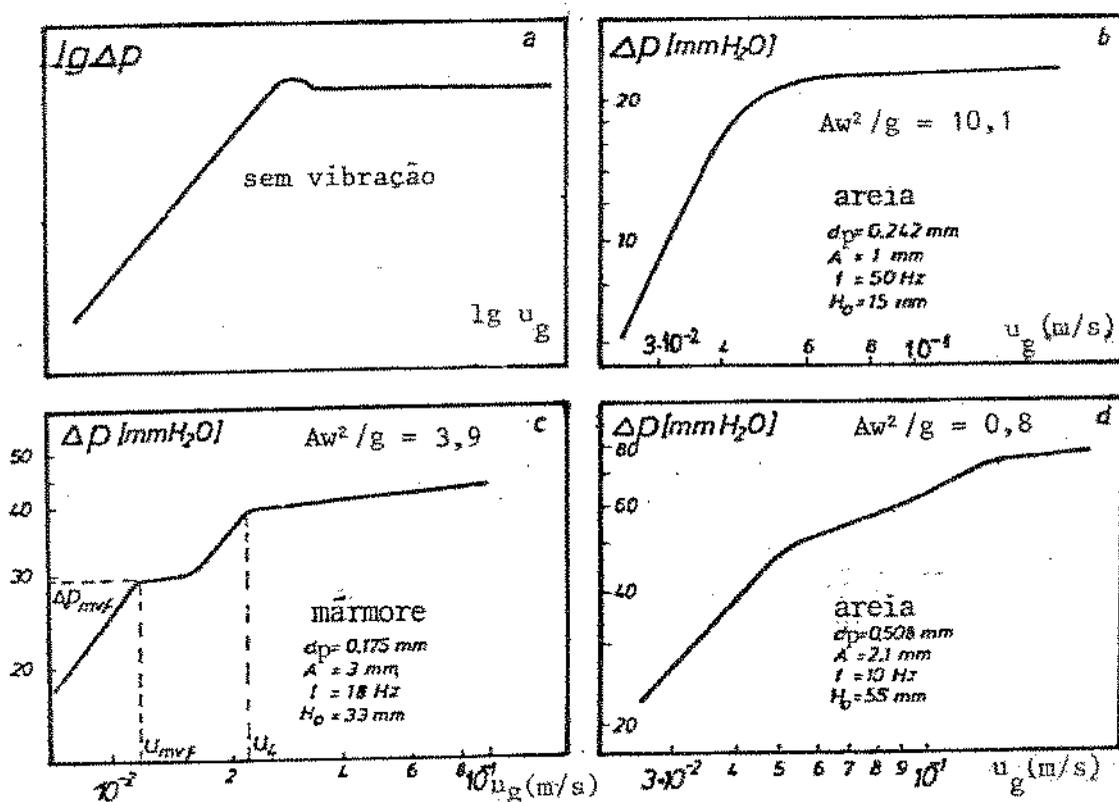


Figura II-32 . Curvas de fluidização, com e sem vibração (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

Na Figura II-32, a curva "a" representa a fluidização convencional, com ausência de vibração. Nos leitos excitados, a forma da curva de fluidização é dependente da relação entre as forças vibracionais e aerodinâmicas, (F_v/F_a) , atuando no leito. No caso de alta aceleração vibracional, curva "b", o pico de pressão não é observado. Para valores intermediários de aceleração vibracional, as curvas são da forma "c" e "d". Na curva "c", u_{mvf} (velocidade incipiente de vibro-fluidização), representa o limite de velocidade do ar que promove o início de movimentação do leito, o que corresponde à extremidade do primeiro patamar da curva.

Para o segundo patamar da curva "c", que inicia-se na velocidade do ar u_4 , não existe uma interpretação física. Entretanto, quando a frequência de vibração aumenta, mantida constante a amplitude, a velocidade u_4 tende à velocidade mínima de fluidização e a curva "c" torna-se similar a "b" (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

É provável que a existência dos dois patamares indicados na curva "c", se relacione com a existência de movimentos preferenciais em determinadas regiões no leito, ao se operar com valores intermediários de aceleração vibracional. Nestas condições a velocidade u_4 indicaria um limite inferior de velocidade do ar, a partir do qual existiria uma situação de homogeneidade na agitação do leito submetido à ação vibracional.

A curva "d" destaca uma situação de excitação do leito sob baixa aceleração vibracional, além do leito ser mais profundo e formado por partículas maiores. A comparação da forma da curva "d" com as anteriores torna-se difícil, pois nesta situação com as condições de vibração utilizadas, tem-se $Am^2/g < 1$, ocorrendo então compactação do leito. O efeito da compactação, juntamente

com a maior altura do leito, são responsáveis pela perda de pressão mais intensa no mesmo.

Apesar de não ser mostrado na Figura II-32, os leitos submetidos a vibração apresentam o fenômeno de histerese, quando a velocidade do ar é inferior a u_{mf} . Operando com velocidade do ar além de u_{mf} , o fenômeno não mais se manifesta. Isto prova, que a partir deste limite ocorre a estabilização da estrutura do leito (PAKOWSKI et alii, 1984).

A Figura II-33, mostra o comportamento de um leito agitado sob ação conjunta do ar e da vibração. Na figura pode ser notado

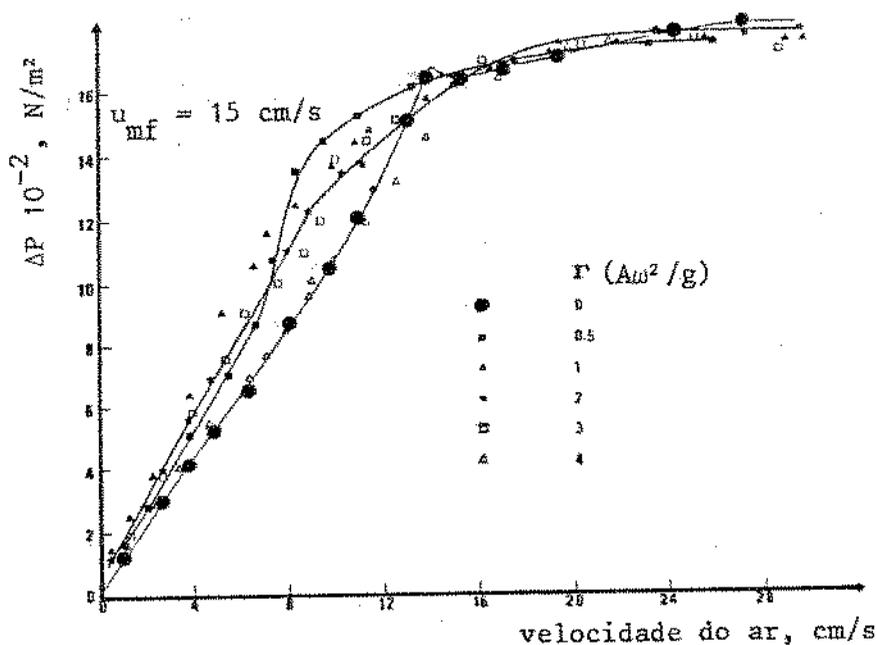


Figura II-33 . Efeito da aceleração vibracional sobre um leito formado por esferas de vidro, $d_p = 0,353$ mm e $H = 120$ mm (MALHOTRA et alii, 1984).

que todas as curvas correspondentes aos leitos vibrados situam-se acima da curva de leito fluidizado convencional ($\Gamma = 0$), para $u_g / u_{mf} < 0,6$ a $0,7$. Operando com velocidade

do ar mais elevada, a perda de pressão pode tornar-se menor para as leitos vibrados. Isto está relacionado com efeitos de expansão e de compactação dos leitos vibrados. Experimentos executados com partículas de diâmetro duas vezes maior que os da Figura II-33 indicaram que a perda de pressão no leito vibrado é menor que a do leito fluidizado convencional, para uma faixa ampla de velocidade do ar, quando $T > 2$. Isto sugere que a compactação do leito é menos pronunciada quando o leito é formado por partículas maiores, pois menor compactação implica em menor resistência ao escoamento (MALHOTRA et alii, 1984; ERDÉZ e MUJUMDAR, 1986).

D-4 . VELOCIDADE INCIPIENTE DE VIBRO-FLUIDIZAÇÃO

O estado vibro-fluidizado ocorre no leito, quando a força gravitacional atuando sobre a partícula é exatamente equilibrada pela soma da força resistiva do gás e pela componente vertical da força vibracional. Do equilíbrio de forças pode-se deduzir que:

$$u_{mvf}^2 = u_{mf}^2 (1 - A\omega^2/g) \quad (II-7)$$

Conclui-se pela Equação (II-7), que o efeito da vibração é no sentido de reduzir a velocidade mínima de fluidização. Entretanto na prática a extensão desta redução é menor do que prevê esta relação, devido ao amortecimento de vibração pela influência da altura do leito (GUPTA e MUJUMDAR, 1980 A).

Como não existe uma curva típica de leitos agitados por vibração, uma velocidade mínima de vibro-fluidização é difícil de ser definida. Jinesco assume para um ciclo de vibração, que na velocidade mínima de vibro-fluidização, o tempo transcorrido para

o leito deslocar-se no sentido ascendente é igual ao tempo gasto para se atingir o suporte do vaso. Esta suposição leva à seguinte equação teórica para u_{mvf} :

$$u_{mvf} = u_{mf} \left(1 - \frac{1+k}{2\pi j} \frac{A\omega^2}{g} \right) \quad (\text{II-8})$$

sendo: k o fator de colisão elástica, $0 < k < 1$; j é a soma do tempo de elevação e de queda, dividido pelo período de vibração. A Equação (II-8) apresenta uso limitado pois j e k devem ser determinados experimentalmente (PAKOWSKI et alii, 1984).

Mushtayev, avaliou a velocidade mínima de vibro-fluidização, em m/s, pela equação empírica com constante dimensional, (PAKOWSKI et alii, 1984; GUPTA e MUJUMDAR, 1980 B):

$$u_{mvf} = 52,38 \left[\frac{\rho_p}{\rho_g} \right]^{0,63} \left[\frac{1}{v_g} \right]^{0,33} d_p^{0,88} \left(1 - c \frac{A\omega^2}{g} \right) \quad (\text{II-9})$$

onde: ρ_p e ρ_g são as densidades do sólido e do gás; v_g = viscosidade cinemática do gás, m^2/s ; d_p é o diâmetro da partícula, m ; $\ln c = 0,0007 f^{1,28} (H/d_p)^{1/2}$; f = frequência de vibração, Hertz; H = altura do leito, m .

A Figura II-34, denota o efeito do adimensional $\Gamma = A\omega^2/g$ sobre a velocidade adimensional de vibro fluidização do gás, u_{mvf}^* , em função do diâmetro adimensional, d^* , das partículas no leito, definidos como:

$$\frac{Re}{Ar_v^{1/3}} = u_{mvf}^* = u_{mvf} \left[\frac{\rho^2 H (1 - \epsilon)}{\mu \Delta P_{mvf}} \right]^{1/3} \quad (\text{II-10})$$

$$e \quad Ar_v^{1/3} = d^* = d_p \left[\frac{\rho \Delta P_{mvf}}{\mu^2 H(1-\epsilon)} \right]^{1/3} \quad (II-11)$$

Ar_v é o número de Arquimedes de vibro-fluidização, H é a altura do leito; ΔP_{mvf} é a perda de pressão na velocidade mínima de vibro-fluidização; ρ e μ são a densidade e a viscosidade de gás; ϵ é a porosidade do leito.

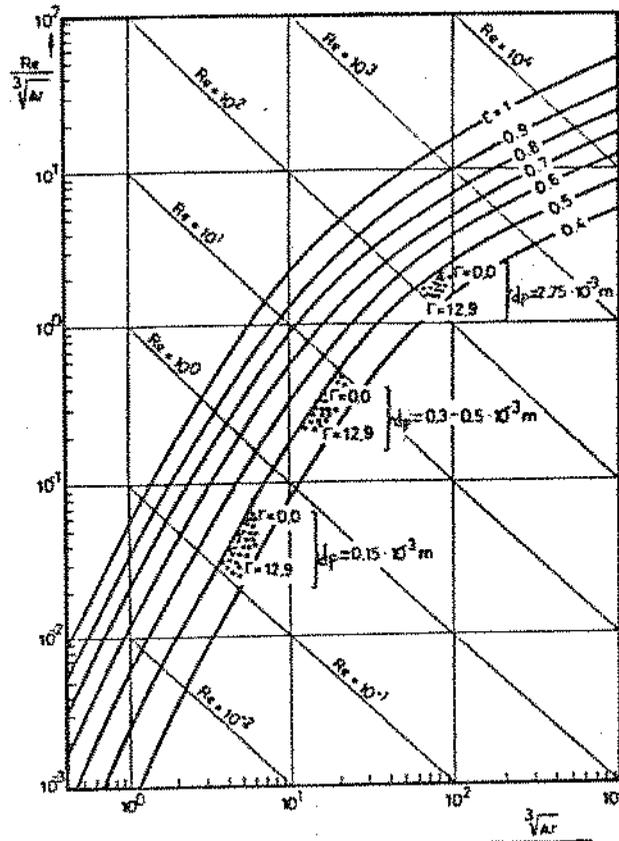


Figura II-34 . Efeito da vibração na velocidade adimensional de vibro fluidização do gás para leitos formados por partículas de diversos diâmetros (ERDÉSZ e MUJUMDAR, 1986).

As curvas da Figura II-34, indicam que a velocidade de vibro-fluidização do gás, reduz-se com o aumento do adimensional $\Gamma = A\omega^2/g$ (ERDÉSZ e MUJUMDAR, 1986).

D-5 , MISTURA NO LEITO E TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS

Informações sobre mistura em leitos agitados, sob ação vibracional, são necessárias para estimar a distribuição do tempo de residência das partículas nos equipamentos contínuos de grande escala. Observações em leitos submetidos à vibração, evidenciam o tipo de escoamento circulatório esquematizado na Figura II-35. Este tipo de movimento é induzido por esforços de cisalhamento nas paredes do vaso e esta circulação é mais intensa nos equipamentos onde apenas o suporte do vaso vibra (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980 ; FINZER e KIECKBUSCH, 1986 B).

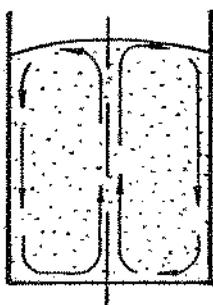


Figura II-35 . Circulação de partículas em LV ou LVF.

Frequentemente, a mistura dos sólidos em leitos agitados sob vibração, ocorre com um caráter difusivo aleatório, devido a ausência de bolhas e de canais preferenciais de circulação. O perfil de concentração no leito, em uma direção, pode ser descrito pelo modelo da dispersão, (SHERWOOD, et alii, 1975):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - U_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{(II-12)}$$

onde: C = concentração de partículas marcadas, M/L³; t = tempo de operação, T; E = coeficiente de dispersão das partículas, L²/T ; U_s = velocidade de alimentação dos sólidos em um processo contínuo M/T .

A Equação (II-12), escrita na forma adimensional torna-se:

$$\frac{\partial C_o}{\partial \theta} = \frac{E}{U_s H} \cdot \frac{\partial^2 C_o}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_o}{\partial Z} \quad \text{(II-13)}$$

onde: C_o = C/C₁; θ = t/ \bar{t} e Z = z/H; C₁ é uma concentração de referência; \bar{t} é o tempo de residência médio das partículas no leito ; H é a altura do leito.

A solução da Equação (II-13), habilita por exemplo, o cálculo de perfis de concentração na saída de um secador em operação contínua, em função do tempo de residência das partículas. O coeficiente de dispersão das partículas deve ser determinado experimentalmente (SATIJA e ZUCKER, 1986 ; STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980). Existem correlações na literatura para estimativa do coeficiente de dispersão das partículas (PAKOWSKI et alii, 1984).

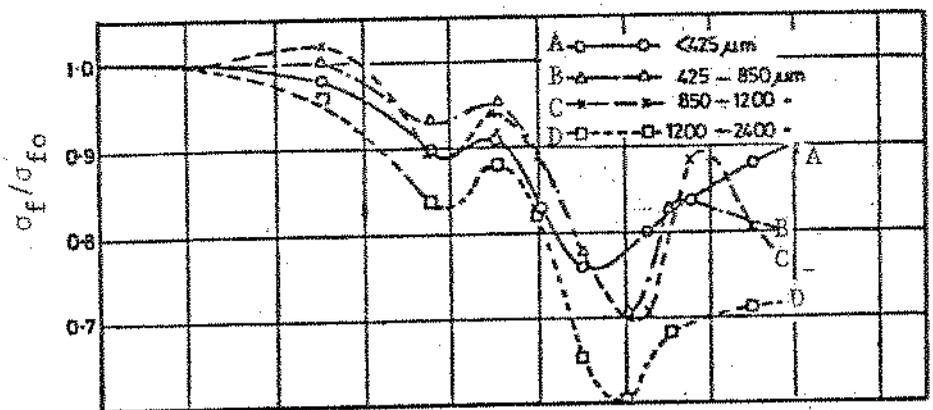
D-6 . INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NO ESCOAMENTO DE SÓLIDOS

A vibração mecânica auxilia na promoção do escoamento de partículas situadas no interior de um vaso. O sistema pode receber vibração na direção vertical, horizontal ou em um plano oblíquo. O importante é que a energia de vibração transmitida, assegure a redução da tensão de cisalhamento nas regiões críticas de

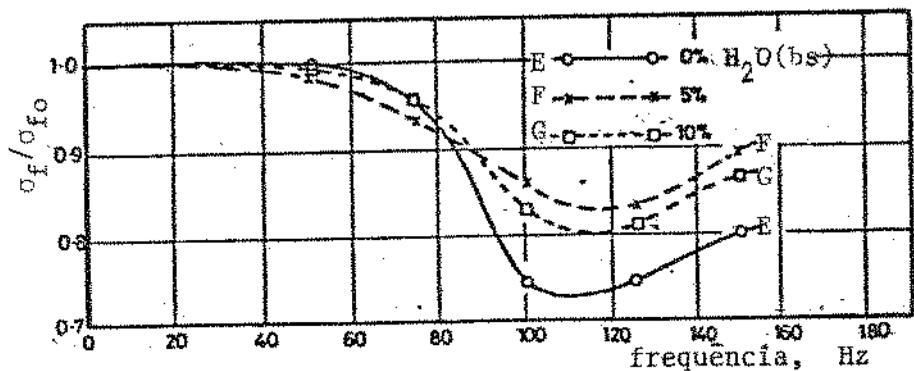
obstrução do escoamento.

Quando usada corretamente, vibrações podem reduzir significativamente a rigidez de uma massa de sólidos, assim como o atrito com a parede de contenção dos mesmos. O resultado leva ao aumento da fluidificação do material. Em transportadores pneumáticos, ocorre redução do consumo de potência, através de aplicação de vibração na parede da tubulação, devido à redução do atrito entre as partículas e a tubulação (AKIYAMA et alii, 1986).

A Figura II-36 indica a razão entre tensões de cisalhamento, com e sem vibração, em função da frequência de vibração, o que ilustra as observações anteriores. Na figura σ_f/σ_{fo} é a tensão de cisalhamento sob aceleração vibracional nula. A Figura II-36 a, re-



(a) Efeito do tamanho da partícula (umidade 5% (bs))

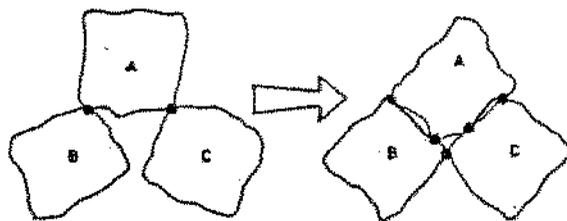


(b) Efeito do conteúdo de umidade, $d_p = 1 \text{ mm}$

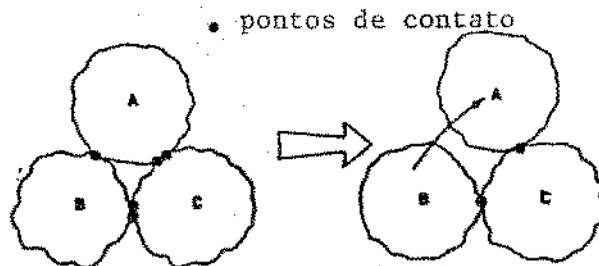
Figura II-36 . Efeito do tamanho da partícula e do conteúdo de umidade sobre σ_f/σ_{fo} , durante a aplicação de vibração senoidal em um leito de sólidos (ROBERTS, 1984).

vela o efeito do tamanho da partícula na razão σ_f/σ_{fo} . A figura mostra a existência de frequências de ressonância bem definidas, que correspondem aos pontos mínimos das curvas. A maior redução na tensão de cisalhamento ocorre no caso de partículas maiores. A Figura II-36 b, mostra o efeito do conteúdo de umidade sobre σ_f/σ_{fo} . A redução na tensão de cisalhamento é mais significativa quando os sólidos apresentam menor conteúdo de umidade.

Existem situações, entretanto, em que a vibração pode apresentar um efeito adverso, isto é, consolidar as partículas, aumentando a tensão de cisalhamento, reduzindo assim a vazão de sólidos no interior de um vaso vibrado (ROBERTS, 1984). Algumas destas situações são denotadas na Figura II-37. Devido à ação da vibração ocorre consolidação do conteúdo de um leito, aumentando pontos de contato partícula-partícula ou então ocorre redução de pontos de contato, e nesta situação o sistema irá se deformar plasticamente até um equilíbrio ser atingido (MATCHETT, 1986).



A consolidação leva a um aumento no número de pontos de contato. Os espaços vazios decrescem.



A ruptura de pontos de contato reduz o cisalhamento ou consolidação normal.
 Figura II-37 . Conseqüências de ruptura de pontos de contato (MATCHETT, 1986).

D-7 , TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS AGITADOS SOB VIBRAÇÃO

TRANSFERÊNCIA DE CALOR, GÁS-PARTÍCULAS

A transferência de calor convectiva de um gás aquecido para um leito de partículas, é uma técnica muito usada para suprimento de calor em leito vibro-fluidizado.

As influências no coeficiente de transferência de calor gás-partículas, devido à operação em LVF, podem ser divididas em quatro contribuições: 1) perturbações na camada limite das partículas ou de aglomerados; 2) recirculação de gás "back mixing" (efeito negativo na transferência de calor); 3) aumento da área de transferência de calor; 4) uniformização da temperatura do leito por mistura. A extensão destas contribuições na quantificação do valor de h_p , depende da faixa de aceleração vibracional e da velocidade do gás, além das propriedades do leito.

A Figura II-38, mostra que a transferência de calor para um leito de esferas de naftaleno é facilitada quando o leito é submetido à vibração, com $\Gamma > 1$. As curvas sugerem que a influência da vibração sobre o número de Nusselt, Nu_p , é significativa para números de Reynolds inferiores a Re_{mf} (que corresponde a u_{mf}), ou seja, para regimes de operação em LV e LVF. Quando $u > u_{mf}$, a vibração exerce pouca influência sobre Nu_p , comparado com leitos fluidizados convencionais (PAKOWSKI et alii, 1984).

A Figura II-39 indica a ação do adimensional Γ , sobre h_p , para secagem de esferas de carbonato de cálcio no período de velocidade constante. Na figura verifica-se que h_p aumenta com o acréscimo da aceleração vibracional e atinge um valor máximo quando $\Gamma = 6$. Tendo este valor como limite, Pakowski correlacionou os dados ex-

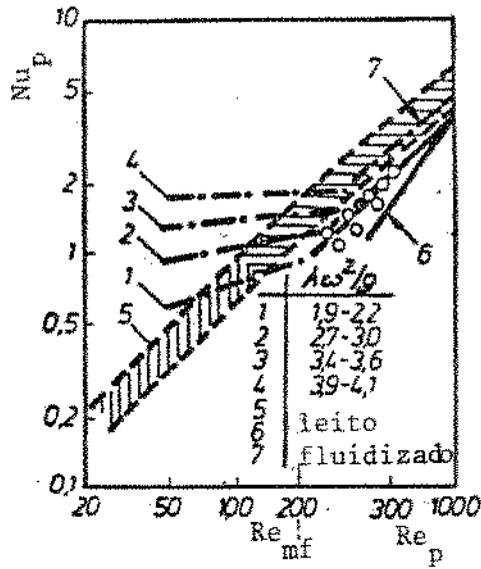


Figura II-38 . Coeficiente de transferência de calor ar - esferas de naftaleno, para diferentes acelerações vibracionais (PAKOWSKI et alii, 1984).

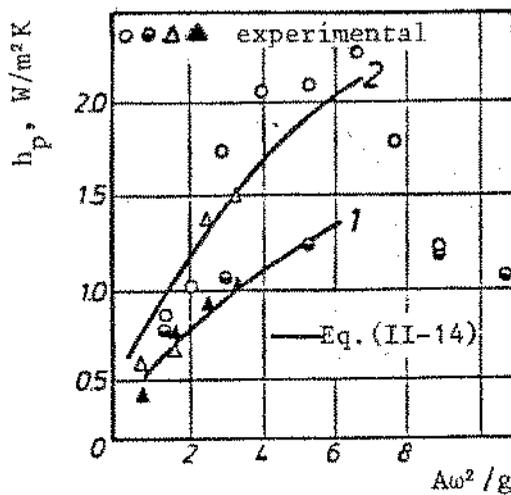


Figura II-39 . Coeficiente de transferência de calor, gás-partículas, para diferentes acelerações vibracionais. Curva 1, $d_p = 0,328$ mm e $u = 0,185$ m/s; curva 2, $d_p = 0,508$ mm, $u = 0,202$ m/s (PAKOWSKI et alii, 1984).

perimentais o que deu origem à Equação (II-14), na qual d_p e H

$$Nu_p = 0,827 Re_p^{1,04} \left(\frac{d_p}{H} \right)^{1,17} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{0,483} \quad (II-14)$$

são o diâmetro das partículas e a altura do leito. A análise da figura destaca que após ser ultrapassado o ponto de máximo, h_p se reduz com o aumento de Γ . Este comportamento indica a existência de uma condição de ressonância para $\Gamma = 6$, na qual a agitação do leito torna-se máxima, facilitando a troca de calor.

Dados experimentais acumulados mostram que, assim como em leitos de jorro, os coeficientes de transferência de calor convectivos são muito menores que aqueles relativos à transmissão por contato. Apesar disso, a primeira técnica tem sido muito utilizada, provavelmente devido a risco de aderência de partículas pegajosas em torno do aquecedor de superfície, podendo ocorrer degradação química ou térmica do produto.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR, LEITO - AQUECEDOR SUBMERSO

O uso de aquecedores submersos é a técnica geralmente utilizada para fornecer calor aos leitos vibrados. Devido à vazão de ar limitada neste regime de operação, este é o método mais adequado para suprimento do calor requerido em uma operação de secagem. Esta técnica apresenta uma série de vantagens, tais como: utilização de tubulações de condução de gás com menores diâmetros; equipamentos de coleta de pós com menores dimensões e redução do consumo global de energia na operação (MALHOTRA e MUJUMDAR, 1987).

Na faixa de operação em LVF, esta técnica de suprimento de

calor é usada apenas como uma fonte de calor suplementar. Os coeficientes de transferência de calor por contato, em leitos agitados por vibração, são influenciados principalmente por dois mecanismos: redução da espessura efetiva do filme de gás situado sobre a superfície aquecida, devido ao contato com as partículas vibradas do leito; transporte de calor da região de aquecimento devido a circulação dos sólidos (PAKOWSKI et alii, 1984 ; ROBERTS , 1984). A primeira contribuição é bem destacada pela Figura II-40, onde a situação "a" representa o leito estático e a "b" a influência da vibração de uma partícula sobre a espessura de filme de gás no espaço denotado por d_r . Ao longo de d_r a espessura da área hachurada se reduz sob ação vibracional, devido ao movimento da partícula para baixo e para cima, o que causa uma redução na resistência à transferência de calor. (GUTMAN, 1976 B; PAKOWSKI et alii, 1984; ROBERTS, 1984).

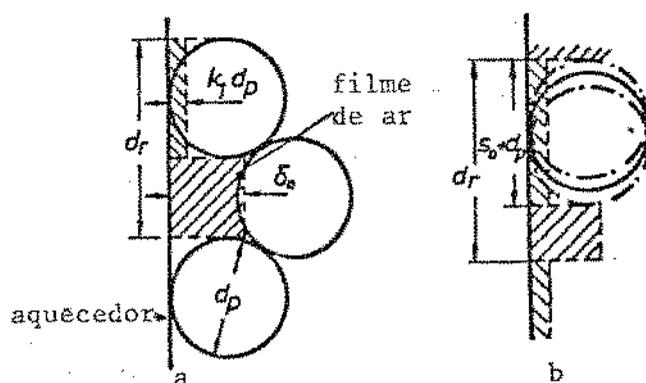


Figura II-40 . Esquema do modelo de Gutman de transferência de calor por contato (GUTMAN, 1976 B).

Em leitos fluidizados, a presença de bolhas de gás provoca uma boa circulação das partículas e o aquecedor é banhado alternadamente pelo gás e pela emulsão. Em contraste, nos leitos agita-

dos com auxílio de vibração, onde geralmente não existem bolhas de gás, o aumento da intensidade de vibração não acarreta acréscimo na porosidade do leito e o movimento das partículas é mais vagaroso, o que implica em menor transporte convectivo de calor, via partículas. Entretanto os coeficientes de transferência de calor em leitos fluidizados e vibrados são da mesma ordem de grandeza, mas os mecanismos de transferência de calor são diferentes. Nos leitos submetidos a vibração, se o transporte de calor é pequeno via circulação das partículas, a maior influência da ação vibracional é sobre a transferência de calor por condução, através do filme que separa a superfície do aquecedor das partículas que formam o leito (GUTMAN, 1976 B; GUPTA e MUJUMDAR, 1980 A e B).

A Figura II-41, ilustra o efeito da vibração expresso pelo parâmetro $A\omega^2/g$, sobre o coeficiente de troca de calor de uma placa aquecedora, instalada no centro do vaso, para um leito de esferas de vidro. A análise das curvas indica que operando com mesma aceleração vibracional, geralmente a operação com maior amplitude de vibração conduz a maiores coeficientes de troca de calor (GUTMAN, 1976 B). As curvas da figura, apresentam condições de coeficientes de transferência de calor máximo. Isto provavelmente é devido a movimentação mais intensa das partículas ao atingirem uma condição de ressonância.

Quando existe escoamento do ar, a vibração também aumenta o coeficiente de transferência de calor superfície-leito, em relação ao leito não vibrado. Isto é mostrado na Figura II-42, cujos dados foram obtidos com um cilindro posicionado horizontalmente no leito. A figura denota que para o leito não aerado a vibração intensifica o coeficiente de transferência de calor em mais de 20 vezes, operando com $\Gamma > 2$. A influência da vibração sobre h_f , tam

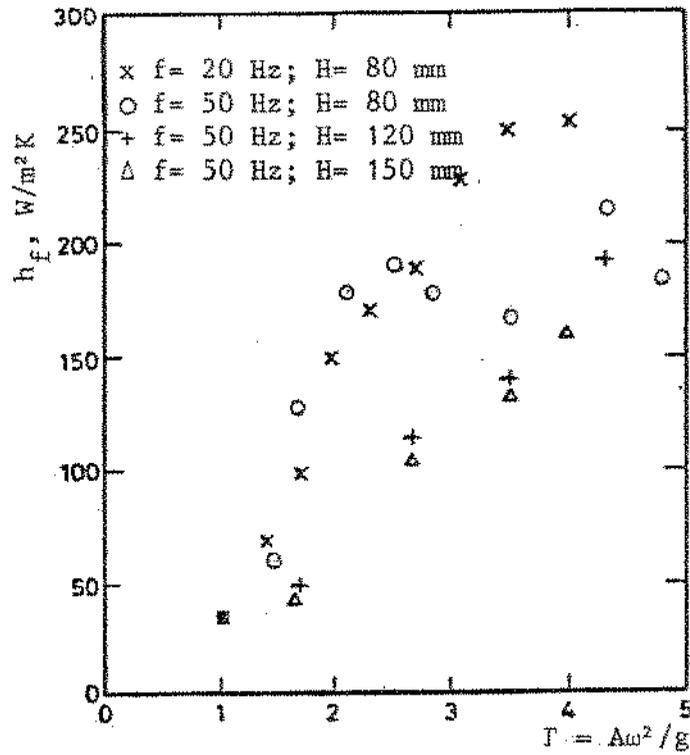


Figura II-41 . Efeito de aceleração vibracional sobre o coeficiente de transferência de calor de uma placa vertical para um leito formado por esferas de vidro. Parâmetros geométricos: Diâmetro das esferas de vidro = 675 - 935 μ m ; $D_c = 63$ mm (GUTMAN, 1976 B).

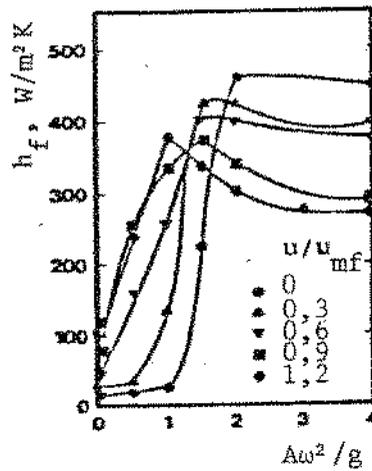


Figura II-42 . Efeito da aceleração vibracional sobre o coeficiente de transferência de calor entre um cilindro horizontal e um leito de esferas de vidro. Parâmetros: $d_p = 0,325$ mm; $A = 4,25$ mm; $D_c = 3,8$ cm; $H = 11$ cm (MALHOTRA e MUJUNDAR, 1987).

bém é notável no caso de leitos aerados, principalmente operando com Γ entre 0,8 e 1,5, que pode intensificar em mais de 10 vezes a grandeza do coeficiente (MALHOTRA e MUJUMDAR, 1987).

Nos sistemas vibrados, o espaço vazio formado entre o fundo do leito e a base vibratória do mesmo e também nas imediações de superfícies de tubos horizontais imersos no leito (Veja seção D-2), é uma região de baixa condução de calor, que atua no sentido de reduzir o coeficiente de transferência de calor superfície-leito. Como não forma-se espaço vazio em torno de superfícies verticais imersas em leitos vibrados, observa-se que esses aquecedores apresentam coeficientes de troca de calor mais elevados. A transferência de calor pode ser aumentada se as superfícies forem aletadas (MALHOTRA e MUJUMDAR, 1987; STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980; THOMAS et alii, 1987).

GUTMAN (1976 B), desenvolveu um modelo para predizer o coeficiente de transferência de calor de um aquecedor posicionado na direção vertical no interior de um leito vibrado. O modelo baseia-se na redução da espessura efetiva do filme de gás, junto à superfície aquecida, devida à vibração, conforme a Figura II-40, e o resultado final é expresso pela equação:

$$h_{fv} = h_f / (1 - k_2 S_o) \quad (\text{II-15})$$

sendo:

$$k_2 = \frac{d_p (1 - k_1 d_p h_f / k_g)}{(d_r^2 - d_p^2)}$$

onde: h_{fv} e h_f são os coeficientes de transferência de calor no leito vibrado e estático ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$); k_g é a condutibilidade térmica da fase gasosa ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$); d_r é a distância vertical média en-

tre as partículas; S_0 é o incremento de distância máxima atingida pelo leito em um ciclo de vibração, (GUTMAN, 1976 A).

Geralmente k_1 é uma constante de proporcionalidade pequena e então:

$$k_2 = \frac{d_p}{d_r^2 - d_p^2}$$

Para as situações estudadas por Gutman, os coeficientes preditos pelo modelo não diferem significativamente dos valores experimentais.

O coeficiente de transferência de calor superfície-partícula, em leitos vibrados, pode ser aumentado instalando um agitador no interior do vaso para melhorar o movimento dos sólidos. As partículas, aquecidas pela superfície de troca de calor, são forçadas a afastar-se mais rapidamente e são substituídas por partículas frias do interior do leito, e com isto melhora a transferência de calor (MUCHOWSKI e MÄNNCHEN, 1980).

Em sistemas vibrados, as características da superfície das partículas afetam a dinâmica do leito e como consequência os fenômenos de transferência de calor e massa. A característica de superfície mais importante é a aderência induzida pela umidade superficial das partículas, tornando-as pegajosas. Quando um gás escoia em baixa velocidade em um leito vibrado, a presença de umidade na superfície das partículas, reduz o coeficiente de transferência de calor superfície-leito.

D-8 , SECAGEM EM LEITO VIBRATÓRIO

Quando agita-se um leito de secagem sob ação vibracional , pode ocorrer aumento da taxa de secagem, dependendo das condições de operação, de parâmetros geométricos e das características físicas do leito. Estudos de transferência de massa usando cilindros de naftaleno vibrados, imersos em uma corrente de ar, mostraram que para baixos números de Reynolds, o aumento da aceleração vibracional, aumenta a transferência de massa, enquanto ao operar com altos números de Reynolds, ocorre o inverso (WONG et alii, 1978).

Na secagem, a influência da vibração sobre a taxa de secagem depende da faixa de velocidade do ar. Para $u_g < u_{mf}$, a influência é maior do que quando $u_g > u_{mf}$. Para, $A\omega^2/g \gg 1$ o aumento de u_g acima de u_{mf} , pode reduzir a taxa de secagem. Mantendo a velocidade do ar constante, a influencia de $A\omega^2/g$, sobre a taxa de secagem pode ser representada esquematicamente pela Figura II-43 (PAKOWSKI et alii, 1984). A forma da figura sugere que o máximo alcançado corresponde a uma condição de ressonância, o que está relacionado com o movimento do leito.

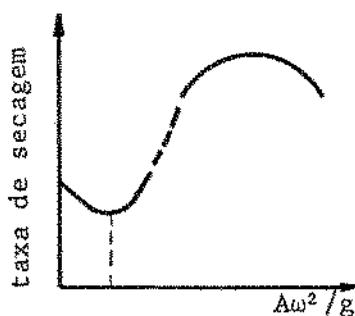


Figura II-43 . Dependência da taxa de secagem com a aceleração vibracional (PAKOWSKI et alii, 1984).

A secagem em leitos vibratórios é apropriada para processamento de materiais em que a vazão de ar é governada pela exigência de fluidização e não pelo calor requerido na secagem, ou quando vazões elevadas de ar não são recomendadas para processamento de materiais facilmente oxidáveis (PAKOWSKI et alii, 1984).

O uso de vibração em secadores apresenta outras vantagens sobre os leitos de jorro ou fluidizados convencionais: a distribuição do tempo de residência das partículas é mais uniforme e a degradação térmica em regiões estagnadas pode ser evitada; o movimento do material através do secador é mais suave, o que reduz o atrito entre as partículas, sendo portanto muito adequado ao tratamento de materiais frágeis; o secador serve ao mesmo tempo de transportador dos sólidos, na direção horizontal no caso de secadores de LV e LVF e na direção vertical no caso LV; apesar da necessidade de vibração, ocorre um menor consumo de potência total (DANIELSEN e HOVMAND, 1980; GUPTA e MUJUMDAR, 1980 A e B).

A aplicação da vibração mecânica, visando tornar mais econômicos os processos comerciais de secagem, sofreu um impulso durante as duas últimas décadas, principalmente no processamento de partículas grandes e de materiais difíceis de serem fluidizados e aqueles pegajosos ou que possuem característica pastosa (GUPTA e MUJUMDAR, 1980 B).

Na atualidade muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas para obter condições ótimas de operação para materiais específicos. Entre elas: secagem de resina de troca iônica (polystyrol), nos períodos de velocidade de secagem constante e decrescente (SUZUKI, et alii 1980 A e B); secagem de partículas de vidro com característica aglomerante (SUZUKI, et alii, 1980 C); secagem de farelo de arroz (FITO et alii, 1975 e 1977; SANZ et alii, 1977);

secagem de fatias de cebola (MAZZA e LeMAGUER, 1980; FINZER, 1984; FINZER e KIECKBUSCH, 1986 B). Anéis de cebola, desidratadas em leito vibro-fluidizado, adquirem ao final da secagem um formato aproximadamente esférico, o que aumenta a densidade aparente do produto (FINZER e KIECKBUSCH, 1983); secagem de milho verde (OGIHARA, 1989); secagem de suspensões alimentícias usando um leito com partículas inertes (NOVY e KIECKBUSCH, 1987).

Em escala industrial, numerosos produtos são desidratados em leitos vibratórios: sais inorgânicos; fertilizantes; plásticos e produtos alimentícios (STRUMILLO e PAKOWSKI, 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. Esquemas de equipamentos mais frequentemente usados são mostrados na Figura II-44 (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

E . LEITO VIBRO - JORRADO

E-1 . INTRODUÇÃO

Tem se procurado diversas alternativas para aperfeiçoar o desempenho de leitos agitados. Uma delas por exemplo, consiste na semi-fluidização, onde a fluidização é parcialmente amortecida por meio da compressão do leito com uma placa porosa, que permite a passagem do gás mas retém os sólidos. No caso dos leitos de jorro e fluidizado, esta técnica reduz a recirculação dos sólidos, o atrito entre as partículas e a erosão de superfícies. A placa porosa também uniformiza a temperatura dos sólidos, evita a segregação de partículas e a formação de canais preferenciais no leito. As

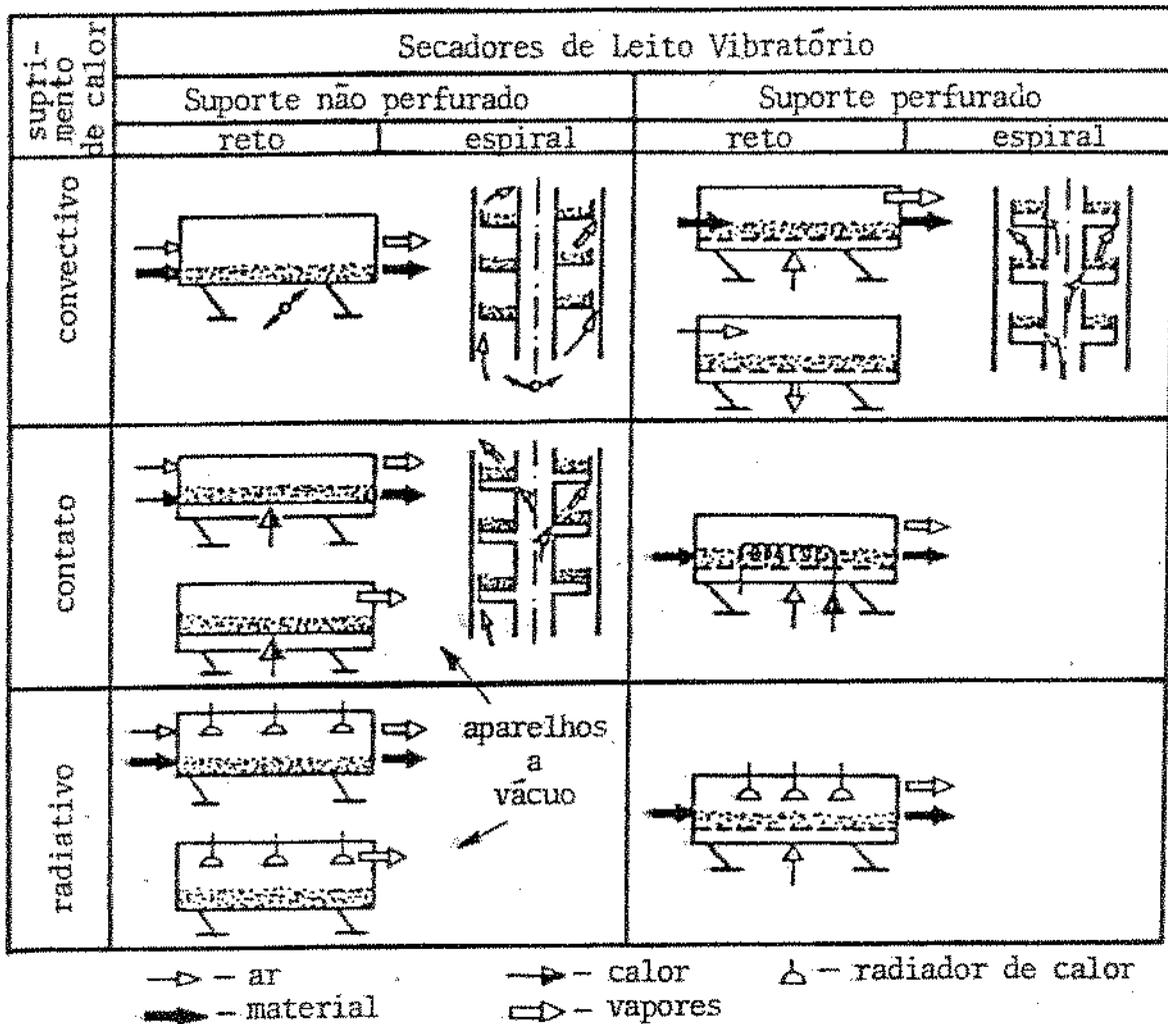


Figura II-44 . Esquemas de secadores de leito vibratório (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

duas últimas situações são problemas comuns da operação em leito estático. Dificuldades de projeto e de controle da fluidodinâmica do leito foram determinantes para que essa técnica não fosse ainda explorada industrialmente (HO et alii, 1987).

Com o uso de vibração as desvantagens citadas acima podem ser minimizadas. Na maioria dos sistemas deste tipo, todo o vaso é submetido a vibração e uma variedade de problemas técnicos surge na mudança de escala nestes equipamentos.

Uma alternativa mais simples e econômica, consiste em vibrar apenas o suporte do leito, que pode ser conectado ao vaso

por meio de uma membrana flexível. A Figura II-45 esquematiza o sistema, onde é mostrado o movimento das partículas no leito. O equipamento foi denominado *leito vibro-jorrado*, ("*vibro spouted bed*"), por RÁTKAI e TOROS (1986).

O suporte do leito atinge uma amplitude máxima determinada pelo mecanismo de vibração, enquanto que a partir da extremidade do suporte vibratório, a amplitude de vibração da membrana diminui gradualmente até zero, junto ao flange de conexão com o corpo de vaso.

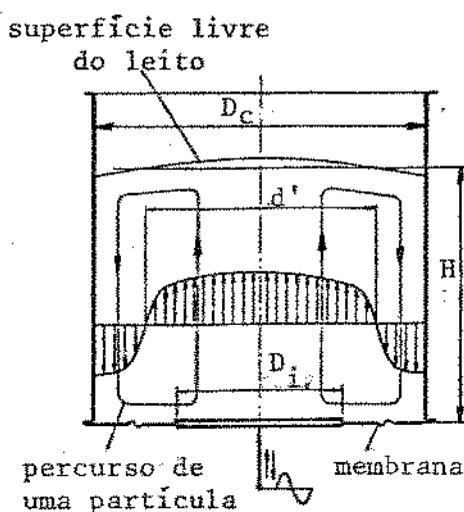


Figura II-45 . Diagrama esquemático de um leito vibro-jorrado (RÁTKAI e TOROS, 1976).

O movimento de vibração do suporte do leito, produz uma maior expansão no centro do leito, e decresce ao longo do raio. Isto faz com que a superfície livre do leito apresente a forma convexa. Devido a redução do atrito entre o material granular por efeitos vibracionais, a pequena inclinação da superfície livre do leito é suficiente para fazer as partículas rolarem para o nível inferior. As partículas no espaço anular se deslocam vagarosamente para baixo. Ao atingirem o fundo do leito, as partículas movem-se em direção ao centro do mesmo e pela ação da vibração do suporte ascendem ao longo do jorro interno. RÁTKAI e TOROS (1986), rela-

tam que o LVJ produz um adequado efeito de mistura em materiais particulados.

E-2 . MECANISMO DE TRANSMISSÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Para leitos formados por múltiplas camadas de partículas , a energia recebida pelas partículas da camada inferior é transmitida, através de choques elásticos partícula-partícula, para as camadas superiores do leito. Baseado nestas considerações Schaffner, considera que um sólido particulado desloca-se no leito como um fluido não-newtoniano e o atrito entre as partículas é influenciado pela transferência de energia por vibração. O processo é considerado análogo a mudança de viscosidade de líquidos com a variação da temperatura (RÁTKAI e TOROS, 1986).

Um mecanismo idealizado de transferência de energia de vibração para o leito, considerando várias camadas superpostas de partículas, é denotado na Figura II-46. A figura mostra a posição das partículas da primeira camada, S_p e do suporte do vaso, S_b , durante um ciclo de vibração. Na mesma figura é mostrada a veloci

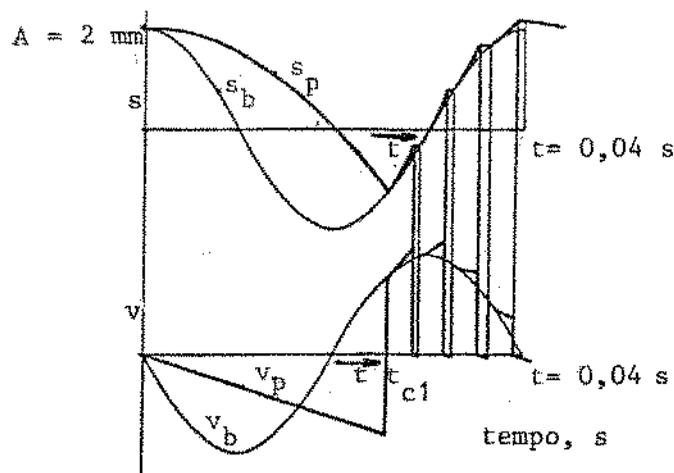


Figura II-46 . Posição e velocidade do leito e do suporte vibratório (RÁTKAI, 1986).

dade das partículas, v_p e do suporte vibratório do leito v_b .

Uma região da Figura II-46 foi ampliada na Figura II-47, para facilitar a descrição do modelo de transferência de energia vibracional. Na figura, t_{c1} corresponde ao instante em que uma partícula colide pela primeira vez com o suporte. A partícula mantém-se em contato com o suporte até o tempo t_d , quando ela é arremessada do mesmo. No instante t_{cs} , a partícula colide com uma partícula da segunda camada e cai. No tempo t_{c2} , a partícula da primeira camada colide novamente com o suporte. Uma sucessão de choques que ocorre em um único período de vibração pode ser visto na Figura II-46. A Figura II-48 representa o suporte vibratório do leito, a primeira e a segunda camada de partículas e ilustra a sequência de colisões representadas na Figura II-46.

Segundo o modelo descrito, a transferência de quantidade de movimento para o leito é quase permanente, por ser muito grande o número de colisões durante um período de vibração.

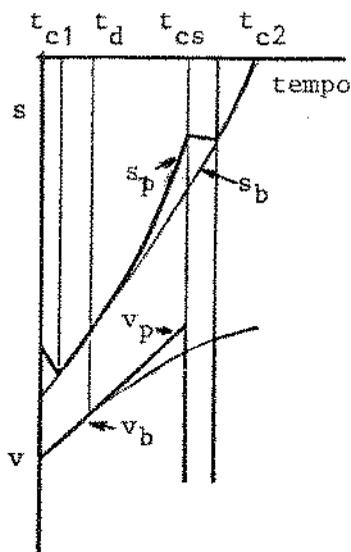


Figura II-47 . Detalhe do movimento de leito e do suporte vibratório (RÁTKAI , 1986).

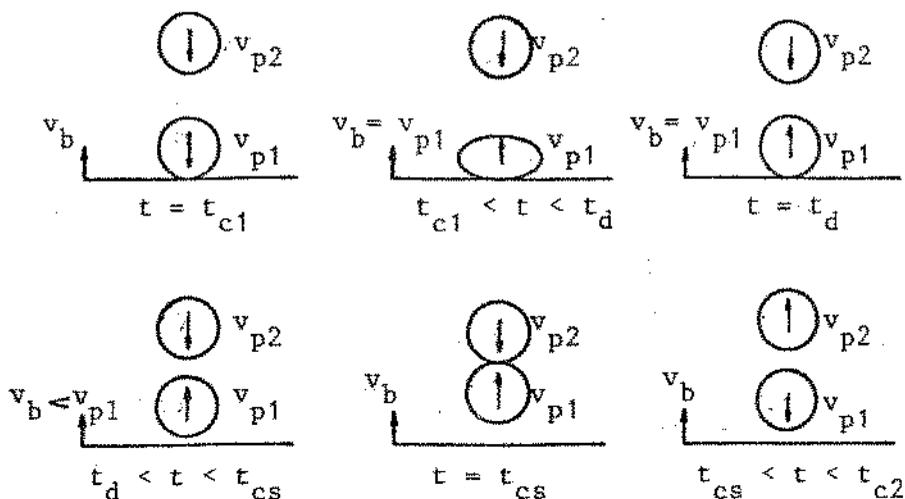


Figura II-48 . Representação do suporte vibratório e da primeira e segunda camadas de partículas, durante a transferência de quantidade de movimento (RÁTKAI, 1986).

Admitindo também a transferência de quantidade de movimento na direção horizontal, devido a ocorrência de colisões obliquas entre partículas e partícula-suporte, periodicamente algumas partículas migram para a segunda camada e desta para a terceira. O efeito final é constituído por um movimento convectivo de sólidos (RÁTKAI, 1986).

Para que ocorra movimento permanente no LVJ, os sólidos devem escoar no sentido descendente pelo espaço anular, como destaca-se na Figura II-45. Quando o vaso é cilíndrico, na imediação do fundo do leito existe um espaço morto, onde as partículas permanecem por um período de tempo excessivo. Quando a seção inferior do leito é cônica, o espaço morto pode não existir, conforme é denotado na Figura II-49 para leitos não submetidos à efeitos vibracionais. A figura mostra que as partículas escoam com mais facilidade, quando o ângulo interno do cone for pequeno (caso b na figura), (ROBERTS, 1984).

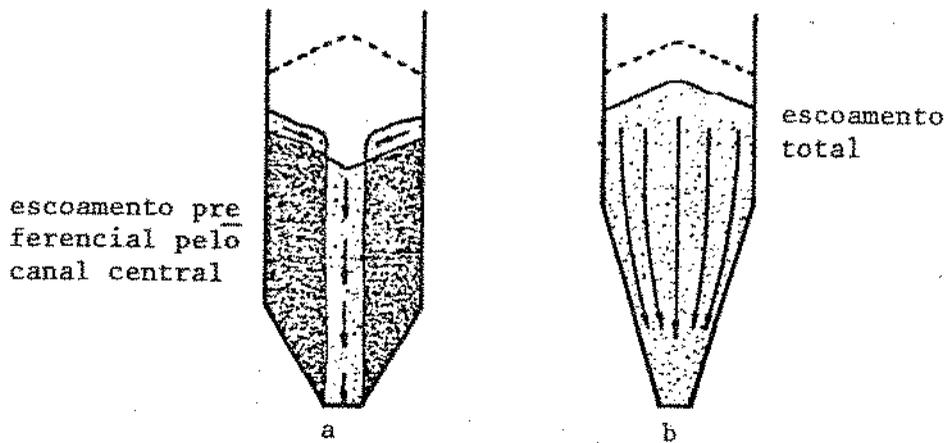


Figura II-49 . Características de escoamento em silos (ROBERTS, 1984).

No leito vibro-jorrado, a propagação de vibração no leito ocorre principalmente na direção vertical e ao longo de linhas inclinadas em relação a vertical. A intensidade de transmissão de vibração nesta direção decresce com o aumento do ângulo das linhas inclinadas, até ser atingido um limite além do qual cessa qualquer perturbação (ROBERTS, 1984). Este efeito lateral atua no sentido de impedir o escoamento dos sólidos no espaço anular.

Existe uma série de outros parâmetros geométricos e operacionais que influenciam no movimento do LVJ, tais como: altura da seção cônica e do leito; relação D_c/D_i ; diâmetro do tubo interno; diâmetro e características superficiais das partículas; amplitude e frequência de vibração. No projeto de um LVJ deve ser estabelecida a combinação ótima entre estas variáveis para proporcionar o bom desempenho do equipamento.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO

A . INTRODUÇÃO

Na fase de planejamento e desenvolvimento do secador de LVJ, foram analisadas e testadas várias alternativas técnicas, visando a operacionabilidade simples e eficiente do sistema, tendo sempre em mente a possibilidade de um único operador efetuar todos os controles, medidas e observações. Nesta introdução vamos apresentar uma visão geral das opções testadas e não aproveitadas para facilitar o encaminhamento de pesquisas futuras sobre o assunto.

O secador foi executado em duas seções (ver Figura III-1), sendo a superior cilíndrica e a inferior cônica com o vértice truncado. A seção cilíndrica, que foi confeccionada com acrílico, permitiu a visualização do conteúdo do leito.

A seção inferior do leito, contendo um suporte vibratório na base cônica truncada, foi executada em duas versões: I) O ângulo interno do cone de 43° e o suporte vibratório constituído por um conjunto pistão-cilindro ("0" na Figura III-1), sendo $D_c/D_i = 1,7$; II) O ângulo da seção cônica de 60° e a extremidade do suporte vibratório fixada a uma membrana flexível de borracha e esta à base cônica por um flange (como na Figura II-45), sendo $D_c/D_i = 3,0$.

O projeto das seções cônicas I e II, que foram executadas com mesma altura baseou-se nas proporções das Figuras II-49 a e

b, respectivamente. Na operação do sistema I, que combinou parede cônica mais inclinada em relação a um plano horizontal e menor relação D_c/D_i , verificou-se que o escoamento dos sólidos foi notavelmente superior ao observado na situação II. A fôlga existente entre o pistão e o cilindro, entretanto, proporcionava um atrito mais intenso com as partículas, podendo provocar desgaste superficial mais acentuado dos sólidos no leito. Apesar deste risco, em todos os ensaios, aqui descritos, utilizou-se este sistema. A opção foi consciente e não se descarta aqui a possibilidade do sistema II dar melhores resultados para algumas situações.

Testes preliminares usando o LVJ, indicaram que a dinâmica do leito depende muito das dimensões geométricas e das propriedades físicas das partículas, em especial de sua elasticidade (FINZER e KIECKBUSCH, 1986 A).

Para obter informações iniciais sobre o alcance das aplicações do equipamento, foram realizadas experiências, operando em LVJ, com o leito formado por diversos tipos de materiais: salgü, confeitos aluminizados, grãos de feijão, de soja e de ervilha, macarrão em forma de anéis, partículas de cloreto de potássio, esferas de sílica-gel e de vidro, cubos de batata, anéis e fatias de cebola.

Nos estudos iniciais foi pesquisada uma alternativa geométrica para o tubo interno P (Figura III-1). O tubo foi substituído por um tronco de cone, com o vértice voltado para o topo ou para o fundo do leito. As observações visuais do movimento das partículas, mostraram que a circulação era mais intensa com o uso do tubo cilíndrico, que foi então selecionado para o presente trabalho.

Foi verificada ainda a influência da utilização de um tubo

interno com a superfície lateral perfurada, o que permitia o escoamento de uma parcela do ar do jorro para o espaço anular. O aumento da velocidade do ar, no espaço anular, atuou no sentido de reduzir a velocidade de escoamento dos sólidos e a opção foi descartada.

Operando sob condições adequadas de vibração, com ou sem o tubo interno e baixa velocidade do ar (inferior a mínima de fluidização), todos os materiais citados anteriormente, com exceção da cebola, movimentaram-se conforme indicado nas Figuras II-35 e II-45. Os cubos de batata se movimentavam com menor intensidade que os outros materiais. Entretanto, com o ar escoando a maior velocidade, era observado um movimento uniforme dos cubos de batata, que desaparecia ao se suprimir a vibração.

O cloreto de potássio, a sílica-gel, as esferas de sagú e os confeitos aluminizados, foram muito suscetíveis aos efeitos de atrito, pois após se movimentarem acerca de 10 minutos sob ação de vibração, já era observada a formação de pó no interior do leito. Para aumentar a resistência superficial ao desgaste destes materiais, decidiu-se recobrir as partículas de sagú e de confeitos aluminizados com uma resina epoxi.

A adição de cerca de 1 grama de graxa de lubrificação a 2600 g de esferas de vidro, com 3,8 mm de diâmetro, reduziu a taxa de circulação dos sólidos no LVJ em mais de 80%. Isto ocorreu por acidente, mas serviu para denotar o notável efeito da viscosidade superficial dos sólidos sobre o movimento do leito.

Os resultados iniciais de secagem, não foram satisfatórios, pois não asseguravam uma eficiência da secagem em LVJ, com tubo interno, superior a de leito estático.

O primeiro ensaio de secagem em LVJ foi realizado com sagú previamente umedecido, com água atomizada, sendo a umidade inicial $X_0 = 0,41 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ de sagú seco. A carga no leito era 52 kg de sagú/ m^2 de área da seção transversal cilíndrica do secador. O ar de secagem estava na temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e escoava à velocidade de $0,28 \text{ m/s}$. Um outro ensaio de secagem foi realizado usando um vaso cilíndrico, com diâmetro idêntico ao da seção superior do LVJ, operando sem vibração e mantendo constante todas as outras condições de operação. Os resultados indicaram que o tempo de secagem em LE foi inferior ao da operação em LVJ. No primeiro caso, a melhor distribuição de ar na totalidade da seção transversal do secador, predominou sobre o efeito da circulação das partículas na operação em LVJ.

Outros ensaios de secagem foram realizados com o leito formado por grãos de ervilha previamente umedecidos, $X_0 = 0,38 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ ervilha seca e carga de 77 kg/m^2 , usando o secador de LVJ e o mesmo equipamento operando sem vibração e sem tubo central. A velocidade e a temperatura do ar de secagem era $0,35 \text{ m/s}$ e 50°C . Durante a secagem em LVJ, foi verificado que a intensidade do movimento no leito aumentava, com o transcorrer da secagem, a medida que diminuía o conteúdo de umidade dos sólidos. Apesar de ocorrer agitação do leito na operação em LVJ, ao final de 2 horas de secagem os dois procedimentos operacionais praticamente proporcionaram produtos finais com idênticos conteúdos médios de umidade. Ensaio de secagem usando cilindros de macarrão, previamente umidificados, apresentaram um comportamento semelhante ao anterior.

Este estudo inicial de secagem indicou ainda a homogeneidade de de umidade de amostras de produtos secados em LVJ, devido ao

movimento permanente dos sólidos no leito, mas não houve evidências de redução do tempo de secagem comparado com leitos não vibrados. Isto deve-se provavelmente ao fato da resistência interna à transferência de massa predominar sobre a externa, para os materiais testados, e a agitação do leito que promove a exposição permanente da superfície dos sólidos ao ar em escoamento, ter exercido nestas situações pouca influência na secagem.

Para pesquisar situações em que o secador de LVJ apresenta desempenho superior a de outros equipamentos, os ensaios se concentraram na secagem de cubos de batata, pelo fato deste material possuir um alto conteúdo de umidade inicial e na secagem de grãos de soja, onde foi dado ênfase especial ao aquecimento indireto do leito, usando um aquecedor submerso. Os dois alimentos escolhidos representam duas classes bem distintas de materiais, a batata pouco elástica e a soja muito elástica. Os resultados são descritos e comentados nos capítulos V e VI.

B , DESENHO E CONSTRUÇÃO DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO

Para estudar a dinâmica do leito e o desempenho do secador, foi desenhada e executada a instalação descrita a seguir e esquematizada na Figura III-1. As Figuras III-2 e III-3 são vistas do equipamento.

O secador de LVJ apresenta os seguintes componentes: I) admissão do ar de secagem por um soprador centrífugo (A), ASTEN - motor de 0,75 cv; II) controle da vazão de ar até $1,6 \text{ m}^3/\text{min}$, por estrangulamento da seção transversal no flange de admissão do ar no secador (B); III) tubulação de chapa galvanizada (C) com 160 mm de DI e 3 metros de comprimento. O perfil de velocidade do ar tende a uniformizar-se a medida que o ar percorre a tubulação;

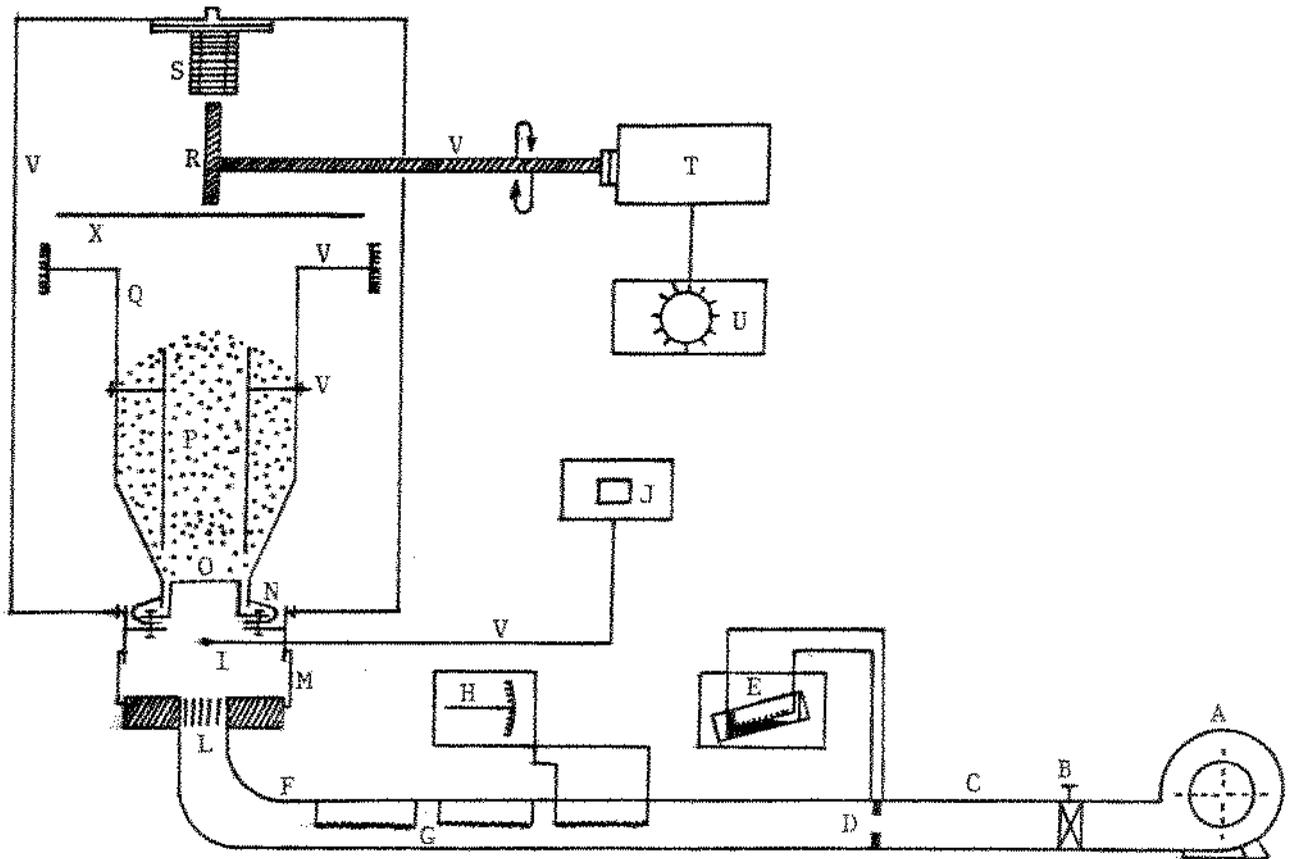


Figura III-1 . Esquema do secador de leite vibro-jorrado.

A) Soprador centrífugo; B) Controlador de vazão do ar; C) Tubulação da chapa galvanizada; D) Medidor de orifício; E) Manômetro ; F) Tubulação de cimento amianto; G) Resistência elétrica ; H) Transformador de voltagem; I) Termopar; J) Registrador de temperatura; L) Uniformizador de fluxo de ar; M) Conexão de borra-cha; N) Diafragma de borraça; O) Pistão e distribuidor de ar ; P) Tubo cilíndrico; Q) Vaso de secagem; R) Sistema de vibração ; S) Seguidor e mola; T) Motor elétrico; U) Variador eletrônico de velocidade do motor; V) Conexões; X) Anteparo de acrílico.

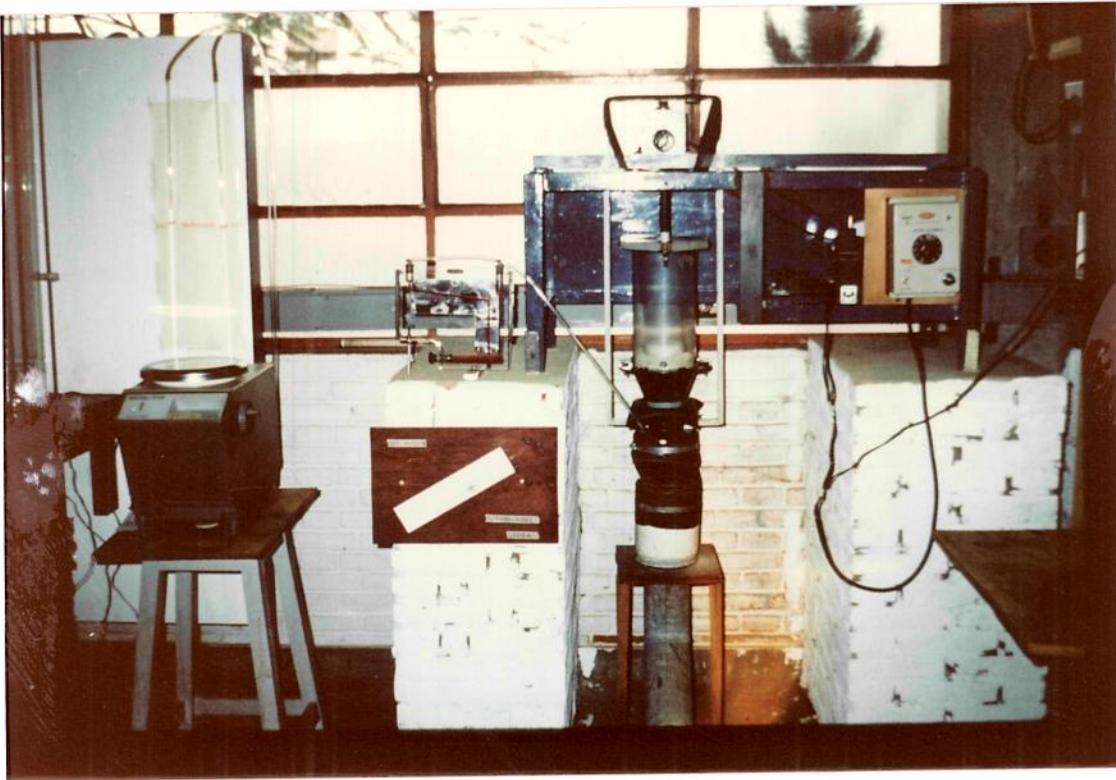


FIGURA III-2 . Vista parcial da instalação experimental do secador de leito vi-
bro-jorrado



Figura III-3 . Vaso de secagem com o leito formado por partículas de sagú sub-
metido à ação vibracional. A fonte, formada pelas partículas, destaca-se no to
po do tubo interno.

IV) medida da vazão de ar através de utilização de um medidor de orifício calibrado (D), executado segundo OWER e PANKHURST (1977) e calibrado com um medidor de fluxo de ar, MERIAM LAMINAR FLOW ELEMENTS. A calibração foi efetuada colocando-se em série os dois medidores FINZER (1984); V) sistema de aquecimento do ar de secagem, constituído por 3 resistências elétricas de níquel cromo (G). Em um suporte de cimento amianto, foram enroladas as resistências elétricas, em paralelo, com conexões independentes, cada uma constituída de aproximadamente 30 metros de fio de 2,122, ohm/m. O conjunto foi montado no interior de uma tubulação de cimento amianto (F). Uma das resistências elétricas foi ligada em série com um transformador variável, tipo VARIAC (H), (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 de fluxo de ar (L), constituído por 52 tubos de cobre (DE= 12 mm, espessura 1,5 mm), soldados entre si, constituindo uma colmeia e ocupando toda a seção transversal da tubulação vertical de cimento amianto. O perfil uniforme de velocidade foi verificado através de utilização de um tubo de pitot ligado a um micro-manômetro; VII) vaso de secagem (Q), constituído por um tubo cilíndrico de acrílico (seção superior), com 145 mm de DI, espessura da parede 5 mm com 300 mm de altura. A seção inferior foi executada em cha pa de aço na forma de um tronco de cone, com 90 mm de altura, sendo o ângulo interno do cone 43°. Na base do cone foi adaptado um cilindro metálico com 25 mm de altura e 86 mm de DI. No interior deste cilindro foi instalado um pistão (O), DI = 85 mm, com a extremidade superior constituída por uma tela rígida de aço inoxidável de 15 malhas (diâmetro do fio = 0,65 mm), com aberturas de 1 mm. Este pistão, conectado externamente ao sistema de vibração,

transmite o movimento vibratório para as partículas no vaso de secagem. Envolvendo o sistema pistão-cilindro, foi adaptado um diafragma de borracha (N), com funções de conectar a parte móvel com a fixa da instalação e não permitir fugas do ar de secagem; Um cilindro flexível de borracha (M), também teve a função de conectar a parte fixa com a móvel do equipamento, sendo a vedação efetuada por duas abraçadeiras removíveis. Uma das abraçadeiras era removida instantes antes de se efetuar a pesagem do sistema durante ensaios de secagem, para quantificar a perda de umidade dos sólidos; VIII) um cilindro de PVC (P), removível, com altura variável (10, 13 e 16 mm) e diâmetro (48, 73 e 99 mm), com espessura de 1,5 mm, foi fixado no centro do vaso de secagem, separando as regiões de escoamento ascendente e descendente do leito; IX) sistema de vibração tipo camo, com possibilidade de variação da amplitude e frequência de vibração, (R). Detalhes do sistema de vibração são mostrados na Figura III-4. O camo foi acoplado a um motor elétrico (T), ASTEN de 1 cv, com velocidade de rotação regulada por um variador eletrônico de velocidade (U) ASTEN, o que permitiu operar

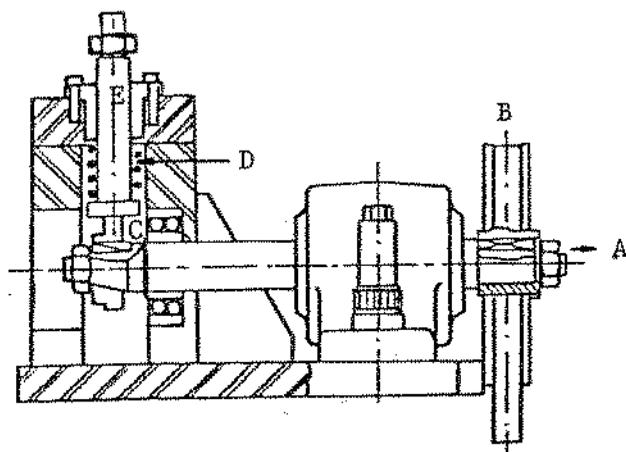


Figura III-4 . Mecanismo de vibração; A) Motor elétrico; B) Polia e correia ; C) Excêntrico; D) Mola; E) Seguidor.

na velocidade desejada. A transmissão do movimento rotacional, do motor para o camo era realizada por intermédio de uma correia "V". Nos ensaios realizados operou-se com frequências de vibração entre 9,0 a 16,5 Hz, medidas com um tacômetro digital (MICROTEST). Um excêntrico removível, acoplado ao eixo de transmissão do movimento para o cilindro (O), permitiu variar a amplitude de vibração (por substituição do excêntrico). Acima do vaso de secagem (Q), foi instalado um anteparo de acrílico para evitar a contaminação do leito com graxa que as vezes desprendia-se do sistema de lubrificação do camo.

Para estudar o efeito do aquecimento indireto do meio de secagem, por transferência de calor de uma superfície para o leito, o tubo cilíndrico central do secador (P), foi substituído por um cilindro de cobre com 52 mm de diâmetro, 210 mm de altura e 1 mm de espessura. Esse cilindro foi revestido externamente por uma fita de amianto, com 25 mm de largura e 1200 mm de comprimento, contendo uma resistência elétrica localizada no seu interior. A fita aquecedora foi recoberta por um tubo de alumínio, com 0,2 mm de espessura, para tornar o sistema hermético. O aquecedor assim constituído é esquematizado na Figura III-5. A instrumentação para acompanhar a geração de calor era composta de um amperímetro, escala de 0 a 5 A com divisões de 0,25 A e de um voltímetro, escala de 0 a 150 V com divisões de 5 V. A intensidade da transferência de calor foi regulada por alteração da voltagem da fonte de energia elétrica, por intermédio de um transformador variável, tipo Variac, entrada 220 volts, saída 0 - 240 V. O amperímetro e o voltímetro foram calibrados por comparação com as medidas de um multímetro digital, TRIEL, série 300.

Nos ensaios de secagem, todo o vaso foi isolado com uma ca

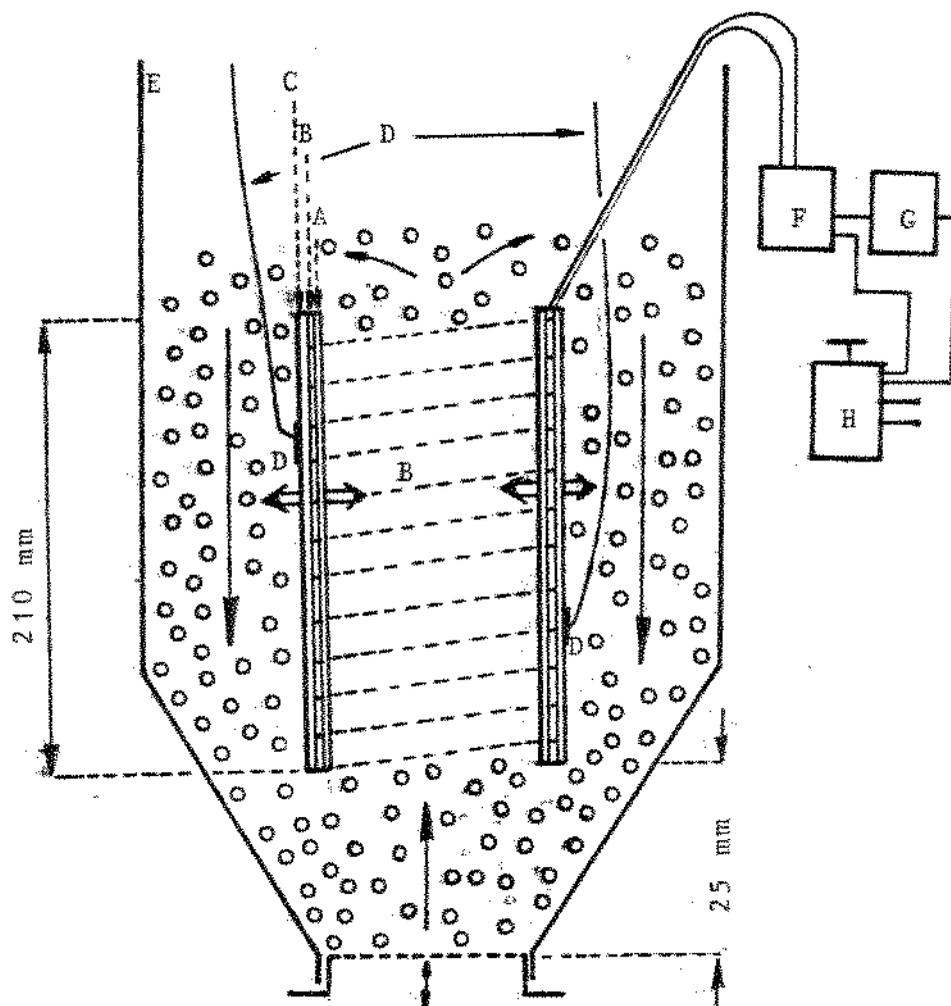


Figura III-5 . Esquema do aquecedor utilizado na operação do secador de LVJ com aquecimento indireto.

A) Tubo de cobre; B) Fita de amianto com resistência elétrica interna; C) Tubo de alumínio; D) Termopar de cobre-constantan; E) Vaso de acrílico; F) Voltímetro; G) Amperímetro; H) Transformador variável de voltagem; escoamento de sólidos (→); fluxo de calor (⇒).

mada de isolante com 5 mm de espessura. O isolante foi fixado ao vaso de secagem por um revestimento externo de alumínio (espessura da fôlha 0,2 mm), que teve também a função de manter a resistência mecânica do sistema, o que permitiu a manipulação do conjunto.

Para medir a temperatura dos sólidos do leite, eram coletadas amostras em um cilindro de plástico, com diâmetro de 30 mm e altura de 48 mm. O centro da base do cilindro era atravessado por um termopar de cobre-constantan, diâmetro do fio 0,6 mm. Após a coleta colocava-se a tampa do cilindro e o sistema ficava em repouso até a temperatura estabilizar-se, e esta era indicada por um indicador de temperatura (S & E). Não foi feita uma calibração desse sistema de medição e os valores das temperaturas obtidas devem se situar um pouco abaixo da real, devido a perdas de calor.

C . TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

C-1 . ENSAIOS PARA ESTUDAR O MOVIMENTO DOS SÓLIDOS NO LEI- TO

Os primeiros ensaios com o LVJ foram realizados para avaliar a dinâmica do leite, formado por grãos de feijão com dimensões médias 0,95 . 0,58 . 0,41 mm, densidade 1,27 g/cm³; esferas de sagú com 4,1 mm de diâmetro médio e densidade média 0,8 g/cm³; esferas de vidro, ($\bar{d}_p = 3,8$ mm; $\rho_p = 2,5$ g/cm³) e confeitos aluminizados ($\bar{d}_p = 5,3$ mm; $\rho_p = 1,4$ g/cm³).

No estudo utilizou-se duas técnicas de medidas para quantificar o movimento dos sólidos no leite. Primeiro utilizou-se uma partícula marcada, recoberta por uma tinta de cor distinta da massa global dos sólidos, e cronometrou-se o tempo que a partícu-

la gastava para completar um ciclo, ou seja, o intervalo de tempo transcorrido entre duas passagens sucessivas pelo topo do tubo (P) da Figura III-1. O segundo método utilizou coletores anulares com uma abertura central que adaptavam-se perfeitamente ao diâmetro externo do tubo interno (P). Com este dispositivo determinou-se a massa de sólido que abandonava o tubo central em intervalos de 3 segundos. O uso do pequeno intervalo de tempo de coleta foi necessário para reduzir a influência, durante a medida, da diminuição da carga de sólidos no leito. A taxa média dos sólidos era avaliada pesando o conjunto coletor-partículas em uma balança MARTE, precisão de 0,1 g, em seguida as partículas eram recolocadas no interior do LVJ.

C-2 , PREPARO DA MATÉRIA PRIMA

Os ensaios de secagem foram realizados com dois materiais: I) cubos de batata (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) com 5 e 10 mm de aresta e II) grãos de soja (*GLYCINE MAX* (L.) MERRIL), sendo o diâmetro médio dos grãos secos 6,7 mm. As duas matérias primas foram adquiridas em supermercado.

Os tubérculos foram fatiados em peças de 5 mm de espessura com um cortador manual calibrado. As fatias foram comprimidas contra placas de aço inoxidável com bordas cortantes, que formavam uma grade quadriculada, gerando os cubos com 5 mm de aresta. Na formação dos cubos maiores, os tubérculos foram comprimidos contra uma grade quadriculada com aberturas de 10 mm. Os paralelepípedos formados foram posicionados na grade entre duas placas paralelas e nova compressão gerou os cubos.

Os grãos de soja usados nos ensaios de secagem, foram hi-

dratados por imersão em uma massa de água à temperatura ambiente, igual a massa dos sólidos secos, durante um intervalo de tempo. Um tempo de contato de 20 minutos conduziu a um conteúdo de umidade das partículas de cerca de 30%; para um tempo de contato de 15 minutos a umidade obtida foi em torno de 20%. Após a imersão, o excesso de água foi drenado usando uma peneira e os grãos acondicionados em um saco de plástico. O conjunto foi colocado no interior de um recipiente hermético e este no interior de uma geladeira, $T = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, por cerca de 20 horas, para uniformizar o conteúdo de umidade dos sólidos. A temperatura inicial dos sólidos alimentados no secador era de aproximadamente $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

D . OPERAÇÃO DO SECADOR

Nos estudos da dinâmica do leito, após a carga de sólidos ser adicionada ao secador, acionava-se o sistema de vibração e o soprador centrífugo. A intensidade de vibração e a vazão de ar eram quantificados por meio de um tacômetro e do medidor de orifício. As condições de operações eram atingidas modificando-se a velocidade do motor do vibrador e a abertura no flange de sucção do soprador.

Nos ensaios com aquecimento direto do leito, o ar aquecido circulava pela tubulação e pelo vaso de secagem, por 30 minutos. Em seguida a matéria prima previamente pesada em uma balança MARTE (precisão de 0,1 g) era adicionada no secador, após o que o sistema de vibração era acionado.

Durante o transcorrer da secagem, a resistência ao escoamento de ar variava, devido a contração do material com a perda de umidade. Isto influenciava a velocidade e a temperatura do ar de se-

cagem. A correção destes parâmetros era feita manualmente, não permitindo-se que a temperatura do ar de secagem excedesse em 0,5 °C o valor pré-fixado.

Nos ensaios de secagem de cubos de batata, em intervalos de 15 minutos, a abraçadeira que unia o vaso de secagem à conexão flexível de borracha (M, Figura III-1), era afrouxada. A vibração era interrompida desligando o motor e rapidamente (cerca de 8 a 10 segundos), retirava-se os parafusos de fixação do vaso de secagem. A pesagem do vaso de secagem era realizada em cerca de 6 segundos. Este era o único intervalo de tempo no qual o material ficava sem contato com o ar de secagem. O conjunto era novamente conectado e re-iniciada a vibração. Nos ensaios agitados mecanicamente, o vaso permanecia no máximo 40 segundos sem receber a influência vibracional.

O conteúdo de umidade dos cubos de batata foi quantificado colocando amostras do material sobre placas de petri e estas em uma estufa FANEM à temperatura de 70 °C por cerca de 12 horas para eliminar parte da umidade dos sólidos. Em seguida as amostras eram colocadas em uma estufa FANEM, à temperatura de 70 °C sob vácuo de 27 polegadas de mercúrio durante 6 horas, suficiente para retirar a umidade final dos sólidos: HART e FISCHER (1971) ; MAKOWER et alii (1946).

A umidade dos grãos de soja foi quantificada colocando inicialmente o material no interior de uma estufa, FANEM, na temperatura de 70 °C, durante cerca de 15 horas. Em seguida as amostras eram colocadas no interior de outra estufa FANEM, ajustada à temperatura de 105 °C até o material atingir peso constante.

As medidas de temperatura do ar de secagem, na entrada e na saída do leito e no interior da suspensão ar-sólidos, foram e-

feteadas com termopares de cobre-constantan com diâmetro de 0,6 mm, previamente calibrados, acoplados a um indicador digital de temperatura de 10 canais (S & E) com precisão de leitura de 0,1 °C.

As condições psicrométricas do ar ambiente foram quantificadas a partir das temperaturas de bulbo seco e úmido, esta última foi medida usando um termômetro com o bulbo revestido por uma camada de gaze de algodão umedecido. Os cálculos das umidades absoluta e relativa do ar foram efetuadas usando um programa de computador (Apêndice B).

CAPÍTULO IV

EFEITO DA VIBRAÇÃO DO SUPORTE DO LEITO NA DINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO

A . INTRODUÇÃO

Neste capítulo é estudado e analisado o comportamento das partículas no LVJ, usando a instalação experimental esquematizada na Figura III-1. Nos experimentos o leito foi formado por diversos materiais: grãos de feijão, esferas de vidro, sagú, confeitos aluminizados e fatias de cebola. A utilização de partículas com características físicas e geométricas diferentes, teve como objetivo a realização de uma análise qualitativa e quantitativa da reação do LVJ, ao ser excitado por efeitos vibracionais.

O presente estudo inclui uma avaliação do comportamento das partículas no leito, dados de perda de pressão e de taxa de circulação das partículas e o efeito da amplitude e da frequência de vibração na circulação das mesmas.

B . TEMPO DE RESIDÊNCIA

Na secagem de materiais sólidos em batelada, operando em leito de jorro ou fluidizado, o tempo de secagem é o mesmo para todas as partículas. Quando a operação é contínua, normalmente o tempo de secagem varia consideravelmente. Uma partícula pode deslocar-se rapidamente da entrada para a saída e abandonar o secador com conteúdo de umidade alto. A partícula pode também permanecer no secador por um período superior ao requerido para comple-

tar a secagem. O desempenho de unidades ampliadas pode ser previsto usando modelos de fluxo e correlações, obtidas pelo uso do princípio da similaridade, juntamente com os resultados experimentais provenientes da unidade reduzida.

Normalmente a distribuição do tempo de residência das partículas no secador é determinada usando o método estímulo-resposta. O estímulo corresponde à alimentação de partículas marcadas no secador, enquanto a resposta trata do registro do tempo de saída das partículas. A distribuição do tempo de residência do material no equipamento é descrita pela função $F(t)$, que representa a fração em peso do material que permanece no equipamento por um intervalo de tempo Δt . Na Figura IV-1 são esquematizados gráficos da função $F(t/\bar{t})$, onde \bar{t} é o tempo de residência médio das partículas no leito. Na figura as curvas representam: a) escoamento pistonado; b) baixo grau de mistura; c) mistura ideal; d) parte do material permanece por longo tempo em regiões estagnadas do equipamento.

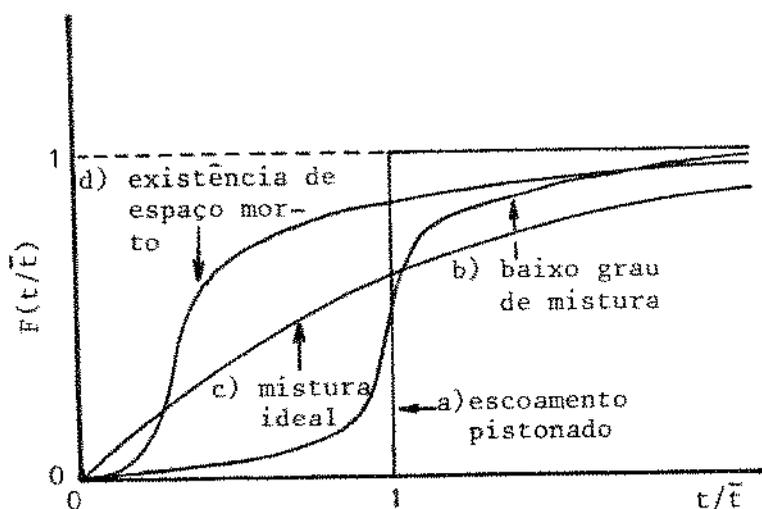


Figura IV-1 . Função $F(t/\bar{t})$, para diferentes modelos de escoamento dos sólidos

Uma outra função de distribuição $E(t)$, definida por $E(t) = dF(t)/dt$ e $E(t) dt$ representa a fração em peso do material na saída do equipamento, cujo tempo de residência situa-se entre t e $t + dt$. Destas definições:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad \text{e} \quad \int_0^{\infty} E(t) dt = 1$$

O tempo de residência médio das partículas no secador é dado por:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} E(t) t dt \approx \sum t_i E_i \Delta t_i \quad (\text{IV-1})$$

onde: t_i é o tempo da amostragem, Δt_i o intervalo de tempo, $E_i = C/Q$ e $Q = \sum C \Delta t_i$ sendo C a concentração das partículas marcadas na saída do secador (LEVENSPIEL, 1974; VANECEK et alii, 1966; WEN e FAN, 1975).

Quando a descarga dos sólidos pode ser medida, o tempo de residência médio das partículas no leito é expresso por:

$$\bar{t} = \frac{V}{\dot{W}} \quad (\text{IV-2})$$

onde V é a massa de sólidos no leito e \dot{W} a descarga de sólidos que sai do equipamento (NAUMAN e BUFFHAM, 1983).

C . COMPORTAMENTO DAS PARTÍCULAS NO LVJ

O secador de LVJ usado nos ensaios é de fato um sistema em batelada, pois a circulação é interna, com as partículas abando-

nando o topo do tubo interno e retornando ao leito. Em um processo contínuo elas são retiradas naquela posição e introduzida uma nova alimentação. Em uma operação contínua em múltiplas etapas, o sistema esquematizado na Figura III-1, constituiria uma das etapas da instalação. O estudo do comportamento dos sólidos no LVJ, supõe uma operação contínua, mas os parâmetros levantados são importantes para definir a agitação e a taxa de circulação de sólidos no leito em batelada.

Testes preliminares realizados para avaliar o efeito da amplitude de vibração na dinâmica do leito, indicaram que o aumento da mesma melhora a taxa de circulação das partículas. Uma excentricidade de 8 mm (Amplitude= 4 mm) foi selecionada como máxima por limitação técnica do equipamento, conforme será analisado na seção E.

Estudos iniciais visando definir um método para medir a taxa de circulação dos sólidos foram efetuados usando grãos de feijão com as seguintes dimensões principais 0,95 . 0,58 . 0,41 mm e duas técnicas de medida. Primeiramente utilizou-se um grão de feijão marcado e fez-se um levantamento da distribuição do tempo necessário para a partícula completar um ciclo, ou seja, cronometrou-se o tempo transcorrido para uma partícula marcada deixar o topo do tubo P (Figura III-1) e retornar à mesma posição. Isto corresponde a uma entrada de pulso e a medida do tempo de residência da partícula em cada ciclo constitui a resposta. As condições de operação e geométricas utilizadas foram: Amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12,1 Hz, respectivamente; carga de 1800 g de feijão; diâmetro do tubo central 73 mm; distância média do tubo central até a base do cilindro vibratório 29 mm. O resultado do ensaio, usando 50 repetições é mostrado na Tabela IV-1 e o histograma da distri-

Tabela IV-1 . Distribuição do tempo de residência

Tempo de residência, t (s)	Porcentagem das partículas, P	Tempo médio, t_i (s)	Intervalo de tempo, Δt_i (s)
40 - 50	4	45	10
50 - 60	30	55	10
60 - 70	36	65	10
70 - 80	18	75	10
80 - 90	10	85	10
90 - 100	2	95	10

buição dos tempos de residência na Figura IV-2.

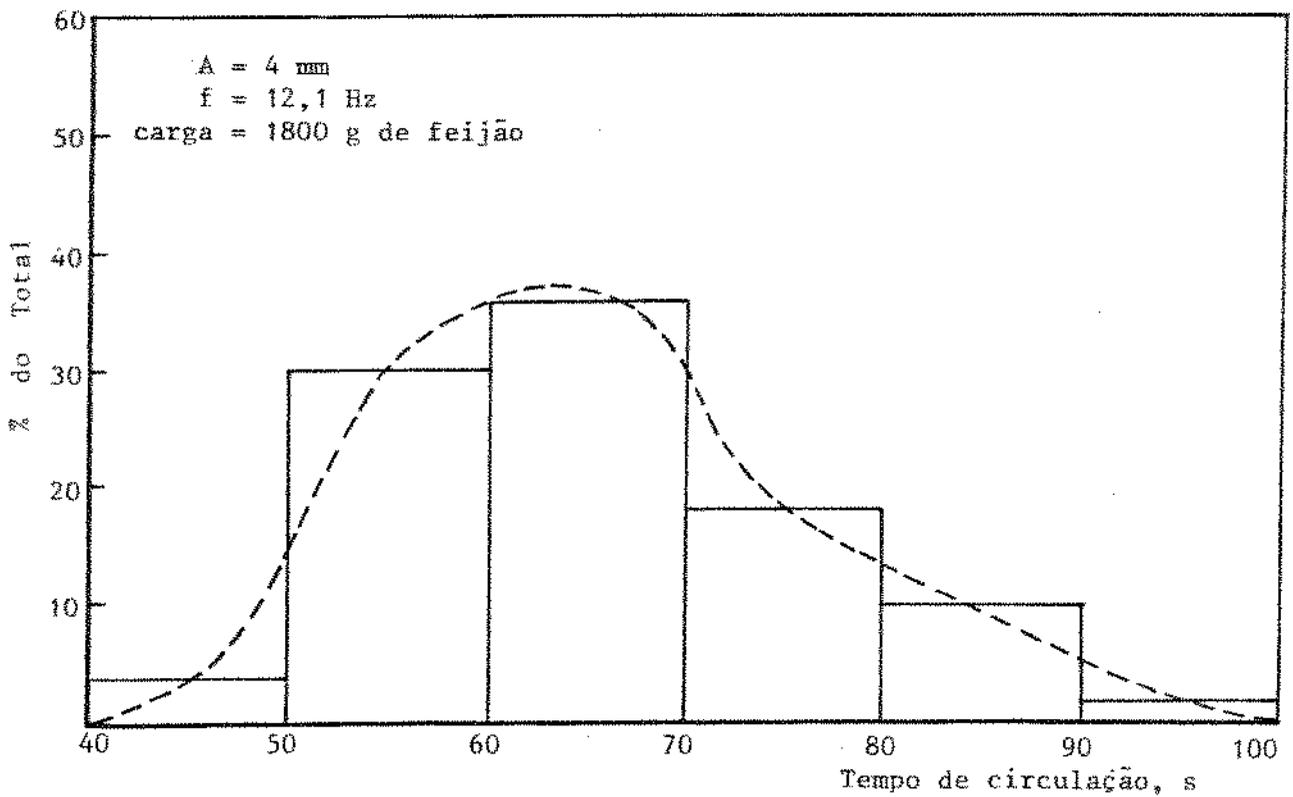


Figura IV-2 . Tempo de circulação de uma partícula marcada.

O tempo de residência médio das partículas no leito pode ser calculado usando a Equação (IV-1).

$$Q = \sum C \Delta t_i = (4 + 30 + 36 + 18 + 10 + 2) 10$$

$$Q = 1000 \text{ s}$$

$$E_i = P/1000, \text{ s}^{-1}$$

$$\bar{t} = 10 [\sum t_i E_i] = 65,6 \text{ s}$$

Como método alternativo para medir o tempo de residência, foi utilizado o coletor anular já descrito e determinou-se a massa de feijão que abandona o tubo central em um intervalo de 3 segundos. A média de 10 repetições foi 27,3 g/s. Como o leito total tinha 1800 g, o tempo de residência médio das partículas por ciclo foi: $\Gamma = 1800/27,3 = 65,8 \text{ s}$. Os dois valores são muito próximos, indicando que qualquer das duas técnicas pode ser utilizada.

Usando os resultados da Tabela IV-1, foi construída a curva da Figura IV-3, onde a ordenada representa $F(t_i/\bar{t})$ e a abscissa (t_i/\bar{t}) . Comparando a curva com as da Figura IV-1, pode ser verificado, que o movimento do material no equipamento corresponde ao escoamento pistonado com baixo grau de mistura, apresentando recirculação.

A Figura IV-4 esquematiza a trajetória desenvolvida pelos grãos de feijão ao se deslocarem pelo vaso de secagem. Um movimento singular ocorre no interior do tubo central conforme esquematizado na figura. Este tipo de recirculação interna já foi constatado por Kroll em STRUMILLO e PAKOWSKI (1980) e por FINZER e KIECKBUSCH (1983). No presente trabalho isto foi verificado acompanhando-se visualmente uma partícula marcada. As vezes ela aparecia no topo do tubo (P) da Figura III-1, e em seguida passava pa-

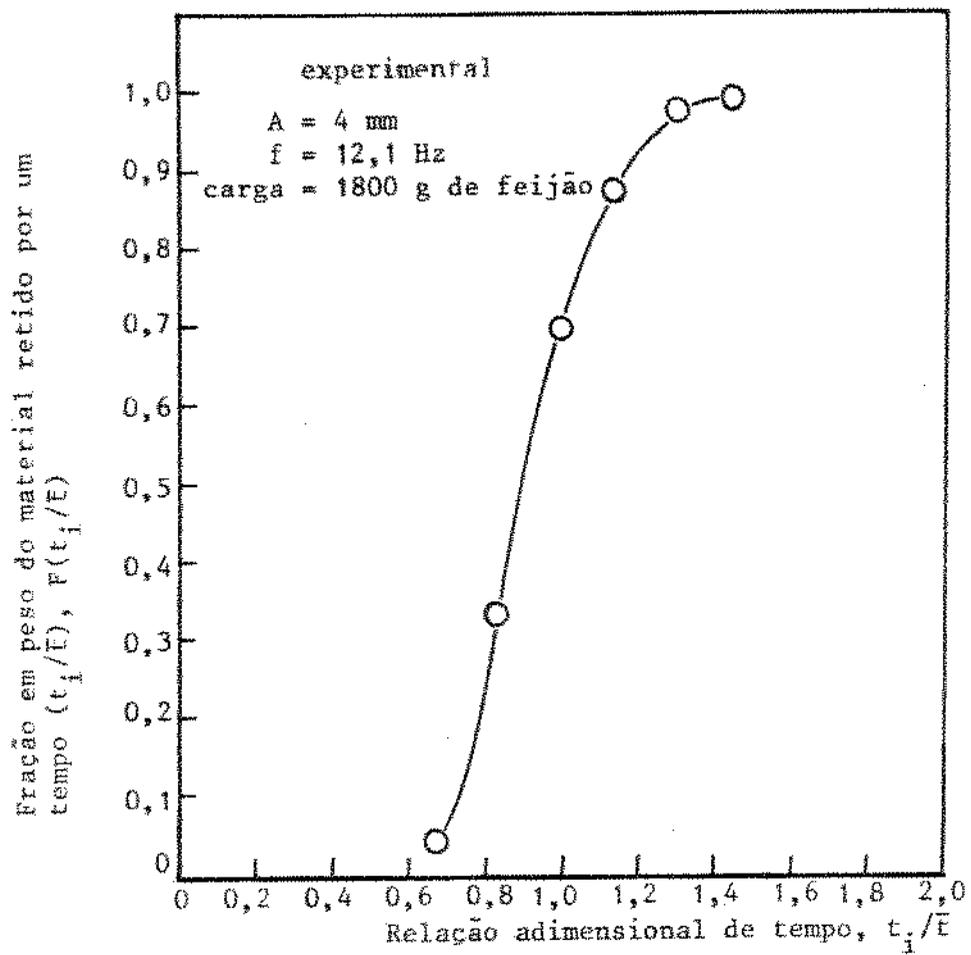


Figura IV-3 . Função $F(t/\bar{E})$ para o LVJ.

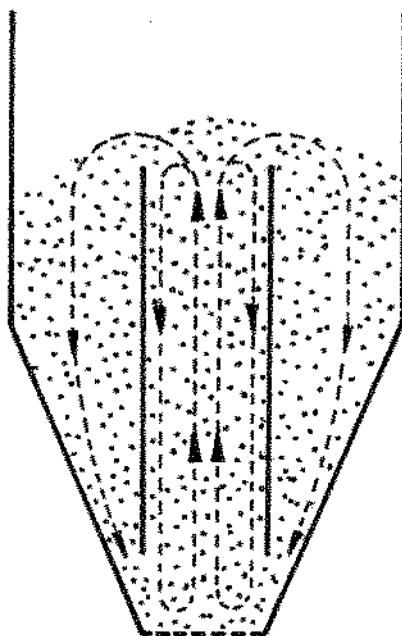


Figura IV-4 . Movimento das partículas no leito vibro-jorrado.

ra o espaço anular; outras vezes surgia e desaparecia no topo por diversas vezes até conseguir passar para o espaço anular.

Após abandonarem o topo do tubo central (P), as partículas posicionavam-se ao acaso sobre qualquer posição da seção transversal do espaço anular e deslocavam-se para o fundo do LVJ, devido ao movimento deslizando do leito.

Ensaio posteriores com o leito formado por esferas de vidro, sagú e confeitos aluminizados, confirmaram o movimento descrito no tubo cilíndrico e no espaço anular. O deslocamento das partículas no espaço anular foi mais fácil de acompanhar uma vez que o tubo externo de acrílico era transparente.

Estas observações indicam que a recirculação das partículas tipo (*"back mixing"*), no tubo central, é a principal responsável pela dispersão do tempo de residência mostrado na Figura IV-2. A distribuição ao acaso das partículas quando lançadas no topo do leito, devido a formação da fonte, também exerce influência, menor, na distribuição do tempo de residência.

Uma característica peculiar do LVJ é a tendência de uniformização da porosidade em todo leito, quando o ar não percola o mesmo ou então o faz à baixa velocidade. Nestas situações observa-se que, no jorro do tubo central, a porosidade não é superior a 5% à do espaço anular. Isto significa que todo o escoamento ocorre em regime de fase densa.

No leito de jorro convencional, a porosidade no jorro é alta, aproximando-se de 100%, imediatamente acima do orifício de entrada. A operação em fase densa no LVJ, apresenta as vantagens em relação ao leito de jorro convencional: aumento da capacidade de processamento dos sólidos, por m^2 de área instalada, devido à

menor porosidade global do leito; redução do consumo de ar e aproveitamento mais eficaz de calor sensível do ar de secagem, pois no leito de jorro convencional o ar que abandona o leito de secagem ainda apresenta um alto potencial de secagem, pelo baixo tempo de permanência no equipamento.

D . PERDA DE PRESSÃO E TAXA DE CIRCULAÇÃO DAS PARTÍCULAS

O comportamento do leito vibro-jorrado, em função da velocidade do ar sob condições ambientes ($T \approx 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), será quantificado em termos da taxa de escoamento das partículas no leito e da queda de pressão no mesmo.

A Figura IV-5 apresenta as curvas obtidas com pérolas de sagü de 4,1 mm de diâmetro médio, revestidas com uma película de resina epoxi. As condições de operação e dimensões geométricas do sistema também são indicados na figura. Os pontos das curvas foram obtidos aumentando-se gradativamente a velocidade superficial do ar (referida ao diâmetro da seção cilíndrica do vaso de secagem), mantendo fixa a frequência de vibração (11,8 Hz) que corresponde a uma situação otimizada (veja Figura IV-11). A observação mais marcante, que se pode concluir das curvas, é em relação ao movimento circulatório das partículas, que se mostrou considerável à velocidade do ar muito abaixo da velocidade mínima de jorro, que para este sistema ocorria em torno de 125 cm/s.

Sem escoamento do ar a taxa de circulação das partículas de sagü é máxima. Aumentando gradativamente a velocidade do ar, observa-se uma redução desta circulação. Tudo indica que o ar em escoamento exerce uma ação resistiva sobre as partículas do espaço anular, diminuindo seu deslocamento descendente. À velocidade

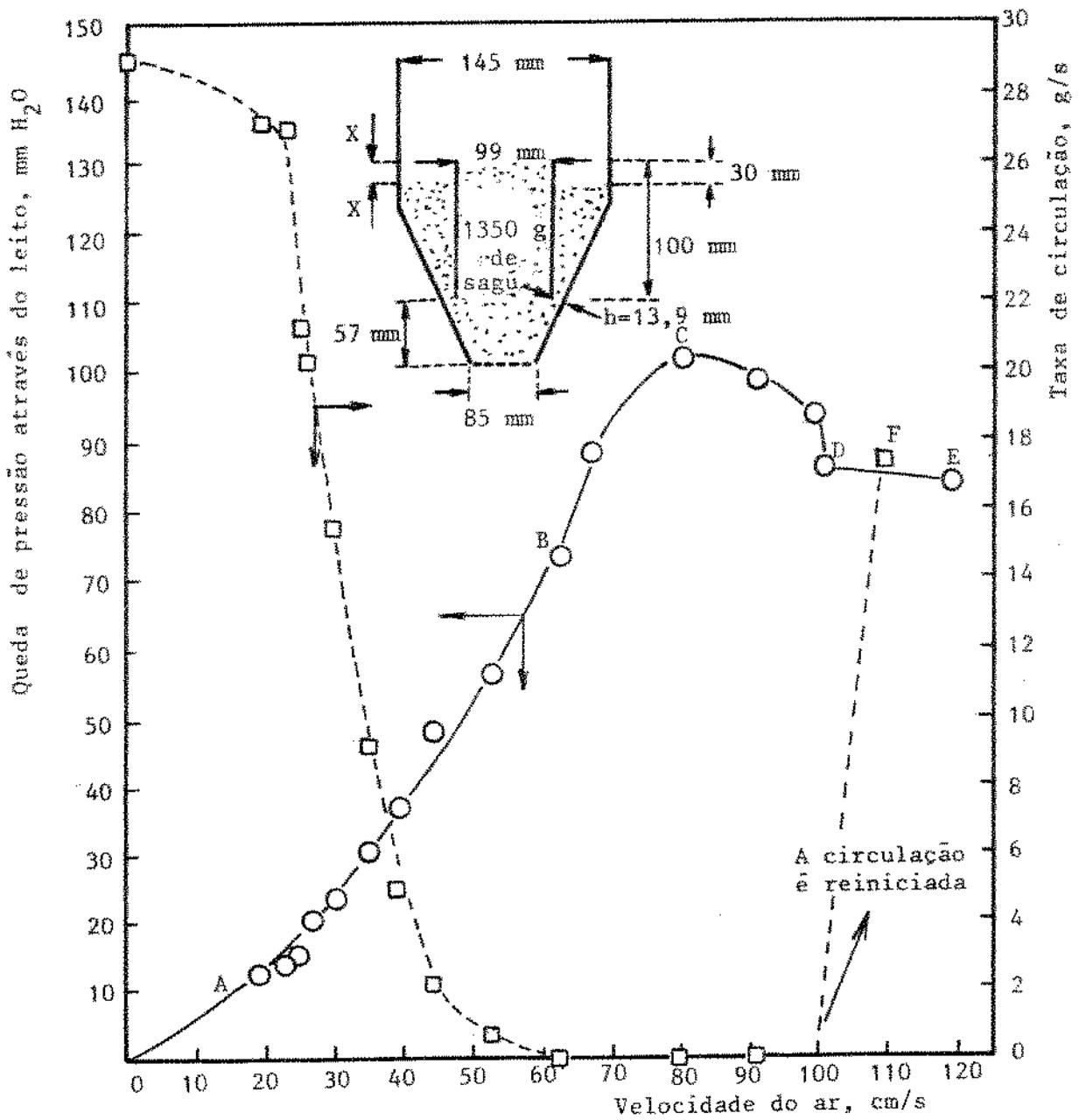


Figura IV-5 . Queda de pressão no leito e taxa de circulação de p erolas de sa-
g u de 4,1 mm de di metro. Condi es de vibra o: A = 4 mm; f = 11,8 Hz.

do ar de 60 cm/s (ponto B), cessa toda circulação. É possível que em torno desta velocidade do ar ocorra uma leve compressão das partículas na base do leito, formando-se uma cavidade no mesmo imediatamente acima da entrada do gás. Isto também ocorre nos leitos de jorro convencionais.

No trecho B-C, a pequena redução do coeficiente angular da curva de queda de pressão sugere uma ligeira expansão do leito e ou ampliação da cavidade central na base do mesmo, podendo ainda surgir um jorro interno como no leito de jorro convencional. No ponto C a perda de pressão é máxima.

A partir do ponto C, observou-se uma inversão no sentido do deslocamento das partículas. Tudo indica que devido à maior altura do material no tubo central e a baixa permeabilidade na interface que delimita a cavidade onde as partículas devem estar comprimidas entre si pela ação resistiva do ar, o mesmo deve se desviar pelo espaço anular provocando a expansão e a inversão do sentido do movimento das partículas. Com o aumento gradativo da velocidade do ar, as partículas chegam a ocupar praticamente todo o espaço livre X-X, na Figura IV-5 (cerca de 30 mm).

O movimento vibratório do pistão ("O" na Figura III-1), responsável pelo aumento e redução da pressão no espaço vazio que se forma entre o fundo e o suporte do leito, também influencia o movimento das partículas no LVJ. Isto é devido à separação e junção periódica do pistão e do leito mostrado nas Figuras II-30 e II-46. Entretanto como o pistão apresenta a seção transversal formada por uma tela, este efeito deve ser atenuado. É provável também que o citado efeito seja minimizado quando aparece a cavidade já mencionada, ou seja, uma fração da superfície da base do leito não entra em contato direto com o pistão vibratório.

No trecho C-D ocorre redução da perda de pressão com o aumento da velocidade do ar, devido a expansão citada acima e a provável ampliação do jorro interno. Um pouco antes do ponto D, deve ocorrer o rompimento do jorro interno (como no leito de jorro convencional), o que explica a redução brusca na perda de pressão mostrada na Figura IV-5. Com a velocidade do ar em cerca de 100 cm/s (ponto D), é reiniciada a circulação das partículas. Usando a técnica da partícula marcada obteve-se o ponto F que é o mesmo da Figura IV-6.

No trecho D-E a queda de pressão no leito, mantém-se aproximadamente constante. Continuando a aumentar a velocidade do ar ocorre certa instabilidade na queda de pressão, difícil de reproduzir e portanto não mostrado na Figura IV-5.

Além do ponto D, o meio no interior do cilindro interno torna-se muito diluído. Nesta região é provável que a influência do arraste do ar predomine, pois a partir deste valor, já se forma o jorro convencional. Adotando a terminologia dos leitos fluidizados-vibrados, ter-se-ia então uma situação de leito de jorro-vibrado. É importante salientar que nesta faixa de velocidade do ar, observou-se visualmente que o movimento das partículas é superior ao promovido sem vibração, isto é, somente pela ação do ar (leito de jorro convencional).

O formato geral da curva de perda de pressão (Figura IV-5) é parecido com a de leitos fluidizados (KUNII e LEVENSPIEL, 1969) e de leitos de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974). O pico da queda de pressão (ponto C) geralmente não existe nos sistemas vibrados (MALHOTRA et alii, 1984; STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

A Figura IV-6 mostra o efeito do diâmetro do tubo interno sobre a taxa de circulação das partículas para operação além do

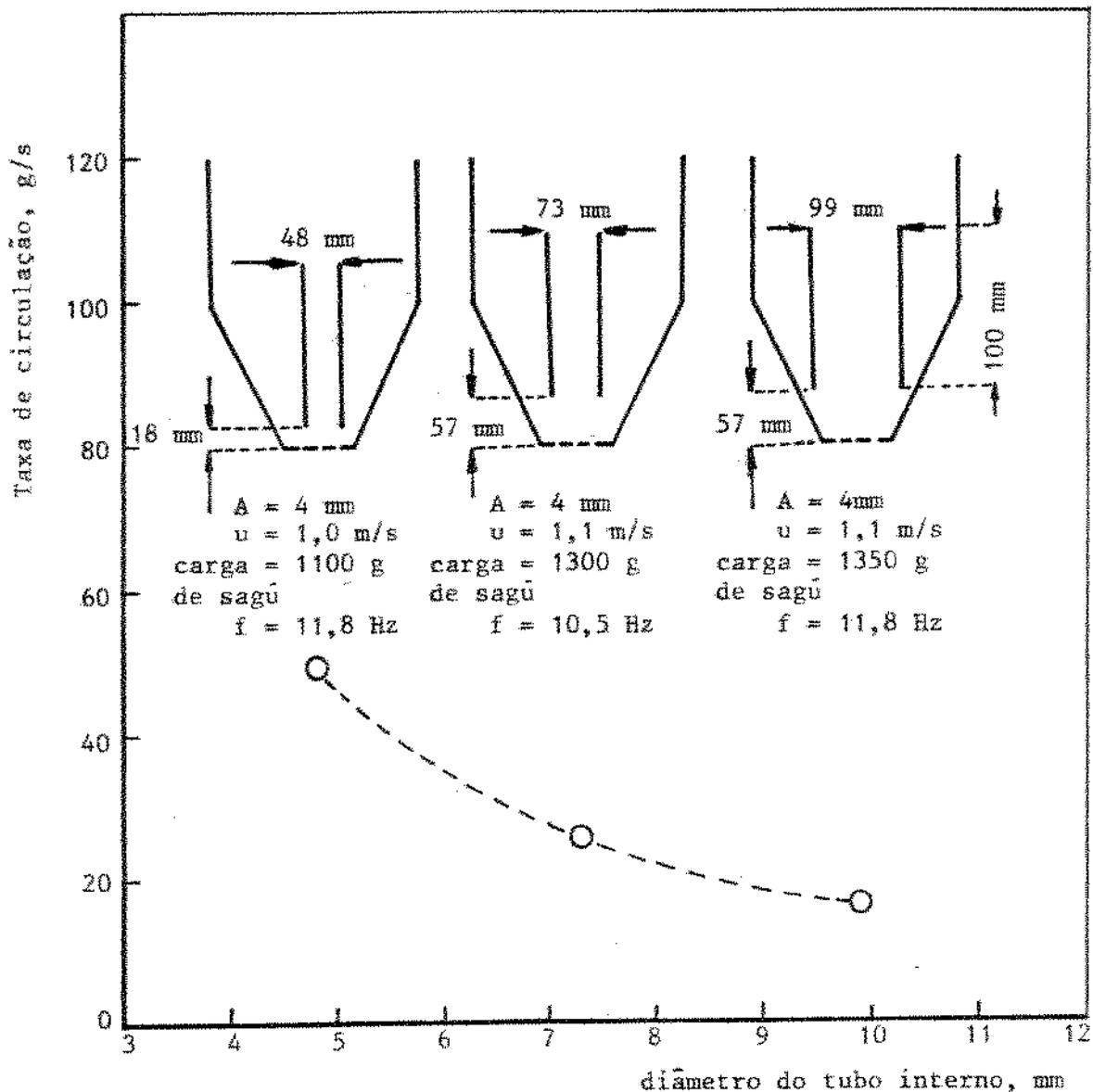


Figura IV-6. Taxa de circulação de partículas de sagü com 4,1 mm de diâmetro em função do diâmetro do tubo interno.

ponto D na Figura IV-5. A amplitude de vibração era 4 mm e as outras condições geométricas e de operação são indicadas na figura. O uso de tubos internos com menores diâmetros possibilitou a promoção de taxas de circulação mais elevadas e isto deve ser resultado de uma série de efeitos superpostos, tais como: I) Maior área da seção transversal, no espaço anular, disponível ao escoamento dos sólidos; II) Menor possibilidade das partículas recircularem no interior do tubo interno devido ao menor espaço disponí-

vel; III) Possibilidade do ar escoar com maior velocidade no tubo interno, devido à maior porosidade associada ao efeito de parede.

A dinâmica do LVJ é diferente quando não existe o tubo interno. Operando com cargas de feijão, sagú e esferas de vidro suficientes para preencher a seção cônica do vaso foi observado um movimento circulatório semelhante ao indicado na Figura IV-4, embora não ocorresse supressão do mesmo com o aumento da velocidade do ar, constatou-se que o aumento da carga de sólidos reduz o movimento no leito.

As observações descritas acima indicam que o LVJ, sem tubo interno, pode operar a contento com qualquer velocidade do ar. A intensidade vibracional deve ser o fator predominante, em termos de movimentação das partículas, quando a velocidade do ar é baixa, e diminui sua influência quando a velocidade de operação do ar é aumentada.

Como complementação, a fim de verificar o comportamento de um leito formado por partículas não esféricas, foi realizado um ensaio com fatias de cebola de 5 mm de espessura e 20 mm de comprimento. A altura do leito de sólidos ultrapassava a seção cônica do LVJ, antes de iniciar-se o movimento. Operando com velocidade do ar em torno de 1 m/s, foi observado um movimento circulatório no qual participavam todas partículas do leito. Ao ser suprimida a vibração, as fatias acomodavam-se no espaço anular, o movimento desaparecia e o ar escoava preferencialmente por um canal formado no centro do leito.

Estas observações indicam que a operação em LVJ estabiliza leitões formados por materiais irregulares, fibrosos ou que apresentam alta porosidade.

E . EFEITO DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS

Para estudar o efeito da amplitude de vibração, no tempo de residência das partículas, foram realizados ensaios com carga de 1800 g de feijão, sendo o diâmetro do tubo central 73 mm e distante 29 mm da superfície do pistão vibratório. Foram utilizados excêntricos de 6, 8 e 10 mm, que correspondem a duas vezes as amplitudes de vibração de operação (veja Figura II-27). Para quantificar o tempo de residência das partículas foi utilizada a técnica do feijão marcado. Os resultados obtidos estão agrupados na Figura IV-7.

As três curvas da Figura IV-7 tem o mesmo formato. O tempo de residência das partículas diminui até atingir uma condição de mínima e torna a aumentar.

Na Figura IV-7, cada um dos três pares de pontos I, II e III, representam praticamente os mesmos valores do adimensional $A\omega^2/g$. Observa-se pela localização destes pontos que o tempo de residência é menor ao operar com maiores amplitudes de vibração. Isto indica que, quando deseja-se que ocorra movimento dos sólidos no leito, o efeito da amplitude é mais importante que a frequência de vibração e explica a observação de vários pesquisadores que constataram que a transferência de calor e massa ocorre com maior intensidade em um leito vibratório, quando a amplitude de vibração é maior do que a frequência, sendo mantido constante o adimensional $A\omega^2/g$. Pelo exposto neste trabalho, isto se deve ao movimento mais acentuado dos sólidos ao operar com maior amplitude de vibração.

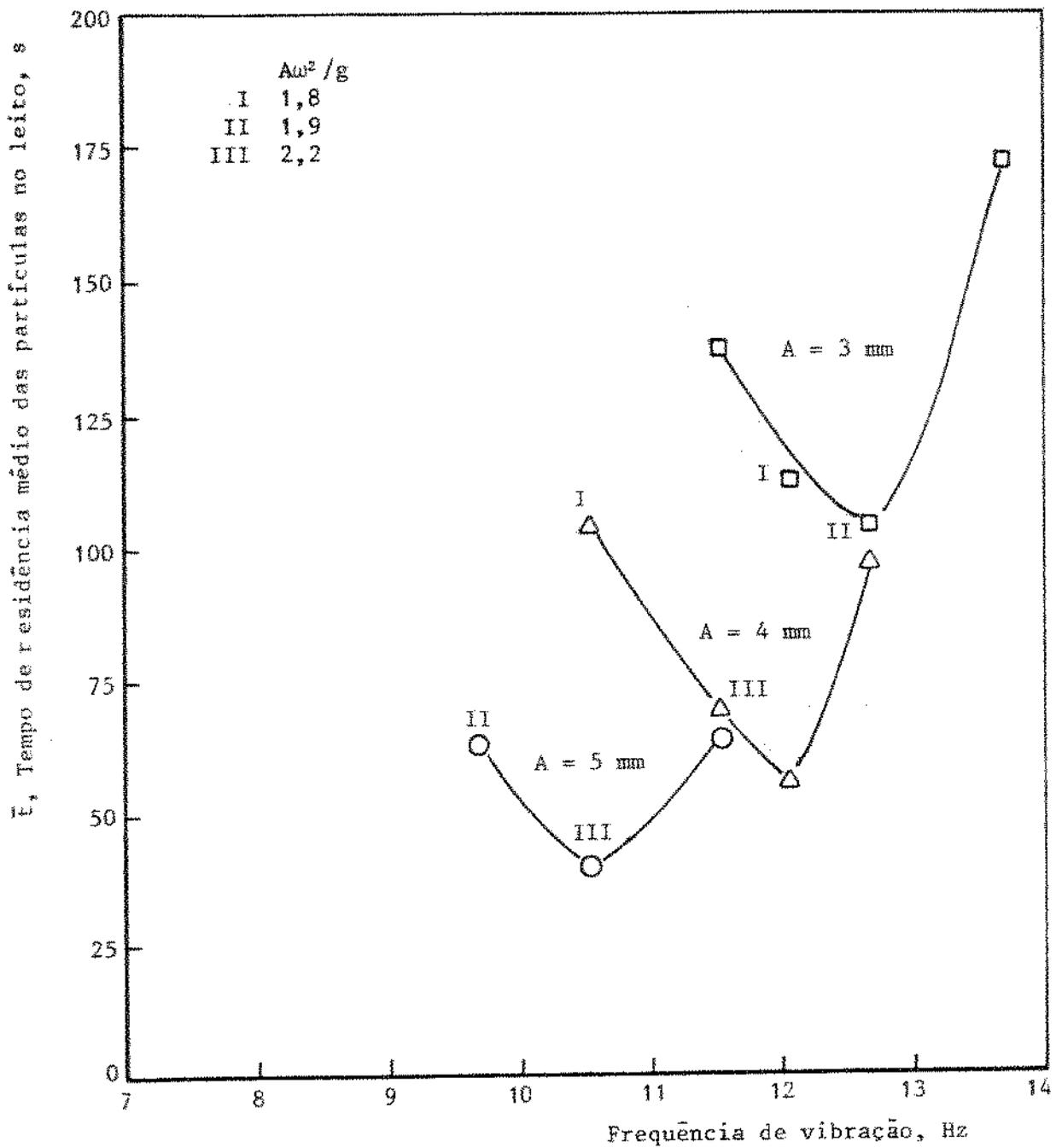


Figura IV-7 . Variação do tempo de residência médio de grãos de feijão com a frequência e amplitude de vibração. Carga de feijão = 1800 g.

F , EFEITO DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO NO MOVIMENTO DO SISTEMA

Foi efetuado uma série de ensaios para verificar o efeito da frequência de vibração na taxa de circulação dos sólidos no leito vibro-jorrado, com o ar escoando à baixa velocidade. A técnica de medida usada foi a do coletor. Foram ensaiadas esferas de vidro (diâmetro = 3,8 mm, densidade absoluta = 2,5 g/cm³), confeitos aluminizados (diâmetro = 5,3 mm, densidade = 1,4 g/cm³) e sagú (diâmetro = 4,1 mm, densidade = 0,8 g/cm³).

As condições de operação, geométricas e situações físicas são indicadas nas Figuras IV-8 a IV-11. Em todas as curvas fica bem caracterizado uma variação periódica da taxa de circulação com a frequência de vibração. Até uma frequência de vibração em torno de 9 Hz não ocorria circulação; aumentando a frequência a taxa subia até um máximo, tornava a diminuir, passando por um mínimo e então aumentava novamente. No caso das esferas de vidro (Figura IV-8 e IV-9) e de sagú (Figura IV-11), os máximos são bem definidos, ao contrário dos ensaios com confeitos aluminizados (Figura IV-10), nos quais as curvas nas imediações dos máximos são achatadas.

Acima de 14 Hz ocorria forte turbulência na saída do cilindro central e as partículas eram atiradas erráticamente para cima. Isto dificultou a obtenção de medidas mais representativas das taxas de circulação de sólidos.

As curvas dos diferentes ensaios indicam que, mantendo as proporções geométricas constantes e variando o afastamento entre o tubo interno e o topo do pistão, existe uma posição ótima na qual a taxa de circulação das partículas é máxima. Esta condição

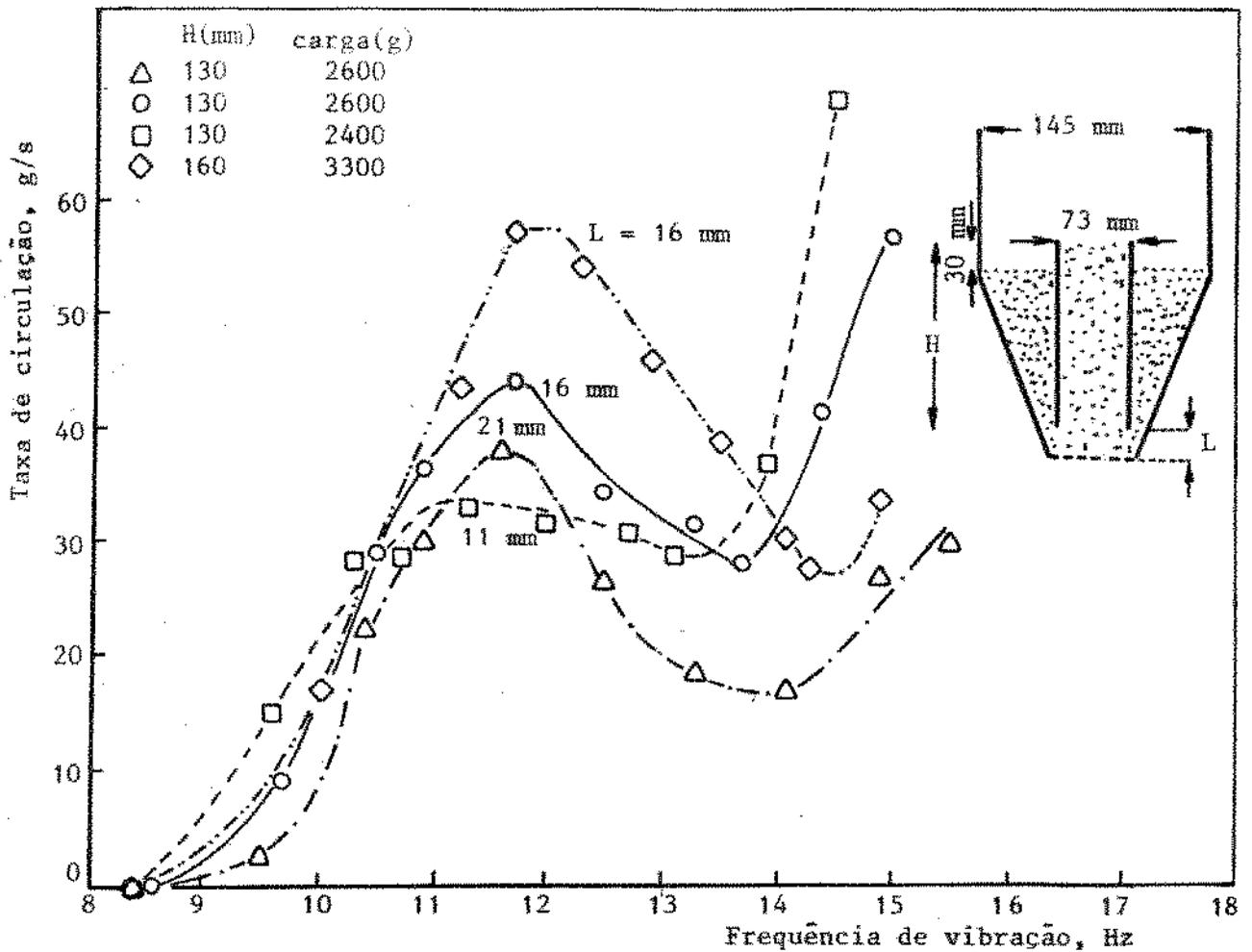


Figura IV-8 . Variação da taxa de circulação de esferas de vidro com a vibração: $A = 4 \text{ mm}$; $u_{ar} = 30 \text{ cm/s}$; $\rho_s = 2,5 \text{ g/cm}^3$; $d_p = 3,8 \text{ mm}$.

ocorre porque ao afastar o tubo interno do pistão atenua-se a transmissão vertical da vibração e quando ele situa-se demasiadamente próximo, o movimento das partículas é prejudicado pela redução da área disponível ao escoamento descendente de sólidos, na região cônica do vaso. Esta é provavelmente a causa principal do comportamento anômalo da curva com $L = 42 \text{ mm}$ da Figura IV-10, obtida com confeitos aluminizados.

A otimização dos parâmetros geométricos é uma tarefa muito difícil, devido ao grande número de variáveis envolvidas. A altu-

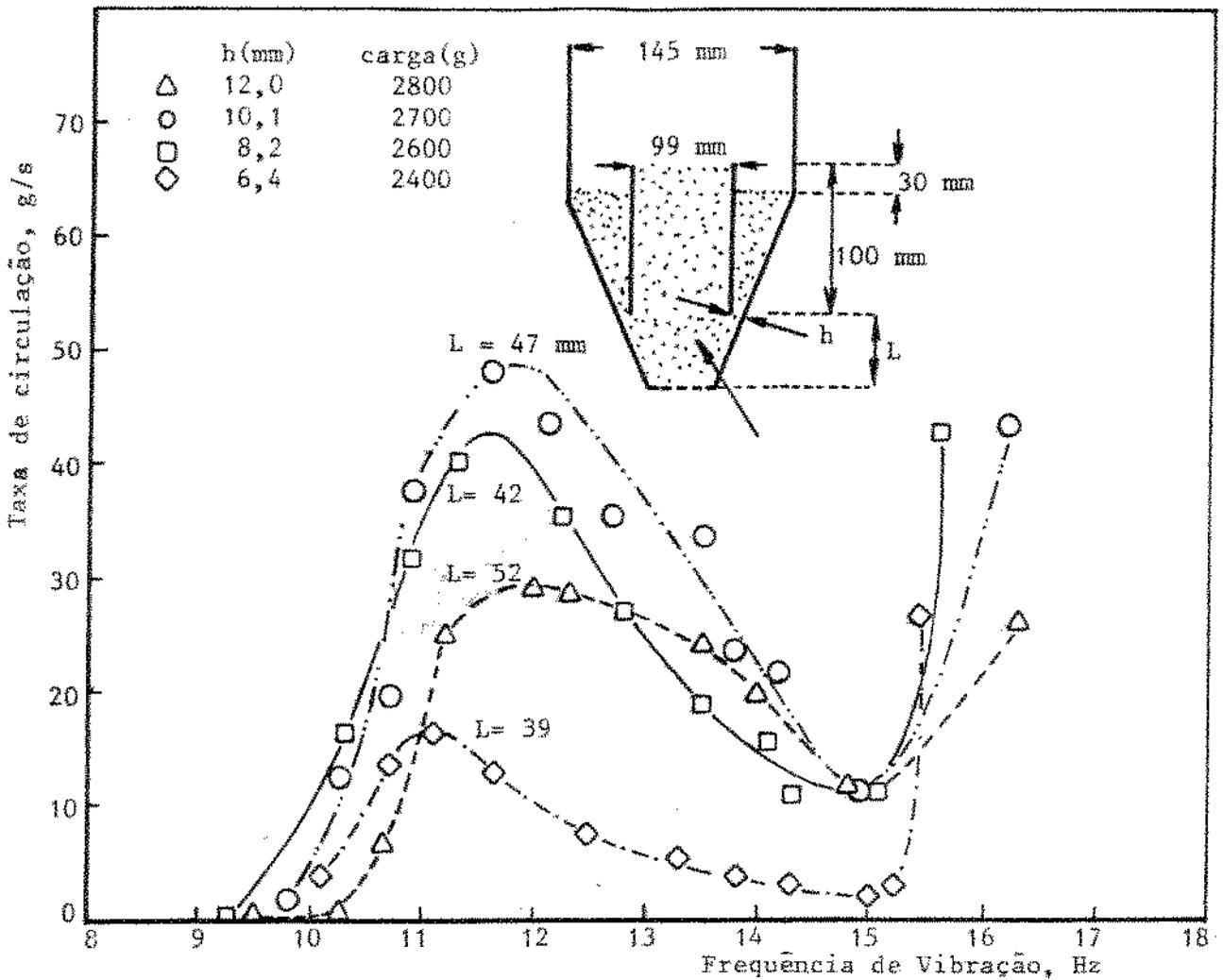


Figura IV-9 . Variação da taxa de circulação de esferas de vidro com a vibração: $A = 4 \text{ mm}$; $u_{\text{ar}} = 30 \text{ cm/s}$; $\rho_s = 2,5 \text{ g/cm}^3$; $d_p = 3,8 \text{ mm}$.

ra do leito (ou do tubo central, H) e a razão de diâmetros do tubo interno e externo, são as variáveis geométricas de maior importância industrial, mas elas por sua vez estão interligadas com o afastamento h e L , à inclinação do cone na seção inferior e à amplitude de vibração. Algumas tendências puderam ser observadas e são apresentadas a seguir.

As curvas da Figura IV-8, que correspondem a $L = 16 \text{ mm}$, representam condições distintas com relação à carga no leito e à altura H do tubo cilíndrico interno. Os resultados indicam que ao aumentar a carga de sólidos no leito de 2600 para 3300 g (aumento porcentu

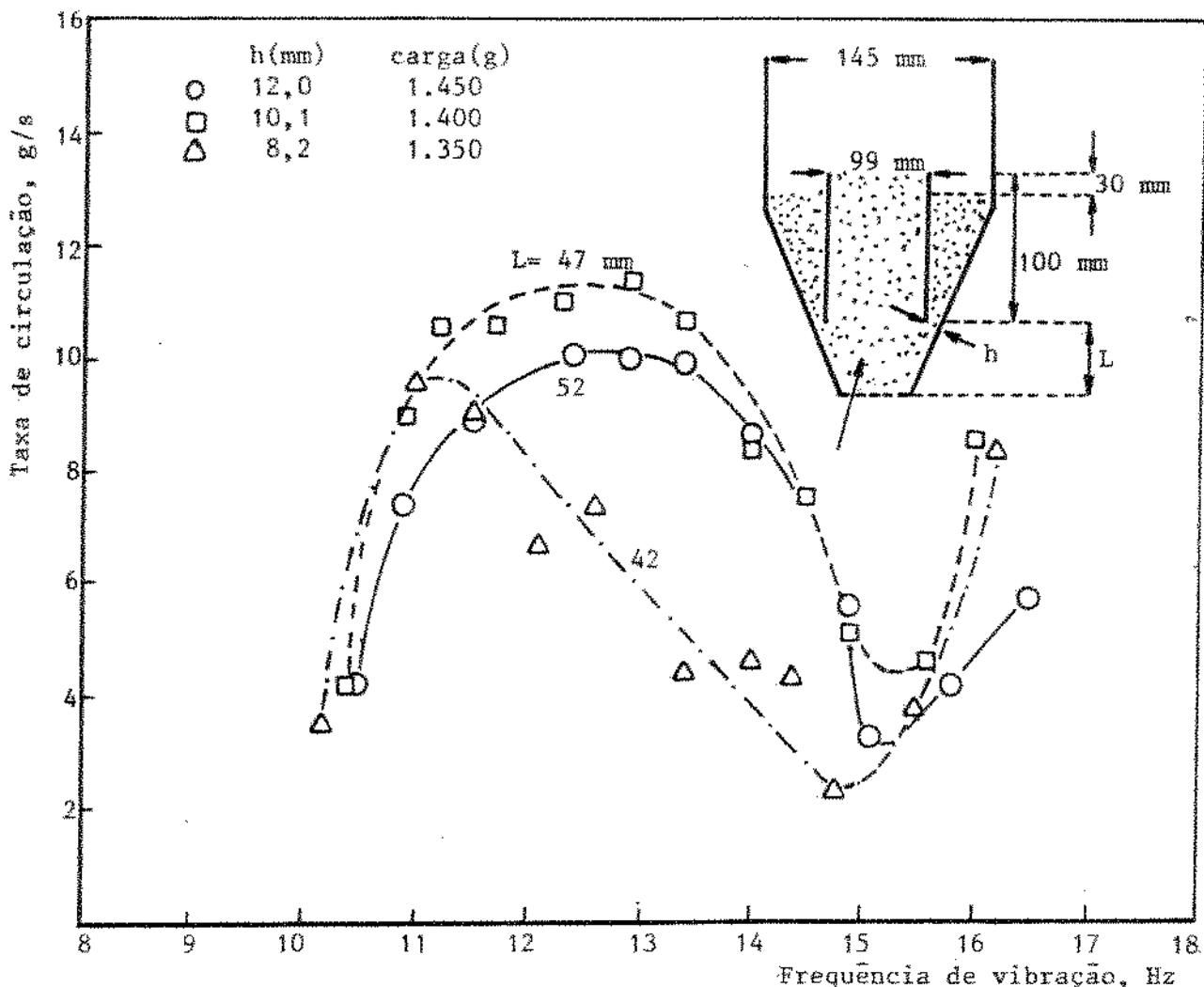


Figura IV-10 . Variação da taxa de circulação de confeitos aluminizados com a vibração; $A = 4 \text{ mm}$; $u_{\text{ar}} = 30 \text{ cm/s}$; $\rho_s = 1,4 \text{ g/cm}^3$; $d_p = 5,3 \text{ mm}$.

al de 27%) a taxa de circulação máxima das esferas de vidro varia de 44,1 para 57,2 g/s (aumento porcentual de 30%). Isto indica que o aumento da carga no leito produz um acréscimo na taxa de circulação de sólidos. É provável que o aumento da taxa de circulação seja proveniente de um acréscimo na tensão normal na base do leito devido à carga de sólidos, o que facilita o escoamento destes para o jorro interno. Como a propagação da energia vibracional decai com o aumento da altura do leito, deve existir um valor ótimo desta última variável que produz uma circulação máxima de sólidos.

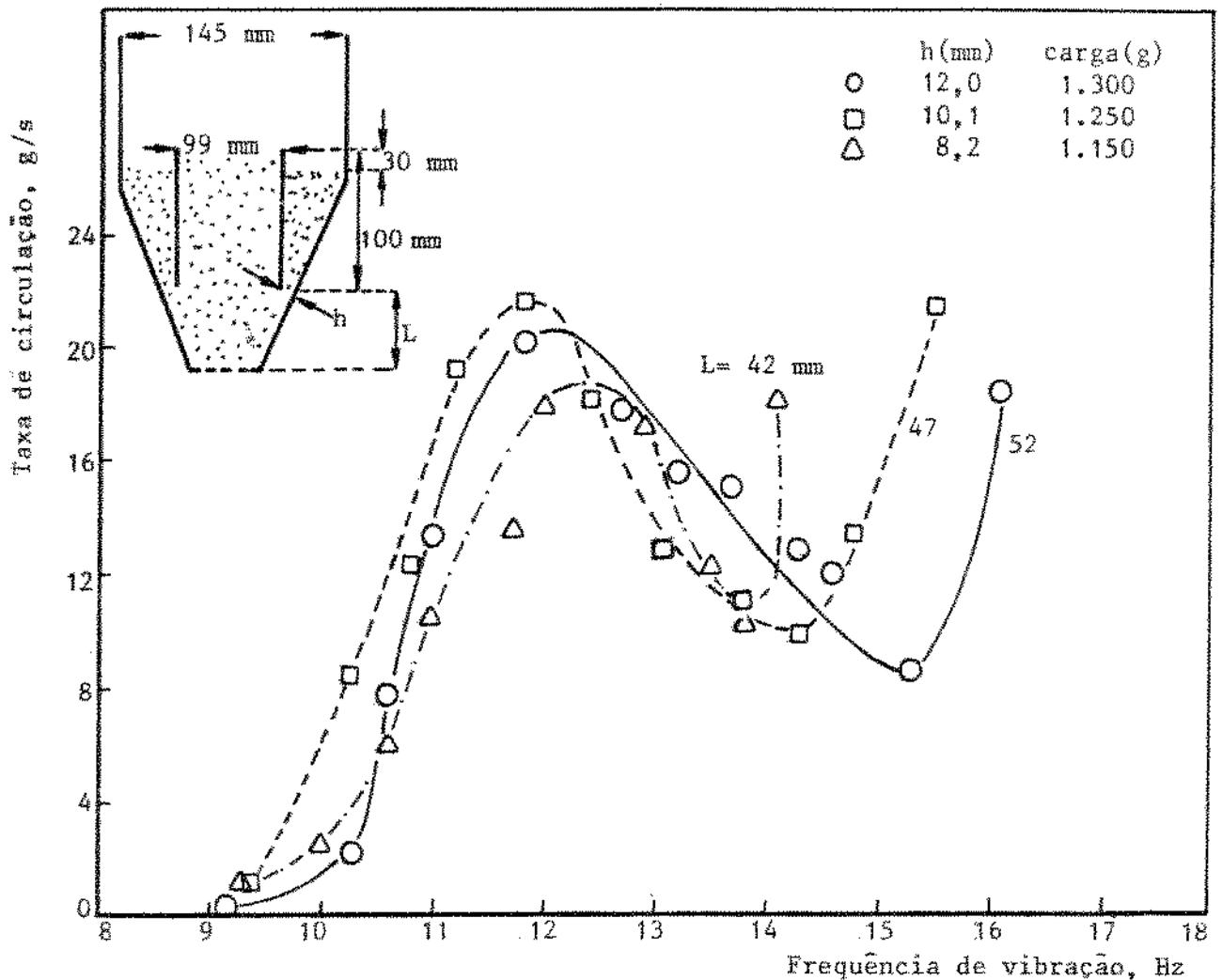


Figura IV-11 . Variação da taxa de circulação de esferas de sagu com a vibração: $A = 4 \text{ mm}$; $u_{\text{ar}} = 23 \text{ cm/s}$; $\rho_s = 0,8 \text{ g/cm}^3$; $d_p = 4,1 \text{ mm}$.

As curvas da Figura IV-3, onde $L = 16 \text{ mm}$ (o) e a da Figura IV-9, onde $L = 42 \text{ mm}$, indicam que como aumento do diâmetro do tubo interno a taxa de circulação de sólidos praticamente não se altera, quando se mantém constante a carga e as demais condições de operação. A curva ($L = 16 \text{ mm}$, o) da Figura IV-8, entretanto já é uma situação otimizada para o diâmetro de 73 mm . Nos ensaios com diâmetro de 99 mm (Figura IV-9) foi encontrado uma situação de circulação (otimizada) sensivelmente superior ($L = 47 \text{ mm}$). Isto mostra uma ligeira vantagem ao operar com o tubo interno com 99 mm ao invés de 73 mm . É preciso considerar entretanto que no primeiro caso a carga tem

um acréscimo de 100 gramas.

Este comportamento é o contrário daquele da Figura IV-6 , onde operou-se à velocidade do ar em torno da correspondente ao ponto D na Figura IV-5. Na situação atual, tudo indica que com o aumento do diâmetro do tubo interno, aumenta a fração de energia vibracional efetivamente aproveitada pelas partículas situadas na região de jorro e que se converte em energia cinética.

Aumentando a carga de esferas de vidro no leito em cerca de 10%, de modo a ocupar totalmente o espaço X-X da Figura IV-5 , foi verificado que a taxa de circulação dos sólidos aumenta em torno de 10%. As medidas foram realizadas usando a técnica da partícula marcada.

A periodicidade da taxa de circulação com a frequência, ilustrada nas Figuras IV-8 a IV-11, é sem dúvida consequência de condições de ressonância, pois um comportamento semelhante é encontrado na vibração de corpos simples.

Como o meio poroso tem características de um meio contínuo com muitos graus de liberdade, ele apresentará várias frequências naturais. As curvas das Figuras IV-8 a IV-11, apresentam pontos de máximo na taxa de circulação de sólidos. Estes máximos representam condições de ressonância, ou seja, a frequência de excitação proveniente do camo, coincide com uma das frequências naturais do meio poroso e a transmissão de energia para o leito de sólidos é máxima.

As curvas das Figuras IV-8 e IV-9 mostram que apesar dos diâmetros dos tubos internos serem distintos (73 e 99 mm), as condições de ressonância situaram-se entre 11,5 e 11,8 Hz.

Aumentando a frequência de vibração aumenta a energia

transmitida para o sistema. Entretanto, entre as condições de ressonância, existem condições de taxa mínima. As partículas vibram mas a energia é absorvida internamente pelo sistema e isto não se traduz em escoamento. Para as situações correspondentes à Figura IV-9, a taxa de circulação mínima situou-se em torno de 15 Hz.

As Figuras IV-10 e IV-11 mostram que as taxas de circulação de partículas aluminizadas e sagú, são menores que as correspondentes as esferas de vidro. As esferas de vidro comportam-se como corpos elásticos, nos choques absorvem pouca energia e são bons transmissores. No caso das esferas aluminizadas e do sagú, a energia é consumida pelos choques inelásticos, ocorrendo amortecimento. Este efeito é superposto ao fato destes dois últimos materiais apresentarem densidades menores e diâmetros diferentes dos das esferas de vidro.

As curvas, das Figuras IV-10 e IV-11, indicam ainda que a substituição do meio poroso por materiais de elasticidade reduzida, com dimensões e propriedades físicas diferentes, foi de alterar a frequência de ressonância para a faixa de 11,7 a 12,7 Hz.

CAPÍTULO V

SECAGEM DE CUBOS DE BATATA EM LVJ

A . INTRODUÇÃO

A qualidade de produtos desidratados depende muito das condições de secagem. Um dos efeitos da secagem rápida é a ocorrência de tensões localizadas nos corpos ao final da secagem, devido às contrações anisotrópicas que ocorrem durante a eliminação de umidade. Como resultado, surgem nos corpos regiões tensionadas e outras comprimidas, o que geralmente conduz à formação de fissuras. A movimentação do material durante o processamento auxilia na tendências ao encolhimento isotrópico. Muitos produtos alimentícios, tais como a batata, apresentam características naturais de adesão devido a presença de amido na superfície externa. Isto prejudica a operação em leite fluidizado, usando equipamentos tradicionais (BAXERRES et alii, 1983; KEEY, 1978).

A batata constitui suporte na alimentação em várias regiões do mundo e apresenta volume elevado e tempo curto de estocagem, quando comparada aos grãos. Nos últimos anos tem ocorrido um aumento de produção de batata processada industrialmente. A desidratação da batata representa uma alternativa de industrialização e o produto seco apresenta um alto conteúdo energético (THERON , 1982).

O processo completo de secagem da batata inclui: lavagem , descascamento, limpeza, classificação, corte, branqueamento, sulfitação e desidratação. Os tubérculos são cortados em peças que apresentam dimensões na faixa de 5 a 25 mm, que, após a secagem, são

consumidos em pratos típicos: picadinhos de carne, sopas, cozidos e usados em rações para as forças armadas (BURR e REEVE, 1973).

O nível do controle de qualidade da batata na colheita es tá diretamente ligado ao rendimento do processo e às característica s do produto desidratado. A batata é constituída de tecidos vivo s que contêm enzimas. Durante o desenvolvimento do tubérculo, o corre conversão de sacarose em amido, catalizada pela enzima sacaro se sintetase. Quando a atividade enzimática atinge um valor de referência, que conduz ao conteúdo máximo de amido, a colheita po de ser realizada. Algumas cultivares de batata conservam uma eleva da concentração de sacarose, da ordem de até 0,005 g/g de batata, na ocasião da colheita. A sacarose sob ação da enzima invertase é convertida em glicose e frutose. Quando a batata é aquecida, a glicose e a frutose reagem com aminoácidos celulares, resultando no escurecimento não enzimático ou reação de Maillard. Entreta nto isto pode ser minimizado efetuando a sulfitação das partícu las antes da secagem e selecionando cultivares que apresentem baixos teores de sacarose na colheita (KUENEMAN, 1967; SOWOKINOS, 1973).

A realização do branqueamento da batata antes da secagem inativa enzimas, reduz a população microbiana e melhora a aparência final do produto, dando-lhe um aspecto superficial brilhante. Muitas vezes o branqueamento é realizado em solução contendo um ag ente flavorizante (NOYES, 1969). Apesar do branqueamento apresenta r esses aspectos positivos, esta técnica é responsável por perda s de ácido ascórbico, que constitui um dos principais nutriente s da batata e as perdas são proporcionais à temperatura do meio de branqueamento (GARROTE et alii, 1986).

Os tubérculos de maior densidade, geram produtos finais

com melhores propriedades funcionais, como por exemplo, menor absorção de óleo durante a fritura (LANA et alii, 1970).

Industrialmente fatias de batata são processadas em secadores de correia, em contracorrente ou em fluxo cruzado. A temperatura de operação varia de 80 a 135 °C (1º estágio), 60 a 70 °C (2º estágio), sendo a secagem final efetuada em silos (25 a 60 °C). O tempo total de secagem é de 6 a 12 horas e o produto apresenta uma umidade média final de 6 a 12% (DOMAGALA, 1984 ; DOMAGALA e SZEBIOTKO, 1986 A e B).

Este capítulo trata da análise do desempenho do secador de LVJ ao ser ensaiado com batata em forma de cubos, sem promover-se o branqueamento e a sulfitação da matéria prima, pois o objetivo da pesquisa relaciona-se ao equipamento e não ao produto final. No estudo efetua-se uma comparação com outros tipos de secador, em termos de tempo de secagem e uniformidade de temperatura e de umidade no leito. O trabalho dá ênfase à contração dos cubos de batata e analisa o efeito da vibração e a aplicabilidade do modelo de Fornell na simulação da cinética de secagem do tubérculo.

B . MECANISMOS DE SECAGEM

Durante a secagem de partículas sólidas, dispostas em camada delgada e percoladas por ar, são observados distintos períodos de secagem. No período de taxa de secagem constante, a umidade no produto é suficientemente alta para manter uma camada superficial de água livre. A pressão do vapor de água na superfície é igual ou muito próxima da pressão de vapor da água pura na temperatura do produto. A secagem é governada pela convecção, que regula a intensidade do transporte de matéria e de calor entre a superfície

do produto e o ar ambiente. Após atingir-se um ponto crítico de conteúdo de umidade, a taxa de secagem começa a diminuir e a temperatura do sólido a aumentar. Inicialmente a taxa de secagem é proporcional à fração da superfície externa ainda molhada. Quando toda umidade livre é removida, o "*limite higroscópico*" é atingido e um segundo período decrescente é iniciado. Neste período e nos subsequentes, a taxa de secagem depende do transporte de umidade na forma de líquido ou de vapor, do interior para a superfície das partículas. A taxa de secagem decresce continuamente até o sistema atingir o equilíbrio, que é caracterizado pela igualdade da atividade da água no produto com a umidade relativa do ar seco (PARRY, 1985).

O movimento da água no interior dos sólidos ocorre por vários e complexos mecanismos, na maioria das vezes combinados: deslocamento de água líquida sob efeito da força de gravidade, da tensão superficial, de um gradiente de concentração segundo a lei de Fick ou de um gradiente de pressão entre o interior e o exterior da partícula, geralmente proveniente de contrações; difusão de água líquida adsorvida sobre a superfície interna dos poros; difusão de vapor sob efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água; migração de água líquida ou na forma de vapor, sob efeito de um gradiente de temperatura. Estes mecanismos de transferência de umidade são influenciados por dois fenômenos particularmente importantes na secagem de materiais biológicos e alimentícios: migração de solutos e contração dos sólidos durante a secagem (KISAKUREK et alii, 1975; PARRY, 1985).

C , INFLUÊNCIA DO DESENHO DA CÂMARA DE SECAGEM

A batata foi selecionada como modelo de alimento a ser ensaiado no desenvolvimento do secador de LVJ, pela sua característica homogênea e por possuir um alto conteúdo inicial de umidade.

Para avaliar o efeito da operação em câmaras de diferentes formatos, foram executados ensaios de secagem com cubos de batata de 5 mm de aresta usando três variações de secadores: A) Constituído por um tubo cilíndrico de 14,5 cm (DI), com o suporte do leito constituído por uma tela de aço inoxidável de 32 malhas. Este secador foi escolhido por ser o que mais se aproxima dos modelos de secadores industriais, usados na secagem de batata, onde o material é disposto em camadas; B) Secador de LVJ, descrito no Capítulo III, sem o tubo interno e operando sem vibração; C) Secador de LVJ, operando sem o tubo interno e com vibração. A seleção do secador B, com mesma forma geométrica que a opção C, objetivou a quantificação do efeito da vibração, desta última, na secagem de cubos de batata.

A vazão de ar em escoamento nos três secadores era 1,30 kg/min, o que correspondeu às velocidades de 1,34 m/s (60 °C) e 1,38 m/s (70 °C) na seção cilíndrica do secador. As condições de vibração foram: amplitude de 4 mm e frequência de vibração de 10,0 a 13,5 Hz. A carga utilizada era de 30,3 kg de batata/m², referida a seção transversal do tubo cilíndrico do secador. A umidade média inicial de batata usada nos experimentos era de 4,6 kg H₂O/kg de batata seca.

No caso A, o comportamento dos cubos de batata no leito, reproduziu uma secagem em leito estático, sem nenhum movimento observável durante o transcorrer da operação.

No caso B, no início da operação, as partículas do centro do leito, eram lançadas para o alto (fonte central), mas descansavam na periferia do leito e o movimento imediatamente cessava. Como resultado permanecia um orifício central, em forma de chaminé, que permitia o escoamento preferencial do ar de secagem. Em alguns ensaios observou-se a formação de mais de um canal. Na maioria dos experimentos esta estrutura permanecia até o final da secagem. Entretanto em algumas provas ocorria desagregação do conjunto ao final da secagem, provavelmente pelo manuseio do secador, devido a translação até a balança para quantificar a perda de umidade dos cubos de batata.

Ao operar em leito vibro-jorrado (LVJ), caso C, a movimentação das partículas no leito era constante durante toda operação. O movimento consistia em uma fonte central, ligeiramente acima da região cônica do secador, com um deslizamento suave das partículas pela parede inclinada do cone, deslocando-se para o topo do cilindro vibratório instalado na base do equipamento. O movimento apresentava semelhança com o de leito de jorro tradicional, quando a geometria global do secador é cônica (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Em alguns ensaios, observou-se que alguns cubos de batata permaneceram aderidos às paredes após o término da secagem. Entretanto isto não aconteceu ao processar cubos com 10 mm de aresta.

Os resultados dos ensaios conduzidos com ar a 60 e 70 °C são indicados na Figura V-1, onde a variação de umidade está expressa pela relação X/X_0 , onde X_0 representa a umidade inicial da batata em kg H₂O/kg bs e X a umidade média do leito. Para alcançar a relação de umidade $X/X_0 = 0,02$, que corresponde a umidade de 8,4% (bu), o aumento do tempo de secagem no caso A se aproxima de 40% em relação ao caso C. Na situação B, o secador mos

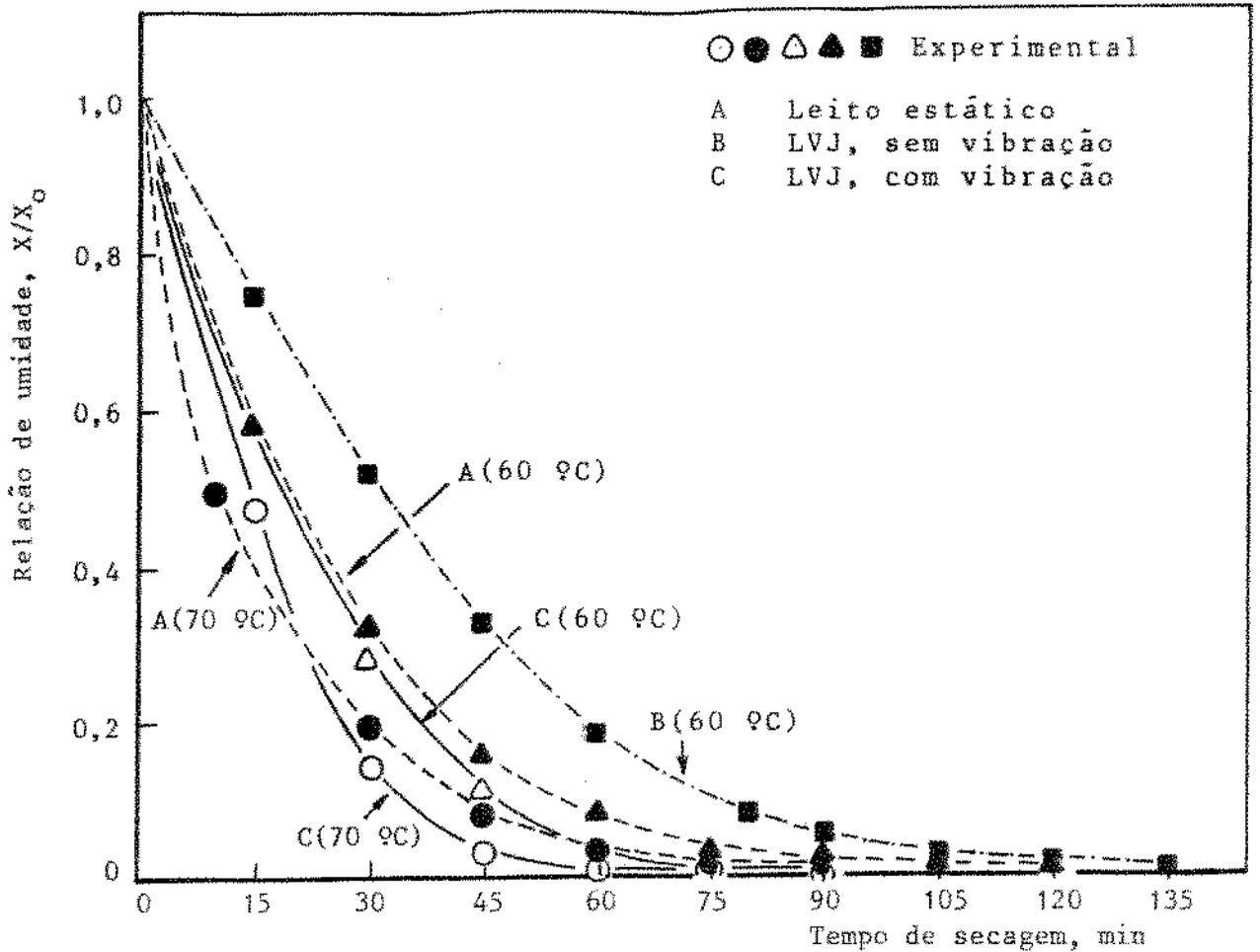


Figura V-1 . Curvas de secagem de cubos de batata (5 mm de aresta) obtidas em diferentes tipos de câmaras de secagem. Condições de operação: vazão de ar = 1,30 kg/min; Carga = 30,3 kg de batata/m²; X₀ = 4,6 kg H₂O/kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 10 a 13,5 Hz.

trou um desempenho nitidamente inferior aos casos A e C, com um aumento do tempo de secagem ultrapassando em cerca de 100% o tempo da mesma instalação com vibração.

D . UNIFORMIDADE DE TEMPERATURA E DE UMIDADE NO LEITO VIBRO-JORRADO

O monitoramento contínuo da temperatura do ar ao longo do secador e da umidade do produto em diferentes regiões do mesmo, exigiria um instrumental não disponível, além de interferir na di-

nâmica do leito. Observações simples realizadas com a temperatura do ar na saída do leito e com as unidades de amostras do produto retiradas da base e do topo da parte cônica da instalação, permitiram confirmar os mecanismos esperados para a movimentação e a secagem das partículas.

Para quantificar a variação de temperatura do ar de secagem, foram efetuadas medidas com termopares, no centro e na periferia do secador, correspondentes ao topo do leito formado com cubos de batata de 5 mm. Os resultados das medidas são mostrados na Figura V-2 e correspondem aos ensaios A e C da Figura V-1, para a temperatura de 70 °C do ar de secagem.

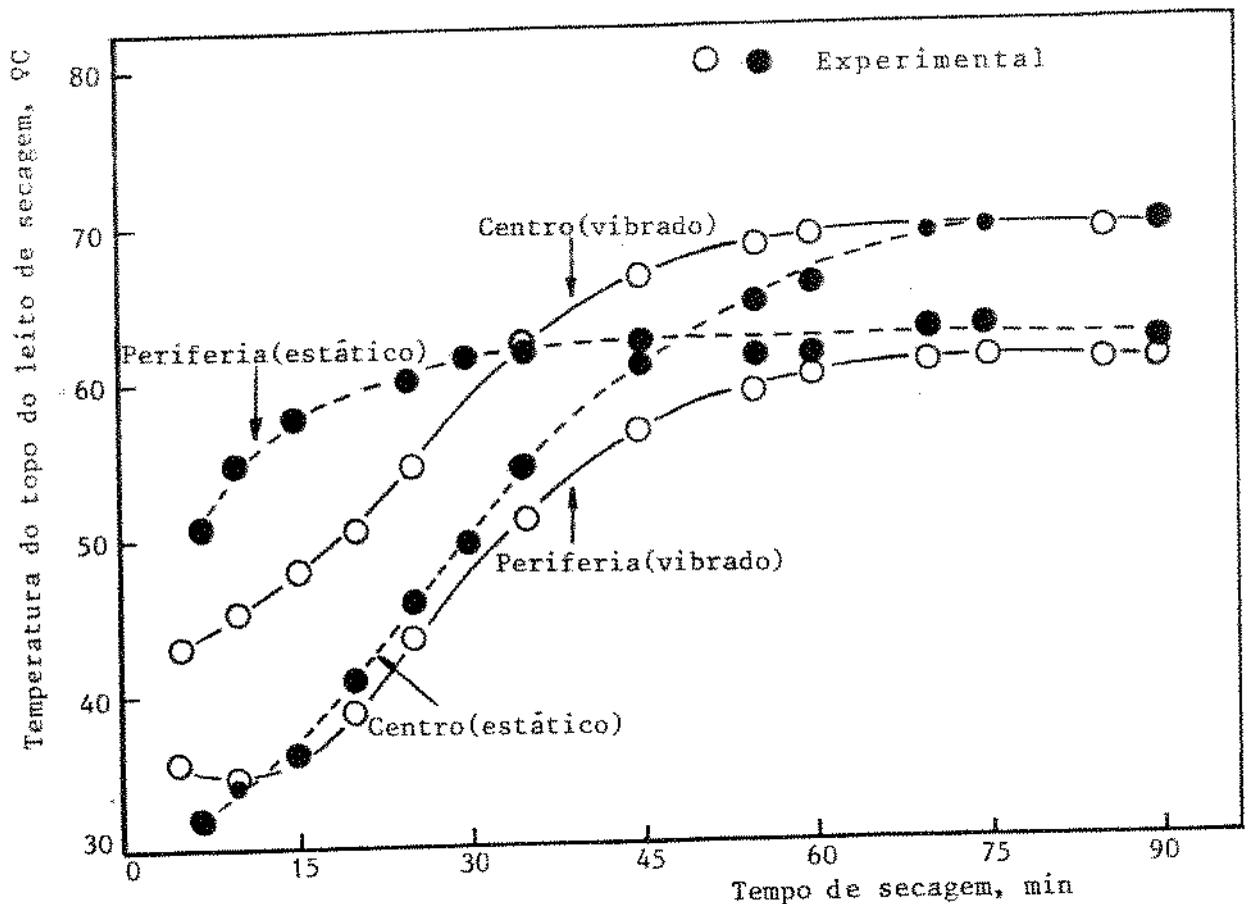


Figura V-2 . Temperatura do ar em diferentes posições no topo do leito de secagem, operando em leito estático e vibro-jorrado, formados por cubos de batata com 5 mm de aresta. Condições de operação: velocidade e temperatura do ar, 1,38 m/s e 70 °C; carga = 30,3 kg/m² X₀ = 4,6 kg H₂O/kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 10 a 13,5 Hz.

Em leito estático, a maior diferença entre as temperaturas do centro e da periferia do leito, ocorreu no início da secagem e foi-se reduzindo gradativamente até existir igualdade a cerca de 50 minutos de secagem. Seguiu-se um aumento gradativo desta diferença com o tempo de secagem. Este comportamento é atribuível à passagem preferencial do ar pelo centro, provocando uma secagem mais rápida e por consequência um "*resfriamento adiabático*" mais intenso. Ao final da secagem, o centro do leito vai se tornando parcialmente seco, diminuindo a taxa de evaporação, e a temperatura do ar tende assintoticamente à temperatura de entrada.

O comportamento do leito vibro-jorrado foi diferente. Durante os 30 minutos iniciais de secagem, a diferença de temperatura nas duas posições do leito foi menor que na operação em leito estático e esta não se modificou apreciavelmente ao longo da secagem. Entretanto durante toda a secagem, a temperatura mais elevada corresponde a região central, sobretudo pela passagem preferencial do ar de secagem. Contudo o tempo de residência das partículas é menor na região central. Assim os cubos de batata devem se aquecer preferencialmente nesta região e a evaporação da água ocorrer em maior intensidade no espaço anular. Neste secador os sólidos ficam menos tempo em contato com o ar à temperatura de entrada, do que os sólidos que situam-se na base do leito estático, e isto melhora a qualidade de produtos termo-sensíveis processados em LVJ.

Para comprovar a tendência à secagem uniforme ao operar em LVJ, foram realizados ensaios para detectar a umidade de amostras de cubos de batata, com 5 mm de aresta, coletados em duas regiões do leito. Foram comparados os casos B e C analisados anteriormente. A velocidade e temperatura do ar de secagem eram 1,38 m/s e

70 °C. A umidade média inicial da batata utilizada foi 4,0 kg H₂O/kg bs e a carga 30,3 kg/m². As amostras de cubos de batata foram extraídas do topo e do fundo do leito e cada par de pontos corresponde a um ensaio. Os resultados são indicados na Figura V-3.

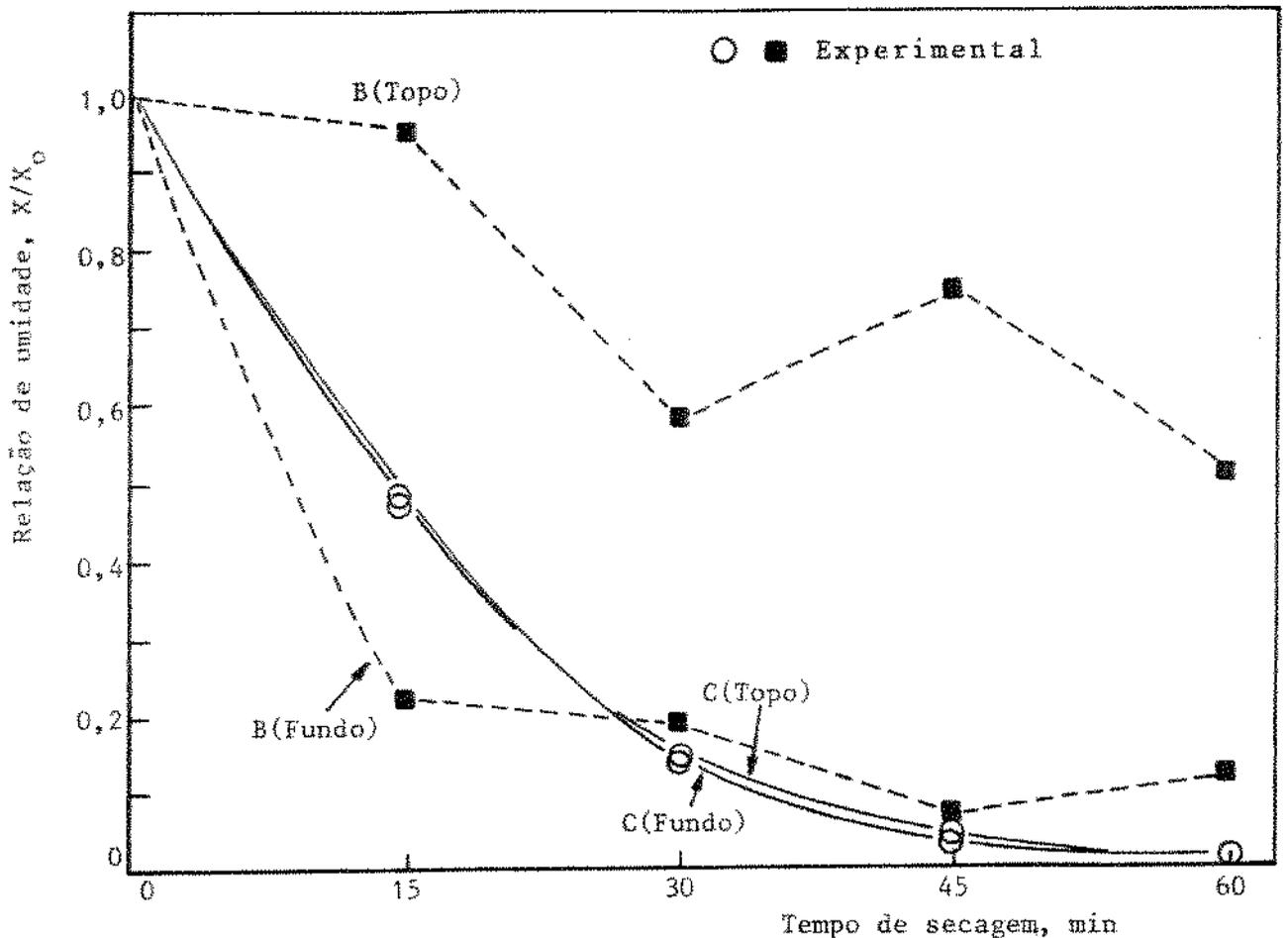


Figura V-3 . Umidade de cubos de batata, 5 mm de aresta, com o tempo de secagem, em diferentes posições do leito (topo e fundo). Condições de operação: velocidade e temperatura de ar, 1,38 m/s e 70 °C; Carga = 30,3 kg/m²; X₀ = 4,0 kg H₂O/kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 10 e 13,5 Hz.

A secagem sem promoção de vibração (caso B), indicou um comportamento muito irregular. Isto se deve sobretudo a existência de canais de circulação preferencial do ar e ao efeito de ad

são partícula-parede e partícula-partícula.

O comportamento do sistema vibro-jorrado mostrou-se muito uniforme e as curvas praticamente coincidiram, comprovando o alto grau de mistura do LVJ. Isto demonstra a uniformidade de tratamento em todo o conteúdo do leito, como consequência da promoção do movimento permanente dos sólidos.

E . CONTRAÇÃO DOS CUBOS DE BATATA

Muitos cereais (arroz, trigo), apresentam uma contração pequena durante o processo de secagem e a solução analítica da segunda lei de Fick pode ser aplicada satisfatoriamente, sem considerar a variação de volume (VIOLLAZ, 1987).

Alimentos que apresentam alto conteúdo de umidade (batata, maçã, beterraba), contraem-se significativamente durante a secagem. Os processos de secagem destes materiais devem ser modelados utilizando métodos numéricos na resolução da equação da difusão, sendo necessário relacionar o encolhimento volumétrico com o conteúdo de umidade dos sólidos, geralmente expresso pelo adimensional, A/A_0 , onde A_0 é a área inicial da superfície da partícula (GABITTO e AGUERRE, 1985; SOBRAL e MENEGALLI, 1986; SOBRAL, 1987; VIOLLAZ e SUAREZ, 1985).

Existem vários modelos que relacionam o encolhimento com a variação de umidade do corpo, entre eles: 1) O modelo no qual o volume do material é considerado uma função linear do conteúdo de umidade do material; 2) O modelo da secagem uniforme assume que a redução de volume, devido a contração, iguala o volume de água perdida durante a secagem; 3) O modelo de secagem com núcleo central "*core drying model*", considera uma camada com baixo conteúdo

de umidade, que se forma externamente com o transcorrer da secagem, enquanto um núcleo central permanece úmido; 4) Modelos empíricos com parâmetros determinados experimentalmente.

O modelo da secagem uniforme é expresso pela Equação (V-1) (SUZUKI et alii, 1976). Ele foi selecionado para utilização neste trabalho por ser simples e muito utilizado quando o sólido contém grande conteúdo de água.

$$A/A_0 = (bX + C)^{2/3} \quad (V-1)$$

onde: $b = \rho_0 / (X_0 + 1)$ e $C = 1 + b - \rho_0$

sendo: A, A₀ áreas superficiais; o índice "0" corresponde a condição inicial; ρ_0 é a densidade do material.

F . VERIFICAÇÃO DO MODELO DA SECAGEM UNIFORME

A técnica normalmente utilizada para acompanhar a contração das partículas no curso da secagem, consiste em fotografar as mostras coletadas no leito durante a operação. Realiza-se a ampliação das fotografias e os resultados são interpretados usando dois procedimentos: 1) As dimensões das partículas são avaliadas utilizando a ampliação; 2) Recorte dos limites das amostras na fotografia e comparando o peso do papel com aquele da amostra inicial. Entretanto esta técnica não quantifica adequadamente as dimensões dos sólidos, ao assumir que duas dimensões representem um corpo tridimensional (SUZUKI et alii, 1976).

Para estudar a contração dos cubos de batata, com aresta inicial de 5 mm, foi realizado um ensaio de secagem com apenas 100 partículas (massa total de 13,2 gramas). Foi utilizado o seca

dor de base cônica (caso B). As condições de operação compreende-
 ram velocidade e temperatura do ar de 1,34 m/s e 60 °C, respecti-
 vamente. A umidade inicial da batata era $X_0 = 4,29 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$.
 Devido à pequena massa de material no leito, a vazão de ar foi
 suficiente para fluidizá-lo desde o início da secagem. O encolhi-
 mento foi acompanhado efetuando-se medidas das três arestas de cu-
 bos retirados do leito durante a realização da secagem, usando um
 paquímetro. As relações de área calculadas com as médias de 5 cu-
 bos, foram locadas na Figura V-4 em função do conteúdo de umidade.

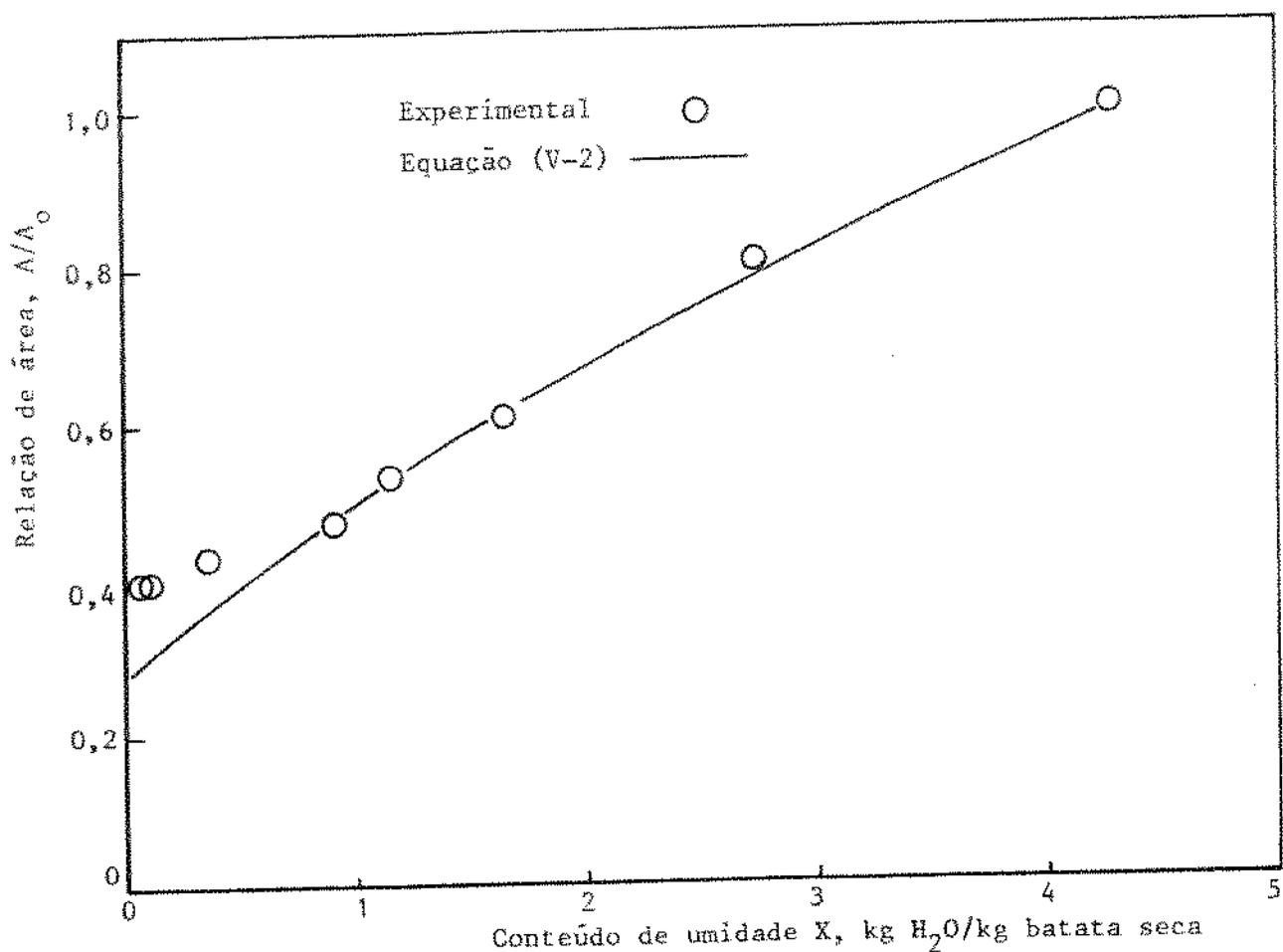


Figura V-4 . Relação adimensional de área em função do conteúdo de umidade dos cubos de batata (5 mm de aresta inicial). Condições de operação: velocidade e temperatura do ar, 1,34 m/s e 60 °C; carga = 13,2 g de cubos de batata; $X_0 = 4,3 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$.

A densidade da batata foi determinada por meio de um picnômetro calibrado, obtendo-se $\rho_0 = 1,053 \text{ g/cm}^3$. Substituindo na Equação (V-1), tem-se:

$$A/A_0 = (0,199X + 0,146)^{2/3} \quad (V-2)$$

A razão A/A_0 , expressa pela Equação (V-2), foi também localizada na Figura V-4, em função do conteúdo de umidade médio da batata. Observou-se que os resultados experimentais ajustaram-se perfeitamente à Equação (V-2), até $X = 0,9 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$. Para umidades inferiores praticamente não existe encolhimento externo das partículas e os pontos experimentais se afastam do modelo. O melhor ajuste do modelo da secagem uniforme durante o estágio de secagem no qual os sólidos contêm umidade elevada, também foi verificado por (SUZUKI et alii, 1976).

Uma observação visual dos cubos de batata ao final da secagem, indicou que algumas partículas apresentavam trincas. Além disso a forma final dos cubos se mostrava distorcida com acentuada concavidade nas faces.

Para estudar melhor estas modificações de forma, foram realizados ensaios de secagem em leito estático e vibro-jorrado, usando cubos de batata com aresta inicial de 10 mm. A forma externa das partículas ao final da secagem foi semelhante à dos cubos de 5 mm. Os cubos secos foram seccionados e verificou-se que também ocorria ajustamento interno do material, gerando cavidades internas nos corpos. Estas eram de formas bastante variadas, podendo haver uma cavidade central com faces paralelas às externas, conforme Figura V-5, ou duas ou mais cavidades por partícula, conforme as Figuras V-6 e V-7, levando às vezes a uma estrutura es-



Figura V-5 . Partícula desidratada inteira (à esquerda) e partículas com uma das faces seccionadas.



Figura V-6 . Partícula com uma face seccionada, mostrando a formação de duas cavidades internas.



Figura V-7 . Partícula com uma face seccionada, mostrando a formação de múltiplas cavidades internas.

ponjosa. Ao seccionar os cubos menores (aresta inicial de 5 mm), observou-se orifícios centrais idênticos aos das partículas de 10 mm (FINZER e KIECKBUSCH, 1987).

As modificações internas provavelmente são decorrentes da formação de uma camada externa endurecida. Em uma segunda etapa , os tecidos devem romper-se internamente e a contração processar-se em torno das novas faces formadas. Isto explica a formação de trincas externas uma vez que o corpo fica submetido a tensões, rompendo-se nas imediações de regiões mais frágeis.

Ao seccionar os cubos de batata de 10 mm, após 2 horas de secagem foram efetuadas as observações a seguir: A- Leito estático; I) (50 °C), a grande maioria das partículas apresentava um núcleo contínuo, com a periferia clarificada e o interior mais escuro devido à presença de umidade. Em apenas algumas partículas era percebido a existência de pequenas cavidades. Provavelmente

estas eram as partículas que situavam-se no fundo do leito. A umidade média global das partículas do leito, expressa por $(X - X_{eq}) / (X_o - X_{eq})$ era 0,11; II) (60 °C) todas partículas seccionadas exibiam cavidades centrais ou então um núcleo esponjoso, indicativo da ocorrência de contrações internas. A umidade média global dos cubos era 0,069. III) (70 °C), existência de cavidades simples e múltiplas e também núcleos esponjosos. A umidade média final era 0,040; B- LVJ; IV) (50 °C), cerca de 80% das partículas cortadas apresentavam um orifício central com diâmetro entre 1,0 - 1,5 mm. A umidade final era 0,071. V) (60 °C), presença de cavidades em todas as partículas, sendo as umidades finais de 0,025 a 0,012.

Estas observações sugerem que o rompimento interno dos tecidos inicia-se quando o conteúdo de umidade adimensional das partículas situa-se em torno de 0,11 para os cubos de 10 mm de aresta.

As modificações internas e externas das partículas dificultam bastante a sua caracterização. Uma vez que os métodos numéricos aplicados à solução das equações diferenciais, como a equação da difusão, necessitam das informações de contração, surgem dificuldades adicionais de cálculo que podem tornar não realistas os resultados numéricos, sobretudo nos estágios mais avançados de secagem.

6 . EFEITO DA VIBRAÇÃO NA CINÉTICA DE SECAGEM

Para estudar o comportamento de cubos de batata de 5 mm de aresta secando em leito vibro-jorrado, foram realizados ensaios onde as condições do ar foram: temperaturas de 50, 60 e 70 °C

(Temperatura do bulbo úmido = 23,2; 25,7 e 28,0 °C, respectivamente). A vazão do ar foi mantida constante em 1,30 kg/min, o que correspondeu a velocidades de 1,30; 1,34 e 1,38 m/s, referidas à seção transversal da região cilíndrica do secador. A carga dos cubos de batata era de 30,3 kg/m² e as umidades na ordem crescente de temperatura do ar de secagem foram $X_o = 5,2$, $X_{eq} = 0,0345$; $X_o = 5,1$, $X_{eq} = 0,0235$; $X_o = 5,3$, $X_{eq} = 0,0115$. As umidades de equilíbrio foram obtidas de KRISCHER, 1956. As condições de vibração foram: frequências de 12,5 a 13,5 Hz e amplitude de 4 mm. Os resultados experimentais foram lançados em escala semi-logarítmica na Figura V-8. Nesta figura estão traçadas linhas que correspondem a um modelo simplificado de secagem, proveniente de uma analogia com a solução analítica da segunda lei de Fick (DAUDIN, 1983), expresso pela Equação V-3. Uma simplificação deste tipo se mostrou adequada no estudo de secagem de fatias de cebola em leito vibro-fluidizado (FINZER e KIECKBUSCH, 1986 B; MAZZA e LeMAGUER, 1980), e na secagem de grãos de trigo em leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

$$X^o = \frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = A \exp(-Bt) \quad (V-3)$$

Os parâmetros da Equação (V-3) foram avaliados usando uma regressão exponencial. Os coeficientes A e B foram ajustados a uma reta por meio de uma regressão linear. O resultado final é expresso pela equação (V-4) que foi locada na Figura V-8.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = (-0,02424 T + 3,5572) \exp(-0,08247 T + 0,1263)t \quad (V-4)$$

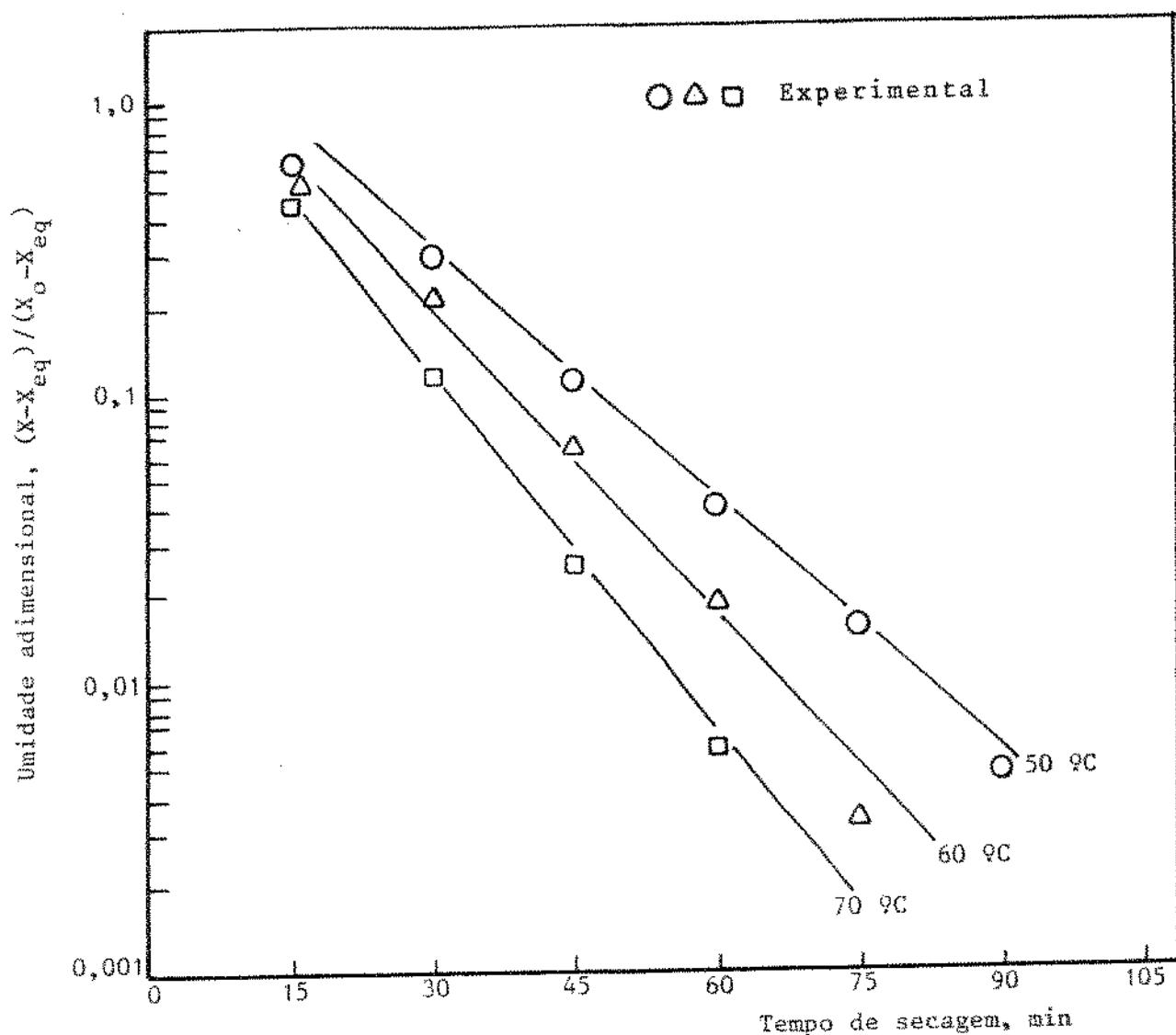


Figura V-8 . Secagem de cubos de batata com aresta inicial de 5 mm, em leito vibro-jorrado (—, curvas simuladas). Condições de operação: vazão do ar = 1,30 kg/min; carga = 30,3 kg/m²; X₀ = 5,2 kg H₂O/kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12,5 a 13,5 Hz.

onde: T = temperatura, °C ; t = tempo de secagem, h

Observa-se que os pontos experimentais não se ajustam perfeitamente à reta do modelo no final da secagem, mas tendem a se afastar, deslocando-se para baixo. Isto aconteceu com relação à maioria dos ensaios neste trabalho e indica a existência de um incremento da taxa de secagem no final da operação em relação ao previsto pelo modelo simplificado. Este fato pode ser consequência de: 1) Modificações estruturais (encolhimento, formação de ca

vidades centrais, fissuras) que reduzem a dimensão efetiva das partículas; 2) Formação de pó devido ao atrito abrasivo entre as partículas (RAY et alii, 1987). Este efeito deve ser mais intenso ao final da secagem, quando os cubos de batata vão se tornando friáveis e ocorre maior número de contatos partícula-partícula, devido à redução de volume dos sólidos; 3) Aumento da temperatura do sólido ao final da secagem, que pode favorecer a difusividade, contrabalançando o efeito negativo da diminuição de umidade sobre ela.

O aumento do tamanho das partículas facilita as observações, aumenta o tempo de secagem e reduz o número de contatos entre as partículas, diminuindo o desgaste por atrito. Em vista disso foram realizados ensaios com cubos de 10 mm de aresta. As condições de vibração foram: amplitude 4 mm e frequência de vibração de 12 a 14 Hz. A carga dos cubos de batata era de 30,3 kg/m². As condições do ar foram: temperaturas de 50, 60 e 70 °C, mantendo-se constante a vazão de 1,30 kg/min. A Figura V-9 apresenta os resultados dos ensaios de secagem em leito vibro-jorrado e em leito estático.

As curvas relativas à secagem em LVJ confirmam as observações efetuadas na Figura V-8. As curvas ao final da secagem apresentam uma inclinação ainda mais acentuada e como a formação de pó foi menos intensa é provável que as alterações estruturais internas sejam as principais responsáveis pelo aumento relativo da taxa de secagem.

Devido ao fato das curvas de secagem em LVJ mudarem a inclinação exatamente nas imediações da umidade $X^0 = 0,11$, quando inicia-se a formação de cavidades internas, conforme observações anteriores, pode-se concluir que a acomodação interna talvez seja a principal responsável pela variação da taxa de secagem no segun

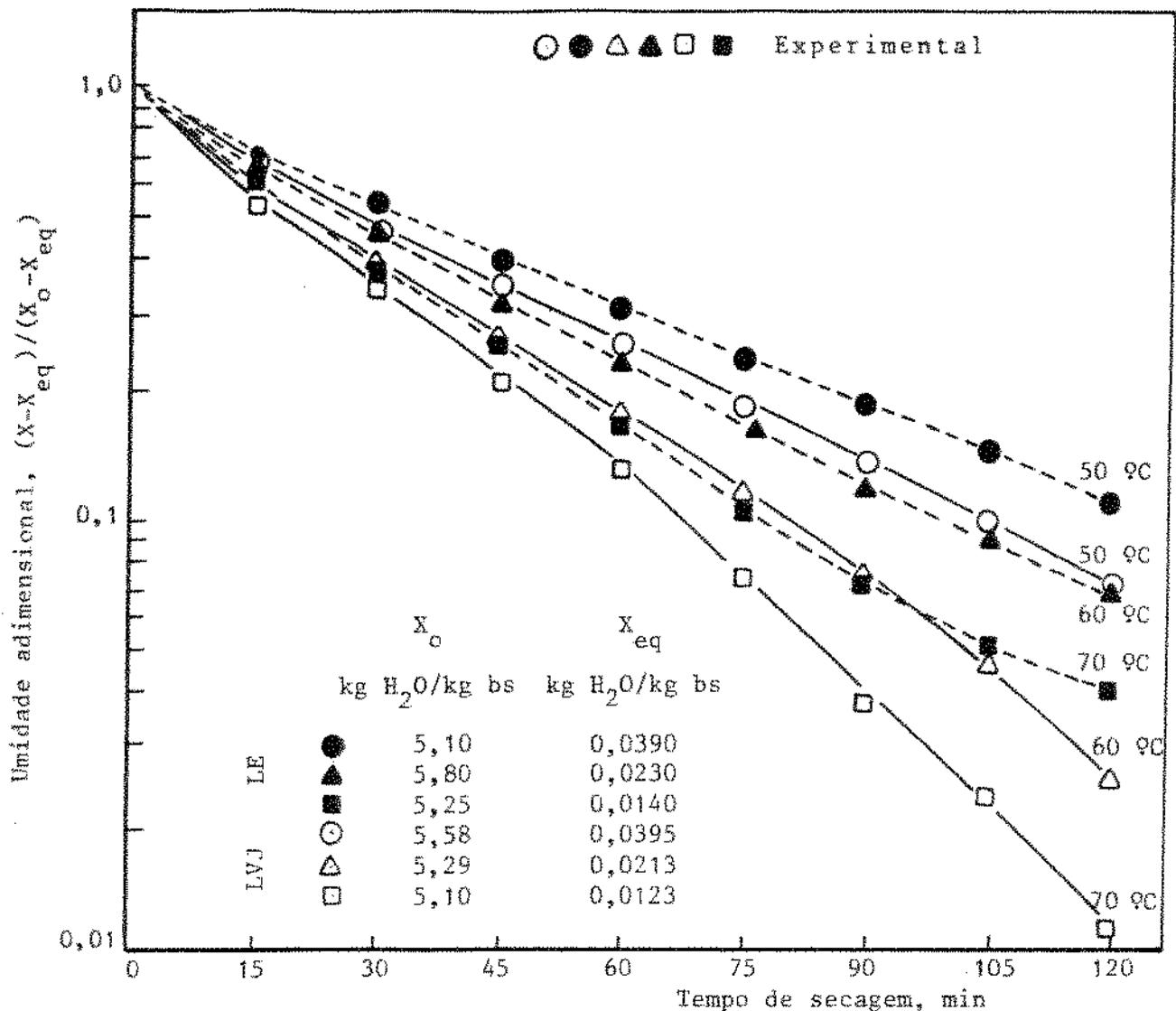


Figura V-9 . Secagem de cubos de batata, com aresta inicial de 10 mm, em leito estático e vibro-jorrado. Condições de operação: vazão de ar = 1,30 kg/min; Carga = 30,3 kg/m²; X₀ médio = 5,4 kg H₂O/kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12 a 14 Hz.

do período de secagem. É provável que os efeitos abrasivos, devido ao atrito, sejam desprezíveis quando comparados com os da contração interna.

As mesmas deformações ocorrem na secagem em leito fixo que, entretanto, apresentou um comportamento inverso, isto é, a inclinação da curva de secagem no segundo período tende a ser inferior à do primeiro período. É provável que isto seja reflexo de vários efeitos: 1) Existência de canais preferenciais, conforme já

relatado, o que se acentua no final da secagem devido às contrações de volume; 2) Dispersão do tempo de formação da cavidade central e de fissuras ao longo da operação, devido à secagem não uniforme no leito. Em um período de baixa taxa de secagem elas não acontecem ao mesmo tempo em todo o leito, como no caso LVJ, revertendo assim a tendência da secagem. Como as camadas inferiores secam mais rapidamente, logo surgem as tensões que promovem deformações, enquanto o resto do leito ainda permanece úmido e com considerável taxa de secagem.

As curvas da Figura V-9, relativas à operação em LE e LVJ e associadas ao primeiro período de taxa de secagem decrescente, interceptam o eixo das ordenadas em torno de $X^0 = 1$. Usando uma analogia com a lei de esfriamento de Newton, proposta por Lewis, a taxa de secagem pode ser expressa pela Equação (V-5) (PARRY, 1985):

$$\frac{dX}{dt} = -k (X - X_{eq}) \quad (V-5)$$

Integrando esta equação, tem-se:

$$(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq}) = \exp (-k t) \quad (V-6)$$

que é a própria Equação (V-3), com $A = 1$, usada para correlacionar os pontos experimentais da secagem de cubos de batata na Figura V-8. Portanto para o primeiro período de secagem os dois modelos são aplicáveis.

H . CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM

H-1 . MODELO DE FORNELL

Grande parte dos modelos de secagem existentes são aplicados apenas a uma camada delgada de partículas, embora os secadores de grande porte tenham o leito formado por uma camada profunda. Muitos autores consideram em seus modelos, a dependência do coeficiente de difusão com a umidade e com a temperatura dos sólidos. Um parâmetro muito importante é a dimensão das partículas, difícil de ser caracterizada, sobretudo devido às formas geométricas irregulares, à dispersão de tamanho no leito e à deformação de volume pela contração e pela formação de cavidades, como foi analisado na seção anterior. Os modelos de secagem aplicados às camadas delgadas, são úteis na modelagem de secadores de leito profundo, quando estes últimos são constituídos por leito estático ou por leito onde não ocorre a mistura entre as partículas. Os balanços de calor e massa são realizados sobre uma camada delgada de sólidos e estendidos ao leito total (PARRY, 1985).

Modelos simplificados de secagem aplicáveis às camadas profundas, também requerem a avaliação de parâmetros tais como a difusividade e as dimensões das partículas, e sua aplicabilidade é dificultada no processamento de materiais cuja variação de forma e de volume é acentuada durante a secagem (LEMAGUER e MAZZA, 1985; RAMASWAMY e LO, 1983).

Nas duas últimas décadas, estudos que conduzem a compreensão dos fenômenos físicos que influenciam na migração interna de água tem tido considerável desenvolvimento. Mesmo assim, caracterizações matemáticas completas do comportamento de um material biológico durante a secagem não têm tido sucesso, devido aos fe

nômenos secundários que influenciam a secagem. Ensaíos a nível de laboratório, sob condições limitadas, permitem o cálculo da cinética de secagem de produtos biológicos, válido para aquelas situações restritas. Os resultados experimentais podem ser normalizados sob a forma de uma curva característica de secagem. A curva característica tem aplicações mais amplas, podendo ser utilizada para simular a cinética de secagem e para obtenção de parâmetros para o projeto de secadores de grande porte (DAUDIN, 1983).

Estudando curvas de secagem obtidas com diferentes condições de ar de secagem, Van Meel, em 1958, observou que, dividindo-se n (taxa de evaporação da água em kg H₂O/kg ss.h) por n_1 (taxa de evaporação no período de taxa constante), obtinha-se uma função única do conteúdo de umidade, mais precisamente:

$$\frac{n}{n_1} = f'(X^0) \quad (V-7)$$

A curva obtida foi denominada curva característica de secagem (ccs), (DAUDIN, 1983). A taxa de secagem n_1 , depende das condições do ar de secagem sendo expressa pela Equação (V-8):

$$n_1 = \left(\frac{A}{W_s} \frac{h}{\Delta H_v} \right) (T_\infty - T_{bu}) \quad (V-8)$$

onde: A/W_s é a área de secagem específica (m²/kg ss); h é o coeficiente convectivo de transferência de calor; ΔH_v é o calor latente de vaporização da água livre; T_∞ e T_{bu} , são as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar de secagem. No período de taxa constante, esta última é a temperatura do sólido. Substituindo n_1 na Equação (V-7) vem:

$$n = \frac{A}{W} \frac{h}{\Delta H_v} (T_\infty - T_{bu}) \cdot f'(X^0) \quad (V-9)$$

Esta modelagem foi retomada por Krischer e Kroll em 1963, sendo ilustrada pela Figura V-10, onde $n = dX/dt$ é a taxa de secagem (DAUDIN, 1983).

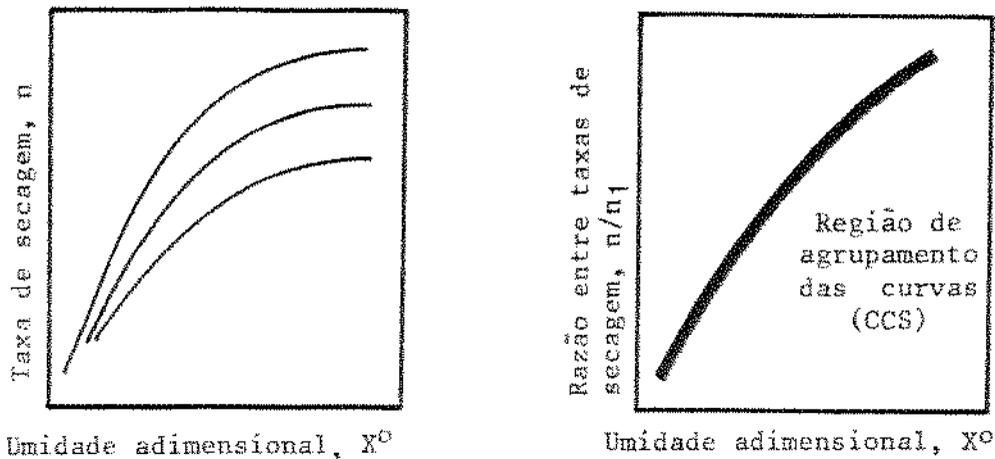


Figura V-10 . Obtenção da curva característica de secagem.

A Equação (V-9) apresenta uso limitado na secagem de materiais biológicos, pois com eles o primeiro período de secagem geralmente não é observado. Para contornar essa situação, FORNELL et alii (1980), definiram uma taxa fictícia de secagem para materiais biológicos no primeiro período de secagem, nos mesmos moldes da Equação (V-8), com ΔH_v constante durante este período fictício de secagem.

Complementando o modelo, LONCIN (1976) demonstrou que a razão $h/\Delta H_v$ é proporcional a raiz quadrada da velocidade do ar de secagem para corpos em forma de lâminas, ou seja:

$$\frac{h}{\Delta H_v} = K u^{0,5} \quad (V-10)$$

Fazendo as substituições, e expressando a influência do conteúdo de umidade dos sólidos por X (modelo de Fornell), tem-se

$$\frac{n}{(T_\infty - T_{bu}) u^{0,5}} = K \frac{A}{W} f'(X) = f(X) \quad (V-11)$$

FORNELL (1980), observou uma boa superposição das curvas de taxa de secagem, usando o modelo expresso pela Equação (V-11), para cubos de maçã, cenoura, batata e beterraba, em camadas delgadas dispostas sobre uma bandeja, com o ar escoando através do leito no sentido descendente. O agrupamento de curvas de secagem de milho não foi possível, provavelmente porque nesse caso, a maior parte da água evapora pelo pedúnculo, onde o grão se fixa ao sabugo, o que torna o fenômeno de secagem diferente.

H-2 , APLICABILIDADE DO MODELO DE FORNELL

Na secagem da maioria dos vegetais ricos em água, às vezes ocorrem contrações e deformações que são independentes das condições do ar de secagem (temperatura e velocidade) e, geralmente, são diretamente proporcionais ao conteúdo de água (FINZER e KIECKBUSCH, 1987; SUZUKI et alii, 1976). Isto faz com que estes fenômenos sejam englobados pelo modelo de Fornell, através da função f(X) da Equação (V-11). Já a formação de pó devido ao desgaste e à fratura das partículas, vai depender do desenho do secador, que pode produzir maior ou menor turbulência no leito (PELEG e NORMAND, 1987).

No modelo de Fornell, expresso pela Equação (V-11), a temperatura do ar T_{∞} é constante para a camada delgada, mas a temperatura dos sólidos, T_s , é maior do que T_{bu} , nos períodos de taxa de secagem decrescente. Portanto, a parcela de diferença de temperaturas é melhor representada por $(T_{\infty} - T_s) = (T_{\infty} - g'(X) \cdot T_{bu})$, pois a temperatura dos sólidos depende do conteúdo de umidade. Entretanto, representando a diferença de temperaturas pela Equação (V-12) (KIECKBUSCH e FINZER, 1988) vem:

$$(T_{\infty} - g'(X) \cdot T_{bu}) = g(X) \cdot (T_{\infty} - T_{bu}) \quad (V-12)$$

e, explicitando a função $g(X)$, tem-se:

$$g(X) = \left[\frac{T_{\infty}}{T_{\infty} - T_{bu}} - g'(X) \frac{T_{bu}}{T_{\infty} - T_{bu}} \right] \quad (V-13)$$

Para um intervalo de temperatura do ar de secagem, com condições psicrométricas usuais em secagem de vegetais ricos em água, pode-se calcular as razões $T_{\infty}/(T_{\infty} - T_{bu})$ e $T_{bu}/(T_{\infty} - T_{bu})$, para cada condição de secagem, assim como as médias destas razões.

Usando o segundo membro da Equação (V-12) com $g(X)$ estimado à partir das médias das razões de temperatura e admitindo um aumento considerável da temperatura do sólido, relativo a T_{bu} , o erro cometido não é significativo. Isto explica a aplicabilidade do modelo de Fornell nas situações em que os sólidos apresentam comportamento higroscópico no início da secagem, uma vez que $g(X)$ fica incluído em $f(X)$ da Equação (V-11).

Em sistemas nos quais a temperatura do ar varia ao longo do secador (camadas espessas), a análise é mais complicada. Por sim-

plificação vamos assumir uma carga de sólidos constante e que a vazão de ar de operação seja alta, para que não ocorra saturação do ar na saída. No período fictício de secagem constante a taxa será dada pela Equação (V-8) adaptada:

$$n_1 = \frac{A}{W} \frac{h}{\Delta H_t} \Delta T \quad (V-14)$$

onde " ΔT " representa uma média das diferenças de temperatura entre o ar e o sólido ao longo do leito.

Quando o conteúdo de umidade dos sólidos for alto, a temperatura das partículas se aproximará de T_{bu} , enquanto a temperatura do ar reduzirá-se exponencialmente ao longo do leito. O " ΔT " será a média logarítmica das diferenças de temperatura na entrada e na saída do ar.

Quando a secagem for dificultada pela resistência interna à transferência de massa, a temperatura média dos sólidos no leito se elevará, enquanto a variação de temperatura do ar no leito será menos pronunciada do que no período descrito acima. Isto faz com que ocorra diminuição na média logarítmica das diferenças de temperatura. Para uma mesma vazão de ar é provável que " ΔT " seja uma função do conteúdo de umidade médio do leito, X .

Para utilizar a Equação (V-14) para leitos espessos é necessário avaliar $h/\Delta H_t$. Com os dados experimentais indicados na Figura V-8 e o resultados de novos ensaios de secagem de cubos de batata, variando-se apenas a velocidade do ar de secagem, calculou-se o coeficiente convectivo de transferência de calor, h , usando a Equação (V-15) (NONHEBEL e MOSS, 1971):

$$h = R_c \Delta H_t / \Delta T_{m,\ell} \quad (V-15)$$

onde; R_c é a taxa inicial de secagem $\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; $\Delta T_{m,\ell}$ é a média logarítmica das diferenças de temperatura entre o ar e o produto, onde assumiu-se que no início da secagem a temperatura dos cubos de batata se aproxima de T_{bu} , devido ao alto conteúdo de umidade da batata; $\Delta H_t = \Delta H_v + \Delta H_w$, onde ΔH_v é a entalpia de vaporização da água pura e ΔH_w a entalpia associada com as ligações físico-químicas. Para batata, esta última parcela é desprezível quando $X > 0,3$ (KEEY, 1978).

Os cálculos mostraram que;

$$h / \Delta H_t = K u^{0,5}$$

ou seja, manteve-se a potência 0,5 da velocidade do ar de forma análoga à predita por LONCIN (1976), apesar da operação ser em LVJ com camada espessa.

O efeito da vazão do ar é mais complicado, pois ela também altera a variação de temperatura do mesmo ao longo do leito e, portanto, indiretamente, o potencial para transferência de calor e massa. A forma da função da velocidade deve ser ainda caracterizada pela aplicação dos modelos físico-matemáticos, mas em princípio por simplificação, este trabalho mantém o expoente 0,5 da velocidade do ar.

Estas considerações mostram que o parâmetro mais influenciado pela operação em camada espessa é " ΔT ".

Se a média logarítmica das diferenças de temperatura en-

tre o ar e o leite pudesse ser expressa, com uma aproximação, pelo produto de uma função de X multiplicada por $(T_{\infty} - T_{bu})$, para uma carga constante de sólidos, como na análise da camada delgada anterior, a Equação (V-11) poderia ser usada para obter curvas generalizadas de secagem de leitos profundos, pois a função de X estaria incluída no segundo membro da equação. O presente trabalho procura demonstrar experimentalmente esta hipótese, usando resultados de secagem em camada espessa, para operação em LE e LVJ.

H-3 , RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para testar a aplicabilidade do modelo de Fornell para leitos espessos, foram utilizados os resultados de ensaios de secagem com cubos de batata com arestas iniciais de 5 e 10 mm, operando em LE e LVJ. Os resultados dos ensaios de secagem de cubos de batata com arestas de 10 mm são mostrados na Figura V-11 e são os mesmos da Figura V-9.

Os pontos experimentais não tiveram bom ajuste aos modelos simples como do tipo denotado pela Equação (V-3), o que já foi relatado anteriormente. A fim de obter taxas de secagem precisas, necessárias para avaliar o modelo de Fornell, preferiu-se ajustar um polinômio de 5º grau usando o método dos mínimos quadrados para correlacionar os dados. A derivada em relação ao tempo, forneceu taxas de secagem (n) e quantificou-se o grupamento $n/(T_{\infty} - T_{bu}) u^{0,5}$ em função de X. Os resultados são mostrados nas Figuras V-12 e V-13 para cubos de batata de 5 e 10 mm de aresta.

Os resultados de ensaios de secagem em LVJ, com cubos de batata com aresta inicial de 5 mm, são os mesmos da Figura V-8, e no caso de LE operou-se com as mesmas condições de operação.

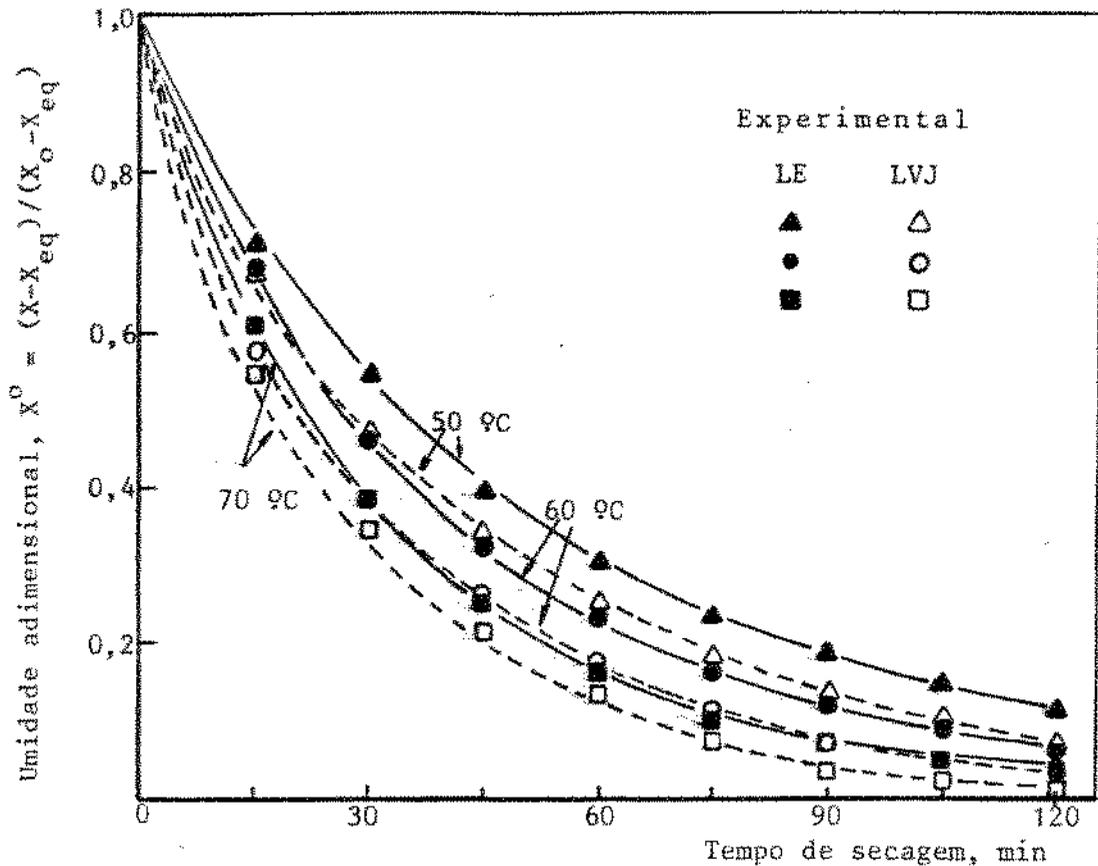


Figura V-11 . Secagem de cubos de batata com aresta inicial de 10 mm, em leito estático e vibro-jorrado, (---, —) simulação. Condições de operação: vazão de ar = 1,30 kg/min; Carga = 30,3 kg/min; $X_0 = 5,4$ kg H_2O /kg bs; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12 a 14 Hz.

As curvas da Figura V-12, para cubos de 5 mm, apresentam uma concavidade voltada para baixo, enquanto nas curvas da Figura V-13, para cubos de 10 mm, a concavidade é voltada para cima. A distinção nas concavidades das curvas deve-se ao efeito das dimensões das partículas. Os cubos de 5 mm apresentam uma maior superfície por unidade de massa, disponível à transferência de calor e massa, o que se reflete em maiores taxas de secagem.

As curvas que representam a operação em LVJ situam-se acima das curvas da operação em LE. Este comportamento mostra o efeito da operação em LVJ, que promove o movimento permanente dos cu-

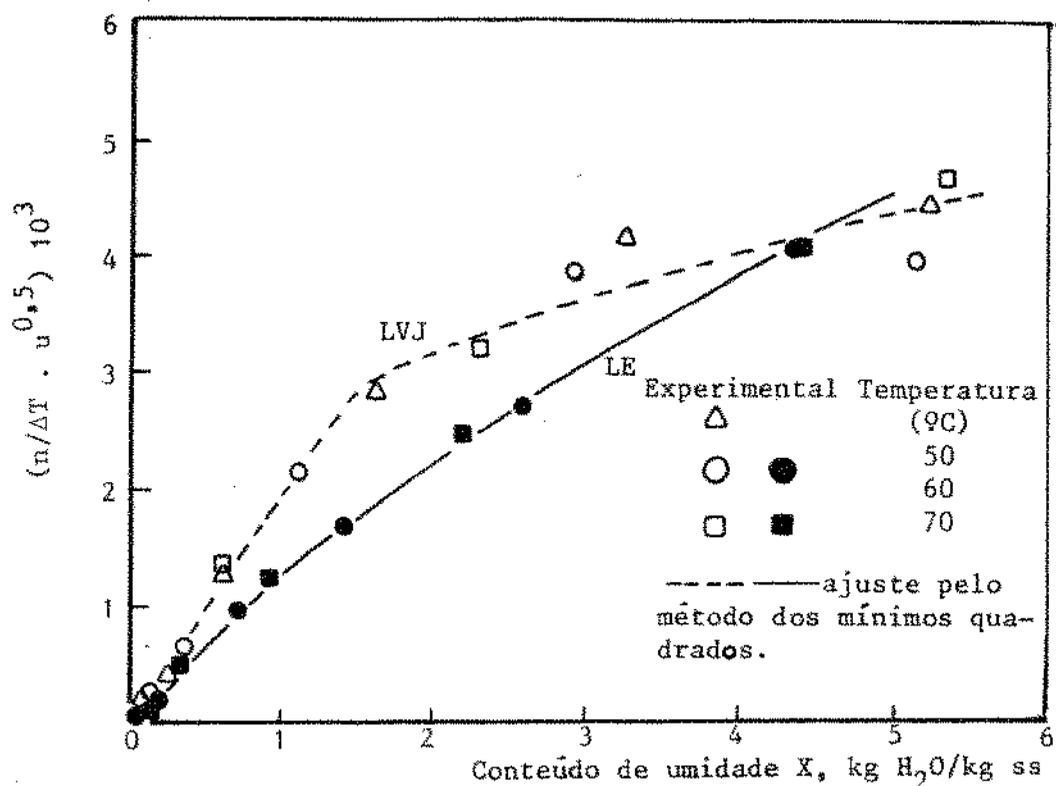


Figura V-12 . Curvas generalizadas de secagem de cubos de batata com aresta inicial de 5 mm; n (kg H₂O/kg batata seca . min), ΔT (°C), u (m/s). Condições de operação: vazão de ar = 1,30 kg/min; Carga = 30,3 kg/m²; $X_0 = 4,6$ kg H₂O/kg bs (LE); $X_0 = 5,2$ kg H₂O/kg bs (LVJ); amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12,5 a 13,5 Hz.

bos de batata no leito, eliminando a aderência entre partículas e partículas-parede, e expondo a totalidade da superfície das mesmas ao ar de secagem. Entretanto no início da secagem, muitos cubos de batata, com 5 mm de aresta, aderiam-se à parede do tubo de acrílico. Isto não acontecia com os cubos de batata com 10 mm de aresta. Este comportamento pode explicar a tendência de superposição das curvas da Figura V-12, no princípio da operação, indicando que a vibração não atua no sentido de aumentar a taxa no início da secagem, quando o leito é formado por partículas pequenas com característica adesiva.

As Figuras V-12 e V-13, indicam que os maiores afastamentos das curvas que representam a operação em LVJ, em relação ao LE, situam-se à direita nas figuras. Como a velocidade do ar é a

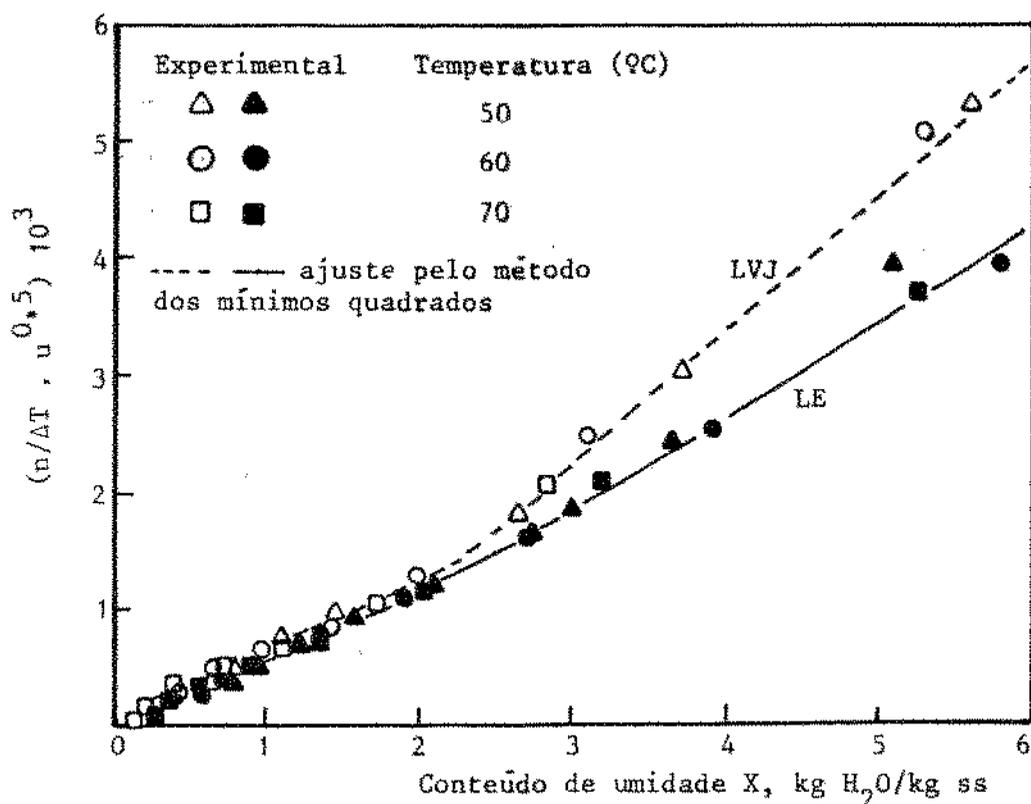


Figura V-13 . Curvas generalizadas de secagem de cubos de batata com aresta i inicial de 10 mm; n (kg H_2O /kg batata seca . min), ΔT (°C), u (m/s). Condições de operação: vazão de ar = 1,30 kg/min; Carga = 30,3 kg/m²; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12 a 14 Hz.

mesma nas duas situações, a agitação dos sólidos, devido a ação vibracional, atua no sentido de reduzir a resistência externa à transferência de massa no LVJ. Quando o leito é formado por cubos de batata de 5 mm, Figura V-12, a influência da vibração na transferência de massa torna-se desprezível quando o conteúdo de umidade dos sólidos, X , for inferior a 0,3. Com relação à Figura V-13, que denota a secagem de cubos de batata de 10 mm de aresta, o efeito da operação em LVJ não é importante para $X < 2,0$ kg H_2O /kg ss, ou seja, abaixo deste limite a resistência interna à transferência de massa torna-se dominante. Abaixo deste conteúdo de umidade, existe uma tendência dos pontos experimentais provenientes da operação em LVJ, situar-se acima dos pontos da operação em LE. Isto

deve ser proveniente da ocorrência do desgaste superficial dos cubos de batata, devido ao movimento permanente dos sólidos sob ação vibracional, o que facilita a migração de umidade para o meio de secagem.

Os pontos experimentais das Figuras V-12 e V-13, foram correlacionados por equações, que integradas tornam a resgatar relações de X como função do tempo. Substituindo os parâmetros, observou-se um excelente ajuste com pontos experimentais, como pode-se observar para a secagem de cubos de 10 mm de aresta, locados na Figura V-11.

Para analisar a influência da velocidade do ar no modelo de Fornell, foi realizado um ensaio de secagem em LVJ, com cubos de batata de 5 mm de aresta com as condições do ar de secagem, temperatura 70 °C ($T_{bu} = 31,2$ °C) e velocidade 0,90 m/s. A carga dos cubos de batata e o seu conteúdo inicial de umidade era o mesmo das experiências anteriores, assim como a amplitude e frequência de vibração. Os resultados experimentais são mostrados na Figura V-14. Na mesma figura são denotados os pontos experimentais para condições do ar de secagem 70 °C e 1,38 m/s. Na Figura V-14, também estão traçadas as curvas de secagem simuladas, obtidas através da utilização da CCS, correspondente à Figura V-12 para LVJ.

Analisando os resultados da Figura V-14, pode ser verificado que durante a primeira hora de secagem, os desvios máximos entre as curvas simuladas e os pontos experimentais, situam-se em torno de 6%, o que comprova a aplicabilidade do modelo de Fornell, ao se variar a velocidade do ar na faixa pesquisada, para secagem de cubos de batata dispostos em múltiplas camadas e operando em LVJ.

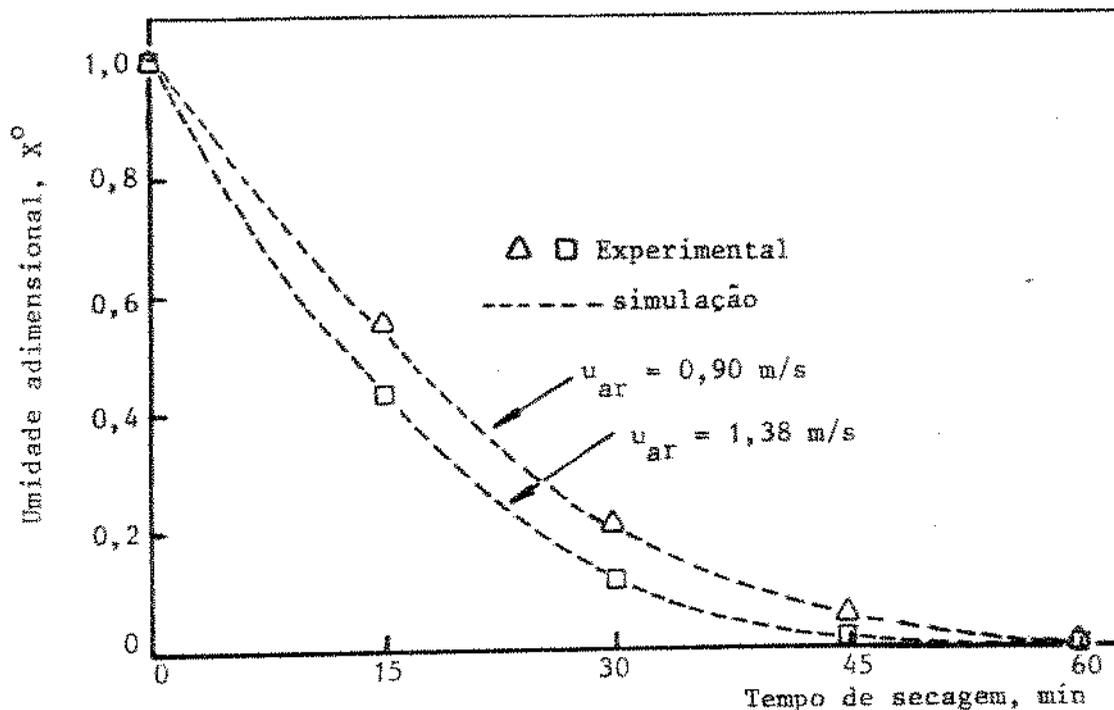


Figura V-14 . Curvas de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta. Condições de operação: temperatura do ar = 70 °C; Carga = 30,3 kg/m²; X₀ = 4,5 kg H₂O/kg bs (A); X₀ = 5,2 kg H₂O/kg bs (B); amplitude e frequência de vibração 4,0 mm e 12,5 a 13,5 Hz.

Após uma hora de secagem a curva simulada na Figura V-14 ($u_{ar} = 0,90$ m/s), tende a se afastar dos pontos experimentais indicando umidades menores para o produto. Neste período a umidade reduzida dos cubos de batata torna o material friável e o atrito entre as partículas conduz a desgaste superficial, observando-se formação de pó. Este efeito é mais pronunciado ao se operar com maior velocidade do ar, o que produz uma maior agitação do leito. As curvas da Figura V-12 foram determinadas para velocidade do ar 1,38 m/s e utilizadas para simular a curva da Figura V-14, para $u_{ar} = 0,90$ m/s. Portanto o efeito do atrito incluído na Figura V-12, facilita a saída de umidade enquanto ao operar com $u = 0,90$ m/s este efeito é minimizado. Isto explica a tendência da curva simulada na Figura V-14 se afastar dos pontos experimen

tais além de uma hora de secagem.

Convém ressaltar que este estudo da ampliação do uso do modelo de Fornell é preliminar, principalmente aquele relativo ao efeito da velocidade do ar. A influência da variação da temperatura do ar de secagem deve ser pesquisada operando com leitos espessos de diferentes alturas, formados por outros materiais biológicos ricos em água, para obter subsídios que levem à confiabilidade da extensão do modelo.

I , OPERAÇÃO DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO COM TUBO CENTRAL

Secadores de LVJ, acoplado com o tubo central (*"draft tube"*) são importantes na operação contínua em múltiplas etapas. O tubo central separa a região de escoamento descendente e ascendente de sólidos o que permite um melhor controle do tempo de residência das partículas em uma etapa de secagem. Operando com baixa velocidade do ar pode-se controlar o tempo de residência das partículas em uma etapa, variando a aceleração vibracional. Isto constitui uma característica importante do secador de LVJ, em relação ao de leito fluidizado (FINZER e KIECKBUSCH, 1986 A). Neste último entre as técnicas utilizadas para reduzir o tempo de residência das partículas, destaca-se a necessidade de utilização de defletores e telas perfuradas internas (SATIJA e ZUCKER, 1986).

Para ilustrar o desempenho do secador de LVJ com tubo central, foram realizados mais ensaios de secagem usando cubos de batata. Os cubos já haviam sido desidratados em outros ensaios (aresta inicial de 5 mm) e foram reidratados com água. O material foi colocado em repouso no interior de uma geladeira por 18 horas

para uniformizar a distribuição da umidade. As condições de vibração utilizadas foram 11 Hz e 4 mm. A temperatura do ar de secagem era 70 °C. As dimensões geométricas do sistema e as outras condições de operação são indicadas na Figura V-15, onde também são de notados os resultados dos ensaios de secagem. As velocidades do ar selecionadas permitem operar dentro das duas faixas de trabalho do secador de LVJ com tubo interno (FINZER e KIECKBUSCH, 1986 A). Nos dois ensaios, o movimento das partículas foi constante durante toda a secagem. No entanto as partículas deslocavam-se mais rapidamente ao operar com velocidade do ar igual a 120 cm/s.

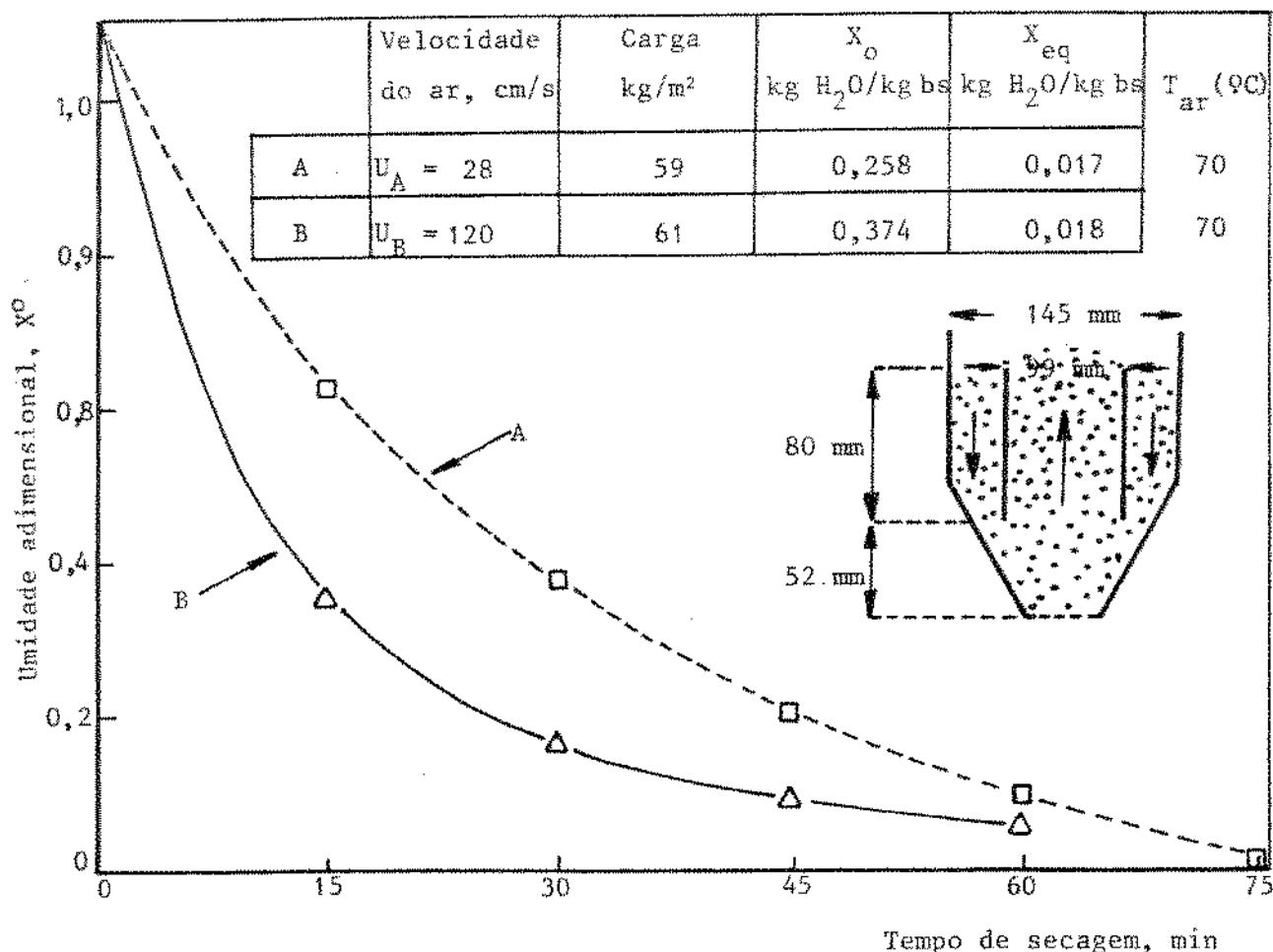


Figura V-15 . Operação do secador de leito vibro-jorrado com tubo cilíndrico central.

Na realidade não se procurou otimizar o processo de secagem com o tubo interno, onde nos dois ensaios da Figura V-15 foi variado simultaneamente a velocidade do ar e a umidade inicial dos sólidos.

Entretanto algumas conclusões podem ser adiantadas. Para se atingir o conteúdo adimensional de umidade 0,08 a relação entre os tempos de secagem (θ_A/θ_B) foi de 1,3, enquanto a relação entre as velocidades do ar (\bar{u}_B/\bar{u}_A) era 4,3. Já a relação de consumo de energia para aquecer o ar de secagem foi de $(E_B/E_A) = 3,3$. Como a energia de aquecimento do ar constitui a parcela mais substancial do balanço energético (KEEY, 1972), a operação mais econômica é representada pela curva A da Figura V-15.

A análise anterior também pode ser efetuada partindo de cubos de batata com mesmo conteúdo de umidade, por exemplo $X_0 = 0,258$ kg H₂O/kg ss, o que equivale a $X^0 = 1$ na curva A e $X^0 = 0,674$, na B. Secando a batata até o conteúdo de umidade $X = 0,0652$, o que equivale a $X^0 = 0,2$ na condição A e $X^0 = 0,135$ em B, e usando a Figura V-15, verifica-se que a relação entre os tempos de secagem é 1,61. Já a relação de consumo de energia para aquecer o ar foi de 2,7. Além disso, na situação B consome-se mais energia para deslocar o ar de secagem.

Estes resultados indicam que em determinadas situações, a seleção da operação mais econômica pode conduzir à secagem em LVJ, operando com velocidade reduzida do ar de secagem.

A agitação das partículas no LVJ é mais intensa quando o leito é formado por partículas mais elásticas, o que já foi discutido anteriormente. O capítulo à seguir estuda a secagem de grãos de soja em LVJ, que apresentam elasticidade superior à dos cubos de batata.

Nas seções anteriores C, D, G e H deste capítulo optou-se por operar o secador de LVJ sem o tubo interno central, pois não visualizou-se vantagens relevantes que levassem à optar pela instalação do mesmo na secagem de cubos de batata com alto conteúdo de umidade inicial, pois as partículas deste material não transmitem com facilidade energia vibracional entre si.

Entretanto, a influência do escoamento do ar na circulação dos sólidos é diferente da situação onde não se usa o tubo interno. Como o tubo interno não permite que o ar do seu interior escoe para o espaço anular, a força resistiva do ar deve reduzir-se nesta última região. O resultado deve ser uma maior facilidade de escoamento dos sólidos e isto pode facilitar a secagem. Porém, nesta situação o escoamento preferencial de ar pelo tubo central reduz a fração do mesmo que escoo pelo espaço anular e isto pode prejudicar a secagem.

Para analisar a influência do tubo interno foram realizados novos ensaios de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta em LVJ, sendo a carga dos mesmos 30,3 kg/m². As condições de ar de secagem eram, temperatura 70 °C e velocidade 1,38 m/s.

Na operação em LVJ com tubo central observou-se uma circulação intensa dos cubos de batata desde o início da secagem. No espaço anular observou-se visualmente que ocorria recirculação dos cubos de batata e no interior do tubo interno o escoamento ocorria em fase diluída.

Os resultados experimentais são denotados na Figura V-16, onde também são indicados os parâmetros geométricos do secador.

Os pontos experimentais relativos às duas situações praticamente coincidiram. Portanto, para a situação estudada o uso do

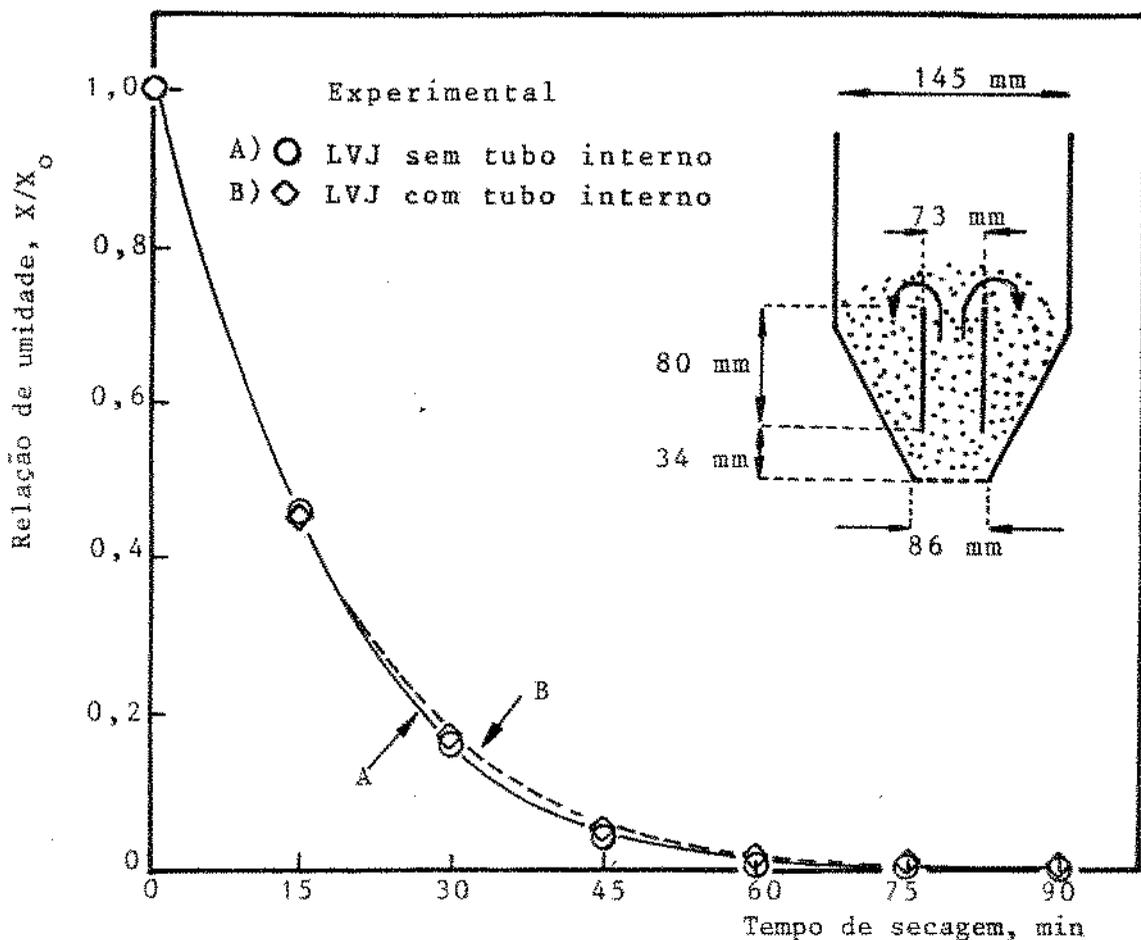


Figura V-16 . Curvas de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta, obtidas com o secador de LVJ, operando com e sem o tubo interno. Condições de operação: velocidade e temperatura do ar, 1,38 m/s e 70 °C. Carga de batata = 30,3 kg/m²; $X_0 = 3,8$ kg H₂O/kg bs (LVJ com tubo interno); $X_0 = 4,3$ kg H₂O/kg bs (LVJ sem tubo interno); Amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 10,0 a 13,8 Hz.

tubo interno não mostrou-se vantajoso, ele talvez tivesse maior importância tecnológica funcionando como um trocador de calor que fornecesse energia térmica suplementar para a secagem.

Outro ensaio de secagem foi realizado operando com tubo central e com uma carga de cubos de batata quatro vezes superior à anterior, ou seja, 121 kg de batata/m², sendo a velocidade e temperatura do ar 1,38 m/s e 70 °C, mantidas constantes todas as outras condições anteriores de operação e geométricas. Os sólidos ocupavam uma seção de 14 cm de altura acima do tubo central.

Observou-se visualmente que os sólidos escoavam no leito muito lentamente, o que indicou que a capacidade do equipamento foi ultrapassada. Provavelmente, o escoamento fosse mais intenso aumentando-se a altura do tubo interno ou a velocidade do ar de secagem. Esta última hipótese não foi possível de ser verificada por limitação da capacidade do soprador utilizado.

J . AUMENTO DA CARGA DE CUBOS DE BATATA OPERANDO EM LVJ SEM TUBO CENTRAL

Nas seções anteriores deste capítulo onde operou-se em LVJ sem tubo central, a carga inicial de cubos de batata era mantida constante e igual a 30,3 kg/m².

Nesta seção procurou-se estudar o efeito do aumento da carga de cubos de batata mantendo-se constante as demais condições de operação. Os resultados obtidos ao operar com cargas de 30,3; 48,4 e 60,6 kg de batata/m² são mostrados na Figura V.17.

O movimento circulatório das partículas foi observado desde o início da secagem, para as três cargas pesquisadas. Entretanto, a circulação dos cubos de batata era mais intensa, no início da secagem, quando a carga de sólidos era menor. Com o transcorrer da secagem observou-se visualmente que a circulação dos sólidos aumentava para as três situações estudadas. Isto é devido entre outros efeitos, à maior facilidade de transmitir-se vibração ao leito, a medida que os cubos de batata vão sendo desidratados.

Desidratando o tubérculo até conseguir um conteúdo de umidade de 8% (bu), o que corresponde a $X/X_0 = 0,02$ na Figura V- 17, a relação entre os tempos de secagem para as situações A e C é:

$$t_C/t_A = 1,7.$$

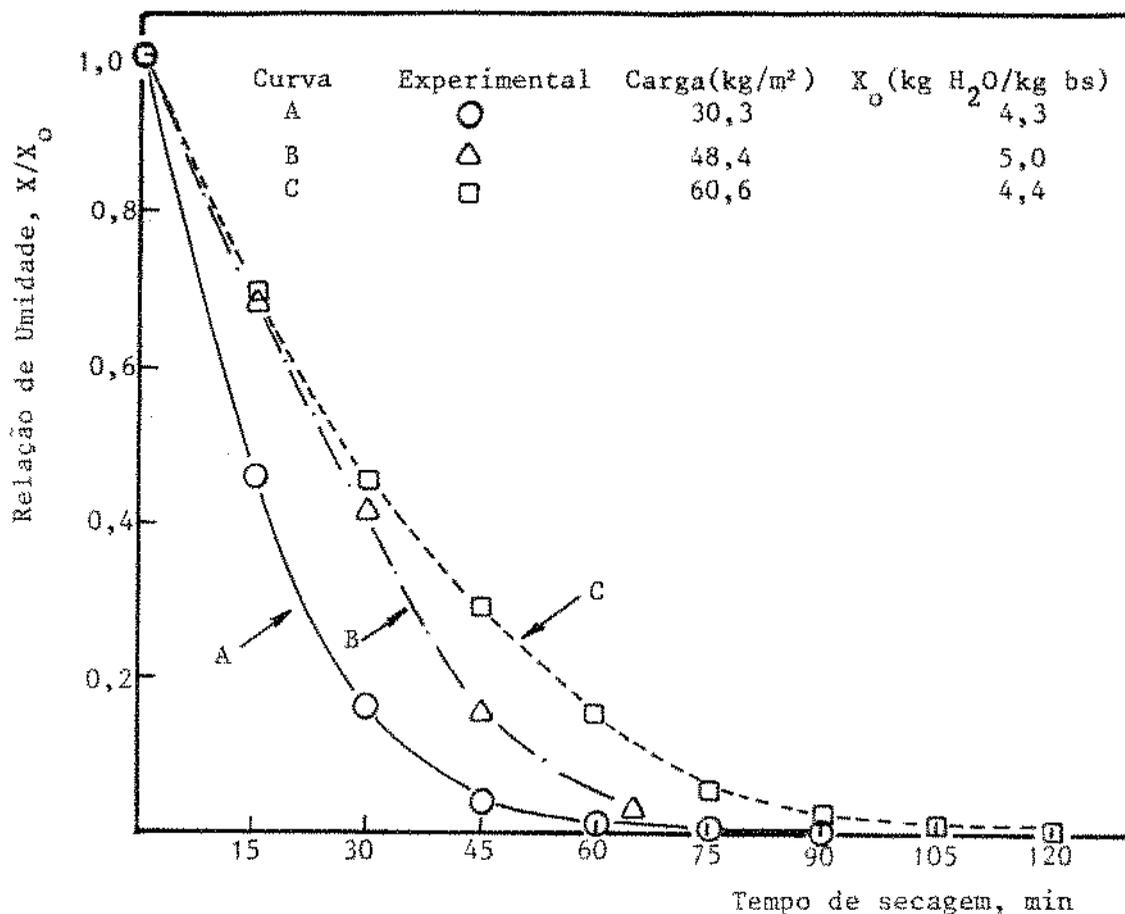


Figura V-17 . Curvas de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta, obtidas com o secador do LVJ operando sem o tubo interno. Condições de operação: velocidade e temperatura do ar 1,38 m/s e 70 °C. Amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 10,0 a 13,8 Hz.

Como todas as condições operacionais foram mantidas constantes, inclusive a vazão do ar de secagem, este resultado denota ser vantajoso operar o LVJ com carga mais elevada de sólidos, em termos de economia de energia do ar de secagem.

Esta análise mostrou que ao duplicar-se a carga de cubos de batata, o consumo de energia do ar de secagem por unidade de massa do produto reduz-se em 15% em relação à menor carga, além de ter sido duplicada a capacidade do equipamento instalado.

CAPÍTULO VI

SECAGEM DE GRAOS DE SOJA COM AQUECIMENTO INDIRETO EM LEITO VIBRO-JORRADO

A . SECADORES COM AQUECIMENTO INDIRETO DO LEITO

Na secagem com aquecimento indireto, o sólido recebe calor por intermédio de uma superfície aquecida que pode ser a parede do secador, agitadores ocios ou transportadores instalados no interior da unidade. O líquido é evaporado e abandona o leito de secagem na forma de vapor (NONHEBEL e MOSS, 1971). As vezes uma vazão reduzida de gás inerte é utilizada para remover esse vapor (ROOT III, 1983). Veja Capítulo II - D.7, aquecimento indireto em leito vibrado.

A técnica de secagem de sólidos usando aquecimento indireto apresenta uma série de vantagens em relação ao método direto (que utiliza o calor sensível de um gás aquecido) que são: 1) o produto não entra em contato direto com a fonte de calor, o que pode evitar contaminação; 2) devido à pequena vazão do gás incondensável, solventes valiosos ou tóxicos podem ser recuperados de maneira econômica, por adsorção, absorção ou condensação e o arraste de pequenas partículas é minimizado; 3) a razão entre o calor requerido para eliminar o solvente e o calor total admitido conduz a uma alta eficiência térmica (SLOAN et alii, 1967; PERRY e CHILTON, 1974).

Os secadores com aquecimento indireto mais utilizados nos processos industriais são: 1) Bandejas aquecidas; 2) Liofilizadores; 3) Pratos sobrepostos para possibilitar a operação contínua, sendo a movimentação dos sólidos promovida por agitadores; 4) Tam

bor ("drum dryer"); 5) Cilindro rotativo horizontal, provido internamente de tubos dissipadores de calor (GOENAGA, 1984; ROOT III, 1983).

Na atualidade diversos modelos de secadores com aquecimento indireto usam vibração para promover o transporte dos sólidos e intensificar a transferência de calor. A Figura II-44 destacou alguns destes secadores.

Na presente pesquisa, uma sequência natural no desenvolvimento do secador de LVJ, foi adaptá-lo para trabalhar com aquecimento indireto. Para tanto utilizou-se grãos de soja e o aquecimento foi realizado por meio de uma resistência elétrica envolta no tubo central (veja Figura III-5).

Este capítulo apresenta e analisa os resultados dessas pesquisas, pelas quais assegura-se o grande potencial de utilização deste processo. A cinética de secagem de grãos de soja é estudada e comparada com os resultados obtidos em um secador de LE, estando este último operando com aquecimento direto do leito.

Foi quantificada a energia consumida no processo de secagem em LVJ e enfatizada a economia da mesma por comparação com o consumo na operação em LE (Seção F).

O desenvolvimento de um modelo matemático tornou possível a simulação da cinética de secagem em LVJ, usando aquecimento indireto do leito (Seção G).

B , TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

Quando partículas de um material úmido são colocadas em um recipiente que recebe energia de um aquecedor submerso no leito ,

a taxa de secagem é dada pela equação geral (NONHEBEL e MOSS, 1971).

$$R = \frac{1}{A_h} \frac{dw}{dt} = \frac{1}{A_h} \frac{1}{\Delta H_T} \frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{h_{ef} (T_h - T_s)}{\Delta H_T} \quad (\text{VI-1})$$

onde: R é a taxa instantânea de secagem kg/m²s

w é a massa de água eliminada do sólido.

ΔH_T é a entalpia total requerida na evaporação de cada kg de H₂O.

$\delta Q/\delta t$ é a taxa de transferência de calor efetivamente utilizado para aquecer os sólidos e evaporar a água. Essa taxa depende da diferença entre a temperatura da superfície aquecedora, T_h , e a do material T_s , da área da superfície do aquecedor, A_h , e do coeficiente global efetivo de transferência de calor, h_{ef} , referido a essa área.

Quando a umidade nos sólidos não for ligada, a temperatura local onde ocorre a evaporação aproxima-se da temperatura de ebulição da água pura, desde que a superfície que dissipa calor esteja à temperatura mais elevada do que a anterior (SLOAN et alii, 1967).

Devido à complexidade na quantificação dos parâmetros da equação acima, é difícil prever a grandeza da taxa de secagem, R.

As duas resistências térmicas que são relevantes no processo e que definem a grandeza de h_{ef} , são: a resistência da superfície do aquecedor-leito e a resistência do interior do meio de secagem. Esta última contribuição depende muito da dinâmica dos sólidos no leito, ou seja, depende do projeto do secador, da natureza e do conteúdo de umidade dos sólidos e das

propriedades físicas do gás (SLOAN et alii, 1967). No interior do leito, uma combinação de resistências à transferência de calor em série e em paralelo, é responsável pelo transporte de calor no mesmo. As contribuições mais importantes neste mecanismo, são os coeficientes de transferência de calor partícula-partícula e partícula-gás (VANDERSCHUREN e DELVOSALLE, 1980). É conveniente ressaltar que a vibração atua no sentido de movimentar as partículas e isto melhora a transferência de calor.

Quando o leito de secagem for bem agitado, o processo de transferência de calor é bastante dependente da resistência superfície-leito. Já os mecanismos de transferência de calor em paralelo no leito, facilitam a dissipação do calor proveniente da superfície aquecida.

Por outro lado a grandeza do coeficiente de transferência de calor superfície-leito, é maior: 1) do que os coeficientes convectivos de transferência de calor; 2) em sistemas vibrados quando a superfície que dissipa calor situa-se na posição vertical; 3) na interface jorro-espaço anular (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980; THOMAS et alii, 1987; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Pelas considerações anteriores, o secador de LVJ, operando em fase densa, deve apresentar ótimo desempenho na secagem de grãos de soja, se o aquecedor submerso no leito for constituído por um cilindro vertical (veja Figura III-5), com o ar escoando no leito à baixa velocidade, suficiente para retirar o vapor de água eliminado dos sólidos durante a secagem.

O valor de R varia ao longo da secagem, como pode ser inferido traçando-se tangentes às curvas experimentais das Figuras VI-1 e VI-2 (veja Seção D). Essa variação é devido, entre outros fatores, ao aumento da temperatura dos sólidos e as alterações nas

partículas que influem na sua dinâmica e conseqüentemente no h_{ef} .

A fim de se conseguir uma equação de trabalho simples, podemos assumir um valor médio de h_{ef} , válido para determinado intervalo de secagem, e integrar a Equação VI-1, surgindo então um valor médio para ΔT e outro para ΔH_{Tm} , que satisfaçam a equação, então:

$$R_m = \frac{(X_o - X) W_s}{A_h t} = \frac{(h_{ef})_m (T_h - T_s)_m}{\Delta H_{Tm}} \quad (VI-2)$$

onde: R_m é a taxa de secagem global média, $kg H_2O/m^2 s$, de todo o intervalo de secagem, ou seja, do conteúdo de umidade X_o até X ;

W_s é a massa de sólidos secos, kg ;

$(h_{ef})_m$ é o coeficiente efetivo médio de transferência de calor, $W/m^2 K$. Este coeficiente é um valor médio para a secagem dos sólidos de X_o até X . Variando o intervalo de conteúdo de umidade, $(h_{ef})_m$ também varia, pois este coeficiente é muito dependente das condições do sólido (GOENAGA, 1984);

$(T_h - T_s)_m$ é uma média das diferenças de temperatura para todo o leito durante a secagem.

Esta equação relaciona corretamente o tempo total necessário para se secar o produto de X_o até X . Sua utilização na forma como está, entretanto, é limitada, pois $(h_{ef})_m$ e $(T_h - T_s)_m$ devem ser conhecidos ("a priori") para cada situação. Uma equação mais geral, baseada na Equação (VI-2) será deduzida na Seção G.

C . A SOJA E SUA SECAGEM

O ponto de maturação fisiológica de grãos representa o ponto em que a produção de matéria seca e a capacidade de germinação

são máximos e que o grau de deterioração é mínimo. Estudos de maturação de grãos de soja mostram que sua maturidade fisiológica é atingida com teores de umidade na faixa de 50 a 64%. Seria vantajoso realizar a colheita da soja nesse ponto. Entretanto o teor de umidade dos grãos é muito elevado, o que implica em maiores custos de secagem e a planta encontra-se com grande número de folhas verdes, o que impossibilita a operação de uma colheitadeira mecânica (CARVALHO e ANDREOLI, 1981; FRAGA et alii, 1981).

É recomendável a colheita da soja quando os grãos atingirem um teor de umidade compatível com a colheita mecânica, em torno de 14 - 16%, para minimizar danos mecânicos nos grãos. Os danos mecânicos aumentam quando o teor de umidade é superior a 18% e inferior a 13%. Quando a umidade é baixa, os grãos podem se quebrar e apresentar alta porcentagem de casca rachada. Se a colheita for realizada quando a umidade dos grãos for inferior a 13%, pode não ser necessária a secagem artificial antecedendo o armazenamento.

Antes de efetuar a secagem é importante analisar o nível de umidade desejada. Quando a umidade é superior a 13%, a taxa respiratória dos grãos é elevada e aumenta a infestação de fungos e insetos. Os conteúdos de umidade entre 10 e 13% são favoráveis à conservação dos grãos durante 8 meses em ambiente aberto. Umidades próximas de 10% são recomendáveis para conservação a granel (FILHO et alii, 1982).

No caso de soja destinada a produção de óleo e ração, temperaturas do ar de secagem superiores a 100 °C reduzem o rendimento de óleo. Geralmente nos secadores contínuos tem-se obtido bons resultados, operando com ar nas temperaturas na faixa de 85 a 90 °C. Normalmente a temperatura do grão não deve ultrapassar

D . ENSAIOS DE SECAGEM EM LVJ COM AQUECIMENTO INDIRETO

Para ter-se uma idéia do desempenho do secador de LVJ, quando comparado com o de um secador de leito estático que aproxima-se dos modelos de secadores industriais nos quais não ocorre mistura de grãos, decidiu-se comparar o consumo total de energia de um secador de LVJ com aquecimento indireto, com o de um secador de LE aquecido por ar, controlando-se o insumo total de energia de maneira a produzir temperaturas de mesma ordem no sólido, e com isso riscos idênticos de deterioração por efeitos térmicos.

Ensaio com soja a dois níveis de umidade inicial são apresentados a seguir.

D-1 . SECAGEM DE SOJA COM 30% DE UMIDADE INICIAL

Inicialmente foram realizados ensaios de secagem com grãos muito úmidos, isto é, com um conteúdo médio de umidade inicial em torno de 30% (bu). A carga era de 170 kg de soja/m² e o leito foi percolado com ar ambiente a baixa velocidade, 15 cm/s, preferidos à seção cilíndrica do secador. A energia elétrica dissipada pela resistência elétrica, correspondeu a uma diferença de potencial de 103 V e a uma corrente de 2,58 A, sendo a potência de 266 watts.

Após cerca de 6 minutos do início da operação de secagem em LVJ, era aparente a saída de vapor de água pelo topo do leito e ocorria condensação do mesmo sobre o anteparo de acrílico situado acima do secador mostrado na Figura III-1. A superfície interna do secador, acima do leito de secagem, também apresentou emba-

çamento e o condensado era removido periodicamente em um tecido.

Após 90 minutos de secagem, a redução de volume do leito devido ao encolhimento dos grãos de soja, pela perda de umidade, foi de 28%. Nessa situação o topo do trocador de calor emergia no leito e a secagem era interrompida.

No transcorrer da secagem foi necessário variar a frequência de vibração do leito a fim de manter uma boa movimentação das partículas, isto era esperado pois ensaios preliminares mostraram que a descarga de sólidos no leito aumentava ao operar com menor conteúdo de umidade dos sólidos. Isto se relaciona diretamente com a elasticidade do material, que diminui com o maior conteúdo de umidade. O maior amortecimento nos choques de grãos com maiores umidades, implica em uma menor amplitude de vibração na frequência de ressonância, o que conduz a uma menor descarga de sólidos. Com a redução do conteúdo de umidade dos grãos durante a secagem, era necessário reduzir a frequência de vibração do camo, para conseguir uma descarga máxima visível de sólidos associada à condição de ressonância. Durante os ensaios operou-se entre 12 e 17 Hz dependendo dos conteúdos de umidade dos grãos de soja. Em um processo contínuo em múltipla etapas, em cada etapa pode-se operar em uma frequência fixa de vibração.

O resultado da secagem é mostrado na Figura VI-1, onde cada ponto experimental corresponde a um ensaio de secagem. Na figura a ordenada representa a relação de umidade X/X_0 , e a abscissa o tempo de secagem. Excluindo o ponto inicial, a figura mostra que os pontos experimentais encontram-se razoavelmente alinhados a uma reta, o que indica uma taxa de secagem constante. Este resultado foi surpreendente e desejável, uma vez que a simulação é facilitada no período de taxa de secagem constante.

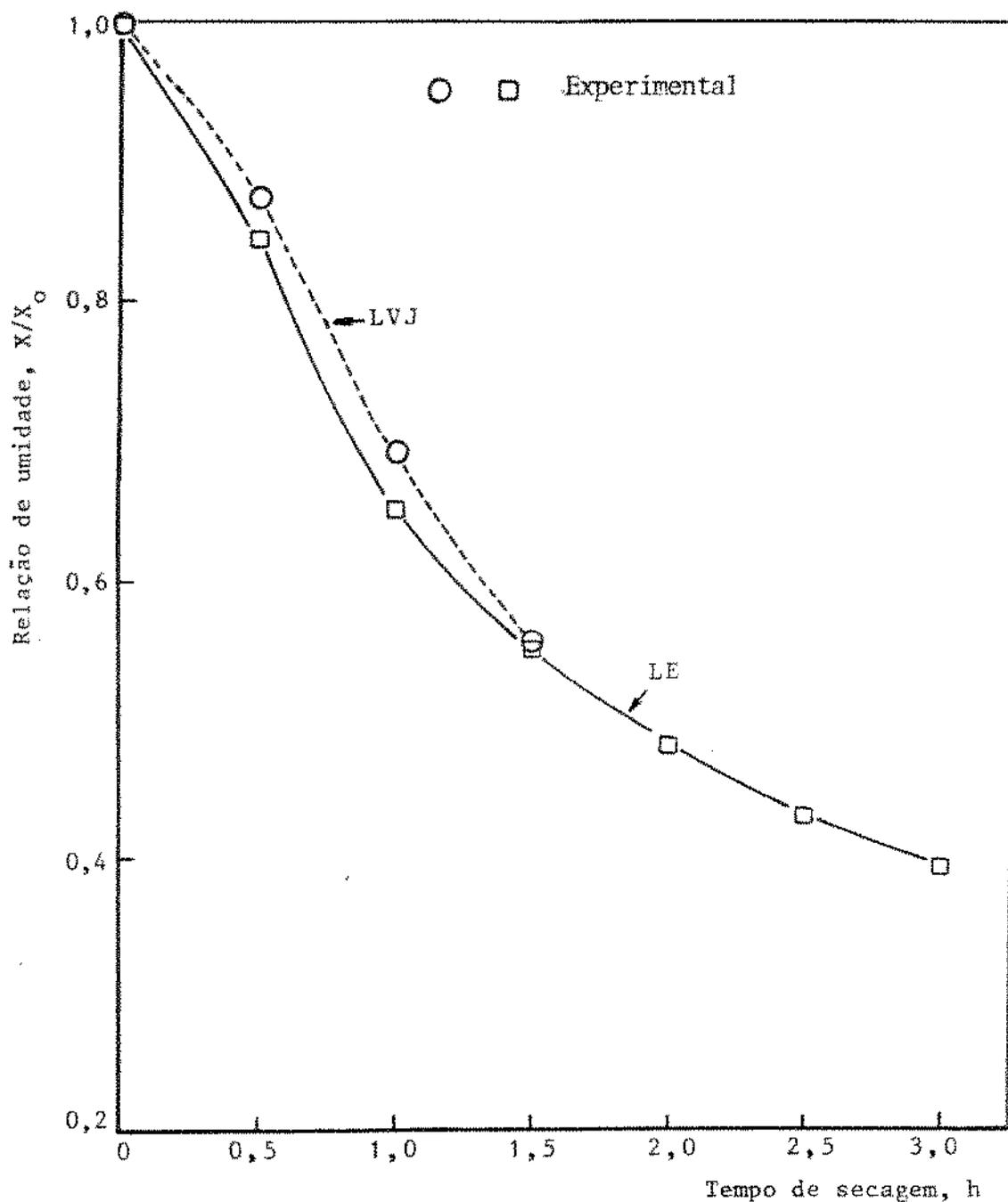


Figura VI-1 . Curvas de secagem de grãos de soja, carga = 170 kg/m²; LE (aquecimento direto): T_{ar} = 60 °C, u_{ar} = 67 cm/s, umidade inicial dos sólidos = 28% (bu); LVJ (aquecimento indireto: T_{ar} (ambiente), u_{ar} = 15 cm/s, umidade inicial = 30% (bu); potência = 266 watts; A = 4 mm; f = 12 a 17 Hz.

Como elemento de comparação foi realizado um ensaio com um secador cilíndrico de acrílico com 14,5 cm de diâmetro interno. O fundo era 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. O aquecimento do leito foi direto, com o ar a uma temperatura de 60 °C e velocidade de 67 cm/s. A carga de grãos de soja era de 170 kg/m² e a umidade média inicial de 28% (bu). Os resultados da secagem são também mostrados na Figura VI-1.

Uma comparação entre as curvas da Figura VI-1 indica que os mecanismos de secagem em LVJ e LE são distintos, uma vez que no LE não foi percebido o período de taxa de secagem constante.

Um segundo ensaio com uma umidade média inicial de 30% (bu), foi realizado com a finalidade de confirmar a extensão do período de taxa de secagem constante. Para tanto foi utilizada uma carga inicial maior (182 kg/m²), tanto no LVJ como em LE. Os resultados são traçados na Figura VI-2. Com relação a operação em LVJ, cada ponto na figura novamente correspondeu a um ensaio individual. A Figura VI-2 confirma o comportamento do secador semelhante ao da Figura VI-1.

Os pontos experimentais da Figura VI-2 foram ajustados a curvas, usando o método dos mínimos quadrados, que foram derivadas em relação ao tempo, obtendo-se as taxas de secagem, $d(X/X_0)/dt$. Os resultados são mostrados na Figura VI-3. Na ordenada foram locadas as taxas de secagem e na abscissa a razão de umidade X/X_0 . A figura ilustra a diferença dos mecanismos de secagem. No primeiro caso, LVJ, a taxa média mantém-se constante ao final da secagem e no segundo não foi constatado o período com taxa constante. As taxas de secagem iniciais não são denotadas na Figura VI-3, pelo fato dos pontos experimentais serem insuficientes para

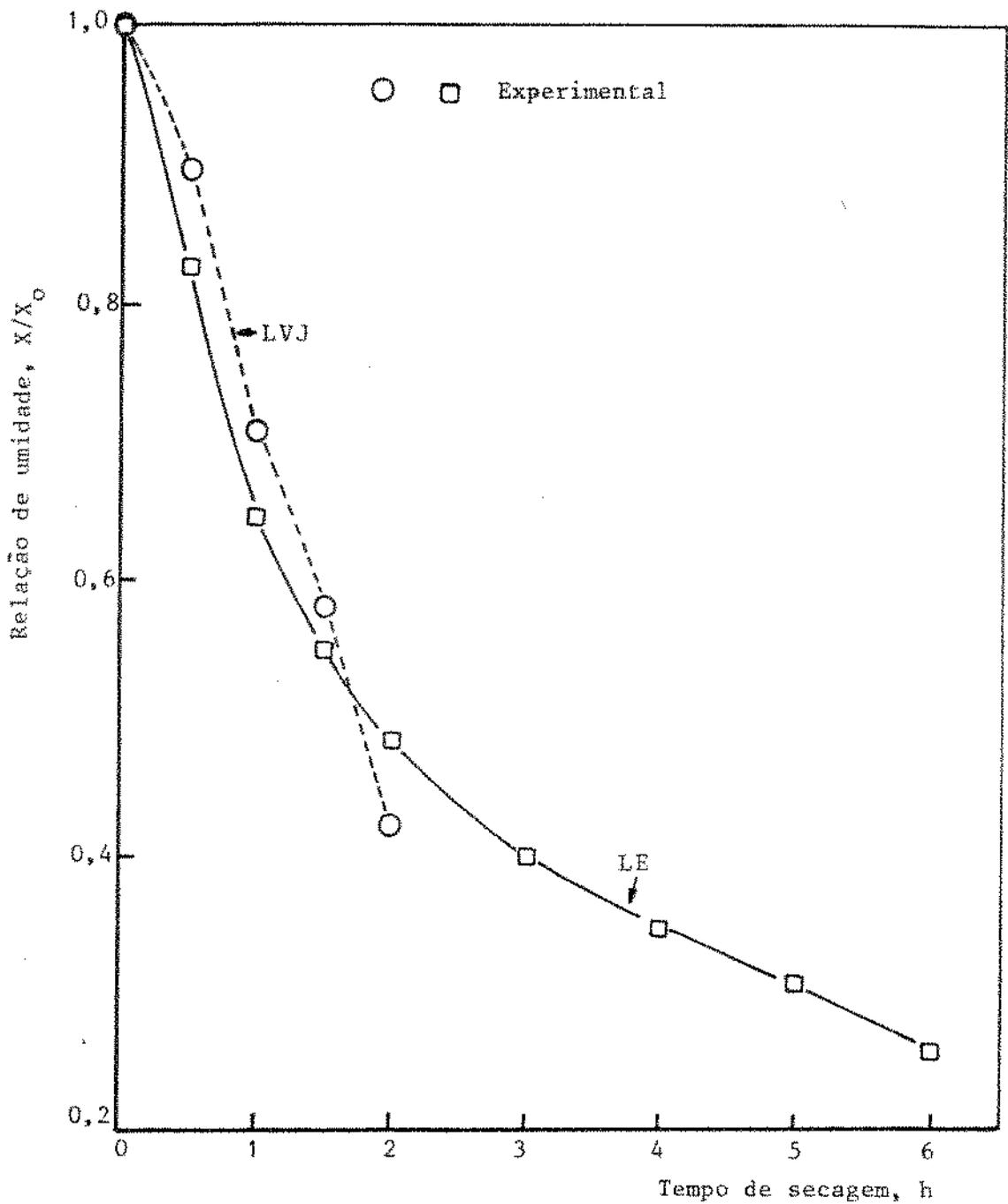


Figura VI-2 . Curvas de secagem de grãos de soja, umidade inicial dos sólidos = 30% (bu), carga = 182 kg/m^2 ; LE (aquecimento direto): $T_{\text{ar}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{u}_{\text{ar}} = 67 \text{ cm/s}$; LVJ (aquecimento indireto): T_{ar} (ambiente), $\bar{u}_{\text{ar}} = 15 \text{ cm/s}$. Potência = 266 watts; $A = 4 \text{ mm}$; $f = 12 \text{ a } 17 \text{ Hz}$.

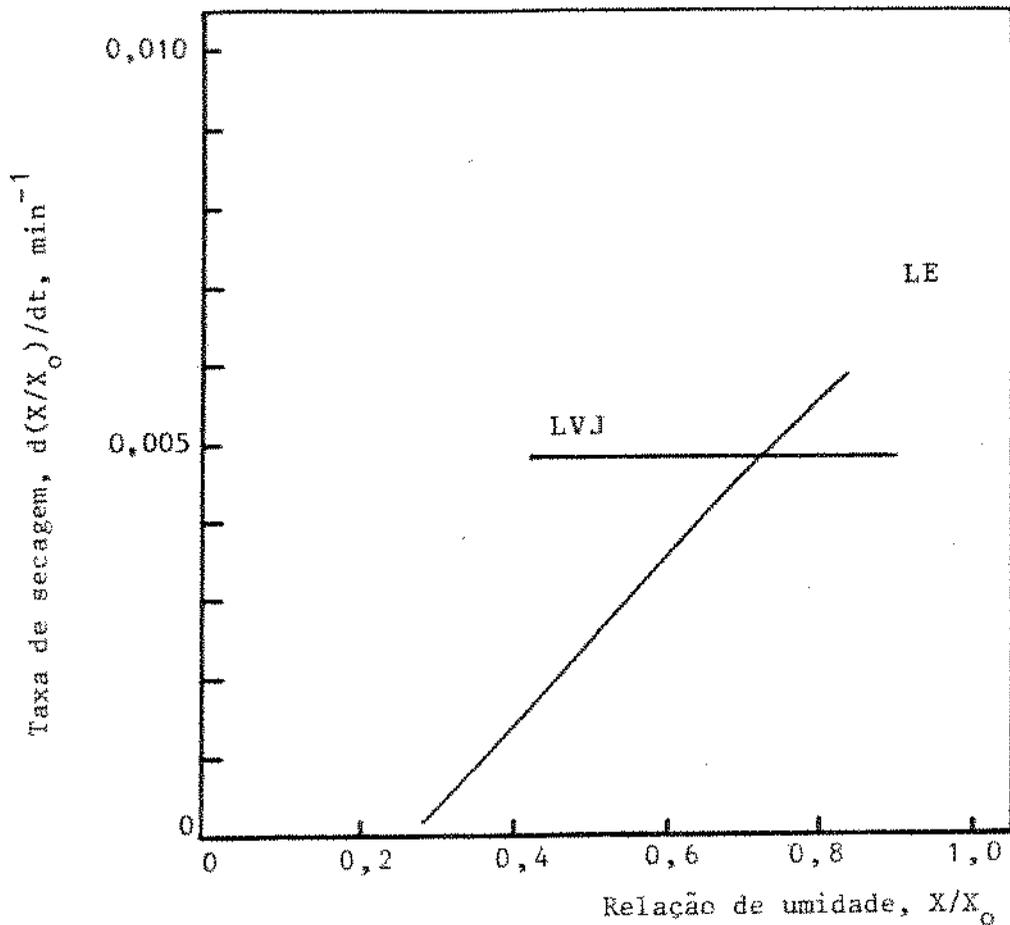


Figura VI-3 . Taxas de secagem, operação em LE e LVJ relativas aos pontos experimentais da Figura VI-2.

quantificar as mesmas com segurança.

A redução do volume aparente do leito de secagem devido a contração de volume dos grãos com a eliminação de umidade é mostrada na Figura VI-4. Os resultados correspondem ao ensaio em LVJ da Figura VI-2. Na ordenada foi locada a relação V/V_0 , onde V_0 é o volume inicial de grãos no leito e na abscissa o tempo de secagem. A análise da figura indica que após 2 horas de secagem o volume aparente do leito é 76% do volume inicial. A curva da Figura VI-4 apresenta uma inclinação reduzida no início da secagem. Isto se deve ao fato dos sólidos e do vaso de secagem estarem frios no início da operação, o que dá origem a um período de indução

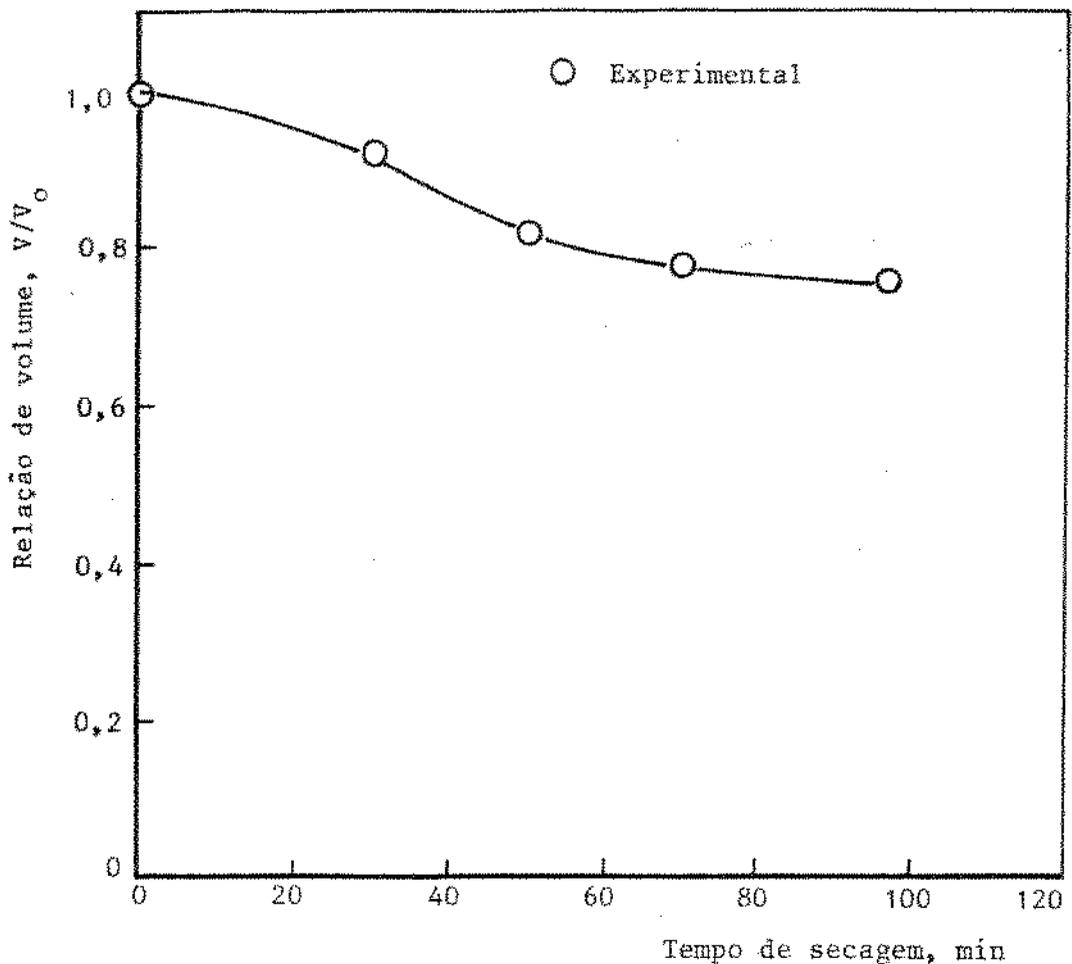


Figura VI-4 . Relação de volume aparente do leito com o tempo de secagem, operação em LVJ.

mais prolongado, também refletido na curvatura inicial da Figura VI-2.

Para verificar a variação da temperatura média dos grãos de soja que abandonavam o topo do tubo central, foram realizadas medidas periódicas da temperatura de porções de grãos, usando o coletor cilíndrico descrito no Capítulo III - Seção B. O resultado das medidas correspondentes ao ensaio da Figura VI-2, para a operação em LVJ, são indicadas na Figura VI-5, em função do tempo de secagem. Após os primeiros 20 minutos de secagem a temperatura apro-

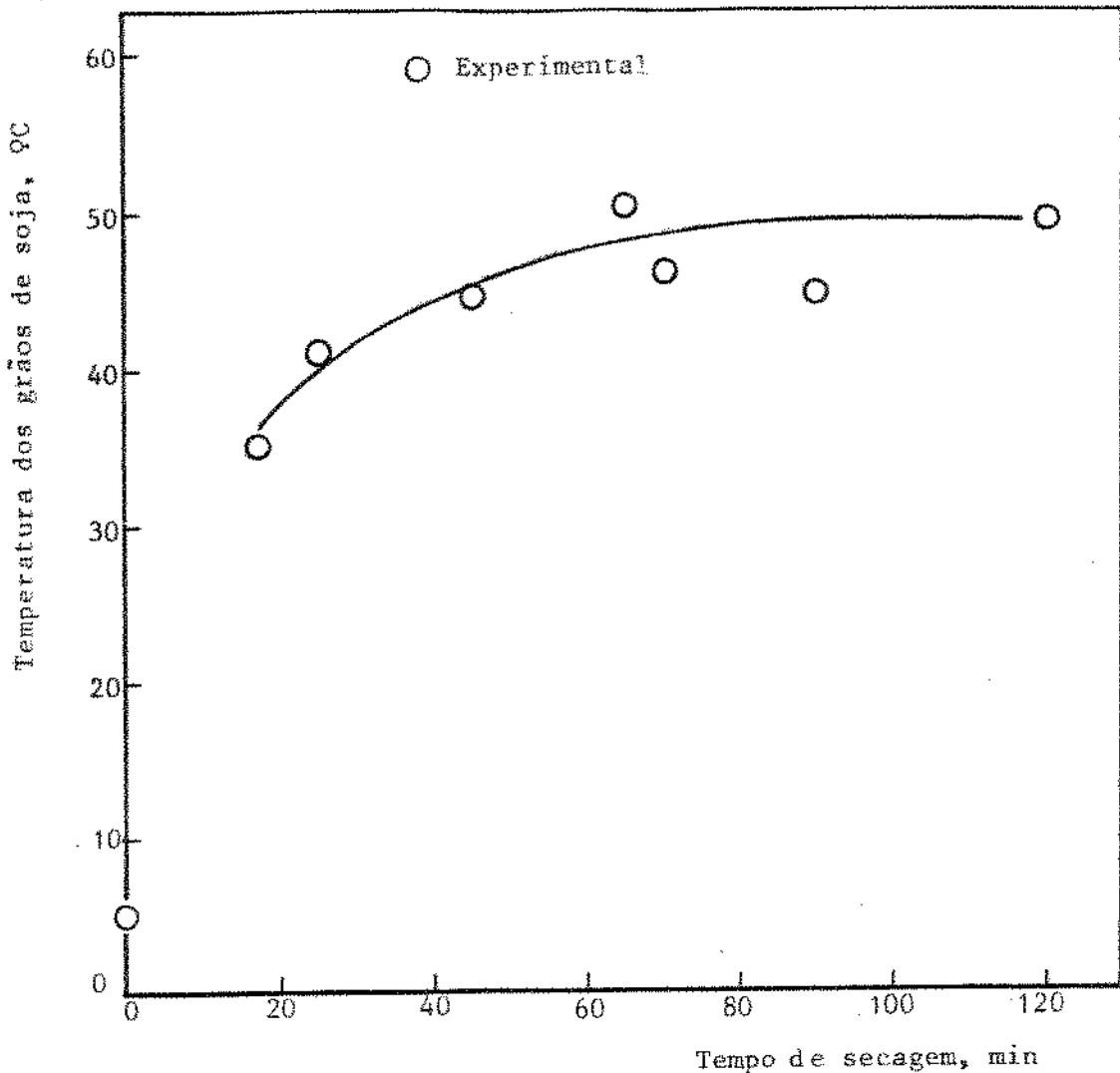


Figura VI-5 . Temperatura dos grãos de soja no topo do tubo central (fonte) do LVJ, referente ao ensaio da Figura VI-2.

ximava-se de 40 9C, no final do processo oscilava em torno de 50 9C, quando o conteúdo de umidade médio dos grãos era 15% (bu). Estes resultados indicam que após ser ultrapassado um período inicial de indução, não existe um incremento marcante na temperatura dos sólidos até 120 minutos de secagem, pelo menos para grãos inicialmente muito úmidos. Após 45 minutos de secagem a temperatura média do ar que abandonava o centro do leito era 40 9C.

As medidas de temperatura na superfície do tubo, efetuadas por intermédio de termopares fixados à parede, indicaram um valor médio na superfície em cerca de 135 °C. Portanto é provável que os grãos, ao deslocarem-se nas proximidades da parede, sofram maiores incrementos de temperatura do que as médias medidas experimentalmente.

Na operação em LE, correspondente à Figura VI-2, após 20 minutos de secagem, a temperatura média dos sólidos no topo do leito era 27,1 °C, próxima da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, que era 29,0 °C. Após 120 minutos de secagem, a temperatura dos sólidos era 44,7 °C. No interior do leito a temperatura deve aumentar com a profundidade. Isto indica que a dissipação de calor empregada na operação em LVJ, não conduz à temperaturas médias do leito superiores as de operação em LE, para as condições de operação utilizadas, que são brandas.

D-2 , SECAGEM COM AQUECIMENTO INDIRETO DE SOJA COM 16% DE UMIDADE INICIAL

Considerando que os grãos mais secos apresentavam um comportamento dinâmico distinto, foi efetuado um ensaio com grãos de soja com um conteúdo médio de umidade inicial de 15,9% (bu). A carga de soja no leito era 182 kg/m². Durante os ensaios em LVJ, operou-se entre 12 e 14 Hz e a amplitude de vibração era 4 mm. As condições do ar foram as mesmas dos ensaios das Figuras VI-1 e VI-2.

Desde o início da secagem, em LVJ, foi observado uma boa movimentação dos grãos de soja no leito. Isto deve-se provavelmente à maior elasticidade dos grãos com umidades menores, conforme

analisado anteriormente. O topo do leito apresentou o aspecto de uma fonte jorrando lentamente, e a superfície superior do leito apresentava-se convexa, sendo a altura máxima localizada no centro do tubo. Visualmente não era notado nenhuma partícula estacionária no leito. As partículas que abandonavam o centro do tubo interno, migravam radialmente em direção à parede de acrílico do secador e desapareciam na seção anular, recobertas pelas novas partículas que proviam da região central.

A temperatura inicial dos sólidos admitidos no secador de LVJ, era 4,5 °C. Após 45 minutos de secagem, a temperatura média de porções que jorravam pelo topo do tubo central, era 41,8 °C, e ao final de 90 minutos, era 72,8 °C, sendo a umidade média final dos sólidos 8,6% (bu).

Os resultados dos ensaios em LVJ e LE são denotados na Figura VI-6. Observe-se que para se atingir a relação de umidade $X/X_0 = 0,5$, a relação entre os tempos de secagem, LE para LVJ foi de 2,9. Estes índices indicam o melhor desempenho do secador de LVJ, ao operar com menores conteúdos de umidade iniciais dos grãos de soja, devido entre outros fatores, a melhor agitação do leito.

A análise entretanto está baseada em apenas um ponto e testes mais conclusivos deverão ser realizados. Um outro alerta diz respeito aos níveis de temperatura atingidos pelo sólido, inaceitáveis se o produto for sensível à temperatura, sendo então necessário operar com menor dissipação de energia.

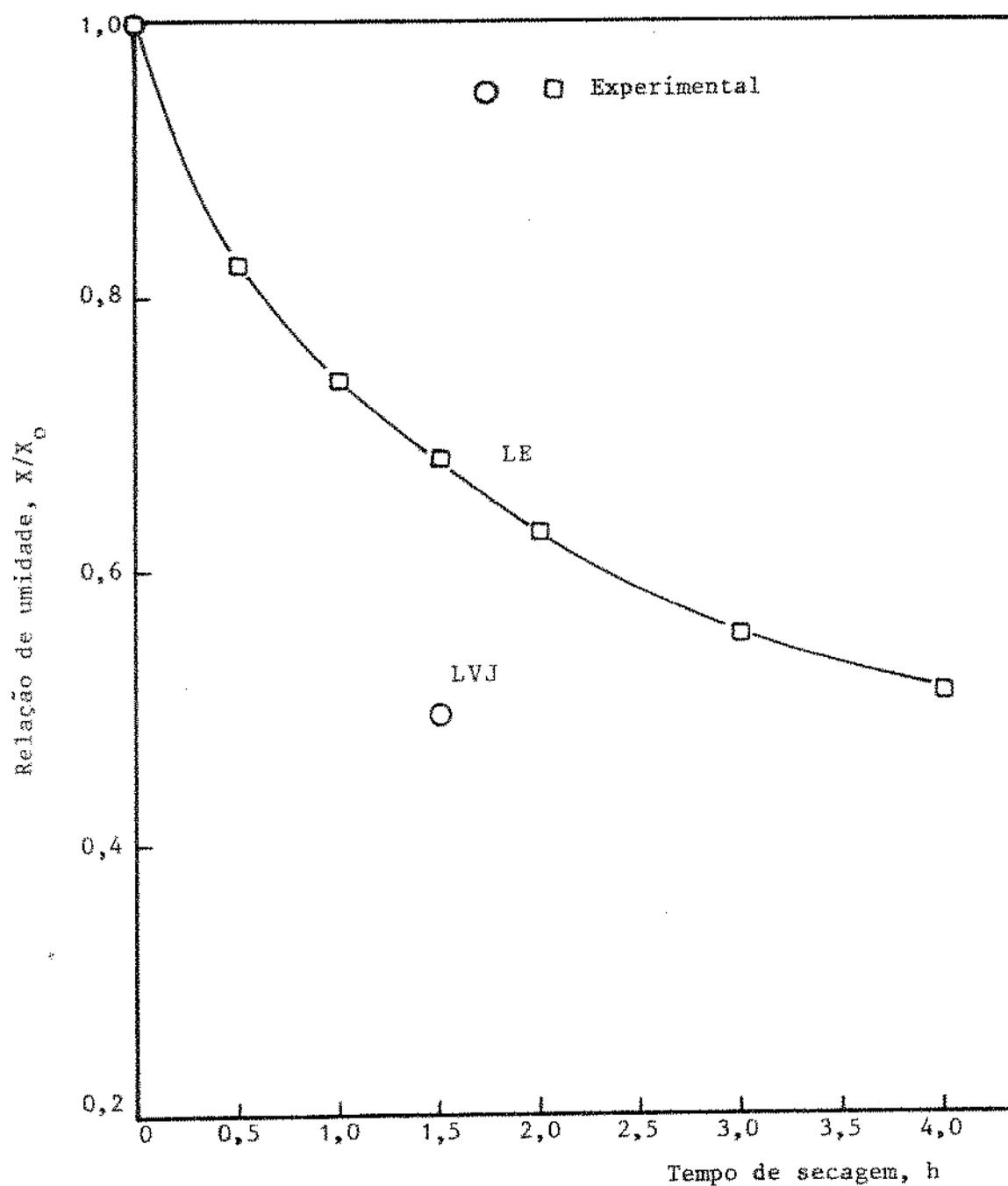


Figura VI-6 . Secagem de grãos de soja, umidade inicial dos sólidos = 15.9% (bu), carga = 182 kg/m²; LE (aquecimento direto): $T_{ar} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $u_{ar} = 67 \text{ cm/s}$; LVJ (aquecimento indireto): T_{ar} (ambiente), $u_{ar} = 15 \text{ cm/s}$, $V = 103 \text{ Volts}$, $I = 2,58 \text{ Amperes}$, potência = 266 watts; $A = 4 \text{ mm}$; $f = 12 \text{ a } 14 \text{ Hz}$.

E , OPERAÇÃO DO SECADOR DE LVJ COM AQUECIMENTO SIMULTÂNEO DO LEITO DE SECAGEM, DIRETO E INDIRETO

Nos ensaios anteriores, operados em LVJ, com aquecimento indireto do leito de secagem, percolou-se o leito com ar à temperatura ambiente, apenas com a finalidade de retirar a umidade eliminada dos sólidos. Foram realizadas novos ensaios de secagem para pesquisar o efeito da admissão de ar aquecido simultaneamente com o aquecimento indireto por dissipação de energia elétrica.

As condições do ar de secagem em LVJ foram: temperatura 60 °C e velocidade 15 cm/s. O conteúdo médio de umidade inicial dos grãos de soja no leito era 29,6% (bu) e a carga 182 kg/m². As condições de vibração eram: amplitude 4 mm e frequência entre 12 e 17 Hz.

Os resultados são mostrados na Figura VI-7. Na mesma figura são superpostos os resultados da operação em LVJ com aquecimento indireto, correspondentes à Figura VI-2. A figura indica que para se atingir a relação de umidade $X/X_0 = 0,5$, a redução do tempo de secagem ao operar com aquecimento simultâneo foi de 25%. O efeito do aquecimento simultâneo pode ser quantificado de uma maneira global pelas retas ajustadas aos pontos experimentais. A inclinação da reta, resultante da operação com aquecimento simultâneo foi 6,1 e operando apenas com aquecimento indireto foi 4,9. Estes coeficientes representam taxas médias de secagem.

F , ENERGIA CONSUMIDA NA OPERAÇÃO EM LVJ E LE

Nos ensaios de secagem de grãos de soja efetuados, foi consumida energia do tipo: 1) deslocamento do ar de secagem; 2)

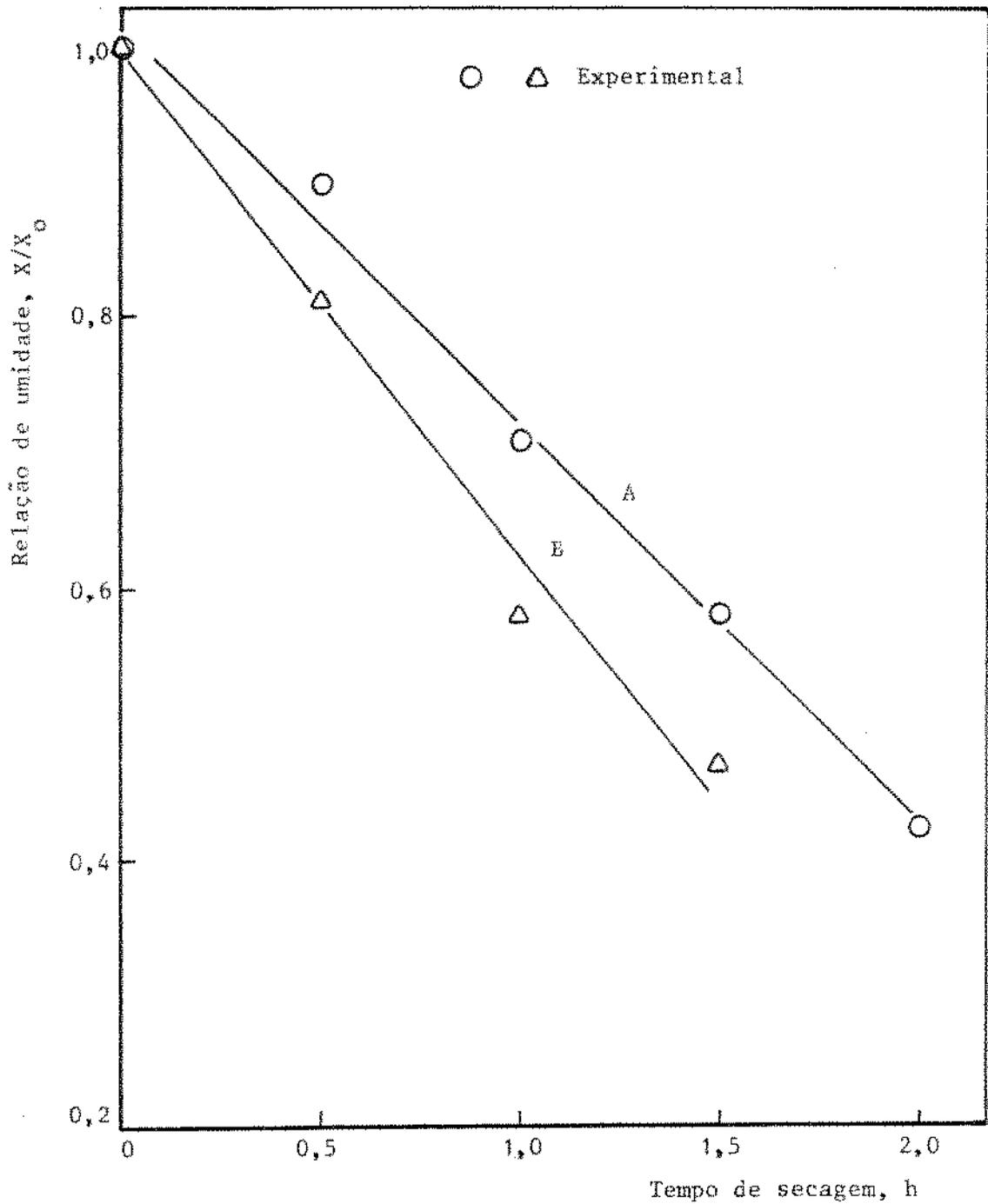


Figura VI-7 . Curvas de secagem de grãos de soja em LVJ, umidade inicial dos sólidos = 29,6% (bu), carga = 182 kg/m²; A (aquecimento indireto): T_{ar} (ambiente) u_{ar} = 15 cm/s; B (aquecimento simultâneo, direto e indireto): T_{ar} = 60 °C, u_{ar} = 15 cm/s, V = 103 V, I = 2,58 A, potência = 266 watts.

aquecimento do ar de secagem; 3) vibracional; 4) dissipação elétrica. Para quantificar e comparar os consumos globais de energia, das opções de operação pesquisadas, foram deduzidas expressões matemáticas pertinentes.

F-1 . ENERGIA DE DESLOCAMENTO DO AR DE SECAGEM

Realizando um balanço de energia mecânica e considerando o ponto "a" na entrada do ventilador e o ponto "b" na saída do vaso de secagem, tem-se (McCABE e SMITH, 1976):

$$\frac{p_a}{\gamma} + \frac{u_a^2}{2g} + Z_a + \eta W_p = \frac{p_b}{\gamma} + \frac{u_b^2}{2g} + Z_b + h_f \quad (\text{VI-3})$$

Todos os termos da Equação (VI-3) estão expressos em metros de coluna de fluido e representam: p/γ , a energia de pressão, na presente situação $p_a \approx p_b$; $u^2/2g$, a energia de velocidade, sendo $u_a = 0$ na entrada do ventilador (ar ambiente); Z é carga estática, $Z_a = 0$ no centro do flange de sucção do ventilador (referência), $Z_b \approx 1$ 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.

A queda de pressão no medidor de orifício era 20,0 mm H_2O (vazão de ar= 0,74 kg/min) e 1,5 mm H_2O (vazão de ar= 0,17 kg/min). A energia total requerida para deslocar o ar, ($-\eta W_p$) foi determinada medindo-se a pressão do ar na saída do ventilador, que foi equivalente a 6 e 69 metros de coluna de ar, para as vazões de ar de operação. Estimando o coeficiente de rendimento do soprador igual a 0,5, a potência requerida para movimentar o ar pode ser calculada:

$$P = \frac{(0,74/60) \cdot 69 \cdot 9,8}{0,5} = 16,70 \text{ J/s} = 16,70 \text{ watts}$$

$$P = \frac{(0,17/60) \cdot 6 \cdot 9,8}{0,5} = 0,33 \text{ J/s} = 0,33 \text{ watts}$$

Portanto, a energia consumida pelo ventilador pode ser calculada pelas Equações (VI-4 e VI-5), para vazões de ar iguais a 0,74 e 0,17 kg/min.

$$E = 1002 \text{ t} \quad (\text{VI-4})$$

$$E = 19,8 \text{ t} \quad (\text{VI-5})$$

onde E é quantificada em Joules e t é o tempo de secagem em minutos.

F-2 , ENERGIA DE AQUECIMENTO DO AR DE SECAGEM

A entalpia molar do ar úmido \bar{h}_m , pode ser calculada pela Equação (VI-6) (STEWART et alii, 1983):

$$\bar{h}_m = X_a (\bar{h}_a^0 + \bar{h}_a') + X_w (\bar{h}_w^0 + \bar{h}_w') + R T [(B_m - T \frac{dB_m}{dT}) \frac{1}{\bar{V}_m} + (C_m - \frac{T}{2} \frac{dC_m}{dT}) \frac{1}{\bar{V}_m^2}] \quad (\text{VI-6})$$

onde:

X_a = fração molar do ar;

X_w = fração molar do vapor de água no ar;

\bar{h} , representa a entalpia molar; \bar{h}^0 refere-se a valores do gás ideal; \bar{h}' , representa constantes que ajustam os

estados de referência do ar e da água para uma base consistente. O índice (a) se refere ao ar e o índice (w) a água.

B_m = segundo coeficiente virial para a mistura ar-água;

C_m = terceiro coeficiente virial para a mistura ar-água;

B_m e C_m são equacionados por (HYLAND e WEXLER, 1983 B);

\bar{V}_m = volume molar do ar úmido;

R = constante universal dos gases;

T = temperatura termodinâmica absoluta.

A fração molar X_a foi calculada usando um programa de computador (ver Apêndice B), usando as condições psicométricas do ar de secagem e o fator "f" (ver Apêndice A), que considera a não idealidade da mistura ar-vapor de água. A entalpia da mistura ar-vapor de água, foi calculada usando a fração molar X_a e a Equação (VI-6), por meio de um programa de computador (ver Apêndice D), onde a entalpia de ar úmido foi expressa em kJ/kg de ar úmido. A diferença de entalpia para aquecer o ar ambiente até a temperatura do ar de secagem foi calculada usando duas vezes o programa do Apêndice D e determinando a diferença entre os dois valores calculados.

F-3 . ENERGIA VIBRACIONAL

O sistema de vibração era constituído por um camo que atua sobre um seguidor. A Figura VI-8 mostra o conjunto e o deslocamento do seguidor durante um ciclo (FINZER, 1984).

O movimento produzido é descrito matematicamente pela Equação (II-5).

$$y = A \text{ sen} \theta \quad ; \quad \theta = \omega t \quad (\text{II-5})$$

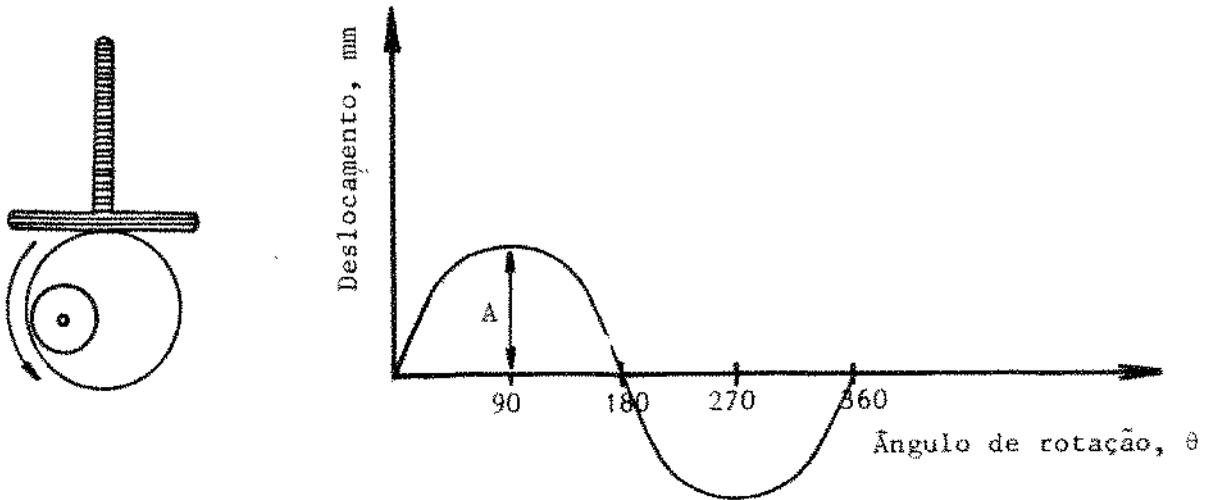


Figura VI-8 . Esquema do camo e do seguidor e posições do seguidor durante um ciclo.

A aceleração \ddot{y} do seguidor é:

$$\ddot{y} = - A \omega^2 \text{ sen}\theta \quad (\text{VI-7})$$

F_y é a componente vertical da força resultante do seguidor atuando sobre o camo e determinada pela Equação (VI-8) (MELLO, 1978):

$$F_y = F_m + F_i + P \quad (\text{VI-8})$$

F_m = Força externa de mola = $- k(y_o + y)$

k = Constante da mola

y = Deslocamento

y_o = 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 E

quação (VI-9):

$$W = \int F_y dy \quad (\text{VI-9})$$

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

$$W = - 2.A [K y_o + P] \quad (\text{VI-10})$$

A potência consumida é determinada pela Equação:

$$\text{Potência} = W \omega \quad (\text{VI-11})$$

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

$$\text{Energia de Vibração} = \text{Potência} \cdot t \quad (\text{VI-12})$$

A mola utilizada teve sua ação ampliada por intermédio de uma correia de borracha que auxiliou na manutenção do camo solidário ao seguidor, sendo a constante efetiva do conjunto 0,44 kg/mm e $y_o = 1$ mm.

O peso da conexão de ligação do camo à base vibratória do leito, acrescentado do peso desta última, era 4 kg. A massa de soja suportada pela base vibratória é cerca da metade da carga. Portanto $P = 4 + 0,5$ (carga de soja no leito). Nos cálculos foi utilizado a média aritmética da massa de soja no leito em intervalos de 30 minutos de secagem.

O sistema de vibração utilizado comunica uma amplitude de vibração à base do leito 20% superior à de projeto do excêntri

co (FINZER, 1984). Os ensaios de vibração foram realizados com o excêntrico de amplitude igual a 4 mm. Portanto a amplitude de vibração efetiva é 4,8 mm. Substituindo os parâmetros na Equação (VI-12), tem-se:

$$E = 5,65 \omega [0,44 + P] t \quad J \quad (VI-13)$$

onde: t é o tempo de vibração em minutos, ω a frequência de vibração em radianos/s e P (kg).

F-4 . ENERGIA ELÉTRICA DISSIPADA

A dissipação de energia elétrica usada no sistema de aquecimento indireto do leite, foi quantificada pela Equação (VI-14):

$$E = 60 V I t \quad (VI-14)$$

V = diferença de potencial, volts

I = intensidade de corrente, amperes

t = tempo de secagem, min

As quatro parcelas de consumo de energia expressas pelas equações VI-4, VI-5, VI-6, VI-13 e VI-14, foram organizadas em um programa de computador (ver Apêndice E), para cálculo da energia consumida na secagem.

F-5 . ENERGIA TOTAL CONSUMIDA NA SECAGEM EM LE E LVJ

Utilizando o programa de computador desenvolvido no Apêndice E foi calculada a energia total consumida na secagem em LE e

LVJ, correspondente aos ensaios da Figura VI-2. Os resultados parciais são indicados nas Tabelas VI-1 e VI-2 e a energia consumida total está plotada na Figura VI-9, em função da relação de umidade X/X_0 .

Tabela VI-1 . Consumos parciais de energia, secagem em LE. Condições de operação: $T_{ar} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$; $u_{ar} = 67 \text{ cm/s}$; carga = 182 kg/m^2 ; umidade inicial dos sólidos = 30% (bu).

Tempo (min)	$\frac{X}{X_0}$	Escoamento do Ar (KJ)	Aquecimento do Ar (KJ)	Energia Total (KJ)
30	0,827	30	859	889
60	0,646	60	1718	1778
90	0,551	90	2577	2667
120	0,486	120	3436	3556
180	0,401	180	5154	5334
240	0,348	240	6872	7112
300	0,309	300	8590	8890
360	0,258	360	10308	10668

A Tabela VI-1 indica que na operação em LE, 97% do consumo de energia total corresponde ao aquecimento do ar de secagem, enquanto que na operação em LVJ (ver Tabela VI-2), a dissipação de energia elétrica representa 84% da total.

O resultado do balanço global de energia expresso pela Figura VI-9 foi surpreendente. Ao reduzir a relação X/X_0 , na secagem em LE, o coeficiente angular da curva de energia total aumenta gradativamente, enquanto em LVJ, o coeficiente angular da curva não modifica-se. Enquanto prevalecer esta tendência, quanto menor for a umidade final desejada dos grãos de soja, menor será o

Tabela VI-2 . Consumo parciais de energia, secagem em LVJ com aquecimento indireto. Condições de operação: T_{ar} = ambiente; u_{ar} = 15 cm/s; carga = 182 kg/m²; umidade inicial dos sólidos = 30% (bu).

Tempo (min)	$\frac{X}{X_0}$	Escoamento do Ar (KJ)	Vibração (KJ)	Dissipação Elétrica (KJ)	Energia Total (KJ)
30	0,896	0,6	94	478	573
60	0,708	1,2	187	957	1145
90	0,582	1,8	277	1435	1714
120	0,424	2,4	365	1913	2280

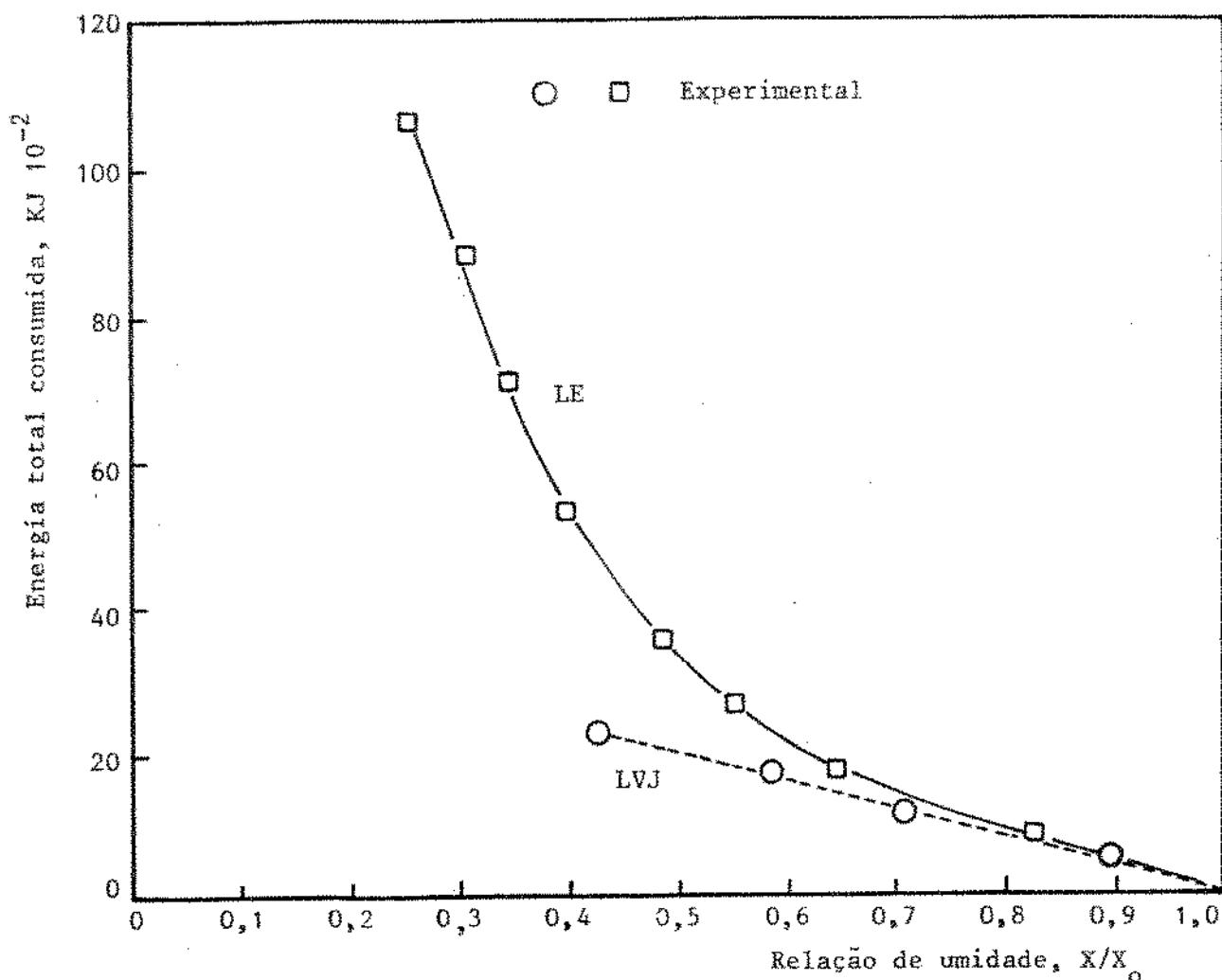


Figura VI-9 . Energia total consumida em LE (aquecimento direto) e LVJ (aquecimento indireto), correspondendo aos ensaios da Figura VI-2; umidade inicial dos sólidos = 30% (bu); carga = 182 kg/m²; LE (T_{ar} = 60 °C; u_{ar} = 67 cm/s); LVJ (T_{ar} (ambiente), u_{ar} = 15 cm/s, potência = 266 watts, A = 4 mm, f = 12 a 17 Hz).

consumo de energia da secagem em LVJ, comparado com a secagem em LE. Para atingir $X/X_o = 0,5$, a economia de energia resultante da operação em LVJ é:

$$E = \frac{33,5 - 20,2}{33,5} \cdot 100 = 40\%$$

Entretanto esta economia de energia é relativa, pois na operação em LE o ar que abandona o leito de secagem pode ser recirculado, e isto reduz o consumo de energia total.

As diferentes inclinações da Figura VI-9, sugerem que a economia de energia deve aumentar quando a umidade inicial dos sólidos for menor. Para pesquisar este efeito, foram calculados os consumos de energia associados com a secagem de grãos de soja com menor conteúdo de umidade inicial, 15,9% (bu), correspondente à Figura VI-6. Os resultados do balanço são mostrados nas Tabelas VI-3 e VI-4.

Tabela VI-3 . Consumos parciais de energia, secagem em LE. Condições de operação: $T_{ar} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $u_{ar} = 67 \text{ cm/s}$; carga = 182 kg/m^2 ; umidade inicial dos sólidos = 15,9% (bu).

Tempo (min)	$\frac{X}{X_o}$	Escoamento do Ar (KJ)	Aquecimento do Ar (KJ)	Energia Total (KJ)
30	0,825	30	837	867
60	0,741	60	1673	1733
90	0,683	90	2510	2600
120	0,630	120	3347	3467
180	0,566	180	5020	5200
240	0,515	240	6693	6933

Tabela VI-4 . Consumo parciais de energia, secagem em LVJ com aquecimento indireto. Condições de operação: $T_{ar} =$ ambiente; $u_{ar} = 15$ cm/s; carga = 182 kg/m²; umidade inicial dos sólidos = 15,9% (bu).

Tempo (min)	$\frac{X}{X_o}$	Escoamento do Ar (KJ)	Vibração (KJ)	Dissipação Elétrica (KJ)	Energia Total (KJ)
90	0,497	1,8	244	1435	1681

Os resultados do balanço de energia são traçados na Figura VI-10. Para alcançar a razão entre umidades, $X/X_o = 0,5$, a economia de energia resultante da operação em LVJ é:

$$E = \frac{78 - 16,8}{78} \cdot 100 = 78\%$$

Este resultado confirma a hipótese anterior de maior economia de energia, partindo de sólidos com menores conteúdos de umidade.

Na realidade, na operação em LE não é consumida toda a energia indicada na Tabela VI-3, pois o ar que abandona o leito encontra-se aquecido, apresentando ainda um alto potencial de secagem.

As eficiências da operação em LE e LVJ podem ser determinadas calculando a porcentagem da energia térmica admitida que é efetivamente utilizada para aquecer o leito e evaporar a água dos sólidos, esta parcela de energia pode ser calculada pela Equação VI-15, desprezando-se os efeitos higroscópicos.

$$E = m_s C_p \text{ soja } \Delta T + m_{H_2O} \lambda \quad (VI-15)$$

onde: m_s e m_{H_2O} são as massas de soja no leito e de água evaporada; C_p é o calor específico da soja (BROOKER et alii, 1974); ΔT é

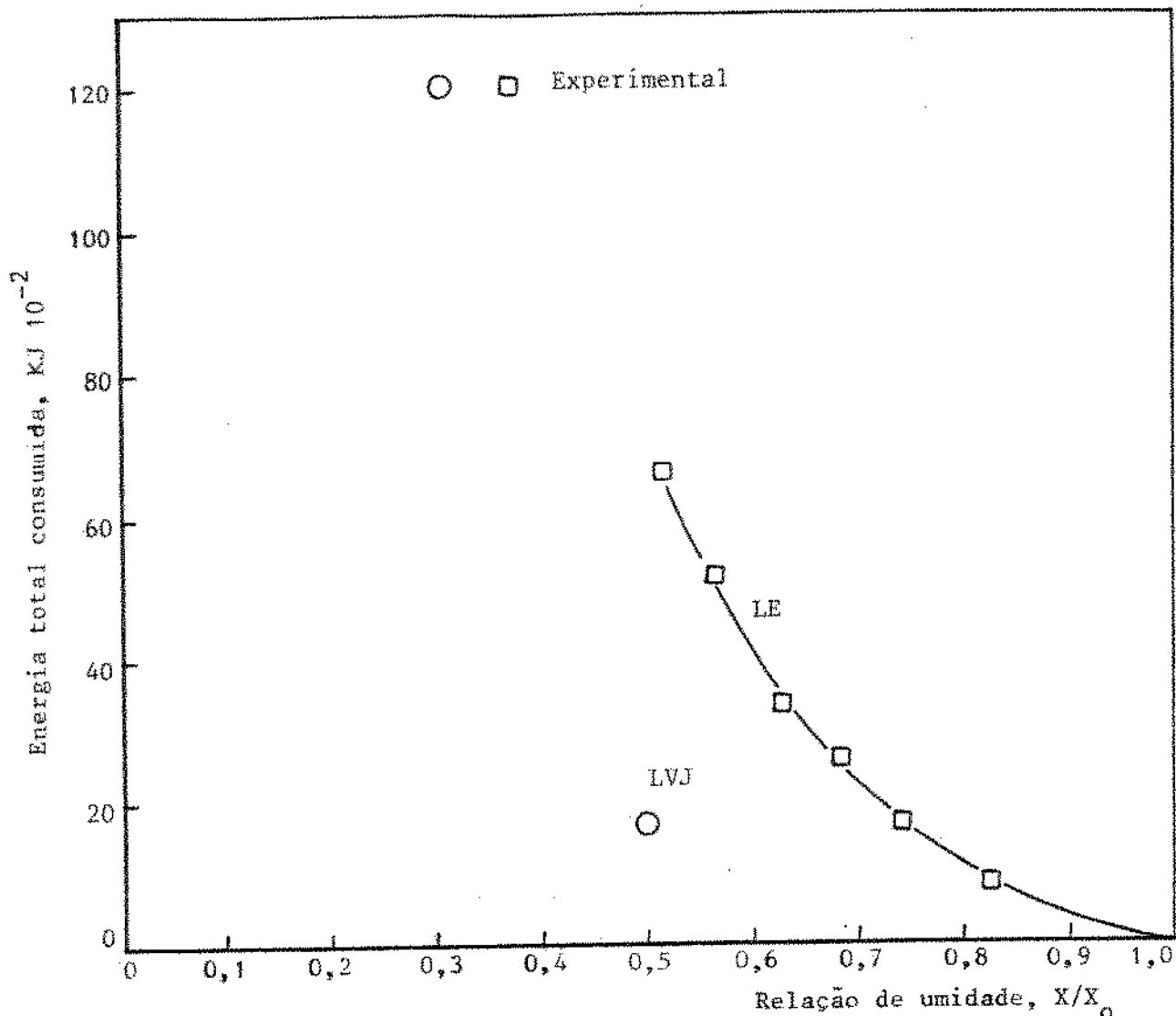


Figura VI-10 . Energia total consumida em LE (aquecimento direto) e LVJ (aquecimento indireto), correspondendo aos ensaios da Figura VI-6; umidade inicial dos sólidos = 15,9% (bu); carga = 182 kg/m²; LE($T_{ar} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $u_{ar} = 67 \text{ cm/s}$) ; LVJ($T_{ar}(\text{ambiente})$, $u_{ar} = 15 \text{ cm/s}$, potência = 266 watts, $A = 4 \text{ mm}$, $f = 12 \text{ a } 14 \text{ Hz}$).

a variação de temperatura dos sólidos no leito; λ é o calor latente de evaporação da água. Nos cálculos foram utilizadas valores médios dos parâmetros citados acima.

Na operação em LE foi utilizado apenas 13% (860 KJ) do total de energia térmica admitida (veja Tabela VI-3), durante 4 horas de secagem; o restante foi perdido com o ar quente que abandonava o leito e pelas paredes do secador. Com a progressão da

secagem os sólidos vão se tornando mais secos e a temperatura do ar que abandona o leito vai se tornando mais elevada, e isto reduz gradativamente a efetividade do aproveitamento do calor sensível do ar.

Na operação em LVJ, 67% (960 KJ) da energia elétrica dissipada (veja Tabela VI-4) foi efetivamente utilizada para aquecer os grãos de soja no leito e evaporar a água perdida pelos mesmos durante 90 minutos de secagem.

Estes índices indicam que a operação em LVJ foi mais eficiente do que a em LE, em termos de transferência de energia térmica para os sólidos do leito. O tempo de secagem requerido para obter um conteúdo de umidade final dos sólidos, foi inferior ao da operação em LE.

Partindo de grãos de soja com maior umidade inicial (30% (bu)), os efeitos higroscópicos tornam-se menos pronunciados no início da secagem e aumentam as eficiências térmicas das operações em LE e LVJ; permanece entretanto, a superioridade do aquecimento indireto do leito.

As parcelas do consumo de energia no processo de secagem com aquecimento simultâneo do leito, direto e indireto, referentes à Figura VI-7, são mostrados na Tabela VI-5.

Os resultados do balanço de energia da Tabela VI-5, juntamente com os da Tabela VI-1, foram colocados na Figura VI-11.

Para alcançar a razão $X/X_0 = 0,5$ a economia de energia da operação em LVJ com aquecimento indireto, comparada com o aquecimento simultâneo é:

$$E = \frac{21,2 - 20,2}{21,2} \cdot 100 = 5\%$$

Tabela VI-5 . Consumos parciais de energia, secagem em LVJ, com aquecimento si-
multâneo. Condições de operação: $T_{ar} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $u_{ar} = 15 \text{ cm/s}$; carga = 182 kg/m^2 ;
umidade inicial dos sólidos = 29,6% (bu).

Tempo (min)	$\frac{X}{X_0}$	Escoamento do Ar (KJ)	Aquecimen- to do Ar (KJ)	Vibracio- nal (KJ)	Dissipação Elétrica (KJ)	Energia Total (KJ)
30	0,813	0,6	222	94	478	795
60	0,580	1,2	445	187	957	1590
90	0,470	1,8	667	278	1435	2382

A economia da operação em LVJ, com aquecimento simultâneo,
comparado com a operação em LE é:

$$E = \frac{33,5 - 21,2}{33,5} \cdot 100 = 37\%$$

Estes índices indicam que, em termos de economia de ener-
gia e nas situações pesquisadas, é desvantajoso aquecer o ar que
atua como veículo de arraste do vapor de água formado, na secagem
em LVJ com aquecimento indireto.

G . SIMULAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM EM LVJ

Na análise a seguir, verifica-se a possibilidade de expres-
sar os parâmetros de operação, $(h_{ef})_m$, $(T_h - T_s)_m$ e ΔH_{Tm} , contidos
na Equação (VI-2), em função do conteúdo de umidade dos sólidos e
conseguir uma equação generalizada de secagem, para um material es-
pecífico, inspirado na técnica usada por FORNELL et alii (1980).

A diferença de temperatura $(T_h - T_s)_m$ em secadores que

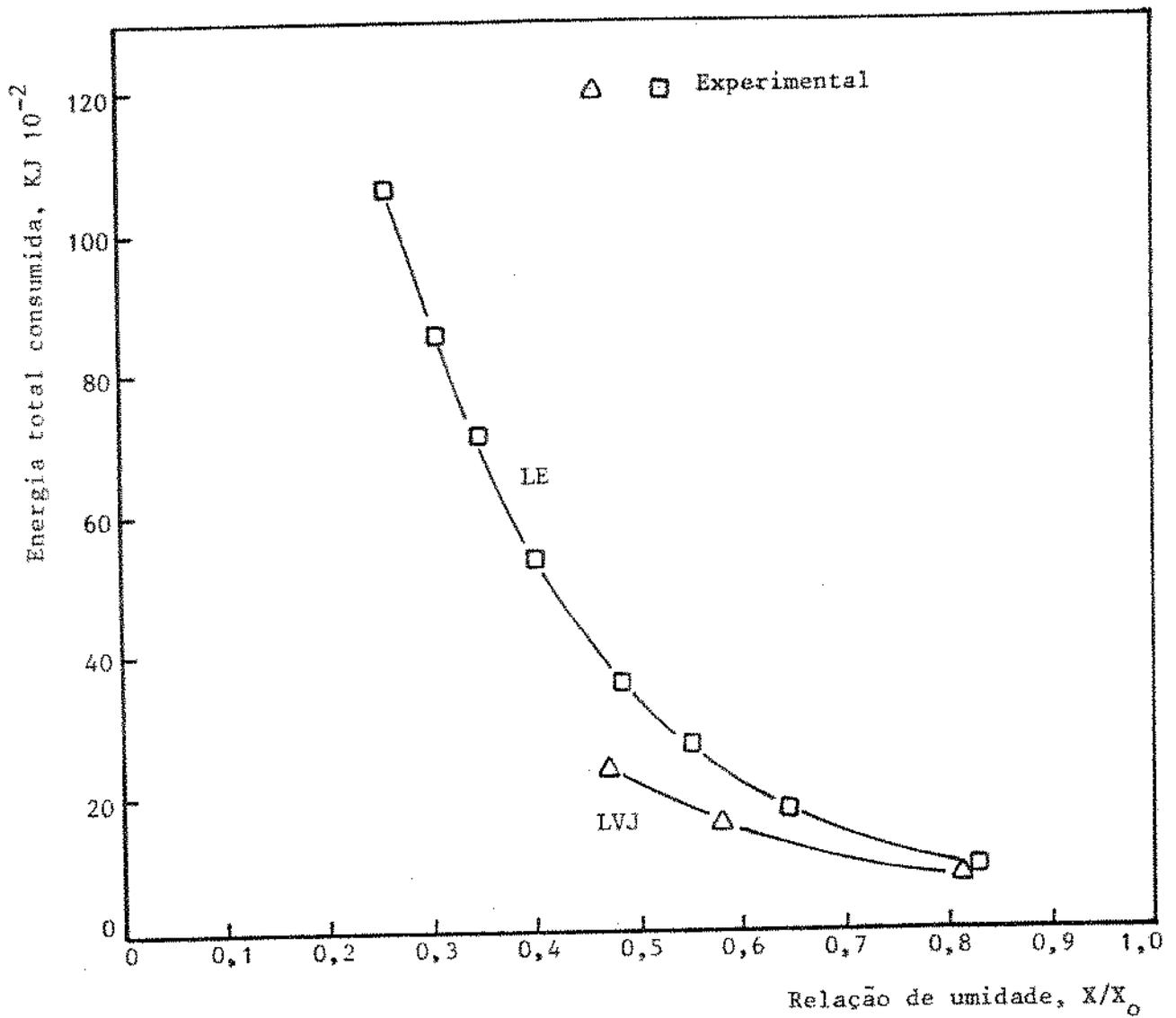


Figura VI-11 . Energia total consumida em LE (aquecimento direto) e em LVJ (aquecimento simultâneo), correspondendo aos ensaios da Figura VI-2 (LE) e VI-7 (LVJ); umidade inicial dos sólidos = 30% (bu), carga = 182 kg/m²; LE ($T_{ar} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $u_{ar} = 67 \text{ cm/s}$); LVJ, AS ($T_{ar} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $u_{ar} = 15 \text{ cm/s}$, potência = 266 watts, $A = 4 \text{ mm}$, $f = 12 \text{ a } 17 \text{ Hz}$).

contêm o tubo interno esquematizado na Figura III-5, vai depender da voltagem e da corrente elétrica de operação, ou seja, da geração de calor, Q_{elet} e da temperatura média dos grãos de soja. Esta, em uma posição no leito, depende do tempo de secagem (veja Figura VI-8), isto é, depende do conteúdo de umidade médio dos sólidos, que pode ser expresso pelo adimensional (X/X_o) .

Por outro lado, a taxa de circulação dos grãos de soja no LVJ, em um dado instante, depende do conteúdo inicial de umidade dos mesmos, e isto afeta diretamente a temperatura do leito nas imediações do aquecedor e também o coeficiente efetivo médio de transferência de calor.

Portanto, para a instalação ensaiada, a diferença de temperatura é bem representada pela Equação (VI-16).

$$(T_h - T_s)_m = f(Q_{elet}) g(X/X_o) h(X_o) \quad (VI-16)$$

onde as funções: $f(Q_{elet})$, $g(X/X_o)$ e $h(X_o)$, representam os efeitos: da transferência de calor para o leito, do conteúdo de umidade médio e inicial dos grãos de soja.

Substituindo a Equação (VI-16) na Equação (VI-2) vem:

$$\frac{(X_o - X) W_s}{A_h t} = \frac{(h_{ef})_m f(Q_{elet}) g(X/X_o) h(X_o)}{\Delta H_{Tm}} \quad (VI-17)$$

Como $(h_{ef})_m$ depende principalmente do conteúdo de umidade inicial e final dos sólidos no leito, podemos quantificá-lo pela Equação (VI-18):

$$(h_{ef})_m = g'(X/X_o) \cdot h'(X_o) \quad (VI-18)$$

O mesmo raciocínio se aplica a entalpia de evaporação da água:

$$\Delta H_{Tm} = g''(X/X_o) \cdot h''(X_o) \quad (VI-19)$$

Substituindo as Equações VI-18 e VI-19 na VI-17, e englobando as funções dos conteúdos de umidade tem-se:

$$\frac{(X_o - X_f) W_s}{A_h t} = f(Q_{elet}) G'(X/X_o) H(X_o) \quad (VI-20)$$

Considerando constante a transferência de calor em um equipamento com dimensões fixas, pode-se representar $f(Q_{elet})$ e A_h por K , de onde:

$$\frac{(X_o - X) W_s}{t H(X_o)} = K G'(X/X_o) = G(X/X_o) \quad (VI-21)$$

Para um mesmo (X/X_o) , independente da umidade inicial do sólido, ter-se-á valores idênticos para o grupamento expresso pelo primeiro membro da Equação (VI-21). A equação indica que existe uma função $H(X_o)$, que agrupa os pontos experimentais, expressos pelo primeiro membro da equação, em torno de uma única curva. A forma da função $H(X_o)$ deve ser pesquisada para situações específicas.

A validade da Equação VI-21, foi verificada com os dados levantados nessa pesquisa.

Os resultados da secagem de grãos de soja em LVJ, com aquecimento indireto do leito, sendo os parâmetros de operação os dos ensaios da Figuras VI-1, VI-2, VI-6 e de outro experimento não

publicado no capítulo VI, foram resumidos na Tabela (VI-6), em função do X/X_0 , nas colunas 1 a 6.

A influência da umidade inicial dos grãos deve ser analisada procurando uma função, $H(X_0)$. Por simplificação foi experimentada uma função de potência, ou seja:

$$H(X_0) = X_0^n \quad (\text{VI-22})$$

onde: n é um parâmetro de ajuste que deve satisfazer a Equação VI-21. Substituindo $H(X_0)$ nesta equação, tem-se:

$$\left[\frac{X_0 - X}{t} \right] \cdot \frac{W_s}{X_0^n} = G(X/X_0) \quad (\text{VI-23})$$

O valor de n que melhor agrupou os resultados experimentais foi 0,55.

A Figura VI-12 confirma a tendência de agrupamento dos pontos experimentais em torno de uma única curva característica de secagem. O maior número de pontos experimentais concentra-se em um trecho da curva no qual o coeficiente angular é igual a zero. Apenas os pontos experimentais associados ao período inicial de indução, se afastam do valor de 6,81, média aritmética dos demais. Neste período inicial, parte do calor dissipado é utilizado para aquecer os sólidos, o próprio tubo aquecedor central e o vaso de secagem.

Utilizando a curva característica de secagem em LVJ, Figura VI-12, foram simuladas as curvas de secagem para as seguintes umidades iniciais médias dos grãos de soja: 30,0; 20,7 e 15,9% (bu). Os resultados são locados na Figura VI-13. Na mesma figura

Tabela VI-6 . Grupamentos de parâmetros de secagem

Operação em LVJ com aquecimento indireto. Condições de operação: Tar = ambiente; var = 15 cm/s; amplitude e frequência de vibração, 4 mm e 12 a 17 Hz; potência = 266 watts; carga de 170 a 182 kg/m²; umidade média inicial dos sólidos de 15,9 a 30% (bu).

1	2	3	4	5	6	7
X ₀ kg H ₂ O/kg ss	X kg H ₂ O/kg ss	$\frac{X}{X_0}$	tempo de secagem (min)	W _s massa sólidos secos (g)	$\frac{X_0 - X}{t} \cdot W_s$	$\frac{X_0 - X}{t} \cdot \frac{W_s}{X_0^{0,55}}$
0,431	0,386	0,896	30	2097	3,15	5,00
0,404	0,286	0,708	60	2136	4,20	6,91
0,433	0,252	0,582	90	2094	4,21	6,67
0,451	0,191	0,424	120	2067	4,48	6,94
0,261	0,176	0,674	60	2379	3,37	7,05
0,189	0,094	0,497	90	2523	2,66	6,65
0,408	0,357	0,875	30	1988	3,38	5,53
0,403	0,279	0,692	60	1996	4,13	6,81
0,447	0,249	0,557	90	1935	4,26	6,64

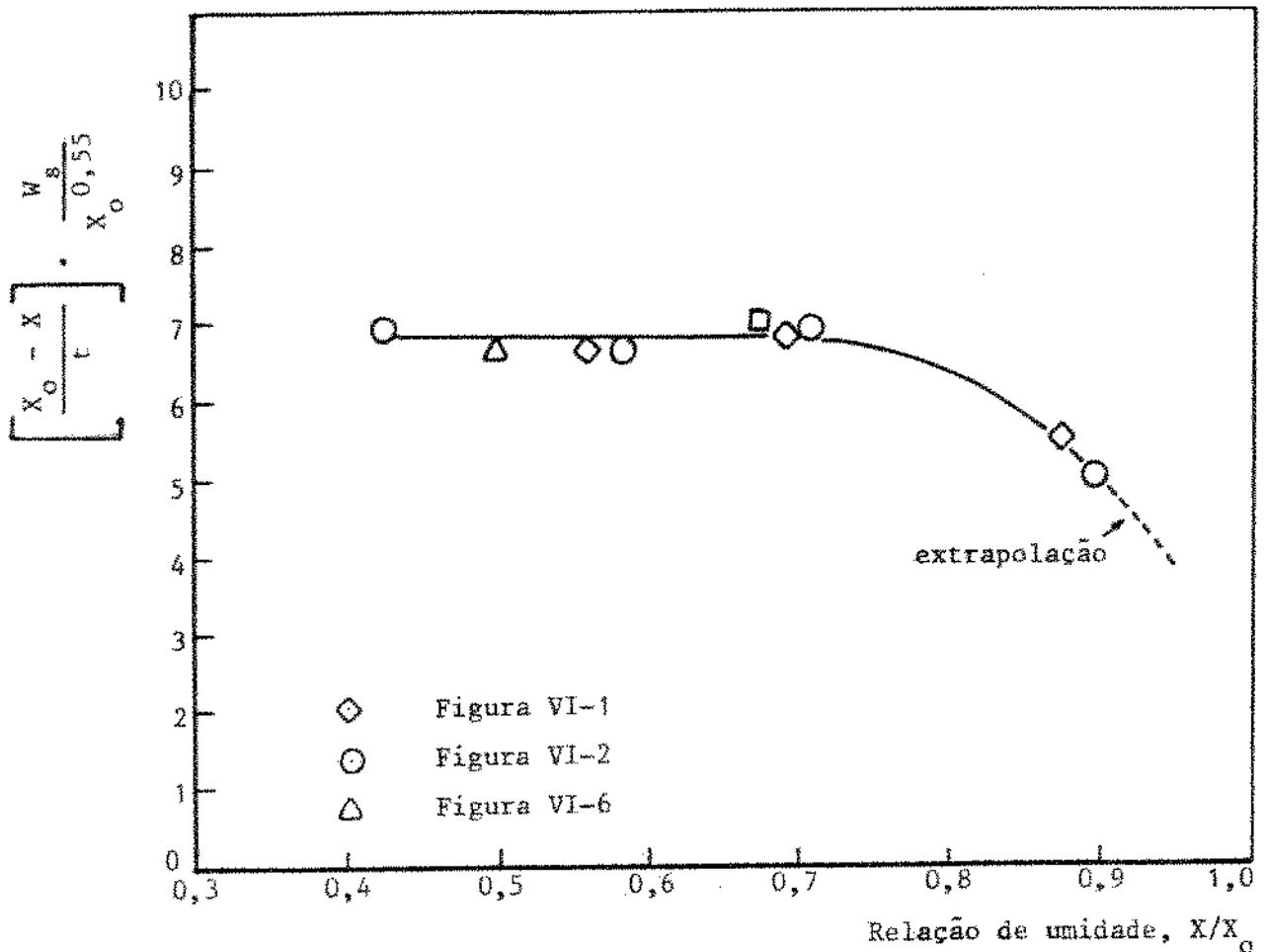


Figura VI-12 . Curva característica de secagem de grãos de soja em LVJ, com aquecimento indireto do leito. Condições de operação: T_{ar} = ambiente; u_{ar} = 15 cm/s; A = 4 mm; f = 12 a 17 Hz; potência = 266 watts; carga = 170 a 182 kg/m²; umidade média inicial dos sólidos de 15,9 a 30% bu.

são indicados os pontos experimentais, relativos as mesmas umidades iniciais dos grãos de soja das curvas simuladas.

A Figura VI-13 indica que o uso da curva característica de secagem possibilita a reprodução dos pontos experimentais com um desvio inferior a 3%. Admitido um desvio desta ordem de grandeza, o modelo proposto se mostra eficiente na simulação de curvas de secagem em LVJ, partindo-se de alimentações com conteúdos de umidade diferentes, operando com aquecimento indireto do leito, desde que os parâmetros geométricos e operacionais sejam mantidos constantes.

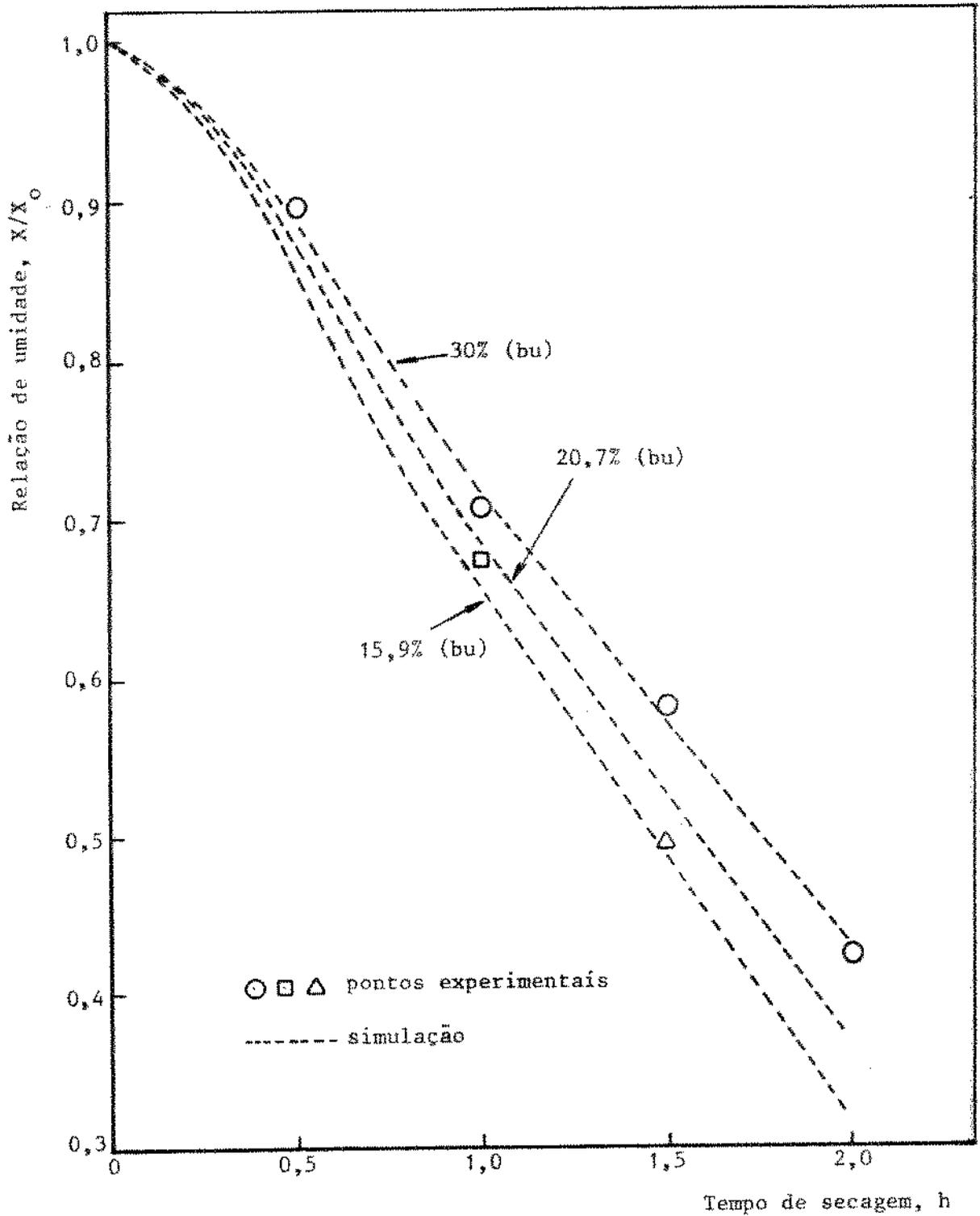


Figura VI-13 . Simulação de curvas de secagem em LVJ , com aquecimento indireto do leito, para conteúdos de umidades iniciais dos grãos de soja: 30,0; 20,7 e 15,9% (bu), carga inicial de sólidos no leito = 182 kg/m², T_{ar} = ambiente, u_{ar} = 15 cm/s, A = 4 mm, f = 12 a 17 Hz, potência = 266 watts.

CAPÍTULO VII

PARAMETROS DE PROJETO

Neste capítulo apresenta-se uma análise dos parâmetros de projeto relevantes na especificação de um secador de leito vibrojorrado. Inicialmente são salientados aspectos e limites práticos definidos no presente trabalho. Na seção F faz-se uma avaliação preliminar de fatores que influem na mudança de escala.

A , COM RELAÇÃO À OPÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO TUBO INTERNO CENTRAL

Ensaio experimentais mostraram que em um secador de LVJ, o uso de um tubo interno central impediu o escoamento de cubos de batata de 5 e 10 mm de aresta, cujo conteúdo de umidade inicial situa-se em torno de 80% (bu), quando o ar escoava no leito à baixa velocidade estando o leito submetido a vibração.

Os cubos de batata são sólidos de elasticidade insuficiente para propagação de vibração através de um leito formado pelos mesmos. Como consequência ocorre amortecimento da vibração e a energia vibracional transmitida ao leito não se traduz em escoamento efetivo dos sólidos.

Entretanto, operando com ou sem o tubo interno, carga de 30 kg de batata/m², com cubos de 5 mm de aresta, e velocidade do ar mais elevada, equivalente a 1,30 kg/min, porém inferior à mínima de jorro, e com as condições de vibração $A = 4$ mm e $f = 12,5$ a 13,5 Hz, observou-se um movimento estável dos cubos de batata em toda a extensão do leito, e este desaparecia ao suprimir-se a vibração. Em termos de secagem de cubos de batata nas condições ci-

tadas, foi indiferente o uso ou não do tubo interno (Veja a seção I do Capítulo V).

Os experimentos de secagem de grãos de soja com conteúdos de umidade iniciais entre 16 a 30% (bu), mostraram um comportamento diferente com relação ao escoamento dos grãos no leito. As condições de operação foram: velocidade do ar, 15 cm/s; amplitude de vibração 12 a 17 Hz e carga = 170 a 182 kg/m². O escoamento dos grãos assemelha-se ao denotado na Figura IV-4 e a taxa de circulação dos mesmos aumentava quando reduzia-se o conteúdo de umidade inicial da alimentação. Isto deve-se à elasticidade deste material que aumenta com a redução do conteúdo de umidade.

Portanto o uso do tubo central em LVJ é recomendado para o processamento de materiais de elasticidade mais elevada (grãos de soja e materiais inorgânicos, como por exemplo cloreto de potássio). O tubo central não deve ser selecionado quando o material alimentício a ser desidratado possui elasticidade pequena e deseja-se operar com vazão reduzida do ar de secagem, como no exemplo de processamento de cubos de batata.

B . COM RELAÇÃO ÀS DIMENSÕES DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO

Os parâmetros geométricos que exercem maior influência sobre o escoamento dos sólidos no leito vibro-jorrado são: a) o ângulo interno do cone; b) a relação D_c/D_i ; c) as dimensões do tubo interno e sua posição em relação ao suporte vibratório do leito; d) a amplitude de vibração do suporte vibratório; e) a altura do leito.

a) A utilização da seção cônica com menor ângulo interno,

facilita o escoamento dos sólidos devido à parede da mesma apresentar maior inclinação em relação ao plano horizontal. Isto reduz a ação da componente normal da parede cônica sobre a carga do leito. No presente estudo os sólidos escoavam livremente quando o ângulo interno do cone era de 43°, o que reduziu-se apreciavelmente quando o mesmo era de 60°.

b) A redução da razão D_c/D_i possibilita uma transmissão de vibração mais intensa para o leito de sólidos. Entretanto, a transmissão transversal de vibração que processa-se paralelamente à transmissão na direção vertical, atua no sentido de reduzir o escoamento dos sólidos no espaço anular. Portanto D_c/D_i é um parâmetro geométrico que deve ser otimizado no projeto de um secador de LVJ.

No presente estudo, operando com vazão de ar nula e com $D_c/D_i = 1,7$ ($\alpha = 43^\circ$), materiais elásticos que formavam o leito (grãos de soja, feijão, cloreto de potássio) escoavam facilmente quando excitados pela vibração. A operação com $D_c/D_i = 3,0$ ($\alpha = 60^\circ$), teve como resultado uma taxa de escoamento de sólidos notavelmente inferior à anterior.

c) Existe uma distância ótima entre o tubo interno e o topo do suporte vibratório, que possibilita uma taxa de circulação máxima de partículas no leito.

Operando com a relação $D_c/d_i = 1,5$, onde d_i é o diâmetro do tubo interno, e com vazão de ar nula, a descarga máxima de sólidos é obtida ao operar com $D_i/L = 1,8$, para partículas com diâmetro de 3,8 (esferas de vidro); 4,1 (sagú) e 5,3 mm (confeitos a luminizados), sendo as densidades absolutas 2,5; 0,8 e 1,4 g/cm³, respectivamente (Veja as Figuras IV-9, IV-10 e IV-11).

Quando $D_c/d_i = 2,0$, a descarga máxima de sólidos é obtida ao operar com $D_i/L = 5,4$, para esferas de vidro, $d_p = 3,8$ mm e $\rho_s = 2,5$ g/cm³ (veja a Figura IV-8).

d) Mantendo-se o adimensional $A\omega^2/g$ constante, descargas mais elevadas de sólidos foram obtidas ao operar com maior amplitude de vibração (veja a Figura IV-7).

e) Na secagem de cubos de batata com 5 mm de aresta, operando em LVJ sem tubo interno e com as condições de ar, velocidade de 1,38 m/s e 70 °C, é vantajoso economicamente operar com cargas iniciais de cubos de batata de 60 kg/m². Entretanto esta não é ainda uma condição otimizada (Veja a Seção J do Capítulo V).

C . COM RELAÇÃO A SELEÇÃO DA FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO

O aproveitamento máximo da energia vibracional em LVJ ocorre sob uma condição de ressonância do leito. Portanto esta condição deve ser selecionada como a de operação do sistema.

Os ensaios de secagem de grãos de soja tornaram evidente que a aceleração vibracional ótima, $(A\omega^2)$ ótima, reduz-se com a redução do conteúdo de umidade dos sólidos. Nos ensaios tornou-se necessário reduzir a frequência de vibração periodicamente para conservar a condição de ressonância.

Ao elaborar projetos de secadores em LVJ com múltiplas etapas, em cada uma destas deve-se operar com valores constantes de amplitude e de frequência de vibração, pois em um processo contínuo a umidade média dos sólidos no leito permanece constante.

D . COM RELAÇÃO A UTILIZAÇÃO DE AQUECIMENTO DIRETO OU INDIRETO DO LEITO DE SECAGEM

Na secagem de cubos de batata, com 5 e 10 mm de aresta, em LVJ sem tubo interno central, o escoamento uniforme dos sólidos no leito foi conseguido operando com velocidade do ar próxima da mínima de jorro e com transmissão de vibração, ou seja, os efeitos vibracionais e da força resistiva do ar foram relevantes na promoção do movimento das partículas. Observações visuais do leito mostraram que a porosidade na região de jorro era superior a do espaço anular, aproximando-se esta última do escoamento em fase densa.

O presente trabalho não contemplou ensaios de aquecimento indireto do leito constituído por cubos de batata operando-se em LVJ. Entretanto algumas suposições sobre o comportamento do mesmo em relação à transferência de calor podem ser adiantadas: a) na região de jorro, o contato das partículas com a superfície de troca de calor é inferior ao de um leito em fase densa como no espaço anular. Portanto desejando-se utilizar um aquecedor como fonte adicional de calor para promoção da secagem, o mesmo deve localizar-se no espaço anular; b) como o ar escoo no leito com uma velocidade apreciável, o mesmo pode receber uma fração significativa do calor fornecido pela superfície de troca de calor, principalmente se for admitido à baixa temperatura, e isto pode, proporcionar baixas eficiências energéticas para o processo.

Quando o leito é formado por partículas de elasticidade alta que transmitem com facilidade energia vibracional entre si, o sistema comporta-se como um leito vibrado quando o ar escoo no mesmo à baixa velocidade. Como resultado os sólidos escoam em re-

gime de fase densa.

Neste sistema, trocadores de calor imersos no leito, transferem calor com eficiência para as partículas que escoam em fase densa, devido a menor porosidade do leito comparada com os leitos de jorro ou fluidizados convencionais.

No presente estudo, a análise dos resultados experimentais de secagem de grãos de soja com aquecimento indireto em LVJ, para um intervalo de conteúdo de umidade inicial dos grãos de 16 a 30% (bu), denotou eficiências de aproveitamento de energia térmica superiores à de operação em leito estático com aquecimento direto.

Portanto, operando um secador de LVJ em fase densa, recomenda-se o aquecimento indireto do leito quando o critério decisivo de seleção é baseado na eficiência de aproveitamento da energia de aquecimento do leito.

E , COM RELAÇÃO AS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS SÓLI- DOS

Muitos materiais ao serem processados em LVJ comportam-se como friáveis, observando-se a formação de pó, devido ao atrito entre as partículas e a parede do secador. No presente trabalho observou-se este comportamento quando o leito era constituído por confeitos aluminizados; sagú; sílica gel e cloreto de potássio.

Operando em LVJ com baixa velocidade do ar de secagem, é pequena a taxa de escoamento de partículas que possuem a superfí-cie externa pegajosa (por exemplo a situação em que adicionou-se graxa às esferas de vidro, Seção A - Capítulo III). O filme pega-joso que recobre as partículas deve atuar no sentido de amortecer vibrações além de favorecer a adesão das partículas. Nestas situaç

ções é provável que a operação em LVJ com velocidades mais elevadas do ar de secagem facilite o escoamento destes materiais, pois isto aconteceu com os cubos de batata que apresentam uma certa pegajosidade devido a presença de amido na superfície das partículas.

F . COM RELAÇÃO A ESTUDOS INICIAIS DE MUDANÇA DE ESCALA

F-1 . INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica de materiais granulares pode ser realizado com um equipamento de grande escala, mas isto conduz a custos elevados, além do consumo excessivo de tempo e de trabalho. Os experimentos usando modelos em escala reduzida são muito efetivos, e os resultados podem ser aplicados diretamente à protótipos, desde que o princípio da similaridade seja considerado.

O aumento de escala ("*scale up*") de secadores de leite móvel, está intimamente ligado ao modelo de escoamento das partículas no interior do vaso de secagem. Para que o escoamento na situação ampliada apresente similaridade com o modelo de escala reduzida é necessário que entre os dois sistemas exista semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Para que isto aconteça os parâmetros operacionais e as variáveis geométricas do sistema ampliado devem ser especificados, usando correlações que assegurem as condições de similaridade (HOLLAND e CHAPMAN, 1966; ROBERTS, 1984).

Na literatura não existem estudos específicos sobre similaridade aplicáveis à mecânica dos sólidos e diretamente a um leito vibro-jorrado.

Entretanto, existem estudos referentes ao escoamento do sólidos em silos com geometria semelhante à do secador de leite de

jorro. As correlações adimensionais provenientes de um balanço de tensões no leito são gerais e independem de um sistema particular (NAGAO, 1986; TAKEUCHI et alii, 1987).

No presente estudo é analisado teoricamente a aplicação de correlações provenientes de um balanço de tensões no leito, expresso na forma adimensional, com vistas à ampliação de escala do leito vibro-jorrado.

F-2 . EQUAÇÕES DA MECÂNICA DE MATERIAIS GRANULARES

Em um sistema de coordenadas retangulares (x, y e z), as densidades de fluxo de quantidade de movimento em um meio particulado são representadas pelos tensores σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} e σ_{zx} . σ_{xx} é a tensão normal que atua sobre uma face x e o σ_{xy} é a tensão de cisalhamento que atua sobre uma superfície x na direção y e assim por diante (BIRD et alii, 1965).

Definidos ρ' e ρ como a densidade aparente e verdadeira das partículas; u, v e w coordenadas de um ponto no meio; t o tempo, as equações de balanço de tensões podem ser escritas na forma a seguir (NAGAO, 1986), onde a última parcela de cada equação representa o efeito da aceleração vibracional sobre o escoamento das partículas sólidas para o caso de LVJ, o que será discutido à seguir.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \frac{D}{Dt} \{ \rho (1 - \epsilon) U \} - \frac{\partial p_x}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = \frac{D}{Dt} \{ \rho (1 - \epsilon) V \} - \frac{\partial p_y}{\partial y} \quad (\text{VII-1})$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \frac{D}{Dt} \{ \rho (1 - \epsilon) W \} + \rho g (1 - \epsilon) - \frac{\partial p_z}{\partial z}$$

onde: U, V e W são as velocidades:

$$U = \frac{\partial u}{\partial t} \quad , \quad V = \frac{\partial v}{\partial t} \quad , \quad W = \frac{\partial w}{\partial t}$$

ϵ é a porosidade do meio e g a aceleração devido a força de gravidade, que é assumida atuando na direção negativa de z.

A força impulsora "p" proveniente da vibração do suporte do leito e responsável pelo movimento das partículas no sentido ascendente, pode ser expressa pela equação a seguir:

$$p = \rho A \omega^2 (1 - \epsilon) r \quad \text{(VII-2)}$$

onde:

$$r = \frac{\text{volume do leito}}{\text{área da seção transversal da base do leito submetida à vibração}}$$

Entretanto, a amplitude de vibração reduz-se com o aumento da altura do leito, devido ao amortecimento da vibração e aos choques não elásticos e oblíquos entre as partículas e as paredes do leito. Devido aos choques oblíquos também ocorre propagação de vibração nas direções x e y.

Portanto como a vibração propaga-se nas três direções, a força impulsora vibracional que produz o escoamento dos sólidos, possui componentes nas direções x, y e z, que são:

$$p_x = \rho A_x \omega_x^2 r (1 - \epsilon)$$

$$p_y = \rho A_y \omega_y^2 r (1 - \epsilon) \quad (\text{VII-3})$$

$$p_z = \rho A_z \omega_z^2 r (1 - \epsilon)$$

$$\frac{\partial p_x}{\partial x} = \rho r \frac{\partial}{\partial x} (A_x \omega_x^2 (1 - \epsilon))$$

$$\frac{\partial p_y}{\partial y} = \rho r \frac{\partial}{\partial y} (A_y \omega_y^2 (1 - \epsilon)) \quad (\text{VII-4})$$

$$\frac{\partial p_z}{\partial z} = \rho r \frac{\partial}{\partial z} (A_z \omega_z^2 (1 - \epsilon))$$

Para transformar a Equação (VII-1) na forma adimensional pode-se definir:

$$\frac{x}{\ell} = x' \quad \frac{y}{\ell} = y' \quad \frac{z}{\ell} = z' \quad \frac{A}{\ell} = A'$$

onde: ℓ é uma dimensão de comprimento representativa do sistema.

Se σ_0 é a pressão do topo ou do fundo do recipiente, que apresenta dimensões de tensão, vem:

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_0} = \sigma'_{xx} \quad ; \quad \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_0} = \sigma'_{yy} \quad ; \quad \frac{\sigma_{zz}}{\sigma_0} = \sigma'_{zz}$$

$$\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_0} = \sigma'_{xy} \quad ; \quad \frac{\sigma_{yz}}{\sigma_0} = \sigma'_{yz} \quad ; \quad \frac{\sigma_{zx}}{\sigma_0} = \sigma'_{zx}$$

Se U_0 , t_0 e ω_0 são uma velocidade, um tempo e uma frequência angular de vibração representativos:

$$\frac{U}{U_0} = U' \quad , \quad \frac{V}{U_0} = V' \quad , \quad \frac{W}{U_0} = W' \quad , \quad \frac{t}{t_0} = t' \quad , \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \omega'$$

t_0 pode ser o tempo total de descarga das partículas por um orifício situado na base de um silo ou o período de algum fenômeno oscilatório; ω_0 pode ser a frequência angular de vibração do suporte do LVJ.

Substituindo os parâmetros adimensionais e a Equação (VII-4) na Equação (VII-1), tem-se:

$$\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x'} + \frac{\partial \sigma'_{xy}}{\partial y'} + \frac{\partial \sigma'_{xz}}{\partial z'} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{D'}{D' t'} (q U') - \alpha_1 \alpha_4 \alpha_5 \frac{\partial}{\partial x'} (q A'_x \omega'_x)$$

$$\frac{\partial \sigma'_{yx}}{\partial x'} + \frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y'} + \frac{\partial \sigma'_{yz}}{\partial z'} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{D'}{D' t'} (q V') - \alpha_1 \alpha_4 \alpha_5 \frac{\partial}{\partial y'} (q A'_y \omega'_y) \quad (\text{VII-5})$$

$$\frac{\partial \sigma'_{zx}}{\partial x'} + \frac{\partial \sigma'_{zy}}{\partial y'} + \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z'} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{D'}{D' t'} (q W') + \alpha_1 q - \alpha_1 \alpha_4 \alpha_5 \frac{\partial}{\partial z'} (q A'_z \omega'_z)$$

onde:

$$\alpha_1 = \frac{\rho' g \ell}{\sigma_0} \quad ; \quad \alpha_2 = \frac{\ell}{g t_0^2} \quad ; \quad \alpha_3 = \frac{U_0 t_0}{\ell} \quad ;$$

$$\alpha_4 = r/\ell \quad ; \quad \alpha_5 = \frac{\ell \omega_0^2}{g}$$

$$q = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \quad ; \quad \rho' = \rho(1 - \varepsilon_0) \quad ;$$

$$\frac{D'}{D' \tau'} \equiv \frac{\partial}{\partial \tau'} + \alpha_3 \left(U' \frac{\partial}{\partial x'} + V' \frac{\partial}{\partial y'} + W' \frac{\partial}{\partial z'} \right)$$

ε_0 é a porosidade em algum estado padrão, podendo ser a porosidade inicial do meio.

Na Figura VII-1 são representados dois sistemas A e B de escalas diferentes mas que apresentam similaridade. Devido a similaridade $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ e α_5 são iguais para os dois sistemas. Isto faz que as equações de balanço de tensões sejam exatamente as mesmas para A e B. Em outras palavras, se existem soluções para as equações dos dois sistemas, elas devem ser uma única solução, expressa em termos dos parâmetros adimensionais.

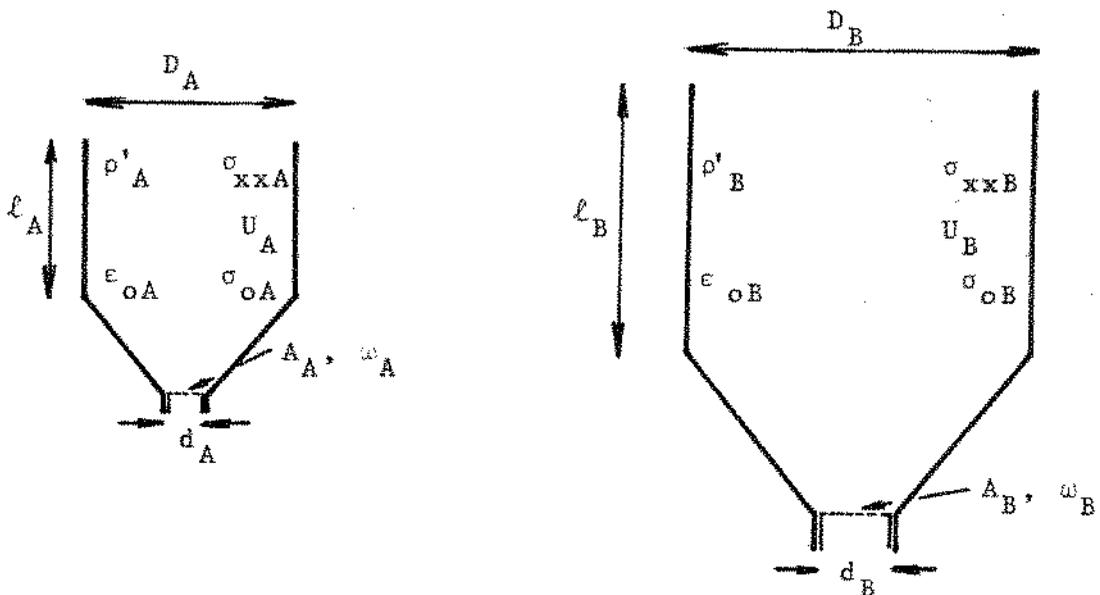


Figura VII-1 . Sistemas A e B em escalas diferentes.

Portanto:

$$\alpha_1 = \frac{\rho_A' g \ell_A}{\sigma_{oA}} = \frac{\rho_B' g \ell_B}{\sigma_{oB}} \quad (\text{VII-6})$$

$$\alpha_2 = \frac{\ell_A}{g t_{oA}^2} = \frac{\ell_B}{g t_{oB}^2} \quad (\text{VII-7})$$

$$\alpha_3 = \frac{U_{oA} t_{oA}}{\ell_A} = \frac{U_{oB} t_{oB}}{\ell_B} \quad (\text{VII-8})$$

$$\alpha_4 = \frac{r_A}{\ell_A} = \frac{r_B}{\ell_B} \quad (\text{VII-9})$$

$$\alpha_5 = \frac{\ell_A \omega_{oA}^2}{g} = \frac{\ell_B \omega_{oB}^2}{g} \quad (\text{VII-10})$$

Este tratamento possibilita a realização de ensaios com o modelo de escala reduzida e utilizar os resultados no projeto ou mudança nas condições de operação do protótipo.

Utilizando a igualdade entre os parâmetros adimensionais dos dois sistemas pode-se obter correlações. Da Equação VII-7:

$$\frac{t_{oB}}{t_{oA}} = \left[\frac{\ell_B}{\ell_A} \right]^{1/2} \quad (\text{VII-11})$$

Da Equação VII-8:

$$\frac{U_{oB}}{U_{oA}} = \frac{t_{oA}}{t_{oB}} \cdot \frac{\ell_B}{\ell_A} = \left[\frac{\ell_B}{\ell_A} \right]^{1/2} \quad (\text{VII-12})$$

Usando as Equações VII-7 e VII-8 pode ser mostrado que vazão de sólidos é proporcional ao diâmetro do orifício elevado a potência 2,5, ou seja:

$$Q = \frac{\pi}{4} \alpha_3 \sqrt{\alpha_2 g} d^{2,5} \quad (\text{VII-13})$$

Da Equação (VII-10):

$$\frac{\omega_{oB}}{\omega_{oA}} = \left[\frac{\ell_A}{\ell_B} \right]^{1/2} \quad (\text{VII-14})$$

As equações provenientes do balanço de tensões foram testadas no escoamento de partículas de sílica e grãos de trigo durante a descarga em silos de dimensões diferentes onde não existe influência de efeitos vibracionais. Os resultados confirmaram a aplicabilidade das equações oriundas da aplicação do princípio da similaridade (TAKEUCHI et alii, 1987).

No presente trabalho as correlações gerais anteriores serão utilizadas no estudo de ampliação do secador de LVJ.

A análise que será realizada aplica-se apenas à um leito formado por partículas com conteúdo de umidade fixo e que escoam no leito sob ação vibracional, não ocorrendo transferência de calor ou de massa.

Um estudo completo aplicável à secagem em LVJ, deve incluir outras equações expressas na forma adimensional, como a da energia e da continuidade para a água retirada do sólido na secagem.

Portanto, a análise a seguir constitui apenas uma introdu-

ção ao tema e o estudo tem um carácter de proposta para uma pesquisa futura.

F-3 . AMPLIAÇÃO DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO

O secador de LVJ utilizado neste trabalho foi descrito no Capítulo III. No estudo de ampliação de escala do secador será considerado que o protótipo possui um fator de escala igual a 9, ou seja, as dimensões lineares do protótipo são 9 vezes maiores que as do modelo.

F-4 . FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO PROTÓTIPO

A frequência de vibração no protótipo pode ser calculada utilizando a Equação (VII-14). Para o modelo operando a 900 rpm (15 Hz), substituindo as variáveis na equação, tem-se:

$$\omega_B = (2\pi \cdot 15) \left[\frac{1}{9} \right]^2 = 2\pi \cdot 5$$

então: $f = 5$ Hz (300 rpm), que deve ser a frequência de vibração do protótipo.

O adimensional $A\omega^2/g$, exerce uma notável influência no movimento das partículas, conforme foi analisado no Capítulo II. Para um mesmo equipamento, mantido $A\omega^2/g$ constante, a agitação do leito é mais intensa ao operar com maior amplitude de vibração.

Este estudo de ampliação de escala indica que $A\omega^2/g$ deve ser mantido constante, uma vez que é necessário a semelhança dinâmica entre os dois sistemas, para que aconteça a similaridade desejada. Os cálculos mostraram que para o protótipo a frequência

de vibração deve ser reduzida, enquanto a amplitude aumenta pelo fator de escala.

Na Figura VII-2, é proposto um desenho para construção do protótipo de secador de LVJ, o qual apresenta um mecanismo simples de transmissão de vibração para o suporte do leito.

A admissão do ar, que serve de veículo de transporte do vapor de água formado na operação com aquecimento indireto do leito, pode ser efetuada tangencialmente ao corpo do secador ou ao longo da seção cônica do mesmo. Isto pode modificar efeito da força resistiva do ar na dinâmica do leito.

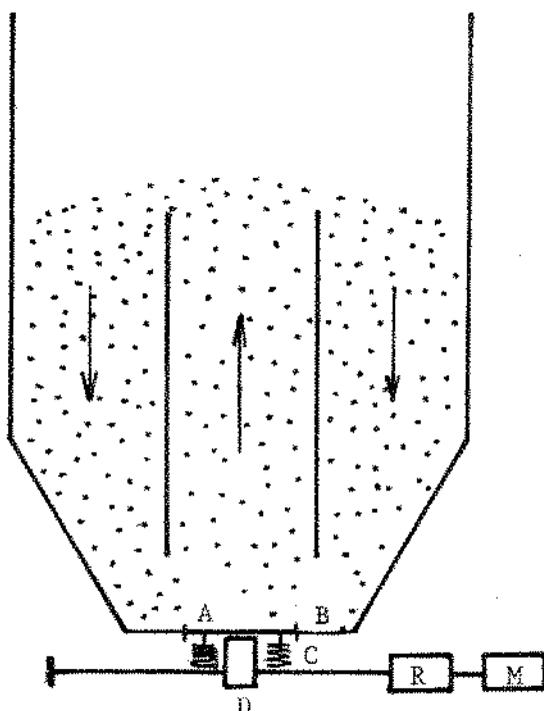


Figura VII-2 . Mecanismo de transmissão de vibração do protótipo do secador de leito vibro-jorrado.

A) Suporte vibratório; B) Diafragma elástico; C) Mola; D) Excêntrico; R) Redutor; M) Motor.

F-5 . TEMPO DE RESIDÊNCIA E VAZÃO VOLUMÉTRICA DE ESFERAS DE VIDRO NO PROTÓTIPO

A dinâmica do leito no modelo de secador de LVJ foi estudada usando esferas de vidro, conforme, descrito no Capítulo IV. Constatou-se que o modelo de escoamento dos sólidos corresponde ao escoamento pistonado com baixo grau de mistura, e que o tempo médio de residência das esferas era $\bar{t} = 65,6$ s.

No protótipo, o tempo médio de residência das partículas pode ser estimado usando a Equação VII-11.

$$\frac{t_{oB}}{t_{oA}} = \left(\frac{9}{1}\right)^{1/2} \quad t_{oB} = 197 \text{ s}$$

De acordo com a função $F(t/\bar{t})$, (veja Figura IV-3), os desvios máximo e mínimo do tempo de permanência das partículas durante um ciclo serão: 283 e 110 s.

A vazão de esferas de vidro que ascendem pelo tubo central pode ser estimado usando a Equação VII-13, escrevendo-a para o modelo e para o protótipo e dividindo uma pela outra, de onde:

$$Q_{\text{protótipo}} = 243 Q_{\text{modelo}}$$

A influência real do aumento da carga de sólidos devido a mudança de escala deve ser determinada experimentalmente com modelos de dimensões diferentes e verificada a validade das correlações provenientes do princípio da similaridade aplicado à mecânica dos sólidos.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSOES

A . COM RELAÇÃO A DINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO

1) No cálculo do tempo de residência médio das partículas, o uso do método estímulo-resposta ou da técnica que quantifica a descarga das partículas, praticamente conduzem ao mesmo resultado, para a operação em LVJ com tubo cilíndrico central.

2) O modelo de circulação das partículas no LVJ com tubo cilíndrico central, corresponde ao escoamento pistonado com baixo grau de mistura.

3) A trajetória das partículas no espaço anular do LVJ, corresponde a um deslizamento contínuo em direção ao suporte vibratório do leito. No interior do tubo cilíndrico central ocorre recirculação das partículas ("*back mixing*"), que é a causa principal da dispersão do tempo de residência das partículas.

4) Na operação em LVJ com tubo cilíndrico central, a porosidade em todo leito é bastante uniforme e aproxima-se da porosidade do LE, isto quando o movimento no leito deve-se mais ao efeito da aceleração vibracional. Entretanto, quando a velocidade do ar é mais importante que a vibração, a porosidade do leito é alta na região central, como no leito de jorro convencional. No espaço anular a característica do meio é de fase densa.

5) A operação em LVJ em fase densa e com velocidade reduzida do ar de secagem, apresenta as seguintes vantagens em relação ao leito de jorro convencional: aumento da capacidade de processa

mento de sólidos, devido à menor porosidade global do leito; redução do consumo de ar de secagem e aproveitamento mais eficaz do calor sensível do mesmo.

6) Operando em LVJ com tubo central, a taxa de circulação das partículas é máxima quando a vazão de ar é nula, diminuindo gradativamente com o aumento da velocidade do ar, até cessar todo o movimento no leito. Ao ser ultrapassado um limite de velocidade crítica, forma-se o leito de jorro convencional.

7) Operando em LVJ sem o tubo central, a taxa de circulação dos sólidos aumenta com o aumento da velocidade do ar. A intensidade vibracional deve predominar se a velocidade do ar for baixa, ocorrendo o inverso quando a velocidade do ar for alta.

8) A curva de perda de pressão em função da velocidade do ar, possui um máximo para operação em LVJ com tubo central. Isto geralmente não ocorre nos sistemas vibrados.

9) A operação em LVJ estabiliza os leitos altamente porosos, proporcionando uma circulação uniforme das partículas, como por exemplo leitos formados por fatias de cebola.

10) Variando o afastamento entre o tubo interno e o pistão vibratório, existe uma condição ótima na qual a taxa de circulação das partículas é máxima. Com o afastamento do tubo interno ao pistão, atenua-se a transmissão vertical da vibração para o meio e quando o tubo encontra-se demasiadamente próximo da base do leito, o movimento das partículas é prejudicado pela redução da área disponível ao escoamento descendente dos sólidos na região cônica do secador.

11) Existe uma periodicidade na taxa de circulação dos sólidos com a frequência de vibração. A taxa de circulação máxima é

associada a uma condição de ressonância.

12) A taxa de circulação dos sólidos é mais intensa quando as partículas são formadas por materiais de alta elasticidade, que são bons transmissores de quantidade de movimento. Com materiais menos elásticos ocorre amortecimento, devido aos choques inelásticos entre as partículas.

B , COM RELAÇÃO A SECAGEM COM AQUECIMENTO DIRETO DE CUBOS DE BATATA.

1) O tempo de secagem de cubos de batata na operação em LVJ sem o tubo central, foi inferior ao do leito estático e ao do leito de jorro.

2) Operando em LVJ sem o tubo central, as curvas de secagem de amostras de cubos de batata extraídas no topo e no fundo do secador praticamente coincidiram, comprovando a ocorrência da secagem uniforme de todo conteúdo do leito, devido à circulação permanente dos sólidos.

3) A contração de cubos de batata durante a secagem, ajusta-se muito bem ao modelo de secagem uniforme ("*uniforme drying model*"), até o conteúdo de umidade, $X = 0,9 \text{ kg H}_2\text{O/kg batata seca}$.

4) Durante a secagem de cubos de batata, surgem trincas e acentuada concavidade nas faces dos mesmos. Quando o conteúdo de umidade dos cubos de batata aproxima-se de $0,11 \text{ kg H}_2\text{O/kg batata seca}$, inicia-se um rompimento interno dos tecidos, o que gera cavidades internas, que aumentam com o transcorrer da secagem.

5) As curvas de secagem, em LVJ, de cubos de batata, ajustaram-se razoavelmente a um modelo difusional simplificado. Os re

sultados experimentais sugerem que a mudança do primeiro para o segundo período ocorre em torno do conteúdo de umidade $X = 0,11 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ batata seca, o que corresponde ao início da formação das cavidades internas nos cubos de batata.

6) A simulação de curvas de secagem, para leitos formados por múltiplas camadas de cubos de batata em LE e LVJ, ao invés de camada delgadas, conforme proposição original do modelo de Fornell, denotou um bom ajuste aos pontos experimentais, tanto ao variar a temperatura como a velocidade do ar de secagem.

7) Na secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta, e operando o LVJ com e sem o tubo central, sendo a velocidade do ar 1,38 m/s e mantidas constantes todas as outras condições de operação, as curvas de secagem praticamente coincidiram. Em termos de tempo de secagem, não houve portanto vantagens em utilizar o tubo interno central.

8) Ao duplicar a carga de cubos de batata de 30 kg/m^2 para 60 kg/m^2 , operando em LVJ sem tubo interno e com aquecimento direto, o consumo global de energia térmica, efetivamente usada na secagem, por umidade de massa do produto, reduz-se em 15% em relação à menor carga, além de ter sido duplicada a capacidade do equipamento instalado.

C . COM RELAÇÃO A SECAGEM COM AQUECIMENTO INDIRETO DE GRÃOS DE SOJA

1) A taxa de secagem de grãos de soja do conteúdo de umidade de 30% (bu) até 15% (bu), para operação em LVJ com aquecimento indireto do leito, é praticamente constante após ser ultrapassado um período inicial de indução.

2) A circulação de grãos de soja no LVJ com tubo central é mais intensa quando as partículas apresentam umidade reduzida devido à maior elasticidade das mesmas.

3) O secador de LVJ, operando com aquecimento indireto do leite, reduz o tempo de secagem de grãos de soja, quando comparado com o secador de LE, e o desempenho melhora para menores umidades iniciais dos grãos de soja.

4) O consumo total de energia na secagem de grãos de soja em LVJ com aquecimento indireto do leite, é 40 a 78% do da secagem em LE, partindo-se de umidades iniciais dos grãos de soja na faixa de 0,19 - 0,43 kg H₂O/kg sólidos secos. A economia de energia é maior quando a umidade inicial dos sólidos é menor.

5) Preaquecer o ar que atua como veículo de arraste do vapor de água eliminado dos grãos de soja, na secagem em LVJ com aquecimento indireto, acelera a secagem, mas nem sempre compensa em termos de consumo de energia.

6) Um modelo matemático foi desenvolvido para operação em LVJ com aquecimento indireto do leite de secagem. O modelo conduziu a uma única curva característica de secagem de grãos de soja. A curva característica pode ser utilizada para simular a cinética de secagem de grãos de soja com diferentes conteúdos iniciais de umidade no intervalo de 16 a 30% (bu). A previsão do conteúdo de umidade dos grãos de soja com o tempo de secagem, apresentou um desvio inferior a 3%.

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DE PARAMETROS DA MISTURA SATURADA AR-VAPOR DE ÁGUA

O conteúdo de vapor de água disperso no interior do ar saturado, sob determinadas condições de temperatura e pressão, não pode ser determinado com exatidão através da lei dos gases ideais. Mantida a temperatura constante e aumentando a pressão, aumenta o conteúdo de vapor de água no ar saturado, devido a desvios do comportamento ideal.

Esses desvios da idealidade se devem entre outros fatores, à correção de Poynting, isto é, a compressão do líquido pela maior pressão do gás; as interações do tipo Van der Waals, entre espécies moleculares diferentes e ao efeito da lei de Henry, isto é, decréscimo na pressão de vapor, devido à dissolução do ar na água líquida. Destes efeitos o mais influente é o devido as interações de Van der Waals.

Permitindo-se que o ar(g), entre em equilíbrio termodinâmico com a superfície formada por uma camada de água líquida(ℓ), o potencial químico de cada componente na fase gasosa, é igual ao potencial químico na fase condensada.

Considerando a diferença em potencial químico da água(μ_w), em cada fase, entre estados de pressão P_1 e P_2 , tem-se a Equação (A-1) (HYLAND e WEXLER, 1973).

$$\mu_w^g(P_2) - \mu_w^g(P_1) = \mu_w^\ell(P_2) - \mu_w^\ell(P_1) \quad (A-1)$$

Expressando o potencial químico pela derivada parcial da e

nergia livre de GIBBS em relação ao número de moles da água, pode-se mostrar para as duas fases que:

$$\left[\frac{\partial}{\partial n_w^g} \int_{P_1}^{P_2} V^g dP \right] = \left[\frac{\partial}{\partial n_w^l} \int_{P_1}^{P_2} V^l dP \right] \quad (A-2)$$

O primeiro e o segundo membro da Equação (A-2) podem ser resolvidos.

Expressando o volume da mistura na fase gasosa, pela equação de estado na forma virial e desenvolvendo os dois membros da Equação (A-2), usando conceituações da termodinâmica, o resultado final é denotado pela Equação (A-3) (HYLAND e WEXLER, 1983 A).

$$\begin{aligned} \ln f = & \left[\frac{(1 + kP)(P-p) - \frac{1}{2} k(P^2 - p^2)}{RT} \right] \bar{v}_c + \ln(1 - kx_{as}P) + \left[\frac{x_{as}^2 P}{RT} \right] B_{aa} - \\ & \left[\frac{2x_{as}^2 P}{RT} \right] B_{aw} - \left[\frac{(P - p - x_{as}^2 P)}{RT} \right] B_{ww} + \left[\frac{x_{as}^3 P^2}{(RT)^2} \right] C_{aaa} + \\ & \left[\frac{3x_{as}^2 (1 - 2x_{as}) P^2}{2(RT)^2} \right] C_{aaw} - \left[\frac{3x_{as}^2 (1 - x_{as}) P^2}{(RT)^2} \right] C_{aww} - \\ & \left[\frac{(1 + 2x_{as})(1 - x_{as})^2 P^2 - p^2}{2(RT)^2} \right] C_{www} - \left[\frac{x_{as}^2 (1 - 3x_{as})(1 - x_{as}) P^2}{(RT)^2} \right] B_{aa} B_{ww} - \\ & \left[\frac{2x_{as}^3 (2 - 3x_{as}) P^2}{(RT)^2} \right] B_{aa} B_{aw} + \left[\frac{6x_{as}^2 (1 - x_{as})^2 P^2}{(RT)^2} \right] B_{ww} B_{aw} - \\ & \left[\frac{3x_{as}^4 P^2}{2(RT)^2} \right] B_{aa}^2 - \left[\frac{2x_{as}^2 (1 - x_{as})(1 - 3x_{as}) P^2}{(RT)^2} \right] B_{aw}^2 - \left[\frac{P^2 - (1 + 3x_{as})(1 - x_{as})^3 P^2}{2(RT)^2} \right] B_{ww}^2 \end{aligned} \quad (A-3)$$

Na Equação (A-3), f representa a relação:

$$f = \frac{x_{ws} P}{p} \quad (A-4)$$

onde: x_{ws} é a fração molar do vapor de água disperso no ar saturado; P é a pressão total da mistura gasosa; p é a pressão de vapor da água pura.

O fator de correção f ("Enhancement factor"), avalia a não idealidade da mistura vapor de água-ar no estado saturado.

Os outros parâmetros da Equação (A-3) são:

k = compressibilidade isotérmica da água líquida

k = constante da lei de Henry

R = constante universal dos gases

T = temperatura termodinâmica absoluta

\bar{v}_c = volume molar da fase líquida

x_{as} = fração molar do ar na mistura gasosa saturada.

B e C representam segundos e terceiros coeficientes viriais. Estes coeficientes são funções apenas da temperatura e são derivados da mecânica estatística.

Os segundos coeficientes viriais expressam os efeitos de interação entre duas moléculas e os terceiros entre três moléculas.

B_{aa} e B_{ww} , representam o segundo coeficiente virial para o ar seco e o vapor de água.

C_{aaa} e C_{www} , representam o terceiro coeficiente virial para o ar seco e o vapor de água.

B_{aw} é o segundo coeficiente virial cruzado, e expressa os efeitos da interação entre uma molécula de ar com outra de água.

C_{aaw} e C_{aww} representam o terceiro coeficiente virial cruzado, e expressam os efeitos de interação entre duas moléculas de ar com uma de água e vice versa.

As correlações dos coeficientes viriais em função da temperatura, k e k são fornecidos por: (HYLAND e WEXLER, 1983 A e B; HIMMELBLAU, 1960).

Os parâmetros da Equação (A-3), foram organizados em um programa de computador (Programa A) que conduz ao cálculo do coeficiente f e determina as frações molares do ar e do vapor de água na mistura saturada.

Utilizando o programa A, determinou-se o fator f para a pressão barométrica média de Campinas (SP), 94925,52 Pa (712 mm Hg) para a temperatura do ar variando de 5 °C até 98 °C.

Os resultados são listados na Tabela A-1.

Tabela A-1 . Fator f em função da temperatura do ar, para a pressão barométrica de 94925,52 Pa.

T (°C)	f
5	1,00371
10	1,00373
20	1,00388
30	1,00418
40	1,00461
50	1,00513
60	1,00561
70	1,00583
80	1,00533
90	1,00541
95	1,00157
98	1,00009

Os resultados da Tabela A-1, indicam que o maior desvio da idealidade na mistura gasosa ar-água, se localiza na temperatura do ar em torno de 70 °C e é cerca de 0,6%.

```

10 REM: * PROGRAMA A *
20 REM: * ESTE PROGRAMA CALCULA O FATOR  $\gamma$  *ENHANCEMENT FACTOR* QUE CONSIDERA A
   NAO IDEALIDADE DA MISTURA SATURADA DE VAPOR DE AGUA-AR. SAO TAMBEM CALCULADAS
   AS FRACOES MOLARES DO VAPOR DE AGUA E DO AR. OS PARAMETROS DE ENTRADA SAO T (K)
   E PT (Pa). *
30 REM: * T E A TEMPERATURA ABSOLUTA DO SISTEMA (K) *
40 INPUT "T(K)=";T
50 U=0
60 KI=0
70 V=0
80 IF T>373.15 THEN 180
90 J0=50.88496#
100 J1=.61638130000000002#
110 J2=.001459187#
120 J3=.00002008438#
130 J4=-5.8477270000000002D-08
140 J5=4.1041100000000001D-10
150 J6=.01967348#
160 TI=ABS(T-273.15)
170 GOTO 250
180 J0=50.884917#
190 J1=.62590623#
200 J2=.0013848668#
210 J3=.000021603427#
220 J4=-7.2087667000000001D-08
230 J5=4.6545054000000001D-10
240 J6=.019659938#
250 KI=KI+V
260 IF U=0 THEN JI=J0
270 IF U=1 THEN JI=J1
280 IF U=2 THEN JI=J2
290 IF U=3 THEN JI=J3
300 IF U=4 THEN JI=J4
310 IF U=5 THEN JI=J5
320 IF U>5 THEN 370
330 V=JI*TI*U
340 U=U+1
350 GOTO 250
360 REM: * K E A COMPRESSIBILIDADE ISOTERMICA DA AGUA LIQUIDA SATURADA (1/Pa) *
370 K=(KI/(1+J6*TI))*10^-11
380 A=-.0005943
390 B=(-.0512*(1000/T)-.1076
400 C=(-.147*(1000/T)^2)+.8447*(1000/T)-1
410 D=SQR(B*B-4*A*C)
420 Y1=(-B+D)/(2*A)
430 Y2=(-B-D)/(2*A)
440 IF Y1>Y2 THEN 470
450 Y3=Y2
460 GOTO 480

```

```

470 Y3=Y1
480 KL=10*Y3
490 REM: *KO E A CONSTANTE DA LEI DE HENRY PARA O OXIGENIO*
500 KO=KL
510 A1=-.1021
520 B1=(-.019*1000/T)-.03741
530 C1=(-.1482*(1000/T)^2)+.851*(1000/T)-1
540 D1=SOR(B1^2-4*A1*C1)
550 X1=(-B1+D1)/(2*A1)
560 X2=(-B1-D1)/(2*A1)
570 IF X1>X2 THEN B00
580 X3=X2
590 GOTO B10
600 X3=X1
610 KM=10*X3
620 REM: *KN E A CONSTANTE DA LEI DE HENRY PARA O NITROGENIO*
630 KN=KM
640 F=1
650 PX=(((-5800.2206#)/T)+(1.3914993#)-((.0486402390000001#)*T)+((.000041784788#)
*(T^2))-((.000000014452093#)*(T^3))+((6.5459673#))*LOG(T)
660 P=EXP(PX)
670 REM: *P E A PRESSAO DE VAPOR DE AGUA NA MISTURA*
680 PRINT *P=*,P
690 REM: *PT E A PRESSAO TOTAL DO SISTEMA (Pa)*
700 INPUT *PT=*,PT
710 R=8.31441E+08
720 R1=(-2403.360201#)+((-1.40758895#)*T)+((.1068287657#)*T^2)+((-2.914492351000
001D-04)*T^3)+((.000000373497936#)*T^4)+((-2.1203767D-10)*T^5)
730 R2=(-3.424442728#)+((.01619785#)*T)
740 R3=(R1/R2)
750 VC=((18015.28#)/R3)
760 PRINT *VC=*,VC
770 REM: *XWS E A FRACAO MOLAR DO VAPOR DE AGUA NA MISTURA SATURADA*
780 XWS=F*P/PT
790 REM: *XAS E A FRACAO MOLAR DO AR NA MISTURA SATURADA*
800 XAS=(PT-F*P)/PT
810 KP=((.22/KO)+(.78/KN))
820 REM: *KA E A CONSTANTE DA LEI DE HENRY PARA A MISTURA*
830 KA=1/KP
840 KF=(1/(KA*1013251))*10^-4
850 REM: *BAA E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL, PARA O AR SECO*
860 BAA=(34.9588)-((6887.72)/T)-((2101410#)/(T^2))+((9.24748E+07)/(T^3))
870 REM: *BAW E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA OS EFEITOS DE INTE
RACAO ENTRE UMA MOLECULA DE AR E UMA DE AGUA*
880 BAW=(32.366097#)-((14113.8/T)-((1244535#)/(T^2))-((2348789000#)/(T^4))
890 W=(7E-09)-(1.47184E-09)*EXP(1734.29/T)
900 REM: *BWW E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL, PARA O VAPOR DE AGUA*
910 BWW=R*T*W
920 REM: *CAA E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL ,PARA O AR SECO*

```

```

930 CAAA=(1259.75)-(1909051/T)+(6.32467E+07)/(T^2)
940 REM: "CAAW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA OS EFEITOS DE IN
TERACAO ENTRE DUAS MOLECULAS DE AR COM UMA DE AGUA"
950 CAAW=(482.737)+(1056781/T)-(6.56394E+07)/(T^2)+((2.94442E+10)/(T^3))-((3.1
9317E+12)/(T^4))
960 REM: "CAWW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA OS EFEITOS DE IN
TERACAO ENTRE UMA MOLECULA DE AR COM DUAS DE AGUA"
970 CAWW=(-1E+06)*EXP((-10.728876#)+(3478.02/T)-(3833831)/(T^2)+(3.3406E+07)/(T^
3))
980 WW=(1.04E-15)-(3.35297E-18)*EXP(3645.09/T)
990 REM: "CWWW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL PARA O VAPOR DE AGUA, EXPRESSA OS
EFEITOS DE INTERACAO ENTRE TRES MOLECULAS"
1000 CWWW=((R*T)^2)*(W+W^2)
1010 G1=(((1+K*P)*(PT-P)-.5*K*(PT^2-P^2))/(R*T))*VC
1020 G2=LOG(1-KF*XAS*PT)
1030 G3=(((XAS^2)*PT)/(R*T))*BAA
1040 G4=(((2*XAS^2)*PT)/(R*T))*BAW
1050 G5=(((PT-P-(XAS^2)*PT)/(R*T))*BWW
1060 G6=(((XAS^3)*(PT^2)/(R*T)^2))*CAA
1070 G7=(((3*XAS^2*(1-2*XAS)*(PT^2))/(2*(R*T)^2))*CAAW
1080 G8=(((3*(XAS^2)*(1-XAS)*(PT^2))/(R*T)^2))*CAWW
1090 G9=(((1+2*XAS)*(1-XAS)^2)*PT^2-P^2)/(2*(R*T)^2))*CWWW
1100 G10=(((XAS^2*(1-3*XAS)*(1-XAS)*PT^2)/(R*T)^2))*BAW*BWW
1110 G11=(((2*XAS^3*(2-3*XAS)*PT^2)/(R*T)^2))*BAA*BAW
1120 G12=(((6*XAS^2)*((1-XAS)^2)*(PT^2))/(R*T)^2))*BWW*BAW
1130 G13=(((3*(XAS^4)*(PT^2))/(2*(R*T)^2))*BAA^2)
1140 G14=(((2*XAS^2)*(1-XAS)*(1-3*XAS)*(PT^2))/(R*T)^2))*BAA^2)
1150 G15=(((P^2-(1+3*XAS)*((1-XAS)^3)*(PT^2))/(2*(R*T)^2))*BWW^2)
1160 G=G1+G2+G3-G4-G5+G6+G7-G8-G9-G10-G11+G12-G13-G14-G15
1170 FI=EXP(G)
1180 Q=ABS(FI-F)
1190 IF Q<.000001 THEN 1220
1200 F=FI
1210 GOTO 780
1220 PRINT "FI=";FI
1230 PRINT "XAS=";XAS
1240 PRINT "XWS=";XWS
1250 END

```

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DE PARAMETROS PSICROMÉTRICOS DO AR DE SECAGEM

A teoria da temperatura de bulbo úmido conduz à seguinte relação (TREYBAL, 1968),

$$(P_w - P_v) = \frac{h_c}{k_G \frac{M_A}{A} \Delta H} (T - T_w) \quad (B-1)$$

P_w = pressão de vapor da água na temperatura de bulbo úmido ,
kgf/cm²

P_v = pressão parcial de vapor de água no ar, kgf/cm²

h_c = coeficiente convectivo de transferência de calor ,
kcal/h m² °C

k_G = coeficiente de transferência de massa, kmol/(h m² (kgf/cm²)).

M_A = peso molecular da água, kg/kmol

ΔH = entalpia de vaporização da água, kcal/kg, à T_w

T = temperatura de bulbo seco do ar, k

T_w = temperatura de bulbo úmido do ar, k

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

$$\frac{h_c}{k_G} = 8,5 \left(\frac{\nu}{D_{AB}} \right)^{0,56} P \quad (B-2)$$

Sendo: P = pressão atmosférica local (kgf/cm²); ν = viscosidade cinemática do ar e D_{AB} = difusividade da água no ar.

A viscosidade do ar úmido (condições ambientes), aproxima-se da viscosidade do ar seco e pode ser calculada pela Equação (B-3), (KISAALITA, et alii, 1986).

$$\mu = \frac{(0,1458 \cdot 10^{-5}) T^{1,5}}{T + 110,7} \text{ kg/m s} \quad (\text{B-3})$$

Onde T é a temperatura absoluta de ar (k)

A difusividade da água no ar pode ser determinada em diversas temperaturas usando a Equação de Fuller (REID et alii, 1977). Usando valores experimentais da difusividade da água na pressão atmosférica (NORMAN, 1962; REID et alii 1977; TREYBAL, 1968), modificou-se o expoente da temperatura na equação de FULLER, para ajustar os dados experimentais da difusividade da água.

$$D_{AB} = [0,26 (T/298)^{1,48}] / P \quad \text{cm}^2 / \text{s} \quad (\text{B-4})$$

onde: P é a pressão total em atmosferas.

A densidade do ar na pressão atmosférica pode ser calculada pela equação dos gases ideais:

$$\rho_a = 341,94 (P/T) 0,001 \quad \text{g/cm}^3 \quad (\text{B-5})$$

A entalpia de vaporização da água, na temperatura de bulbo úmido do ar, pode ser determinada pela Equação (B-6), válida para o intervalo de temperaturas (0 - 60 °C). A equação foi obtida dos dados de PERRY e CHILTON (1974), ajustados pelo método dos mínimos quadrados:

$$\Delta H = (- 0,566 T_w + 1093,6) / 1,8 \quad \text{kcal/kg} \quad (\text{B-6})$$

onde: T_w é a temperatura de bulbo úmido, (° F).

O fator f (que corrige a não idealidade da mistura ar-vapor de água) é calculado pelo programa de computador do Apêndice A.

Um polinômio de 5º grau foi ajustado aos parâmetros da Tabela A-1, usando o método dos mínimos quadrados sendo o resultado expresso pela Equação (B-7).

$$f = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 + C_5 T^5 \quad (B-7)$$

onde: T é a temperatura do ar (k)

$$C_0 = 1,00378984$$

$$C_1 = -2,4519901 \text{ E} - 05$$

$$C_2 = 2,17309377 \text{ E} - 06$$

$$C_3 = 5,0058860 \text{ E} - 08$$

$$C_4 = 8,22484149 \text{ E} - 10$$

$$C_5 = -5,6319971 \text{ E} - 12$$

As umidades absolutas do ar Y (kg H₂O/kg ar seco) e Y_s , para o ar saturado, são calculadas pelas Equações (B-8) e (B-9), (ASHRAE, HANDBOOK, 1985).

$$Y = 0,62198 \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{X_w}{1 - X_w} \quad (B-8)$$

$$Y_s = 0,62198 \frac{f P_{ws}}{P - f P_{ws}} \quad (B-9)$$

P é a pressão absoluta da mistura gasosa e P_{ws} é a pressão de saturação do vapor de água em uma temperatura, T ; P_v é a pressão de

vapor da água no ar; X_w é a fração molar da água no ar.

O grau de saturação do ar úmido, X , é definido por:

$$X = Y/Y_s \quad (B-10)$$

O ar que alimenta a câmara de secagem é o ar ambiente aquecido até a temperatura da alimentação. Nesta última temperatura P_s é a pressão de vapor de água no ar saturado. Portanto a fração molar da água no ar que alimenta a câmara de secagem, em condições de saturação é:

$$X_{ws} = f P_s / P \quad (B-11)$$

Usando a definição da umidade relativa do ar:

$$U = [X_w / X_{ws}]_{T,P} \quad (B-12)$$

E combinando as Equações (B-8) a (B-12), tem-se:

$$U = \frac{X}{1 - (1 - X) X_{ws}} \quad (B-13)$$

A fração molar do ar na mistura é dada por:

$$X_A = \frac{(1/28,9645)}{(1/28,9645) + (Y/18,0153)} \quad (B-14)$$

As equações anteriores foram organizadas em um programa de computador (Programa B), no qual também foram incluídas umidades

de equilíbrio de cubos de batata (veja Apêndice C), em função das condições do ar de secagem.

```

10 REM: *PROGRAMA B*
20 REM: *ESTE PROGRAMA CALCULA A UMIDADE RELATIVA DO AR UMIDO PARA AS CONDICÕES
  ATMOSFERICAS DE CAMPINAS. OS PARAMETROS DE ENTRADA SÃO: A TEMPERATURA DO AR (K)
  A DIFERENÇA DE TEMPERATURAS (BULBO SECO - BULBO UMIDO), (K); Pw; P*
30 REM: * O PROGRAMA TAMBEM CALCULA PARAMETROS PSICROMETRICOS DO AR DE SECAGEM E
  DADOS DE EQUILIBRIO DE CUBOS DE BATATA COM O AR DE SECAGEM.*
40 INPUT *T(K)=*,T
50 A=(((.1458*10^-5)*(T^1.5))/(T+110.7))*10
60 REM: P 'E A PRESSÃO ATMOSFERICA LOCAL (KGF/CM2)
70 P=.968
80 REM: *C E A DIFUSIVIDADE DA AGUA NO AR, (cm2/s)*
90 C=.26*((T/298)^1.48)/P
100 REM: *B E A DENSIDADE DO AR, (g/cm3)*
110 B=341.94*(P/T)*.001
120 D=(A/(B*C))^*.56
130 REM: *(E) E A RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CA
  LOR E O COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASSA.*
140 E=8.5*D*P
150 INPUT *TEMPERATURA B. SECO-TEMPERATURA B. UMIDO,DT(K)=*,DT
160 REM: *S E A TEMPERATURA DE BULBO UMIDO, (F)*
170 S=1.8*(T-DT-273)+32
180 REM: *G E A ENTALPIA DE VAPORIZAÇÃO DA AGUA, (KCAL/KG), NA TEMPERATURA DE
  BULBO UMIDO DO AR.*
190 G=(-.566*S+1093.6)/1.8
200 INPUT *PW(PRESSÃO DE VAPOR DA AGUA NA TEMPER. BULBO UMIDO,KGF/CM2)=*,PW
210 REM: *PV E A PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE AGUA NO AR, (KGF/CM2)*
220 PV=PW-E/(18.0153*G)*DT
230 REM: *PS E A PRESSÃO DE VAPOR DA AGUA NO AR SATURADO*
240 INPUT *PS(PRESSÃO DE VAPOR DA AGUA NA TEMPER. DO AR, KGF/CM2)=*,PS
250 C0=1.00378964#
260 C1=-.0000245199013#
270 C2=.00000217309377#
280 C3=-5.005886000000001D-08
290 C4=8.22484149D-10
300 C5=-5.631997100000001D-12
310 INPUT *TA(C)=*,TA
320 F=C0+C1*TA+C2*TA^2+C3*TA^3+C4*TA^4+C5*TA^5
330 PRINT *F,FATOR NAO IDEALIDADE=*,F
340 REM: *Y E A UMIDADE ABSOLUTA DO AR*
350 Y=.62188*PV/(P-PV)
360 REM: *YS E A UMIDADE ABSOLUTA DO AR SATURADO*
370 YS=.62188*F*PS/(P-F*PS)
380 REM: *X E O GRAU DE SATURACAO DO AR UMIDO*
390 X=Y/YS
400 XW=F*PS/P
410 U=X/(1-(1-X)*XW)
420 PRINT *U(UMIDADE RELATIVA)=*,U
430 PRINT *Y=*,Y
440 REM: *XA E A FRACAO MOLAR DO AR UMIDO*

```

```

450 XA=(1/28.9645)/((1/28.9645)+(Y/18.0153))
460 PRINT "XA,FRAÇÃO MOLAR DO AR NA MISTURA GASOSA=",XA
470 REM: "CALCULO DO CONTEUDO DE UMIDADE DE EQUILIBRIO DE CUBOS DE BATATA COM AR
DE SECAGEM PARA AS TEMPERATURAS (TA) de 50, 60 e 70 C."
480 IF TA=50 THEN 520
490 IF TA=60 THEN 540
500 IF TA=70 THEN 560
510 GOTO 390
520 XE=.1331016656***(U)^(.5441010770000002#
530 GOTO 580
540 XE=.1234158573***(U)^(.6091743325000004#
550 GOTO 580
560 XE=.113378666***(U)^(.6744657335000004#
570 GOTO 580
580 PRINT "XE=";XE
590 END

```

APÊNDICE C

UMIDADES DE EQUILÍBRIO DE CUBOS DE BATATA

O conteúdo de umidade de equilíbrio de cubos de batata com o ar de secagem, foram obtidos dos sistemas de equilíbrio de KRISCHER, (1956), para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os dados foram ajustados as Equações (C-1) a (C-3), usando regressões de potência. As equações podem ser utilizadas até o limite de umidade relativa do ar, $U = 0,2$

$$X_{eq} = 0,1331 U^{0,544} \quad (50 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (\text{C-1})$$

$$X_{eq} = 0,1234 U^{0,609} \quad (60 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (\text{C-2})$$

$$X_{eq} = 0,1134 U^{0,674} \quad (70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (\text{C-3})$$

APÊNDICE D

DETERMINAÇÃO DA ENTALPIA ESPECÍFICA DO AR ÚMIDO

A entalpia molar do ar úmido, pode ser calculada pela Equação (D-1), para temperaturas da mistura no intervalo de 173,15 a 372,15 K e pressões até 5 MPa (STEWART et alii, 1983).

$$\bar{h}_m = x_a \left(\sum_{i=0}^{i=5} a_i T^i + \bar{h}'_a \right) + x_w \left(\sum_{i=0}^{i=5} d_i T^i + \bar{h}'_w \right) + \quad (D-1)$$

$$RT \left[\left(B_m - T \frac{dB_m}{dT} \right) \frac{1}{\bar{v}_m} + \left(C_m - \frac{1}{2} T \frac{dC_m}{dT} \right) \frac{1}{\bar{v}_m^2} \right] \quad \text{J/mol}$$

$$a_0 = 0,63290874 \times 10^1$$

$$d_0 = 0,5008 \times 10^{-2}$$

$$a_1 = 0,28709015 \times 10^2$$

$$d_1 = 0,32491829 \times 10^2$$

$$a_2 = 0,26431805 \times 10^{-2}$$

$$d_2 = 0,65576345 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = -0,10405863 \times 10^{-4}$$

$$d_3 = -0,26442147 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = 0,18660410 \times 10^{-7}$$

$$d_4 = 0,51751789 \times 10^{-7}$$

$$a_5 = -0,97843331 \times 10^{-11}$$

$$d_5 = -0,31541624 \times 10^{-10}$$

onde: B_m e C_m são o segundo e terceiro coeficientes viriais para o ar úmido:

$$B_m = x_a^2 B_{aa} + 2x_a x_w B_{aw} + x_w^2 B_{ww} \quad (D-2)$$

$$C_m = x_a^3 C_{aaa} + 3x_a^2 x_w C_{aaw} + 3x_a x_w^2 C_{aww} + x_w^3 C_{www} \quad (D-3)$$

O volume molar do ar úmido, para temperaturas compreendidas entre 173,15 e 473,15 K é calculado pela equação de estado virial:

$$\frac{P}{R} \frac{\bar{v}}{T} = 1 + \frac{B_m}{\bar{v}} + \frac{C_m}{\bar{v}^2} + \dots \quad (D-4)$$

Na Equação (D-1), \bar{h}_a e \bar{h}_w são constantes que ajustam os estados de referência das entalpias molares do ar seco e do vapor de água. A entalpia molar do ar seco é adotada igual a zero no estado de referência $T = 273,15$ K e $P = 101325$ Pa (1 atm) (HYLAND e WEXLER, 1983 A). A entalpia molar do vapor de água é adotada igual a zero nas condições do ponto triplo da água (HYLAND e WEXLER, 1983 B).

Os coeficientes viriais: B_{aa} ; B_{aw} ; B_{ww} ; C_{aaa} ; C_{www} ; C_{aaw} e C_{aww} , são os mesmos definidos no Apêndice A.

Os parâmetros das Equações (D-1); (D-2); (D-3) e (D-4), foram organizados em um programa de computador (Programa C), que possibilita o cálculo da entalpia específica do ar úmido.

```

10 REM: *PROGRAMA C*
20 REM: *ESTE PROGRAMA CALCULA A ENTALPIA DO AR UMIDO EM KJ/KG DE AR UMIDO. OS
PARAMETROS DE ENTRADA SAO: A FRACAO MOLAR DO AR NA MISTURA GASOSA, Xa; A TEMPE
RATURA DO AR ,T (K) E A PRESSAO DA MISTURA GASOSA , P (Pa).*
30 INPUT *XA=",XA
40 XW=1-XA
50 INPUT *T=",T
60 INPUT *P=",P
70 REM: *R E A CONSTANTE UNIVERSAL DOS GASES (Pa.cm^3/mol.K)*
80 R=8.31441*10^8
90 REM: *S E A CONSTANTE UNIVERSAL DOS GASES (J/mol.K)*
100 S=8.31441
110 REM: *BAE E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL, PARA O AR SECO*
120 BAE=.32366097*10^2-((.668772*10^4)/T)-((.210141*10^7)/(T^2))+((.924746*10^8)/(
T^3))
130 REM: *BAW E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA OS EFEITOS DE IN
TERACAO ENTRE UMA MOLECULA DE AR COM UMA DE AGUA*
140 BAW=.32366097*10^2-((.141138*10^5)/T)-((.124454*10^7)/(T^2))-((.234879*10
^10)/(T^4))
150 W=(.7*10^-8)-(.147184*10^-8)*EXP(1734.29/T)
160 REM: *BWW E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL, PARA O VAPOR DE AGUA*
170 BWW=R*T*W
180 REM: *CAA E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL ,PARA O AR SECO*
190 CAA=.125975*10^4-((.190905*10^6)/T)+(.632457*10^8)/(T^2)
200 REM: *CAW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA OS EFEITOS DE
INTERACAO ENTRE DUAS MOLECULAS DE AR COM UMA DE AGUA*
210 CAW=.482737*10^3+((.105678*10^6)/T)-((.656394*10^8)/(T^2))+(.284442*10^11)/(T
^3)-(.319317*10^13)/(T^4)
220 REM: *CAWW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO, EXPRESSA EFEITOS DE IN
TERACAO ENTRE UMA MOLECULA DE AR COM DUAS DE AGUA*
230 CAWW=(-1*10^6)*EXP((-1.0728876*10^2)+(.347802*10^4)/T)-(.383383*10^6)/(T^2
)+(.33408*10^8)/(T^3)
240 WW=(.104*10^-14)-(.335297*10^-17)*EXP(3645.09/T)
250 REM: *CWWW E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL CRUZADO PARA O VAPOR DE AGUA, EX
PRESSA OS EFEITOS DE INTERACAO ENTRE TRES MOLECULAS DE AGUA*
260 CWWW=((R*T)^2)*(WW+WWW)
270 REM: *PAA E A DERIVADA DE BAE EM RELACAO A TEMPERATURA*
280 PAA=(.668772*10^4)/(T^2)+(.420282*10^7)/(T^3)-(2.77424*10^8)/(T^4)
290 REM: *PAW E A DERIVADA DE BAW EM RELACAO A TEMPERATURA*
300 PAW=(.141138*10^5)/(T^2)+(.248907*10^7)/(T^3)+(.939516*10^10)/(T^5)
310 REM: *PWW E A DERIVADA DE BWW EM RELACAO A TEMPERATURA*
320 PWW=R*((.7*10^-8)+(.147184*10^-8)*T*(EXP(1734.29/T))*(1734.29)/(T^2)-EXP(173
4.29/T)*(.147184*10^-8))
330 REM: *PAAE E A DERIVADA DE CAAE EM RELACAO A TEMPERATURA*
340 PAAE=(.190905*10^6)/(T^2)-(1.26493*10^8)/(T^3)
350 REM: *PAAW E A DERIVADA DE CAW EM RELACAO A TEMPERATURA*
360 PAAW=(-.105678*10^6)/(T^2)+(1.31279*10^8)/(T^3)-(.883328*10^11)/(T^4)+(1.277
27*10^13)/(T^5)

```

```

370 REM: *PAWW E A DERIVADA DE CAWW EM RELACAO A TEMPERATURA*
380 PAWW=CAWW*((-.347802*10^-4)/(T^2)+(.766766*10^-6)/(T^3)-(1.00218*10^-8)/(T^4))
390 PWW1=((-.208*10^-14)*T)-((.670594*10^-17)*T)*EXP(3645.09/T)
400 PWW2=((-.335297*10^-17)*(T^2)*EXP(3645.09/T)*(3645.09)/(T^2))
410 PWW3=2*W*(T^2)*(.147184*10^-8)*(EXP(1734.29/T))*(1734.29/T^2)+2*T*(W^2)
420 REM: *PWWW E A DERIVADA DE CWWW EM RELACAO A TEMPERATURA*
430 PWWW=(PWW1+PWW2+PWW3)*R^2
440 REM: *BM E O SEGUNDO COEFICIENTE VIRIAL PARA O AR UMIDO*
450 BM=(XA^2)*BAA+(2*XA*XW*BAW)+(BWW*XW^2)
460 REM: *CM E O TERCEIRO COEFICIENTE VIRIAL PARA O AR UMIDO*
470 CM=(CAA*XA^3)+(3*(XA^2)*XW*CAAW)+(3*XA*(XW^2)*CAWW)+(CWWW*XW^3)
480 REM: *CALCULO DO VOLUME MOLAR DO AR UMIDO POR ITERACAO*
490 VA=30000
500 V=(R*T/P)*((1+(BM/VA)+(CM/(VA^2)))
510 Q=ABS(VA-V)
520 IF Q<.000001 THEN 550
530 VA=V
540 GOTO 500
550 PRINT "V=",V
560 Y1=XA*((.6329087400000004*10^-1)+(1.26709015*10^-2)*T+(1.26431805*10^-2)*(T^2)
)-(.10405863*10^-4)*(T^3)+(1.1668041*10^-7)*(T^4)-(1.97843331*10^-11)*(T^5)-(79
14.1982*10^-14)
570 Y2=XW*((-.5008*10^-2)+(1.32431829*10^-2)*T+(1.6557634500000003*10^-2)*(T^2)-
(.264415*10^-4)*(T^3)+(1.51751789*10^-7)*(T^4)-(1.31541624*10^-10)*(T^5)+35994.2)
580 Y3=((S*T)/V)*(BM-T*(PAA*XA^2+2*XA*XW*PAW+PWW*XW^2))
590 Y4=((S*T)/(V^2))*(CM-.5*T*(PAAA*XA^3+3*XA^2*PAAW*XW+3*(XW^2)*XA*PAWW+PWWW*XW
^3))
600 H=Y1+Y2+Y3+Y4
610 PRINT "H=",H
620 Y=((1-XA)/XA)*18.0153/28.9645
630 REM: Mm E O MOL MEDIO DO AR UMIDO
640 MM=(1+Y)/(1/28.9645+Y/18.0153)
650 PRINT "Mm=",MM
660 REM: H1 E A ENTALPIA DO AR UMIDO EM KJ/KG DE AR UMIDO
670 H1=H/MM
680 PRINT "H1=",H1
690 END

```

APÊNDICE E

DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE GRAOS DE SOJA

A energia consumida na secagem de grãos de soja, operando em LVJ e LE, cujas parcelas foram expressas pelas Equações (VI-4); (VI-5); (VI-13); (VI-14) e pelo Apêndice D, é determinada pelo programa de computador a seguir, Programa D.

```

10 REM: *PROGRAMA D*
20 REM: ESTE PROGRAMA CALCULA A ENERGIA REQUERIDA: NO AQUECIMENTO E DESLOCAMENTO
DO AR DE SECAGEM; NA VIBRACAO DO LEITO DE SOLIDOS E NO AQUECIMENTO DO LEITO
PELO TUBO CENTRAL DO SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO.
30 INPUT *V,DIFERENCA DE POTENCIAL,VOLTS=*,V
40 INPUT *I,INTENSIDADE DE CORRENTE,AMPERES=*,I
50 INPUT *T1,TEMPO DE FLUXO DE AR MINUTOS=*,T1
60 INPUT *T2,TEMPO DE VIBRACAO,MINUTOS=*,T2
70 INPUT *T3,TEMPO DE DISSIPACAO ELETRICA, MINUTOS=*,T3
80 INPUT *T4,TEMPO DE AQUECIMENTO DO AR, MINUTOS=*,T4
90 INPUT *DH,DIF.ENTALPIA DO AR DE SECAGEM,J/KG AR UMIDO=*,DH
100 INPUT *W,TAXA DE MASSA DO AR DE SECAGEM,KG AR UMIDO/MIN,0.74 OU 0.17=*,W
110 INPUT *MS, MASSA MEDIA DE SOJA NO LEITO,KG=*,MS
120 INPUT *W1, FREQUENCIA DE VIBRACAO, RADIANDOS/s=*,W1
130 IF W=.74 THEN 150
140 IF W=.17 THEN 170
150 EF=16.7*60*T1
160 GOTO 180
170 EF=.33*60*T1
180 P=4+MS*.5
190 REM:EV, E A ENERGIA DE VIBRACAO DADA EM JOULES
200 EV=5.65*W1*(.44+P)*T2
210 REM: ED E A ENERGIA DISSIPADA PELO TUBO CENTRAL, JOULES
220 ED=W*1*60*T3
230 REM: CALCULO DA ENERGIA DE AQUECIMENTO DO AR DE SECAGEM,JOULES
240 EA=DH*W*T4
250 REM: ET E O CONSUMO TOTAL DE ENERGIA NA SECAGEM:FLUXO DO AR, VIBRACIONAL, A
QUECIMENTO DO AR E DISSIPADA PELA RESISTENCIA ELETRICA.
260 ET=EF+EV+ED+EA
270 PRINT "      EF          EV          ED          EA          ET"
280 PRINT "      EF          EV          ED          EA          ET"
290 END

```

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 001 - AKIYAMA, T.; NAITO, T.; KANO, T. Vibrated beds of wet particles. Powder Technology, Lausanne, 43(3): 215 - 222. 1986.
- 002 - ASHRAE Handbook - 1985. Fundamentals. Atlanta, ASHRAE, 1985. cap. 6.
- 003 - BAXERRES, J. L.; YOW, Y. S.; GIBERT, H. Etude du séchage de produits alimentaires en couche fluidisée. Lebensmittel - Wissenschaft & Technologie, Zürich, 16(1): 27 - 31. 1983.
- 004 - BEECKMANS, J. M. & MACWILLIAM. Stabilization of a fluidized bed by horizontal vibrations. Powder Technology, Lausanne, 45(2): 177 - 181. 1986.
- 005 - BEMROSE, C. R. & BRIDGWATER, J. A review of attrition and attrition test methods. Powder Technology, Lausanne, 49 (2): 97 - 126. 1987.
- 006 - BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. New York, John Wiley, 1960. 780 p.
- 007 - BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. Westport, AVI, 1974. 265 p.

- 008 - BURR, H. K. & REEVE, R. M. Potatoes. in: - VAN ARSDEL, W.B.;
 COPLEY, M. J.; MORGAN, A. I., Food Dehydration. Westport,
 AVI. 1973. v. 2.
- 009 - CARROL, P. J. & COLIJN, H. Vibrations in solids flow.
 Chemical Engineering Progress, New York, 71(2): 53 - 68. 1975.
- 010 - CARVALHO, N. M.; & ANDREOLI, C. Colheita. in: - MIYASAKA, S.
 & MEDINA, J. C. A soja no Brasil. Campinas, ITAL, 1981.
 p. 686 - 710.
- 011 - CHENG, P. Heat conduction in a packed bed with wall effects.
 International Communication in Heat and Mass Transfer,
 Oxford, 13(1): 11 - 21. 1986.
- 012 - CLAFLIN, J. K. & FANE, A. G. Gas distribution and heat
 transfer in a draft-tube spouted bed. in: - AIChE
 Symposium Series. Fluidization and fluid particle systems:
 Recent Advances, New York, 80(241): 17 - 23. 1984.
- 013 - CLAFLIN, J. K. & FANE, A. G. Spouting with a porous draft-
 tube. The Canadian Journal of Chemical Engineering,
 Ottawa, 61(3): 356 - 363. 1983.
- 014 - DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air
 chaud des produits biologiques solides. Sciences des
 Aliments, Paris, 3(1): 1 - 36. 1983.
- 015 - DANIELSEN, S. & HOVMAND, S. Drying of granulated product
 in a vibrated fluid bed. in: - Drying 80. V. 1. New York,

- 016 - DOLIDOVICH, A. F. & EFREMTSEV, V. S. Experimental study of the thermal granulation process in a spouted bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 454 - 459. 1983 A.
- 017 - DOLIDOVICH, A. F. & EFREMTSEV, V. S. Studies of spouted beds with small outlet-inlet cross-section ratios. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3) : 382 - 389. 1983 B.
- 018 - DOMAGALA, A. Le blanchiment, le sulfitage et le séchage du coupage alimentaire de pommes de terre. Industries Alimentaires et Agricoles, Paris, 101(11): 1117 - 1124 . 1984.
- 019 - DOMAGALA, A. & SZEBIOTKO, K. Échangeurs d'air pour les séchoirs alimentaires de pommes de terre en morceaux. Partie 1: Généralités. Industries Alimentaires et Agricoles, Paris, 103(1 - 2): 15 - 22. 1986 A.
- 020 - DOMAGALA, A. & SZEBIOTKO, K. Échangeurs d'air pour les séchoirs alimentaires de pommes de terre en morceaux. 2^e partie - le projet et la recherche. Industries Alimentaires et Agricoles, Paris, 103(3): 115 - 124 . 1986 B.
- 021 - ENDOH, S. Sorting of particles by inclined vibrating plate. I. Analysis of the motion of particles on an

- inclined vibrating plate. Powder Technology, Lausanne ,
50(2): 103 - 109. 1987.
- 022 - EPSTEIN, N. & GRACE, J. R. Spouting of particulate solids.
in: - FAYED, M. E. & OTTEN, L. Handbook of Powder Science
and Technology. New York, Van Nostrand, 1984. p. 507 -
536.
- 023 - ERDÉSZ, K. & MUJUMDAR, A. S. Hydrodynamic aspects of
conventional and vibrofluidized beds - A comparative
evaluation. Powder Technology, Lausanne, 46(2 - 3): 167 -
172. 1986.
- 024 - FILHO, J. M.; GODOY, O. P.; CÂMARA, G. M. S. in: - Soja,
produção, pré-processamento e transformação agroindustrial
Serie Extensão Agroindustriais - Secretaria da Indústria,
Comércio, Ciência e Tecnologia, São Paulo, 1982, p. 1-51.
- 025 - FINZER, J. R. D. Secagem de fatias de cebola em leite vibro
fluidizado, Tese de mestrado. Campinas, UNICAMP-FEA. 1984.
134 p.
- 026 - FINZER, J. R. D. & KIECKBUSCH, T. G. Desenvolvimento de um
secador de leite vibro-jorrado. I - Estudo da dinâmica do
leite. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Po
rosos, Campinas, 341 - 352. 1986 A.
- 027 - FINZER, J. R. D. & KIECKBUSCH, T. G. Desenvolvimento de um
secador de leite vibro-jorrado. II - Cinética de secagem
de cubos de batata. Anais do XV Encontro Sobre Escoamento

em meios porosos, Uberlândia, II: 416 - 429. 1987.

028 - FINZER, J. R. D. & KIECKBUSCH, T. G. Efeitos da vibração na secagem de fatias de cebola. Anais do II Congresso Latino Americano de Transferência de Calor e Matéria, São Paulo, B: 1545 - 1555. 1986 B.

029 - FINZER, J. R. D. & KIECKBUSCH, T. G. Secagem de anéis de cebola em leito vibro-fluidizado. Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, B: 503 - 512. 1983.

030 - FITO, P. J.; SANZ, F. J.; FLORS, A. Secado de salvado de arroz en lecho vibro-fluidizado. I - Estudio de la fluidización. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos, Valencia, 15(2): 220 - 226 (1975).

031 - FITO, P. J.; SANZ, F. J.; ARANDA, V. Secado de salvado de arroz en lecho vibro-fluidizado. III - Período de velocidade de secado decreciente. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos, Valencia, 17(1): 140 - 147. 1977.

032 - FORNELL, A.; BIMBENET, J. J.; ALMIN, Y. Experimental study and modelization for air drying of vegetable products. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, Zürich, 13 (2): 96 - 100. 1980.

033 - FOUST, A. S. et alii. Princípios das operações unitárias . 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara, 1982. 670 p.

- 034 - FRAGA, A. C.; SILVA, R. F.; SEDIYAMA, T.; THIÉBAUT, J. F. L.; REIS, M. S. Determinação fisiológica das sementes de soja, var. "UFV - 1", em três épocas de semeadura. Anais do II Seminário Nacional de Pesquisa de Soja - EMBRAPA, Brasília, 1: 589 - 601. 1981.
- 035 - GABITTO, J. F. & AGUERRE, R. J. Solución numerica del processo de secado com cambio de volumen. Revista latinoamericana de transferencia de calor y materia, La Plata, 9(3/4): 231 - 240. 1985.
- 036 - GARROTE, R. L.; SILVA, E. R.; BERTONE, R. A. Losses by diffusion of ascorbic acid during water blanching of potato tissue. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, Zürich; 19(3): 263 - 265. 1986.
- 037 - GELDART, D.; HARNBY, N.; WONG, A. C. Fluidization of cohesive powder.. Powder Technology, Lausanne, 37 (1): 25 - 37. 1984.
- 038 - GOENAGA, R. Séchage des solides et des liquides. in: - Techniques de L' Ingénieur, Transfert de chaleur et de matière, Paris. 1965, v. J3.
- 039 - GRACE, J. R. Contacting modes and behaviour classification of gas - solid and other two - phase suspensions. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 64 (3): 353 - 363. 1986.
- 040 - GUPTA, R. & MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics and thermal

characteristics of vibrated fluid beds - a review. in: - Drying
80. V. 1. New York, Hemisphere Publishing, 1980 A. p. 141 - 150.

041 - GUPTA, R. & MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics of a vibrated
fluid bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering,
Ottawa, 58(3): 332 - 338. 1980 B.

042 - GUTMAN, R. G. Vibrated beds of powders: Part I - Theoretical
model for the vibrated bed. Transactions of the
Institution of Chemical Engineers, London, 54 (3): 174 -
183. 1976 A.

043 - GUTMAN, R. G. Vibrated beds of powders: Part II - Heat
transfer in and energy dissipation of a vibrated bed.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers,
London, 54(4): 251 - 257. 1976 B.

044 - HART, F. L.; FISCHER, H. J. Modern food analysis, New York,
Springer-Verlag, 1971. 519 p.

045 - HIMMELBLAU, D. M. Solubilities of inert gases in water ;
0 °C to near the critical point of water. Journal of
Chemical and Engineering Data, Washington, 5(1): 10 - 15,
1960.

046 - HO, T. C.; YAU, S. J.; HOPPER, J. R. Hydrodynamics of
semifluidization in gas-solid systems. Powder Technology,
Lausanne, 50(1): 25 - 34. 1987.

- 047 - HOLLAND, F. A. & CHAPMAN, F. S. Liquid mixing and processing in stirred tanks. London, Reinhold Publishing Corporation, 1966. 319 p.
- 048 - HYLAND, R. W. & WEXLER, A. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173,15 K to 473,15 K. ASHRAE TRANSACTIONS, New York, 89(2): 500 - 513. 1983 A.
- 049 - HYLAND, R. W. & WEXLER, A. Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173,15 K to 473,15 K and of saturated moist air from 173,15 K to 372,15 K, at Pressures to 5 MPa. ASHRAE TRANSACTIONS, New York, 89(2): 520 - 535. 1983 B.
- 050 - HYLAND, R. W. & WEXLER, A. The second interaction (cross) virial coefficient for moist air. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Washington, 77A(1): 133-147. 1973.
- 051 - HUFENUESSLER, M. & KACHAN, G. C. Estudo da viabilidade de desidratação de purê de banana em secador tipo de jorro. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, 6(1): 31 - 41. 1986.
- 052 - JOGRA, L. G.; ARAGÓN, J. M.; CORELLA, J. Fluidized beds with internal screens. I - Study of a two-dimensional bed. International Chemical Engineering, New York, 19(4): 654 - 663. 1979.

- 053 - KEEY, R. B. Drying, principles and practice. Oxford , Pergamon Press, 1972. 358 p.
- 054 - KEEY, R. B. Introduction to industrial drying operations. Oxford, Pergamon Press, 1978. 376 p.
- 055 - KHOE, G. K. & VAN BRAKEL, J. Drying characteristics of a draft tube spouted bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 411 - 418. 1983.
- 056 - KIECKBUSCH, T. G. & FINZER, J. R. D. Desenvolvimento de um secador de leite vibro-jorrado: III - Curvas generalizadas de secagem de cubos de batata. Anais do III Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, Guanajuato, em impressão. 1988.
- 057 - KISAALITA, W. S.; LO, K. V.; STALEY, L. M. A simplified empirical expression for estimating the viscosity of steam/air mixtures. Journal of Food Engineering, England, 5(2): 123 - 133. 1986.
- 058 - KISAKUREK, B.; PECK, R. E; ÇAKALOZ, T. Generalized drying curves for porous solids. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 53(1): 53 - 59. 1975.
- 059 - KONO, H. O.; SOLTANI-AHMADI, A.; SUZUKI, M. Kinetic forces of solid particles in coarse particles fluidized beds. Powder Technology; Lausanne, 52(1): 49 - 58. 1987.

- 060 - KRISCHER, O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Berlin, Springer-Verlag, 1956.
- 061 - KUCHARSKI, J. & KMIEC, A. Hydrodynamics heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61 (3): 435 - 439. 1983.
- 062 - KUENEMAN, R. W. Dehydrated diced potatoes. in: - TALBURT, W. F. & SMITH, O. Potato Processing. Westport, AVI, 1967. p. 412 - 446.
- 063 - KUNII, D. & LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. New York, John Wiley, 1969. 534 p.
- 064 - LANA, E. P.; JOHANSEN, R. H.; NELSON, D. C. Variation in specific gravity of potato tubers. American Potato Journal, Orono, 47(1): 9 - 12. 1970.
- 065 - LAW-KWET-CHEONG, L.; MALHOTRA, K.; MUJUMDAR, A. S. Some aerodynamic and solids circulation measurements in a slotted spouted bed of grains. Powder Technology, Lausanne, 46(2 - 3): 141 - 148. 1986.
- 066 - LeMAGUER, M. & MAZZA, G. An engineering analysis of the drying of carrots in a vibro fluidizer. In: - BRIAN, M. Engineering and food - V. 1., Elsevier Applied Science, 1985. p. 235 - 243.

- 067 - LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Químicas, São Paulo ,
Edgard Blücher, 1974. v. 2.
- 068 - LONCIN, M. Génie industriel alimentaire - Aspects
fondamentaux. Paris, Masson. 1976. 286 p.
- 069 - McCABE, W. L. & SMITH, J. C. Unit operations of chemical
engineering. 3. ed. Tokyo, McGraw-Hill International ,
1976. 1028 p.
- 070 - MAKOWER, B.; CHASTAIN, S. M.; NIELSEN, E. Moisture
determination in dehydrated vegetables - Vacuum oven
method. Industrial and Engineering Chemistry, Washington,
38(7): 725 - 731. 1946.
- 071 - MALHOTRA, K.; LAW-KWET-CHEONG, L; MUJUMDAR, A. S. Pressure-
drop characteristics for vibrated beds of dry and sticky
particles. Powder Technology, Lausanne, 39(1): 101 - 105.
1984.
- 072 - MALHOTRA, K. & MUJUMDAR, A. S. Immersed surface heat
transfer in a vibrated fluidized bed. Industrial
Engineering Chemistry Research, Washington, 26(10): 1983-
1992. 1987.
- 073 - MARKOWSKI, A. & KAMINSKI, W. Hydrodynamic characteristics
of jet-spouted bed. The Canadian Journal of Chemical
Engineering, Ottawa, 61(3): 377 - 381. 1983.

- 074 - MATCHETT, A. J. A friction bond model for the effects of sinusoidal vibrations upon shear stress in particulate systems. Powder Technology, Lausanne, 47(1): 1 - 8. 1986.
- 075 - MATHUR, K. B. Spouted beds. in: - DAVIDSON, J. F. & HARRISON, D. Fluidization. London, Academic Press, 1971. p. 711 - 747.
- 076 - MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted beds. New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- 077 - MAZZA, G. & LeMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. Journal of Food Technology, London, 15(2): 181 - 194. 1980.
- 078 - MELLO, J. D. B. Efeito da vibração mecânica na estrutura de peças fundidas. Tese de mestrado. Campinas, UNICAMP- FEC. 1978. 134 p.
- 079 - MELLOWES, W. A. A vibratory filtration model for candle-type filters. Powder Technology, Lausanne, 43(3): 203 - 212. 1985.
- 080 - MROWIEC, M. & CIESIELCZYK, W. Fluidized - bed dryers for paste materials. International Chemical Engineering, New York, 17(2): 373 - 379. 1977.
- 081 - MUCHOWSKI, E. Heat transfer from the bottoms of vibrated vessels to packings of spheres at atmospheric pressure and under vacuum. International Chemical Engineering, New

York, 20(4): 564 - 576. 1980.

082 - MUCHOWSKI, E. & MÄNNCHEN, E. Heat transfer from the bottoms of vibrated vessels to stirred packings of spheres at atmospheric pressure and under vacuum. International Chemical Engineering, New York, 20(4): 577 - 582. 1980.

083 - MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics, heat transfer and drying in vibrated fluid beds. Latin American Heat and Mass Transfer Conference. Argentina, Nov. 1982. 21 p.

084 - NAGAO, T. The principle of similarity in the mechanics of granular materials. 1. Theoretical foundation. International Chemical Engineering, New York, 26(4): 716-723. 1986.

085 - NAUMAN, E. B. & BUFFHAM, B. A. Mixing in continuous flow systems. New York, John Wiley, 1983. 271 p.

086 - NÉMETH, J.; PALLAI, E.; ARADI, E. Scale-up examination of spouted bed dryers. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 419 - 425. 1983 A.

087 - NÉMETH, J.; PALLAI, E.; PÉTER, M.; TOROS, R. Heat transfer in a novel type spouted bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 406 - 410. 1983 B.

088 - NONHEBEL, G. & MOSS, A. A. H. Drying of solids in the chemical industry. London, Butterworths, 1971. 301 p.

- 089 - NORMAN, W. S. Absorption, distillation and cooling towers. London, Longmans, 1962. 477 p.
- 090 - NOVY, M. G. & KIECKBUSCH, T. G. Secagem de alimentos líquidos em leito vibro-fluidizado contendo inertes. Anais do XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia, II: 430 - 440. 1987.
- 091 - NOYES, R. Food processing review nº 2. Dehydration processes for convenience foods. Pard Ridge, Noyes, 1969.
- 092 - OGIHARA, L. Secagem de milho verde em leito vibro-fluidizado. Tese de Mestrado. Campinas. UNICAMP - FEA. 1989.
- 093 - OWER, E. & PANKHURST, R. C. The measurement of air flow. 5. ed. Oxford. Pergamon Press, 1977. 363 p.
- 094 - PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes: in: - Advances in Drying. Washington, Hemisphere Publishing, 1984. p. 245 - 305.
- 095 - PARRY, J. L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. Journal of Agricultural Engineering Research, London, 32(1): 1 - 29. 1985.
- 096 - PAVARINI, P. J. & COURY, J. R. Granulation of an insoluble powder in a spouted bed. Powder Technology, Lausanne, 53 (2): 97 - 103. 1987.

- 097 - PELEG, M. & NORMAND, M. D. Computer simulation of the attrition patterns of particulated and agglomerated foods. *Journal of Food Science*, Chicago, 52(4): 943 - 947. 1987.
- 098 - PHAN, Q. T. Behaviours of a conical spouted - bed dryer for animal blood. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Ottawa, 61(3): 426 - 434. 1983.
- 099 - PERRY, R. H & CHILTON, C. H. *Chemical Engineers' Handbook*. 5. ed. Tokyo, McGraw-Hill International, 1974.
- 100 - PETER, M.; PALLAI, E.; TERES, P. Heat and mass transfer in a new type of spouted-bed dryer. *Heat Transfer - Soviet Research*, URSS, 14(4): 7 - 14. 1982.
- 101 - RAMASWAMY, H. S. & LO, K. V. Simplified mass transfer relationship for diffusion-controlled air dehydration of regular solids. *Canadian Agricultural Engineering*, Ottawa, 25(1): 143 - 148. 1983.
- 102 - RÁTKAI, G. & TOROS. Hydrodynamic model of the vibro - spouted bed.-I. Velocity profile in the bed. *Chemical Engineering Science*, Oxford. 41(5): 1345 - 1349. 1986.
- 103 - RÁTKAI, G. Hydrodynamic model of the vibro-spouted bed - II. Derivation of pressure from vibratory action, *Chemical Engineering Science*, Oxford, 41(5): 1351 - 1356. 1986.

- 104 - RAY, Y.; JIANG, T.; WEN, C. Y. Particle attrition phenomena in a fluidized bed. Powder Technology, Lausanne, 49(3): 193 - 206. 1987.
- 105 - RE, M. I. & FREIRE, J. T. Secagem de sangue animal em leito de jorro. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 187 - 198. 1986.
- 106 - REID, R. C.; PRAUSNITZ, J. M.; SHERWOOD, T. K. The properties of gases and liquids. 3. ed. New York, McGraw-Hill, 1977. 687 p.
- 107 - RIETEMA, K. Powder, what are they? Powder Technology, Lausanne, 37(1): 5 - 23. 1984.
- 108 - ROBERTS, A. W. Vibration of fine powders and its application in: - FAYED, M. E. & OTTEN, L. Handbook of powder science and technology, New York, Van Nostrand. 1984. p. 181 - 229.
- 109 - ROOT III, W. L. Indirect drying of solids. Chemical Engineering, New York, 90(9): 52 - 64. 1983.
- 110 - ROVERO, G.; BRERETON, C. M. H.; EPSTEIN, N.; GRACE, J. R.; CASALEGNO, L.; PICCININI, N. Gas flow distribution in conical base spouted beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 289 - 296. 1983.
- 111 - SANZ, F. J.; FITO, P. J.; REQUENI, V. Secado de salvado de arroz en lecho vibro-fluidizado. II. Estudio de la cinética

- ca del secado en el período de velocidade de secado constante. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos, Valencia, 17(1): 131 - 139. 1977.
- 112 - SARTORI, M. R. Movimentação e Secagem dos grãos. in: MIYASAKA, S. & MEDINA, J. C. A soja no Brasil. Campinas, ITAL, 1981. p. 776 - 784.
- 113 - SATIJA, S. & ZUCKER, I. L. Hydrodynamics of vibro-fluidized beds. Drying Technology, New York, 4(1): 19 - 43. 1986.
- 114 - SHERWOOD, T. K.; PIGFORD, R. L.; WILKE, C. R. Mass Transfer. Tokyo, McGraw-Hill International. 1975. 677 p.
- 115 - SLOAN, C. E.; WHEELLOCK, T. D.; TSAO, G. T. Drying. Chemical Engineering, New York, 74(19): 167 - 214. 1967.
- 116 - SOBRAL, P. J. A. Secagem de sangue bovino incorporado a proteína texturizada de soja em leito fluidizado e em leito fixo. Tese de mestrado. Campinas, UNICAMP - FEA. 1987. 171 p.
- 117 - SOBRAL, P. J. A. & MENEGALLI, F. C. Secagem de sangue bovino, incorporado a proteína texturizada de soja, em leito fixo. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 144 - 159. 1986.
- 118 - SOWOKINOS, J. R. Maturation of solanum tuberosum. I. Comparative sucrose and sucrose synthetase levels between several good and poor processing varieties. American

- 119 - STEWART, R. B.; JACOBSEN, R. T.; BECKER, J. H. Formulations for thermodynamic properties of moist air at low pressures as used for construction of new ASHRAE SI unit psychrometric charts. ASHRAE TRANSACTIONS, New York, 89 (2): 536 - 548. 1983.
- 120 - STRUMILLO, C. & PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. in: - Drying 80. v. 1. New York, Hemisphere Publishing, 1980. p. 211 - 226.
- 121 - SULLIVAN, C.; BENKRID.; CARAM, H. Prediction of solids circulation patterns in a spouted bed. Powder Technology, Lausanne, 53(3): 257 - 271. 1987.
- 122 - SUZUKI, K.; FUJIGAMI, A.; YAMAZAKI, R.; JIMBO, G. Characteristics of vibro-fluidized bed for drying of wetted and agglomerated particles. Journal of Chemical Engineering of Japan, Tokyo, 13(6): 495 - 498. 1980 C.
- 123 - SUZUKI, K.; FUJIGAMI, A.; YAMAZAKI, R.; JIMBO, G. Some investigations of falling rate period of vibro-fluidized bed drying. Journal of Chemical Engineering of Japan, Tokyo, 13(6): 493 - 495. 1980 B.
- 124 - SUZUKI, K.; HOSAKA, H.; YAMAZAKI, R.; JIMBO, G. Drying characteristics of particles in a constant drying rate period in vibro-fluidized bed. Journal of Chemical Engineering of Japan, Tokyo, 13(2): 117 - 122. 1980 A.

- 125 - SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, Chicago, 41(5): 1189 - 1193. 1976.
- 126 - TAKEUCHI, T.; NAGAO, T.; HATAMURA, Y.; NAKAJIMA, N. The principle of similarity in the mechanics of granular materials. 2. Experimental confirmation using small - and medium-scale silos. *International Chemical Engineering*, New York, 27(2): 268 - 280. 1987.
- 127 - THERON, M. Industries de transformation de la pomme de terre. *Industries Alimentaires et Agricoles*, Paris, 99 (12): 1111 - 1115. 1982.
- 128 - THOMAS, B.; LIU, Y. A.; CHAN, R.; SQUIRES, A. M. A method for observing phase-dependent phenomena in cyclic systems: Application to study of dynamics of vibrated beds of granular solids. *Powder Technology*, Lausanne, 52(1): 77 - 92. 1987.
- 129 - THOMAS, B.; LIU, Y. A.; MASON, M. O.; SQUIRES, A. M. Vibrated beds: New tools for heat transfer. *Chemical Engineering Progress*, New York, 84(6): 65 - 75. 1988.
- 130 - THOMSON, W. T. *Theory of vibration with applications*. 2. ed. New Jersey, Prentice-Hall, 1972. 467 p.
- 131 - TREYBAL, R. E. *Mass transfer operations*. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 1968. 717 p.

- 132 - VANDERSCHUREN, J. & DELVOSALLE, C. Particle-to-particle heat transfer in fluidized bed drying. Chemical Engineering Science, Oxford, 35(8): 1741 - 1748. 1980.
- 133 - VANECEK, C.; MARKVART, M.; DRBOHLAV, R. Fluidized bed drying. London, Leonard Hill, 1966. 195 p.
- 134 - VIOLLAZ, P. Difusion en sistemas con encogimiento multidireccional. Revista latinoamericana de Ingenieria y quimica y quimica aplicada, La Plata, 17(3): 315 - 326 . 1987.
- 135 - VIOLLAZ, P. SUAREZ, C. Drying of shrinking Bodies. American Institute of Chemical Engineers Journal, New York, 31(9): 1566 - 1568. 1985.
- 136 - VISWANATHAN, K.; LYALL, M. S.; RAYCHAUDHURI, B. C. Spouted bed drying of agricultural grains. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 64(2): 223 - 232. 1986.
- 137 - WEISS, P. J. & MEISEN, A. Laboratory studies on sulphur - coating urea by the spouted bed process. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, 61(3): 440 - 447. 1983.
- 138 - WEN, C. Y.; FAN, L. T. Models for flow systems and Chemical reactors, New York, Marcel Dekker, 1975. 570 p.
- 139 - WONG, P. F. Y. & KO, N. W. M.; YIP, P. C. Mass transfer from large diameter vibrating cylinders. Transactions of

the Institution of Chemical Engineers, London, 56(3): 214
- 216. 1978.

140 - YAMAZAKI, R. & JIMBO, G. Heat transfer between fluidized
beds and heated surfaces. Journal of Chemical Engineering
of Japan, Tokyo, 3(1): 44 - 49. 1970.