


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Parecer

Este exemplar corresponde a recda  
com final da tese defendida por  
Paulo José do Amaral Sobral e  
aprovada pela comissão julgadora  
em 14.08.87.

Campinas, 14 de agosto de 1987

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Banca

SECAGEM DE SANGUE BOVINO INCORPORADO A  
PROTEÍNA TEXTURIZADA DE SOJA, EM LEITO  
FLUIDIZADO E EM LEITO FIXO

Paulo José do Amaral Sobral  
Engenheiro de Alimentos

Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli  
Orientadora

11/87

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

Campinas (SP), 1987

"No invólucro da Natureza que és tu mesma, coberto da tua  
[pele que é a minha própria - oh mulher,  
[espécie adorável da poesia eterna!"

Vinicius de Moraes

A Patrícia, minha mulher e companheira,  
pelo apoio, compreensão e carinho, e à  
Gabriela, minha filha, que na sua efêmera  
passagem deixou marcas permanentes,  
dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli, pela dedicação e apoio na orientação deste trabalho.

Ao então acadêmico Francisco Iguti, pelo trabalho de determinação das isotermas e pelo auxílio na montagem dos equipamentos.

Ao Prof. Dr. Contreras-Guzmán e à Judite, pelo apoio nas análises de proteínas.

Aos colegas da turma de 84, pelos bons momentos e pelas sugestões, em especial ao Róger, pela concessão do programa psicrométrico.

Ao Eng. Wilson S. Cury, pela confecção dos gráficos.

Ao Frigorífico Angelielli, pela concessão do sangue, e à SANBRA S.A., pela PTS.

Ao CNPq, à FAPESP e à UNICAMP, pelo auxílio financeiro.

A Associação Brasileira da Indústria da Alimentação (ABIA), pelo fornecimento das cópias.

## RESUMO

Estudou-se a cinética de secagem de um produto constituído de sangue bovino (s) absorvido em proteína texturizada de soja (PTS), em leito agito-fluidizado e em leito fixo. No leito fluidizado, estudou-se a influência da temperatura (60-100°C), da vazão do ar (1,4-2,5 kg/m<sup>2</sup>s), da agitação (0-60 rpm) e da umidade inicial (1:1 e 1:2 de PTS/s) em amostras pré-secas. No leito fixo se estudou a influência da temperatura (60-80°C) e da umidade inicial (1:1, 1:2 e 1:3), com vazões de ar em torno de 1,8 kg/m<sup>2</sup>s.

Também foram feitos estudos da variação do tamanho, e da densidade aparente, das partículas, durante a secagem em leito fluidizado, observando-se que essas propriedades diminuíram linearmente com a redução da umidade.

A secagem, nos dois leitos, ocorreu no período de taxa decrescente, mesmo com altas umidades (1:3). Para se analisar o fenômeno, integrou-se numericamente a segunda lei de Fick, considerando-se o encolhimento das partículas e a variação da difusividade aparente durante a secagem, pelo método de Murray e Landis. Para se representar as curvas de secagem, utilizou-se a equação de Page (empírica), obtendo-se bons ajustes, com coeficientes de correlação acima de 98%.

As análises químicas demonstraram que os produtos apresentam entre 64 e 72% (bs) de proteínas, e que a solubilidade das mesmas foi preservada em boas proporções após a secagem. Observou-se que a solubilidade é função do tratamento térmico e do teor de sangue nas amostras.

## SUMMARY

The drying kinetics of a product made of bovine blood absorbed on a texturized soy protein was studied in both a stirred fluidized bed and a fixed bed dryer. In the fluidized bed dryer the influence of temperature (60-100°C), air flow rate (1,4-2,5 Kg/m<sup>2</sup> s), agitation (0-60 rpm) and initial moisture content (1:1 and 1:2 PTS/s) were studied. For the fixed bed the influence of temperature (60-80°C) and initial moisture content (1:1, 1:2, 1:3) were determined maintaining the air flow around 1,8 Kg/m<sup>2</sup> s.

Studies with respect to the size distribution and the particle bulk density during the drying in fluidized bed showed a linear decay with the decrease of the moisture content.

The drying occurred in the falling rate-period, in both beds, even at high moisture content (1:3). To analyse the phenomenon, a numerical integration of the Fick's second law of diffusion was performed using Murray-Landis method. The shrinkage of the particle and a variation of the effective diffusivity during the drying were considered.

The drying curves also were correlated by Page's equation, with a correlation coefficient greater than 98%.

The product showed a high protein content (64-72%). The drying experiments conclude that protein solubility was preserved and that thermal injury increased with temperature and blood content.

## NOMENCLATURA

- $A_o$  - área do orifício da placa de orifício ( $\text{cm}^2$ );  
 $C_p$  - capacidade calorífica ( $\text{Kcal/kg}^\circ\text{C}$ );  
 $d_b$  - diâmetro do bocal (cm);  
 $d_o$  - diâmetro do orifício da placa de orifício (cm);  
 $\overline{d_p}$  - diâmetro médio das partículas (mm);  
 $\overline{d_{pf}}$  - diâmetro médio das partículas secas (mm);  
 $d_{pn}$  - diâmetro da abertura da peneira n (mm);  
 $d_t$  - diâmetro do tubo condutor do ar (cm);  
 $D_{ap}$  - difusividade aparente ( $\text{mm}^2/\text{min}$ );  
 $D_{ap}(X)$  - difusividade aparente função da umidade  
 $(\text{mm}^2/\text{min})$ ;  
 $D_{apo}$  - difusividade aparente inicial ( $\text{mm}^2/\text{min}$ );  
 $D_{vg}$  - difusividade do vapor de água no ar ( $\text{m}^2/\text{h}$ );  
 $e_p$  - espessura da placa de orifício (mm);  
 $\epsilon_l$  - porosidade do leito;  
 $\epsilon_p$  - porosidade da partícula;  
 $G$  - vazão mássica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ );  
 $h$  - coeficiente de transferência de calor ( $\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ );  
 $H$  - altura do líquido manométrico (mm);  
 $k$  - condutividade térmica ( $\text{Kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ );  
 $kg$  - coeficiente de transferência de massa ( $\text{m}/\text{s}$ );  
 $kp$  - coeficiente de transferência de massa ( $\text{m}^{-1}$ );  
 $L_o$  - altura inicial do leito (cm);  
 $\lambda$  - calor latente de vaporização ( $\text{Kcal}/\text{Kg}$ );  
 $m$  - coeficiente de partição;  
 $\mu_g$  - viscosidade do ar (cp);

$N$  - rotações do agitador (rpm);  
 $N_a$  - fluxo mássico ( $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ );  
 $P_b$  - pressão barométrica (mmHg);  
 $P_{vo}$  - pressão parcial do vapor de água no ar de secagem (mmHg);  
 $P_{vs}$  - pressão de vapor da água na superfície das partículas (mmHg);  
 $r$  - coordenada radial (mm);  
 $r_p$  - raio da partícula (mm);  
 $r_{po}$  - raio inicial da partícula (mm);  
 $R$  - taxa de secagem ( $\text{ga/gss s}$ );  
 $\rho_{ap}$  - densidade aparente das partículas ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $\rho_f$  - densidade de um fluido ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $\rho_g$  - densidade do ar ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $\rho_m$  - densidade do líquido manométrico ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $\rho_p$  - densidade das partículas ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $t$  - tempo (min);  
 $T_{bu}$  - temperatura de bulbo úmido do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_e$  - temperatura da emulsão sólido-ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_g$  - temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_o$  - temperatura do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_p$  - temperatura do sólido durante a secagem ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_s$  - temperatura do ar de saída de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $U_g$  - velocidade do ar (m/s);  
 $U_{mf}$  - velocidade de mínima fluidização (m/s);  
 $UR$  - umidade relativa do ar;  
 $UR_o$  - umidade relativa do ar de secagem;

$V_p$  - volume das partículas (mm<sup>3</sup>);  
 $V_{po}$  - volume inicial das partículas (mm<sup>3</sup>);  
 $\dot{V}$  - vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);  
 $V_p$  - vazão padrão do ar (m<sup>3</sup>/s);  
 $V_r$  - vazão real do ar (m<sup>3</sup>/s);  
 $W_o$  - massa inicial da amostra no secador (g);  
 $W_e$  - massa de elutriado recolhida (g);  
 $x_i$  - fração mássica retida da i-ésima peneira;  
 $x$  - umidade (g água/g sólidos secos (ga/gss));  
 $x_s$  - umidade na superfície das partículas (ga/gss);  
 $X$  - umidade média das partículas (ga/gss);  
 $X_c$  - umidade média crítica (ga/gss);  
 $X_e$  - umidade média do elutriado (ga/gss);  
 $X_o$  - umidade média inicial das partículas (ga/gss);  
 $X_s$  - umidade média da superfície das partículas (ga/gss);  
 $X^*$  - umidade média de equilíbrio (ga/gss);  
 $Y_o$  - umidade absoluta do ar (g vapor/Kg ar seco);

#### Números adimensionais

$Bi$  - número de Biot de massa  $\left(\frac{kg}{rpo} \cdot \frac{rpo}{D_{ap} \cdot m}\right)$ ;  
 $Fo$  - número de Fourier de massa  $\frac{D_{ap}(X) \cdot t}{rpo}$ ;  
 $Fo'$  - número de Fourier de massa modificado  $\frac{D_{apo} \cdot t}{rpo}$ ;  
 $Ga$  - número de Galileu  $\left(\frac{dp \cdot g \cdot \rho_g (\rho_{ap} - \rho_g)}{\mu_g}\right)$ ;

$Jd$  - fator de Chilton-Colburn de transferência de massa

$-1 -1/3$   
 (Sh Re Sc ) ;



Jh - fator de Chilton-Colburn de transferência de calor

$$\frac{-1}{(\text{Nu Re Pr})^{1/3}};$$

M - unidade residual  $(x - X^*) / (X_o - X^*)$ ;

$\bar{M}$  - unidade residual média  $(X - X^*) / (X_o - X^*)$ ;

$\bar{M}_s$  - unidade residual média da superfície das partículas  
 $(X_s - X^*) / (X_o - X^*)$ ;

Nu - número de Nusselt  $(h d / k)$ ;

Pr - número de Prandtl  $\left(\frac{\mu_o C_p}{k}\right)$ ;

Re - número de Reynolds  $(\rho_g U_g d / \mu_g)$ ;

Remf - número de Reynolds modificado de mínima fluidização  
 $(\rho_g U_{mf} d_p / \mu_g)$ ;

Reo - número de Reynolds do orifício  $(\rho_g U_g d_o / \mu_g)$ ;

Rep - número de Reynolds modificado  $(\rho_g U_g d_p / \mu_g)$ ;

Rep' - número de Reynolds modificado  $\left(\frac{\rho_g U_g d_p}{\mu_g (1 - \epsilon_p)}\right)$

S - coordenada radial adimensional  $(r / r_{po})$ ;

Sp - raio da partícula  $(r_p / r_{po})$ ;

Sc - número de Schmidt  $\left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_{vg}}\right)$ ;

Sh - número de Sherwood  $(k_g d_p / D_{vg})$ ;

## ÍNDICE

I	Introdução.....	1
II	Revisão bibliográfica.....	3
	II.1 Sangue bovino.....	3
	II.2 Proteína texturizada de soja.....	10
	II.3 Sangue incorporado à proteína texturizada de soja....	13
	II.4 Secagem de alimentos.....	15
	II.4.1 Teorias de secagem.....	16
	II.4.2 Efeitos da secagem nas propriedades físicas dos alimentos.....	27
	II.4.3 Efeitos da secagem na qualidade proteica dos alimentos.....	29
	II.5 Secagem de alimentos em leite fluidizado.....	30
	II.5.1 Fluidização de alimentos.....	31
	II.5.2 Estudos de secagem em leite fluidizado.....	34
III	Desenvolvimento experimental.....	37
	III.1 Preparo da matéria prima.....	37
	III.2 Secagem em leite fluidizado.....	38
	III.2.1 Descrição dos equipamentos.....	38
	III.2.2 Operação dos equipamentos.....	43
	III.2.3 Ensaios para o estudo da variação de proprieda- des físicas durante a secagem.....	47
	III.3 Secagem em leite fixo.....	48
	III.3.1 Descrição dos equipamentos.....	48
	III.3.2 Operação dos equipamentos.....	50

III.4	Determinação de umidade das amostras.....	51
III.5	Avaliação e caracterização dos produtos.....	52
III.5.1	Produtos obtidos em leite fluidizado.....	53
III.5.1.1	Análise da distribuição de tamanhos...	53
III.5.1.2	Determinação da densidade aparente das partículas.....	55
III.5.2	Avaliação da qualidade proteica dos produtos.	56
IV	Análise dos resultados.....	59
IV.1	Ensaio preliminares e pré-secagem.....	59
IV.2	Cinética de secagem em leite fluidizado.....	62
IV.2.1	Influência da agitação na secagem.....	67
IV.2.2	Repetitividade dos ensaios de secagem.....	69
IV.2.3	Influência da vazão do ar na secagem.....	69
IV.2.4	Influência da temperatura na secagem.....	71
IV.2.5	Influência da umidade inicial na secagem.....	72
IV.3	Cinética de secagem em leite fixo.....	73
IV.3.1	Influência da temperatura na secagem.....	76
IV.3.2	Influência da umidade inicial na secagem.....	78
IV.4	Variação de propriedades físicas durante a secagem em leite fluidizado.....	79
IV.4.1	Variação do volume das partículas.....	80
IV.4.2	Variação da densidade aparente das partículas.	83
IV.5	Distribuição de tamanhos dos produtos obtidos em leite fluidizado.....	86
IV.6	Qualidade proteica dos produtos.....	89
V	Representação matemática da cinética de secagem em leite flui- dizado e em leite fixo.....	91

V.1 Utilização de uma equação empírica.....	94
V.2 Utilização da segunda lei de Fick.....	98
VI Conclusões.....	114
Apêndices.....	117
A - Isotermas de sorção.....	117
B - Calibração da placa de orifício e dos termopares.....	120
B.1 Resultados da calibração da placa de orifício....	120
B.2 Resultados da calibração dos termopares.....	124
C - Integração numérica da segunda lei de Fick.....	126
C.1 Formulação matemática.....	126
C.2 Utilização do método para a determinação da difu- sividade aparente.....	129
D - Resultados experimentais.....	135
Referências bibliográficas.....	160

## Capítulo I

### INTRODUÇÃO

De um modo geral, no Brasil, os frigoríficos matadouros de bovinos desprezam o sangue como subproduto. Em alguns lugares o sangue é aproveitado na graxaria junto com as vísceras, cabeças, etc, na fabricação de farinhas, para uso em ração animal, em outros, o sangue é jogado fora, provocando poluição ambiental.

O sangue, por suas propriedades nutritivas, pode ter uma maior aplicação na alimentação humana. A grande resistência ao uso do sangue não estaria no consumidor dos produtos finais, mas em restrições impostas pelas indústrias, como os custos de coleta higiênica, de conservação refrigerada e o de secagem. Para reverter essa situação, é necessário desenvolver técnicas simples e baratas que estimulem o aproveitamento do sangue a nível de abatedouros.

Por outro lado, a proteína texturizada de soja (PTS) tem enorme difusão nas indústrias de alimentos, sobretudo nas de produtos cárneos, que teriam um maior potencial de uso do sangue bovino. A combinação do sangue bovino com a PTS amplia o seu potencial de uso nas indústrias de alimentos, seja com a finalidade de proteinizar, seja com a de fortificar com ferro orgânico, produtos formulados. Importante é, também, a possibilidade de secagem dessa mistura com tecnologias mais simples, e portanto, mais baratas.

Além do desenvolvimento tecnológico, esta pesquisa visa o estudo da secagem de materiais biológicos, analisando-se as cinéticas do processo, considerando-se não apenas os parâmetros externos, mas também o encolhimento das partículas, além de avaliar o efeito do tratamento térmico sob os produtos, em dois leitos diferentes.

Considerando-se que este trabalho envolve PTS e sangue, leite fixo e leite fluidizado, além dos efeitos da secagem sobre as características dos produtos, fêz-se uma revisão bibliográfica abrangendo cada um desses itens, que se encontra no capítulo II.

No capítulo III (desenvolvimento experimental) se encontram os materiais, e os métodos, utilizados em todos os ensaios.

No capítulo IV são apresentados os resultados qualitativos das cinéticas de secagem nos dois leitos e dos estudos dos produtos durante e após a secagem. O capítulo V foi dedicado à representação matemática dos processos, através de uma equação empírica e através da integração numérica da segunda lei de Fick. Nesse item se aborda a influência do encolhimento das partículas e a variação da difuzividade aparente durante a secagem.

As isotermas de sorção e os resultados das calibrações da placa de orifício e dos termopares são apresentados nos apêndices A e B, respectivamente. No apêndice C se apresenta detalhadamente, a formulação matemática, com todas considerações envolvidas, necessária à integração numérica da equação da difusão. E por fim, no apêndice D, estão todos resultados experimentais tabelados.

## Capítulo II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### II.1 Sangue bovino

O sangue é uma solução coloidal, constituída de um alto teor de proteínas diversas, enzimas, células, sais, lipídeos, compostos nitrogenados de baixo peso molecular, glicose e vitaminas, mantidas em suspensão (Piske(1982)). Ele faz parte da constituição de todo ser vivo superior e desempenha funções vitais na homeostase.

O sangue é constituído por duas frações: a plasmática e a celular. A fração celular, composta pelas hemáceas, é de intensa pigmentação vermelha causada pela hemoglobina. A fração plasmática, constituída pelo plasma, é de coloração clara, transparente e também é rica em proteínas. Quando o sangue coagula, elementos plasmáticos e celulares formam o coágulo e o líquido claro remanescente é o soro.

O abastecimento de nutrientes para a humanidade é um problema vital, em vista da manifesta carência de proteínas. Cientistas de vários países sugerem pesquisas de novas fontes de proteínas a partir de processos microbiológicos ou de síntese química, e de fontes insuficientemente exploradas (Piske(1982)). Produção de

proteínas de unicelulares, extração de proteínas de sementes e de outras partes das plantas, tem atraído muito interesse. Entretanto, uma fonte de proteínas potencialmente maior, o sangue de animais abatidos sob inspeção sanitária, é negligenciado (Wisner-Pedersen(1979)).

Segundo Quaglia e Alessandrini(1977), a composição química do sangue de bovinos é a seguinte (em g/l): proteínas, 194,0; lipídeos, 1,8; glicídeos, 1,0; e sais minerais, 9,0. Nota-se que o sangue apresenta maior riqueza em proteínas que o leite de vaca, mas que pode variar com a idade, sexo e alimentação dos animais. O teor médio de proteínas é considerado 18% por Wisner-Pedersen(1979) e por Piske(1982). O teor de sólidos totais varia entre 15% e 20%, segundo Quaglia e Alessandrini(1977), e entre 18% e 21%, segundo Fernando(1982). Langhoff(1980) cita que o conteúdo de matéria seca é de cerca de 18%. Ré e Freire(1986) trabalharam com sangue contendo 16% de sólidos.

A proteína do sangue é de boa qualidade, apresentando uma composição em aminoácidos essenciais comparável com a das proteínas da carne bovina, ovo e leite. O sangue é rico em lisina, mas deficiente em isoleucina e metionina. Essa deficiência é pequena e pode ser eliminada através de conjugação com outras proteínas ricas nesses dois aminoácidos essenciais.

O sangue não é só fonte de proteínas, mas também, fonte de ferro de alta assimilação, ferro heme. Na tabela 01 é apresen-



tado teores de ferro em alguns alimentos considerados ricos em ferro, para comparação (Ré e Freire(1986)). Pode-se notar a superioridade do teor de ferro do sangue.

Tabela 01. Conteúdo de ferro de vários alimentos.

	++
	Fe(mg Fe /100 gss)
Sangue	221,2
Levedura de cerveja	18,2
Farinha de soja	13,0
Aveia	7,9
Feijão	6,9
Cajú	5,0
Castanha do Pará	3,4
Ovo integral	2,7

Apesar do seu potencial nutritivo, a quantidade de sangue integral destinada ao consumo humano é muito restrita. Na Itália, a produção de 86.000 toneladas de sangue é sub-utilizada, porém, na Suécia, a sua utilização é de 80% da produção (Quaglia e Alessandrini(1977)). Na França, a produção média é de 190.000 ton/ano, das quais 67% não é recuperada (Tessier(1980)). Graham(1978) afirma que apenas uma pequena parte de sangue é utilizada da produção australiana de 80.000 ton/ano, e que na URSS o processamento de sangue é mais extenso para uso na indústria farmacêutica. A produção de sangue inspecionado no Brasil, em 1979, foi de 100 milhões de litros, isto é, de 18 mil toneladas de proteínas (Piske(1982)).

Por causa de sua cor, o sangue tem pouco uso como ingrediente de produtos alimentares. Mesmo pequena quantidade de sangue

dá uma coloração amarronzada aos produtos, quando tratados termicamente. Por isso, o plasma tem utilização mais ampla nas formulações de produtos cárneos, como salsichas, presuntos, patês e hambúrgueres, além de uso em sopas, na panificação e confeitaria, pois possui boas propriedades funcionais e não altera as características organolépticas do produto final. Para a utilização do plasma, a fração celular tem que ser separada, carregando consigo a maior parte das proteínas do sangue. Segundo Wismer-Pedersen (1979), em média, 100 kg de sangue contém 66 kg de plasma, que possui 8% da proteína (5,3 kg), enquanto que, 33 kg da fração celular contém 35% da proteína (11,6 kg). A diferença de um quilograma é devido ao anticoagulante.

O sangue tem encontrado aplicações na indústria química e farmacêutica. Tem sido usado como fertilizantes e na nutrição animal. Faz-se necessário então, ampliar a utilização do sangue na alimentação humana, o que contribuiria na suplementação proteica, além de reduzir a poluição de efluentes e aumentar a eficiência da indústria. As proteínas do sangue integral também tem boas propriedades funcionais, como capacidade de emulsificação e de retenção de água, que permitem ampliar a sua utilização.

Dois pré-requisitos para a utilização do sangue em alimentos devem ser considerados: a coleta higiênica, que minimiza a sua contaminação; e o aproveitamento de sangue exclusivo de animais sadios e inspecionados pela inspeção sanitária.

Existem duas alternativas para se coletar o sangue higie-  
nicamente: o sistema aberto e o sistema fechado. No primeiro, que  
é tradicional para a coleta de sangue comestível, o sangue é cole-  
tado mediante vasilhas especiais colocadas diretamente contra o  
corte do animal, evitando-se o seu contato com a pele, para redu-  
zir os níveis de contaminação. No sistema fechado, utiliza-se fa-  
cas especiais de sangria. A faca é introduzida diretamente no sis-  
tema arterial, e o sangue flui através de um tubo plástico de grau  
alimentício, ao recipiente devidamente higienizado, contendo ou  
não, anticoagulante, dependendo da finalidade do sangue. O anti-  
coagulante mais utilizado é o citrato de sódio a 0,5% do volume do  
sangue. Esses dois métodos, com variações, e outros, são amplamen-  
te discutidos na literatura por Akers(1973), Graham(1978), Wismer-  
Pedersen(1979), Langhoff(1980), Piske(1982) e Contreras Guz-  
mán(1984a).

O sangue coletado, devido a sua riqueza biológica, sofre  
facilmente deteriorização química, enzimática e microbiológica.  
Logo, se o sangue não for destinado imediatamente ao processamen-  
to, ele deve ser submetido à um tratamento que pode ser baseado na  
utilização de substâncias químicas, no abaixamento da temperatura  
ou na remoção de água.

Segundo Piske(1982), a estabilização química pode ser  
usada em caso de armazenamento eventual, por curto período de tem-  
po. Contreras Guzmán(1984a) estudou a conservação do plasma com

sacarose, cloreto de sódio e com ácido acético, e concluiu que a conservação com esses aditivos só é eficiente à baixa temperatura. Por outro lado, a conservação de sangue em baixa temperatura é um método caro, que exige investimentos na área de armazenagem. O último método, que é a remoção de água, pode ser feito por vários processos: evaporação a baixa temperatura, ultrafiltração, osmose inversa e secagem.

Langhoff(1980) apresenta um fluxograma produzido pela Nitro Atomizer A/S, no qual o plasma e a fração celular descolorida podem ser concentrados em evaporadores de filme descendente, até 28% de matéria seca, ou em um concentrador RTC rotativo, chegando até a 35% de sólidos.

Fernando(1981) concentrou sangue bovino de 18-20% de sólidos totais até 28-30%, com ultrafiltração, concluindo que a ultrafiltração oferece menores custos de operação e de capital, quando comparado com a evaporação a vácuo num simples efeito. Tessier(1980), concentrou plasma de sangue bovino por ultrafiltração e por osmose inversa, e observou que ocorreu maior perda de sais no ultrafiltrado que no resíduo da osmose reversa.

Para a obtenção de farinha de sangue por secagem, o sangue é coagulado, o coágulo é separado do soro e seco (Quaglia e Alessandroni(1977)). Waibel e col.(1977) apresentam outro método para a fabricação de farinha de sangue convencional: o sangue é agitado num cilindro com camisa de vapor, à temperatura acima de

165°C, por 10-12 horas, dando um produto de baixa qualidade proteica, devido a perda de lisina em até 57% da lisina total inicial.

Com o objetivo de se melhorar a qualidade dos produtos secos, vários trabalhos foram feitos. Akers(1973) cita o trabalho de D.P. Haughey para reduzir a perda de proteína na secagem de sangue, pelo uso de um leito fluidizado com grânulos de sangue seco, suspensos na corrente de ar quente, sobre os quais o sangue líquido era atomizado. Graham(1978) relata que na Suécia se fabrica secadores em leito fluidizado com leito de inertes (esferas de plástico), para secar plasma e a fração celular. O princípio do leito de inertes também foi utilizado em secadores tipo leito de Jorro para secar sangue, por Pham(1983) e Ré e Freire(1986), fornecendo produtos de boa qualidade. Quaglia e Alessandrini(1977) e Langhoff(1980), relatam que o sangue, o plasma e a fração celular são secos em secadores atomizadores, conservando boa qualidade.

Os resultados obtidos com essas novas técnicas permitem que se amplie a utilização do sangue integral, principalmente em produtos cárneos, aumentando-lhes o valor nutritivo em proteínas e em ferro, sem que se esteja adicionando algum ingrediente estranho nos produtos, pois a carne bovina possui sangue naturalmente, em 0,3% do peso da carne fresca (Piske(1982)).

## II.2 Proteína texturizada de soja

A texturização envolve um reestruturamento das moléculas de proteínas, formando camadas alinhadas, resistentes à ruptura sob aquecimento e/ou processamento (Harper(1986)). Rakosky, Jr.(1970), Cumming e col.(1972), Campbell(1981) e Kazemzadeh e col.(1982), descrevem os dois principais métodos para a fabricação de proteínas texturizadas: método de esponja e extrusão termoplástica.

No método de esponja, as proteínas são tratadas em solução alcalina forte, causando conversão das proteínas globulares nativas em cadeias parcialmente dissociadas. A espuma formada é acidificada e forçada a passar através de uma matriz que alinha as cadeias de proteínas, formando o produto texturizado.

O método da extrusão termoplástica consiste em fazer passar a massa de proteína globular, umidificada até 22,5% (bu), numa matriz, sob o efeito de uma rosca sem fim, em alta temperatura e em alta pressão. Quando isso ocorre, a água contida na massa proteica se evapora rapidamente, devido à alta diferença de pressão, causando uma expansão no material, que adquire uma estrutura fibrosa e porosa. A texturização é causada pelos efeitos conjuntos do cisalhamento, calor e pressão, dentro do extrusor (Aguilera e col.(1976)). O produto deixa o extrusor com 19% (bu) de umidade e é seco em secadores tipo túnel, em temperatura de 127°C, até atingir 8% (bu) (Brian(1976)). O extrusor é descrito em vários trabalhos, como os de Aguilera e col.(1976) e Harper(1986).

A maioria da proteína texturizada de soja (PTS), é produzida por extrusão da farinha desengordurada de soja (Wood e Franklin(1974) e Brian(1976)), porém, também se texturiza isolados e concentrados proteicos de soja. Wolf(1970) e Rakosky, Jr.(1970) descrevem as operações para a obtenção dos três diferentes produtos de soja, e os diferenciam quanto o teor de proteínas: farinha, de 40% a 50%; concentrado, por volta de 70%; e isolado, com mais de 90% de proteínas.

A PTS obtida de farinha desengordurada apresenta a seguinte composição, em base seca: proteína, 56,6%; carboidratos, 32,5%; cinzas, 6,5%; fibras, 3,3% e gordura, 1,0% (Wood e Franklin(1974)). O teor de gordura da PTS se compara com o da carne bovina fresca, enquanto que o teor de carboidratos da PTS é consideravelmente maior que o da carne e menor que o do leite em pó. As proteínas de soja apresentam deficiência em metionina (Wolf(1970) e Rakosky, Jr.(1970)).

A grande utilização industrial dos produtos de soja não se deve apenas, ao seu potencial nutritivo, mas sobretudo, às seguintes vantagens: eles têm propriedades de emulsificação e de ligação; as proteínas de soja têm a capacidade de reter o suco na carne, especialmente no cozimento; e por último, são de baixo custos (Rakosky, Jr.(1970)). A PTS tem as mesmas propriedades funcionais das matérias primas, além de poder absorver até, três vezes o seu peso em água.

A PTS é utilizada em análogos de carnes, atuando como extensor em produtos de carne moída. Nesses produtos, a PTS confere uma textura desejável, contribui com o valor nutricional e melhora as propriedades funcionais, implicando em estabilidade durante a estocagem (Tuohy(1980)). Dentre os produtos de carne que utilizam a PTS, estão as salsichas e hamburques. Também é utilizada em sopas, como recheios de tortas de frutas e em produtos de peixe, como patês e risoles (Wood e Franklin(1974)).

Muitas pesquisas ainda são feitas para ampliar o uso da PTS, a partir de um melhor conhecimento da sua estrutura porosa. Aguilera e col.(1976) estudaram as alterações na macroestrutura do "grits" de soja durante a extrusão sob várias condições. Harper(1986) analisou a influência do "design" e da operação do extrusor, sob a textura dos produtos obtidos e Stanley(1986) discute a importância do controle dos fatores químicos e de estrutura. Nesses três trabalhos, a estrutura dos extrusados foi estudada por microscopia eletrônica.

Cumming e col.(1972) estudaram, por microscopia eletrônica, a relação entre textura e estrutura da PTS, avaliando a influência das condições do processamento sobre a densidade do produto, a força e a energia de cisalhamento, enfim, sob as propriedades físicas consideradas texturais. Anderson(1974) estudou o efeito da umidade sob as propriedades reológicas, ou texturais, da PTS, apresentando uma relação entre os mecanismos de retenção de água e a textura do produto.



Mesmo com todas essas pesquisas, ainda não existem informações sobre o processo de secagem da PTS, a não ser as mencionadas por Brian(1976), que são apenas ilustrativas, e nem sobre a forma e a porosidade da PTS. Somente Tuohy(1980) descreve a determinação da densidade aparente da PTS, por deslocamento de sementes de colza.

Por outro lado, o trabalho de Anderson(1974) pode ser interessante, na medida em que, aceitando-se as suas considerações, pode-se determinar a condição da água na PTS, através de um estudo reológico do produto. Trabalhos de interesse na secagem de produtos extrusados são os de Campos e Menegalli(1987) e Fortes e Okos(1981a). Os primeiros autores estudaram a fluidização de um leite de PTS, com agitação, e correlacionaram a velocidade de mínima fluidização, a perda de carga e a porosidade do leite, com a umidade das amostras, na faixa de 0,06 a 1,05 (ga/gss). No segundo trabalho, os autores secaram um produto texturizado de farinha de milho, que certamente apresenta uma estrutura diferente da PTS, analisando os mecanismos de migração da água no material.

### 11.3 Sangue incorporado a proteína texturizada de soja

Visando estimular o aproveitamento do sangue integral do abate de bovinos, através de tecnologia simples, Contreras Guzmán(1984a,b,c) desenvolveu um produto desidratado que consiste de

proteína texturizada de soja (PTS) como suporte para o sangue (s) bovino. A PTS adequada foi selecionada através de estudos de composição e de absorção de água, em três marcas comerciais. O autor escolheu a PTS tipo Maxten R, por ter absorvido 300 g de água por 100 g de amostra.

O processamento foi dividido em quatro partes: mistura dos componentes, secagem, moagem e embalagem. A PTS foi misturada com o sangue, suavemente, nas seguintes proporções de PTS/s, em massa: 1:2, 1:2,5 e 1:3. A mistura foi seca em estufa com ventilação forçada, na temperatura de 65°C, até atingir 6% (bu) de umidade. O produto foi moído e embalado. O autor fez também, o mesmo procedimento utilizando plasma (P) no lugar do sangue (s).

Tabela 02. Composição centesimal, e teor de ferro das matérias primas e dos produtos desenvolvidos (g/100 g<sub>s</sub>).

	P	S	PTS	PTS/P 1:2	PTS/P 1:2,5	PTS/S 1:2	PTS/S 1:2,5
Proteínas	91,94	86,96	50,30	58,60	61,06	61,50	63,54
Carboidratos	2,27	2,19	41,58	32,63	30,13	30,90	29,02
Lipídeos	1,36	3,69	1,43	1,89	1,90	1,40	1,40
cinzas	4,43	7,17	6,70	6,88	6,91	6,20	6,04
Ferro*	--	240,00	6,00	--	--	67,00	80,00

\* Em mg/100 g.

Na tabela 02, apresenta-se a composição centesimal das matérias primas e dos produtos desenvolvidos. Observa-se que se obteve um produto (PTS/s) com alto teor de proteína e com um considerável teor de ferro. Contreras Guzmán sugere que esse produto possa ser utilizado para combater carências específicas de proteínas e de ferro, via alimentos formulados que aceitem a sua colora-

ção amarronzada, podendo, inclusive, melhorar as propriedades organolépticas dos produtos.

#### II.4 Secagem de alimentos

A secagem de alimentos é uma prática muito antiga, que era feita para conservar os alimentos para serem consumidos na entressafra. Na atualidade, a secagem de alimentos tem alcançado grandes proporções, não só por ser um processo de conservação, mas também pelo surgimento de alimentos formulados, que exigem insumos desidratados. Trabalhos como os de Charm(1963), Van Arsdel e col.(1973a,b) e Travaglini(1979), descrevem as várias operações industriais para a desidratação de alimentos derivados de leite, carne, peixes, frutas e hortaliças, bem como os tipos de secadores utilizados industrialmente, para esse fim.

Nos últimos tempos tem-se aumentado consideravelmente, as pesquisas na área de secagem de alimentos, com experiências desenvolvidas principalmente, em camada fina, possibilitando projetos de secadores mais adequados e eficientes, melhorando a economia do processo e a qualidade do produto.

Esta revisão se aterá ao estudo da secagem, com interesse não só nos alimentos, mas também, no próprio estudo da secagem em batelada. O estudo da secagem em operação contínua pode ser feito em livros de autores como, Vaněcěk e col.(1966), Keey(1975) e

Treybal(1981). Uma boa revisão sobre transferência de calor e massa em secagem contínua foi realizada por Pécora(1985).

#### II.4.1 Teorias de secagem

A umidade contida em sólidos úmidos, exerce uma pressão de vapor que depende da natureza da umidade, da natureza do sólido e da temperatura. Se, então, o sólido úmido for exposto a um ambiente ventilado, com uma dada pressão parcial de vapor de água constante e menor que a pressão de vapor da umidade do sólido, esse perderá umidade para o ambiente, até igualar as pressões. Diz-se, então, que o sólido e o gás estão em equilíbrio, e que a umidade do sólido é a umidade de equilíbrio ( $X^*$ ) para a dada condição ambiental.

As curvas obtidas ao se graficar a umidade de equilíbrio versus a umidade relativa do ar, sob a qual a umidade do sólido está em equilíbrio, para temperaturas constantes, são as isotermas de sorção. A isoterma é de dessorção quando o sólido perde umidade até atingir a umidade de equilíbrio, e é de sorção, quando ele ganha umidade. Segundo Parry(1985), o termo sorção compreende a adsorção, que se refere às moléculas de vapor de água aderida à superfície do material, e absorção, quando o vapor de água entra nas células do material. As isotermas de dessorção são as que interessam ao estudo da secagem.

Na figura 01, mostra-se uma típica isoterma de dessorção, de forma sigmoideal, onde se ilustram os diversos tipos de umidade. Os conceitos desses tipos de umidade são facilmente encontrados na literatura, como em Dăscălescu(1969), Treybal(1981) e Foust e col.(1982). As umidades ligadas, e não ligadas, referem-se às umidades contidas numa substância, que exercem uma pressão de vapor menor, e igual, respectivamente, à do líquido puro na mesma temperatura. A umidade livre é aquela que está em excesso, isto é, está acima da umidade de equilíbrio, nas condições de secagem.

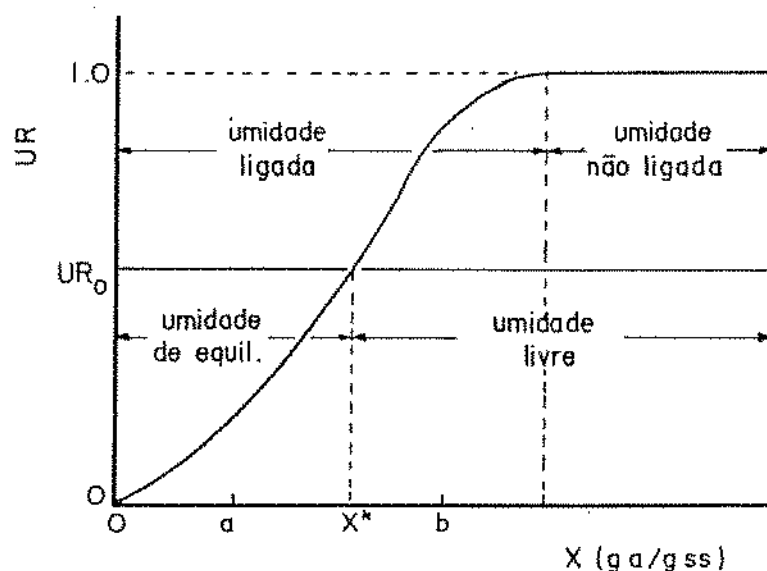


Figura 01. Curva de dessorção típica e tipos de umidade.

Labuza e col.(1970) explicam a união entre a água e os sólidos, nos alimentos, da seguinte forma: a água está aderida em monocamadas, correspondendo à região 0-a na figura 01; a água está aderida em multicamadas (a-b); e finalmente, numa região de condensação, acima de b, na qual a água condensa nos poros da estru-

tura. Dăscălescu(1969) apresenta quatro formas diferentes de união entre a água e os sólidos porosos: forças capilares, adsorção, osmose e retenção mecânica.

A exposição de uma amostra úmida ao ar de temperatura ( $T_g$ ), com umidade relativa (UR), e de velocidade ( $U_g$ ), constantes, constitui uma secagem sob condições constantes. Ocorrerá transferência de calor e de massa simultaneamente, sendo o calor suprido pelo ar, que arrasta a umidade evaporada. A amostra secará de tal forma que a sua umidade ( $X$ ), a taxa de secagem ( $R$ ) e a sua temperatura ( $T_p$ ) poderão ser representados contra o tempo de secagem, formando as curvas a, b e c, respectivamente, na figura 02.

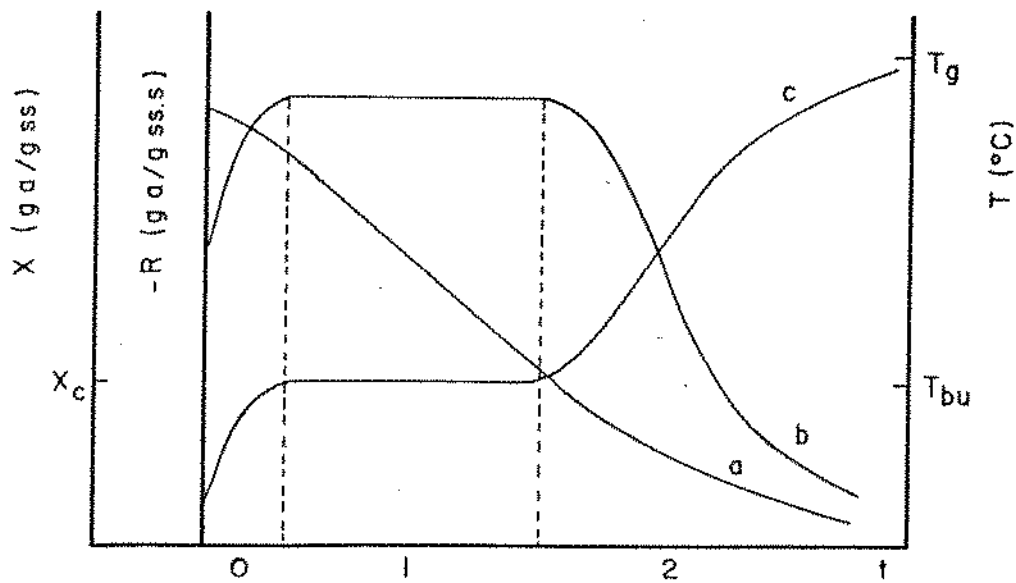


Figura 02. Curva de secagem típica.

O processo de secagem, como o representado na figura 02, divide-se em períodos característicos (Treybal(1981)). No início, o material a ser seco está mais frio, ocorrendo um período de adaptação, representado pela região 0, na figura 02, quando a temperatura do sólido se eleva, ocorrendo também, uma elevação na taxa de secagem. O processo chega, assim, ao primeiro período de secagem, ou período de secagem a taxa constante (região 1), onde o sólido permanece com a superfície coberta por uma camada de líquido, constituindo umidade não ligada, e com temperatura constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar ( $T_{bu}$ ). O líquido absorve calor e se evapora a uma taxa constante. Nesse período, a migração de umidade do interior para a superfície compensa a perda por evaporação.

Com o prosseguimento da secagem, a migração da água para a superfície diminui, não mais compensando a evaporação da água superficial. A superfície, portanto, deixa de ficar saturada, causando redução da pressão de vapor superficial e da taxa de secagem. Nesse ponto, o sólido atinge a umidade crítica ( $X_c$ ), inicia-se o segundo período de secagem, ou período de secagem a taxa decrescente (região 2) e a temperatura do sólido se eleva tendendo, assintoticamente, para a temperatura do ar. O período termina quando o sólido atinge a umidade de equilíbrio.

Keey(1975) discorda de alguns conceitos da teoria clássica. O autor considera que o primeiro período de secagem pode não apresentar taxa constante. Existem resultados mostrando que nesse

período a evaporação nunca atinge valores de evaporação de superfícies livres, mas pode haver um período de indução que faz aparecer uma taxa constante de secagem, especialmente em materiais umedecidos com água.

A natureza do movimento da umidade, ou seja, a sua migração, influencia a secagem durante o período de secagem a taxa decrescente. As teorias a esse respeito são descritas por vários autores, como Van Arsdel e col.(1973a), Keey(1975), Fortes e Okos(1981a,b,c), Treybal(1981), Igbeka(1982), Daudin(1983), Hutchinson e Otten(1983) e Parry(1985). Esses autores explicam que a água pode migrar em meios porosos, tanto na fase líquida como na fase vapor. A migração de vapor pode ocorrer por difusão molecular causada por um gradiente da pressão parcial do vapor; por transporte molar causado por um gradiente na pressão total, pelo encolhimento e alta temperatura; e por efusão, ou fluxo de Knudsen, que pode ocorrer quando o caminho livre médio das moléculas de vapor é da ordem de grandeza do diâmetro dos poros do sólido. O transporte de líquido ocorre por difusão molecular devido o gradiente de concentração; por capilaridade, sob efeito das forças capilares causada pela tensão superficial; por fluxo molar causado por alteração na pressão total; e por difusão superficial. Existem ainda, as teorias da migração de líquido sob efeito da gravidade; e da migração de líquido e vapor sob efeito de um gradiente de temperatura. Esses últimos efeitos são desprezíveis, sobretudo, na secagem de materiais biológicos.



No estudo da secagem, depois de se obter as curvas, e de se caracterizar os períodos de secagem, faz-se necessário descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem, ou em projetos de secadores.

No período de secagem a taxa constante, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido, logo, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem da seguinte forma:

$$N_a = \frac{h (T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (01)$$

onde:  $N_a$  - fluxo mássico ( $\text{Kg}/\text{m}^2 \text{h}$ );

$\lambda$  - calor latente de vaporização da água a  $T_{bu}$  ( $\text{Kcal}/\text{Kg}$ );

$h$  - coeficiente de transferência de calor ( $\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{h } ^\circ\text{C}$ );

$T_g$  - temperatura do gás ( $^\circ\text{C}$ );

$T_{bu}$  - temperatura de bulbo úmido do gás ( $^\circ\text{C}$ ).

Na secagem por convecção forçada o coeficiente de transferência de calor pode ser apresentado na forma generalizada, através de uma equação adimensional, do seguinte tipo:

$$Nu = a Re^b Pr^c \quad (02)$$

onde: Nu - número de Nusselt;  
 Re - número de Reynolds;  
 Pr - número de Prandtl;  
 a, b, c - constantes.

Daudin(1983), entretanto, sugere prudência na utilização dessas equações, retiradas da literatura, por duas razões: porque o coeficiente de transferência de calor é avaliado globalmente, enquanto que o escoamento do ar não é homogêneo sobre toda a superfície do produto; e por causa do efeito da evaporação sobre a transferência de calor, que geralmente, é negligenciado.

Para se descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Esses modelos são geralmente, de transferência de massa, negligenciando-se o efeito da transferência de calor. A principal teoria utilizada para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas (Suarez e col.(1980), Aguerre e col.(1982,1984,1985), Farinati e Suarez(1984)), é a teoria da difusão da umidade como líquido e/ou vapor, representada pela segunda lei de Fick, apresentada na forma geral, a seguir:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ap} \nabla x) \quad (03)$$

onde:  $x$  - umidade (ga/gss);

$t$  - tempo (s);

$D_{ap}$  - difusividade aparente ( $m^2/s$ ).

Crank(1975) calculou várias soluções analíticas da equação da difusão, para diversas condições iniciais e de contorno, em forma de séries, considerando a difusividade constante, ou variando com a concentração de água. Como o fenômeno de migração é complexo, trabalha-se com difusividade aparente que engloba os efeitos que podem intervir nesse fenômeno. Essas soluções se aplicam a sólidos de forma geométrica simples e constantes ao longo do processo (Daudin(1983)).

Considerando-se que o sólido seja uma esfera homogênea, de difusividade constante, que a sua superfície entre em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem, e que o efeito do gradiente de temperatura dentro da partícula seja desprezível, têm-se a seguinte solução analítica:

$$\bar{M} = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{ap} t}{r^2}\right) \quad (04)$$

onde:  $\bar{M}$  - umidade residual média  $(X - X^*) / (X_0 - X^*)$ ;

$X$  - umidade média da partícula (ga/gss);

$X^*$  - umidade de equilíbrio (ga/gss);

$X_0$  - umidade inicial (ga/gss);

$D_{ap}$  - difusividade aparente ( $m^2/s$ );

$t$  - tempo (s).

Suarez e col.(1980) secaram sorgo e consideraram a difusividade constante, e citam outros autores que determinaram que a difusividade no trigo independe da concentração de água entre 12% e 30% (bu) de umidade. Aguerre e Col.(1982,1984) secando arroz, também consideraram que a difusividade independe da umidade. Luitkov (Keey(1975)) considera que a difusividade varia e descreve esse comportamento em quatro regimes, dependendo do estado de sorção da água: em monocamada, em multicamada, em microcapilares, e em capilares. Aguerre e col.(1985) resolveram numericamente a equação da difusão, considerando três tipos de relação entre a difusividade e a umidade: exponencial, potencial e hiperbólica, e concluíram que a determinação da difusividade a partir da inclinação da reta de secagem, em semi log, não fornece necessariamente, o valor real e nem indica que a difusividade é constante.

O processo de secagem de um sólido que encolhe com a remoção da umidade, não pode ser representado pela solução analítica da segunda lei de Fick. É necessário que se integre numericamente, a equação diferencial, considerando-se a redução do volume do sólido.

Um sistema matematicamente equivalente a esse são os problemas de transferência de calor tipo Stefan, com fronteira móvel,

resolvidos por autores como Nebra e Ismail(1980) e Talmon e col.(1983). A segunda lei de Fick é resolvida por Misra e Young(1980), utilizando equações teóricas da variação do volume e da difusividade com a umidade, pelo método das diferenças finitas, para representar secagem de soja. Gabitto e Aguerre(1985) apresentam a solução numérica do processo de secagem, com variação de volume, por três métodos diferentes. Viollaz e Suarez(1985) resolveram a segunda lei de Fick considerando também, uma dependência da difusividade com a umidade, e concluíram que a utilização da equação 04 na determinação da difusividade, pode dar falsos resultados. Métodos numéricos podem ser encontrados em trabalhos como os de Carnahan e col.(1969) e Crank(1975).

Existem vários outros modelos teóricos, poucos utilizados, que podem ser encontrados nos trabalhos de Daudin(1983) e Parry(1985). Existem também, os modelos teóricos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis. Fortes e Okos(1981a,b,c) discutem detalhadamente essa teoria, que considera os efeitos de transferência de calor e massa simultaneamente. Esses modelos são geralmente, um sistema de equações representativas do fluxo de líquido, do fluxo de vapor, do fluxo de calor, e da conservação da massa e da energia. Para a solução desse sistema é necessário que se conheça as propriedades físicas do material, como função da umidade. Os autores, estudando a secagem de produtos extrusados de milho, em forma de cilindros de 3,18 cm de diâmetro na secção reta, observaram uma diferença de 2% entre as temperaturas do centro e da superfície das partículas, e concluíram que a migração da

umidade teve um efeito significativo na transferência de calor dentro das partículas, em altas temperaturas e no final da secagem, porém os resultados apresentados indicam que o efeito da difusividade de massa de origem térmica é desprezível.

Alguns modelos semi-teóricos são baseados na teoria da difusão, mas assumindo que a resistência ocorre numa camada fina na superfície das partículas (Parry(1985)), como o modelo de Lewis, análogo à lei do resfriamento de Newton, que na sua forma integrada (equação 05), é comumente chamada de modelo exponencial.

$$\bar{M} = \exp(-K t) \quad (05)$$

onde:  $\bar{M}$  - umidade residual média  $(X - X^*) / (X_0 - X^*)$ ;  
 $t$  - tempo (s);  
 $K$  - constante (1/s).

Chiang e Petersen(1985) citam autores que determinaram que  $K$ , durante a secagem de grãos, é função da temperatura absoluta dos grãos, e outros que determinaram que  $K$  depende da umidade e da temperatura de secagem.

A cinética de secagem também pode ser analisada por equações empíricas, que descrevem a curva de secagem nas condições do experimento. Uma das mais utilizadas é a equação de Page (Hutchinson e Otten(1983)):

$$\bar{M} = \exp(-K t^n) \quad (06)$$

onde:  $\bar{M}$  - umidade residual média  $(X - X^*)/(X_0 - X^*)$ ;  
 $t$  - tempo (s);  
 $K$  - constante (1/s);  
 $n$  - constante.

Misra e Brooker(1980) compilaram dados de secagem de milho, em camada fina, de nove fontes diferentes, e ajustaram-nos através da equação de Page, observando que  $n$  reflete a resistência interna à secagem, enquanto que  $K$  representa os efeitos das condições externas. Diferentes tipos de equações empíricas podem ser encontradas nas revisões feitas por Daudin(1983) e Parry(1985).

#### 11.4.2 Efeitos da secagem nas propriedades físicas dos alimentos

Produtos biológicos encolhem durante a secagem. Esse encolhimento é interessante porque reduz custos de armazenagem e de embalagens do produto final. Porém, no estudo de secagem, esse efeito é um fator complicador pois causa variação da área, do raio, da densidade e da porosidade dos sólidos. Dăscălescu (1969) cita três classes de deformação: contração, formação de fendas, e alterações estruturais causadas pela temperatura.

Farinati e Suarez(1984) observaram redução do raio da semente, e do cotilédone, de algodão de 13% e 3%, respectivamente. Daudin(1983) cita autores que determinaram diminuição do volume de milho em 35%, e de arroz em 11%. Androutsopoulos e Linardos(1986) observaram que a secagem à vácuo de "lignita" grega causou uma contração do volume das partículas de 33,3%, e um aumento da área superficial, com encolhimento, dos poros.

Lozano e col.(1983) estudaram a deformação durante a secagem de cenoura, alho, pera, batata e batata doce, cortados em cilindro, e observaram que esses produtos reduziram o volume em 70-90% do volume original, e que o volume foi uma função linear da umidade, para valores de  $X/X_0$  acima de 0,15, enquanto que para valores abaixo, o volume foi uma função exponencial. Tal comportamento, porém, não foi observado no estudo da densidade aparente e da porosidade, notando-se que não houve um comportamento generalizado com a umidade, apesar de ter havido uma tendência de diminuição com a umidade, podendo apresentar máximos e mínimos.

Gustafson e Hall(1972) citam autores que observaram que a densidade aparente aumenta e a porosidade diminui, durante a secagem de milho com ar ambiente. Esses autores encontraram uma relação linear entre a densidade aparente e a umidade, mas quanto a porosidade, observaram haver um mínimo. Tuohy(1980), fabricando proteínas texturizadas com microondas, observou que a densidade aparente do produto permanecia constante durante o processo, porque a perda de peso, causada pela secagem, era compensada pela redução do volume.



Daudin(1983) apresenta uma correlação exponencial entre o volume e o tempo de secagem. Keey(1975) sustenta uma relação linear entre o volume e a umidade das partículas, mas considera que materiais porosos com capilares alinhados, e materiais extrusados com cadeias de macromoléculas parcialmente alinhadas, podem mostrar um encolhimento anisotrópico. O autor cita dois fatores de ação contrária, que influenciam o encolhimento: o encolhimento aumenta com a temperatura, e diminui com a taxa de secagem.

#### II.4.3 Efeitos da secagem sobre as qualidades proteicas dos alimentos

Durante a secagem, o alimento pode se aquecer causando alguma degradação nas proteínas. Segundo Osner e Johnson(1968) a alteração de proteínas pode ser benéfica por aumentar a digestibilidade dos alimentos, mas ocorre perda nutricional quando aminoácidos são destruídos ou deixam de ser metabolizáveis. Os dois principais mecanismos que causam perdas nutricionais durante a secagem são: a reação de Maillard, entre aminoácidos e açúcares redutores; e oxidação de lipídeos. A lisina é o aminoácido mais sensível à reação de Maillard, podendo ainda, ser destruída diretamente pela ação do calor (Osner e Johnson(1968) e Van Dender e col.(1986)). Labuza e col.(1970) afirmam que esses mecanismos dependem da atividade de água dos alimentos.

A alteração de proteínas durante a secagem pode significar também, perdas das propriedades funcionais, de forma que o efeito do tratamento térmico pode ser expresso como perda de dispersibilidade ou como perda de solubilidade da proteína (Hågerdal e Martens(1976)). Esses autores observaram que a remoção de água da mioglobina de cachalote, abaixo de 30% (bu) de umidade, provocou menor perda de solubilidade das proteínas submetidas à tratamento de 90°C a 130°C, que as de umidades maiores. Rustad e Nesse(1983) estudaram os efeitos de tratamento térmico e de secagem, sobre pedaços de "capelin" (um pequeno peixe ártico), e observaram que a solubilidade das proteínas diminuíram com o aumento da umidade e da temperatura, e daí concluíram que as proteínas são mais estáveis ao tratamento térmico em baixas umidades. Esses autores observaram também, que os efeitos do tratamento térmico e da secagem, apresentam apenas, pequena diferença. Pham(1983) e Ré e Freire(1986) secaram sangue bovino em leite de jorro com inertes, e observaram que a solubilidade do produto não variou uniformemente com a temperatura de saída do ar, apresentando máximos, em 65°C e 75-80°C, e mínimo em 70°C.

### II.5 Secagem de alimentos em leite fluidizado

Vaněcěk e col.(1966) e Kuniti e Levenspiel(1969) apresentam várias vantagens e desvantagens, do leite fluidizado. Dentre as vantagens tem-se: altas taxas de transferência de calor e massa entre gás e partículas; temperatura uniforme no leite e facilmente

controlável; simples operação de manutenção; e pode ser automatizado facilmente.

Travaglino(1977) considera que a secagem de alimentos em leito fluidizado tem sido aplicada para uma variedade muito grande de produtos, incluindo batatas em cubos, cenoura, cebola, ervilha, carnes em pedaços, farinhas em geral, cacau, café, sal e açúcar. Gangopadhyay e Chaudhuri(1979) compararam a secagem de ervilhas em leito fluidizado e em um secador de bandejas convencional, observando que a taxa de secagem da ervilha picada foi maior no leito fluidizado, e que os produtos obtidos nesse secador, apresentaram melhores qualidades.

#### 11.5.1 Fluidização de alimentos

Meirelles(1984) fez uma ampla revisão sobre a fluidização de alimentos, apresentando duas variações, para secagem de sólidos de grande dimensão: o leito fluidizado centrífugo, e o leito vibro-fluidizado; e uma versão para dimensões menores: o leito agito-fluidizado. O autor discute a fluidização de farinhas e de bagaço de cana, considerando a influência da umidade dos sólidos, em leito agito-fluidizado. Baxerres e col.(1983) utilizaram leito de inertes fluidizado (bolas de vidro) para fluidizar arroz parboilizado, batatas e cenouras em cubos.

O estudo da fluidização de sólidos aglomeráveis tem evoluído ultimamente. Tardos e col.(1985a) desenvolveram um modelo teórico para predizer uma velocidade limite, abaixo da qual é inseguro operar um leito fluidizado, quando houver perigo de aglomeração devido à presença de uma camada de líquido superficial, ou pelo amolecimento da superfície do sólido, causado por altas temperaturas. Tardos e col.(1985b) estudaram experimentalmente a condição limite de fluidização em baixas temperaturas. A aglomeração era causada pela injeção de líquidos no leito, que formava uma camada superficial nas partículas. O modelo teórico se ajustou aos dados experimentais. Esse efeito da camada superficial de líquido foi observado por Pham(1983) e por Ré e Freire(1986), na secagem de sangue bovino com leito de jorro de inertes, quando a secagem não compensava a injeção do sangue, causando aglomeração.

Vazquez e Calvelo(1980,1983) estudaram a fluidodinâmica de leitos de ervilhas, batatas e alumina, secos e úmidos, e observaram que a velocidade de mínima fluidização dos materiais mais úmidos, é maior, atribuindo esse efeito à diferença entre as porosidades de mínima fluidização dos leitos de partículas úmidas e secas. Campos e Menegalli(1987) estudaram a fluidização de proteína texturizada de soja, sob agitação, e observaram que a velocidade de mínima fluidização aumenta linearmente com a umidade, enquanto que a qualidade da fluidização e a porosidade diminuem. Meirelles(1984) observou esse mesmo comportamento no leito de bagaço de cana.

As variáveis fluidodinâmicas podem ser calculadas através de correlações empíricas. Vaněcěk e col.(1966), Kunii e Levenspiel(1969) e Thonglomp e col.(1984) apresentam inúmeras equações para o cálculo das propriedades de interesse na fluidização. A equação clássica, no estudo da fluidização, é a equação de Ergun, porém a sua utilização nem sempre é possível pela dificuldade de obtenção de algumas propriedades físicas, como a esfericidade. Por isso, autores como Wen e Yu(1966) e Richardson e S. Jeronimo(1979), correlacionaram inúmeros dados de esfericidade com a porosidade, e modificaram a equação de Ergun para ser usada no cálculo da velocidade de mínima fluidização. Thonglomp e col.(1984) testaram vinte e uma equações com dados experimentais, e constataram que as equações dos autores acima citados, foram as que melhor se ajustaram. As equações modificadas de Ergun são da seguinte forma:

$$Re_{mf} = \sqrt{A^2 + B Ga} - A \quad (07)$$

onde:  $Re_{mf}$  - número de Reynolds de mínima fluidização;

$Ga$  - número de Galileu;

$A = 33,7$  e  $B = 0,0408$ , na equação de Wen e Yu(1966); e  $A = 25,7$  e  $B = 0,0365$ , na equação de Richardson e S. Jeronimo(1979).

### II.5.2 Estudos de secagem em leito fluidizado

Vazquez e Calvelo(1980,1983) estudaram a transferência de calor em leitos de alimentos, através da secagem no primeiro período, em temperaturas inferiores a 30°C. Os autores observaram que o coeficiente de transferência de calor independe da altura do leito, e apresentam os resultados na forma de fator de Colburn como função do número de Reynolds e de Galileu. Meirelles(1984), secando bagaço de cana, relacionou o coeficiente de transferência de calor na forma de número de Nusselt como função do número de Reynolds, obtendo uma correlação concordante com as citadas na literatura. Vaněcěk e col.(1966) apresentam várias correlações obtidas em experimentos de secagem, e atribuem as diferenças observadas às simplificações nas equações utilizadas e à não observação de todas variáveis relevantes na fluidização.

Lequerica e col.(1974), secando arroz parboilizado, observaram a existência do período de secagem a taxa constante e determinaram o coeficiente de transferência a partir da equação 01, enquanto que Sanz e col.(1977) utilizaram equações empíricas para esse mesmo fim, na secagem de farelo de arroz em leito vibro-fluidizado.

Kitic e Viollaz(1984) compararam a secagem de soja em leito fluidizado e em camada fina, e observaram que o processo foi idêntico nos dois leitos, apresentando apenas, o período de secagem a taxa decrescente. Esses autores concluíram que as curvas de

secagem em camada fina e em leito fluidizado, de até vinte centímetros de altura, podem ser representadas pelo modelo de Fick. Nos leitos fluidizados acima de vinte centímetros, os autores observaram difusividades ligeiramente menores que as de camada fina, e atribuíram esse efeito à queda de temperatura no leito. Baxerres e col.(1983) também não observaram diferenças na secagem de batatas em leito fluidizado com inertes, e em camada fina, mas consideram que a secagem sob fluidização é vantajosa, mesmo sem secagem a taxa constante, por causa do tratamento uniforme durante a secagem.

Lequerica e Col.(1974), Meirelles(1984) e Finzer(1984) utilizaram uma equação empírica, análoga à equação 04 truncada no primeiro termo da série, para representar a secagem de arroz parboilizado, do bagaço de cana e de fatias de cebolas, respectivamente, no segundo período. Fito e col.(1977) utilizaram a equação de Lewis (equação 05) para representar a secagem de farelo de arroz, e relacionaram a constante K com as variáveis do processo, como temperatura e velocidade do ar. Peraza e col.(1986) utilizaram um sistema de leito fluidizado para separar sementes e cascas de uva, baseado nos seus comportamentos aerodinâmicos. A semente de uva foi seca no mesmo equipamento, apresentando os dois períodos de secagem. Os coeficientes de transferência de calor e de massa foram determinados, e no segundo período, a taxa de secagem decresceu segundo o modelo de Fick.

Modelos matemáticos mais sofisticados também são utilizados para representar a secagem em leito fluidizado. Kunii e Le-

venspiel(1969) apresentam seus modelos de bolhas, nos quais é considerado uma interação entre as partículas e as bolhas que ascendem no leito. Hoebink e Rietema(1980a,b) desenvolveram um modelo que descreve a transferência de calor e de massa das partículas para as bolhas ascendentes, com e sem limitação causada pela difusão da umidade dentro das partículas. Esses autores citam outros modelos, como o modelo de reunião de bolhas, de Kato e Wen; e o modelo de duas fases, de Beek.



## Capítulo III

### DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

#### III.1 Preparo da matéria prima

A proteína texturizada de soja (PTS), do tipo Maxten R, foi fornecida pela empresa SANBRA S.A., com sede em São Paulo, SP, apresentando as seguintes propriedades físicas: umidade,  $X = 0,06$  g/gss; densidade de partícula,  $\rho_p = 1,572$  g/cm<sup>3</sup>; densidade aparente,  $\rho_{ap} = 0,8676$  g/cm<sup>3</sup>; e porosidade,  $\epsilon_p = 45\%$  (as densidades e a porosidade foram determinadas por penetrometria de mercúrio no laboratório de catalisadores do CINDECA, La Plata, Argentina).

O sangue bovino foi coletado no frigorífico Angelelli, na cidade de Piracicaba, SP, utilizando-se citrato de sódio em 0,5% (p/v) como anticoagulante. O sangue foi acondicionado em porções de aproximadamente 800g, em sacos de polietileno, e congelado num freezer vertical do Laboratório do Frio do Departamento de Engenharia de Alimentos. Quando era necessária a utilização do sangue nos ensaios, fazia-se um descongelamento lento do número de sacos suficientes, colocando-os numa geladeira, no dia anterior ao do ensaio.

Para preparar as amostras para a secagem, pesavam-se as partes numa balança semi-analítica Mettler P1210N, com menor divi-

são de 0,01g. Em seguida, acrescentavam-se as partes à uma bacia plástica, onde eram misturadas suavemente até a PTS absorver o sangue, o que ocorria em aproximadamente 30 minutos. Foram preparadas amostras nas relações de 1:1, 1:2, e 1:3 de PTS/sangue.

### III.2 Secagem em leito fluidizado

#### III.2.1 Descrição dos equipamentos

Nos ensaios conduzidos em leito fluidizado, foi utilizado o secador construído por Meirelles(1984), depois de várias modificações. O equipamento, que permite a fluidização com agitação simultânea da massa de sólidos, é descrito a seguir, conforme a figura 03.

A) Leito. Coluna de 1,14 m de altura, de secção circular, com diâmetro de 14,2 cm, que pode ser dividida em duas partes: a superior, com 1,0 m de comprimento, é de vidro pìrex, e a base, com 14,3 cm de altura, é metálica. A coluna de vidro foi fabricada com duas tomadas de pressão localizadas a um terço das extremidades. A coluna metálica tem um dispositivo semelhante a um pistão dentro de um êmbulo, que permite a coleta de amostras durante a secagem, sem que se interrompa o processo.

A coluna de vidro é unida à metálica por um sistema de quatro parafusos longos ligando a base do secador, sobre a qual está montada a parte metálica, à uma tampa de madeira localizada na extremidade superior da coluna de vidro. Essa tampa, além dos quatro orifícios para os parafusos, tem um orifício maior que é a saída para o ciclone. Entre as duas colunas há um retentor de borracha para evitar perdas de ar durante a secagem.

B) Distribuidor de ar. Uma tela metálica foi utilizada como distribuidor e instalada na parte inferior da coluna metálica, por meio de flanges, vedadas com borrachas. No centro do distribuidor foi instalado um pequeno cilindro perfurado para sustentar a haste do agitador.

A tela utilizada tem uma malha quadrada com 2,5 mm de abertura. Como esse tipo de distribuidor não causa grande queda de pressão, o que poderia causar uma má homogeneidade no escoamento do ar na secção do leito, ele foi testado com fluidização de sagu, sem que se tenha notado formação de canais preferenciais que causassem uma fraca fluidização, demonstrando a sua possibilidade de uso.

C) Desvio do ar. Foi instalado, abaixo do distribuidor, um tubo de 3 polegadas de diâmetro, perpendicular ao tubo que forma o corpo do secador, que permite desviar o fluxo de ar para o exterior. Ao se abrir esse desvio, reduz-se a velocidade do ar no leito, permitindo a alimentação do secador, sem que se tenha que desligar.

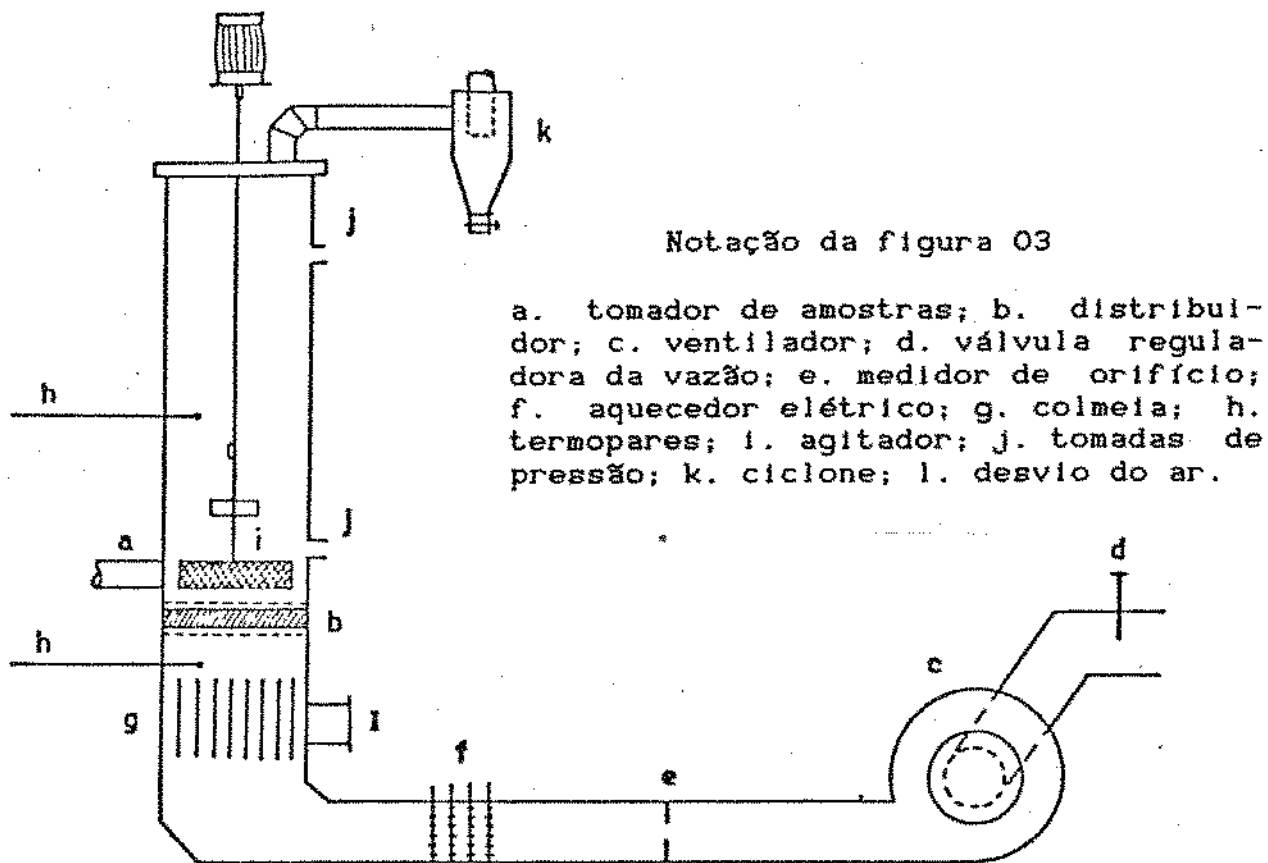


Figura 03. Esquema dos equipamentos utilizados.

D) Ciclone. A tampa da extremidade superior da coluna de vidro, foi ligado um ciclone, construído em PVC, para recolher partículas porventura elutriadas. Esse ciclone é dotado de uma válvula borboleta para bloquear a saída dos finos, se necessário.

E) Ventilador. O fluxo de ar no secador era produzido por um ventilador centrífugo Kongskilde, ligado a um motor elétrico Arno de 7,5 cv e 1710 rpm. O controle da vazão era feito através

de uma válvula que bloqueava a sucção do ventilador. O ventilador é ligado ao leito por uma tubulação de 5 m, com 15,7 cm de diâmetro.

F) Medidor de vazão. Foi construído uma placa de orifício com as seguintes características: diâmetro do tubo,  $d_t = 15,7$  cm; diâmetro do orifício da placa,  $d_o = 3,7$  cm; espessura da placa de orifício,  $e_{po} = 0,07$  cm. Desta forma, a relação entre os diâmetros é de 0,24, e a relação entre a espessura e o diâmetro do tubo, é de 0,004, indicando que o orifício pode ter bordas retas. A placa de orifício foi calibrada com um medidor padrão Merian Laminar Flow, modelo 50MC2-6. O resultado da calibração encontra-se no Apêndice B. Discussões sobre construção e calibração de placas de orifício podem ser encontradas em trabalhos como os de Bean(1971), Spink(1973), Considine(1975), Doebelin(1975), Ower e Pankhurst(1977) e Perry e Chilton(1980).

No secador, a placa de orifício foi instalada por meio de flanges, entre o ventilador e o sistema de aquecimento. A diferença de pressão na placa de orifício era medida através de um manômetro em U, com água como fluido manométrico.

G) Sistema de aquecimento. O ar era aquecido por um sistema de três resistências elétricas independentes, instaladas no interior da tubulação, pouco antes da curva de 90° que antecede a entrada do leito. As resistências são de fio de níquel-cromo de resistividade 2,122 ohm/m. Para aquecer o ar, numa vazão fixa, li-

gavam-se duas resistências diretamente na fonte de 110 V, ou de 220 V, dependendo da temperatura desejada e da vazão do ar, e a terceira era ligada a um variador de voltagem, tipo Variac, permitindo um ajuste fino da temperatura. A parede do secador foi isolada com lã de vidro desde esse ponto até o leito metálico.

H) Sistema de agitação. Utilizou-se o mesmo tipo de agitador usado por Meirelles(1984), que consiste de três pás soldadas a um eixo, com 4,5 cm de distância entre si e formando ângulos de 60° sequencialmente. A pá mais próxima do fundo do leito foi colocada a 0,5 cm do distribuidor. As pás, superior e inferior, têm 13,5 cm de largura, enquanto que a do meio tem 7,8 cm, para permitir o movimento do pistão na coleta de amostras. Não foi necessário o raspador da parede do secador. Um motor Janke & Kunkel, tipo 24S5, com 98 W de potência e velocidade variável de 60 até 2400 rpm, que prende o eixo do agitador por um mandril, instalado acima da extremidade superior da coluna de vidro, completa o sistema de agitação.

O secador tem ainda, um sistema de determinação de temperatura e um de pressão. O sistema de determinação de temperatura é composto por três termopares de cobre-constantan número 24, ligados a um indicador de temperatura digital S & E, modelo 1D4K-8, série 622, com menor divisão de 0,1°C. Um termopar, o primeiro, está instalado logo abaixo do distribuidor, para se obter a temperatura de entrada do ar de secagem. O segundo está instalado a 2,5 cm acima do distribuidor, permitindo a determinação da temperatura

da emulsão, intermediária entre a do sólido e a do ar. O terceiro, era instalado na montagem do secador, entre as colunas de vidro e a metálica (isolada), obtendo-se, portanto, a temperatura de saída do ar de secagem. O sistema termopares-indicador foi calibrado num banho de água, com um termômetro de precisão. Os resultados dessa calibração se encontram no Apêndice B.

O sistema de medida de pressão consiste de tomadas piezo-métricas localizadas imediatamente abaixo e acima do distribuidor, além das tomadas da coluna de vidro citadas anteriormente. Na placa de orifício, as tomadas de pressão ficam imediatamente antes e depois da placa, em número de três de cada lado, distanciadas de 120° e unidas entre si, formando uma única tomada de pressão (equalizada). As tomadas de pressão eram ligadas a manômetros em U com água como líquido manométrico.

### III.2.2 Operação dos equipamentos

Nos ensaios preliminares, as misturas nas três relações de PTS e sangue (1:1, 1:2, e 1:3), demonstraram uma forte tendência a aglomeração, o que dificultou, quando não impediu, a fluidização. As amostras quando começavam a secar, adquiriam um caráter coesivo, formando uma massa que impedia, inclusive, a agitação.

Haviam duas alternativas para se secar as amostras em leito fluidizado. A primeira seria a utilização de inertes, que

poderia ser a PTS, ou o próprio produto já seco. Porém essa alternativa foi impossível num secador de batelada, como esse em questão, pois o alimentado teria que entrar em contato com os inertes já no estado de fluidização, o que não poderia ocorrer. A segunda alternativa, que foi adotada, foi a pré-secagem, isto é, secava-se a amostra até ela perder a umidade superficial e a capacidade coesiva, podendo então, ser fluidizada.

Na pré-secagem, porções de 200 a 250 g da mistura eram adicionadas numa bandeja de alumínio de 400 cm<sup>2</sup>, e levadas sobre a saída da coluna metálica do secador de leito fluidizado, de onde saía ar a 80°C. A amostra era seca sobre efeito mecânico de uma pá para destruir a massa de aglomerados. Quando isso ocorria, terminava-se a pré-secagem. Ainda assim, não se conseguiu pré-secar a mistura na relação 1:3. Para se secar em torno de 700 g da amostra, em três ou quatro porções, gastavam-se de 21 a 24 minutos.

Terminada a pré-secagem, montava-se o secador e o colocava em funcionamento nas condições sob as quais seria realizada a experiência. Uma vez calculada a queda de pressão na placa de orifício para a vazão de interesse, regulava-se essa vazão, abrindo-se a válvula na sucção do ventilador, até se notar aquela diferença de pressão no manômetro acoplado à placa de orifício. Depois, ligavam-se as resistências elétricas e ajustava-se a temperatura do ar, lida no indicador, através do Variac. Desta forma, os componentes do secador se aqueciam, diminuindo o tempo necessário para que o equipamento entrasse em regime, ao iniciar a secagem. Essa etapa demorava de 30 a 40 minutos.



Depois que a temperatura de entrada do ar se estabilizava, alimentava-se o secador para iniciar a experiência. Primeiro se abria o desvio do ar antes do distribuidor, ligava-se o agitador com a rotação previamente escolhida e controlada, e então, alimentava-se o equipamento com a amostra pré-seca, manualmente, pela parte superior da coluna. A massa do alimentado situava-se em torno de 400 g. Conectava-se o ciclone, com um saco para recolher elutriados, fechava-se o desvio do ar e marcava-se o tempo com um cronômetro digital.

O leito de sólidos causava uma pequena redução da vazão do ar, em virtude da perda de carga adicional, que por sua vez causava uma elevação da temperatura do ar. Recolocava-se o processo nas condições ideais em menos de um minuto, regulando-se a vazão e, às vezes, a temperatura.

Ao longo da experiência, a vazão era observada, e corrigida rapidamente quando necessário. Não se fixou tempo para se fazer leituras da perda de carga na placa de orifício, mas fazia-se o seu registro de seis a oito vezes durante o ensaio. As rotações do agitador também eram constantemente controladas, e anotadas de duas a quatro vezes durante a secagem. A velocidade de rotação era medida contando-se o número de rotações no intervalo de um minuto. Não foram observadas flutuações nas rotações do agitador durante a secagem.

A temperatura de entrada do ar de secagem sofria influência da vazão do ar e de variações da energia elétrica, porém, em pouca intensidade. O controle da temperatura de entrada foi importante para o controle do processo, enquanto que a observação da temperatura da emulsão, e a de saída do ar de secagem, foram dados do ensaio, importantes no estudo da cinética da secagem, por isso, anotou-se as três temperaturas de minuto em minuto nos primeiros dez minutos, de dois em dois, nos segundos dez minutos, e de cinco em cinco, depois dos vinte minutos. Desta forma, pode-se observar melhor o comportamento da temperatura com o tempo nos primeiros minutos de secagem.

Neste tipo de secador, a evolução da umidade com o tempo só pode ser observada coletando-se amostras e determinando-se as suas umidades. Por isso, amostras foram coletadas de cinco em cinco minutos. Empurrava-se, cuidadosamente, o pistão coletor para dentro do leito até o ar arrastar o material, que era coletado em pesa-filtros de tampas esmerilhadas, retornando-se, em seguida, o pistão para a posição original. O pesa-filtro era imediatamente tampado, para evitar perda de umidade, e acondicionado dentro de um dessecador com sílica-gel.

Ao longo da secagem, media-se a temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, do ar ambiente, com um psicrômetro composto por dois termômetros de mercúrio, na linha de sucção do ventilador. Com esses dados, obteve-se, através de um programa de computador, as propriedades psicrométricas do ar ambiente. Com a temperatura

de secagem e com a razão de umidade do ar ambiente, obtida pelo primeiro programa, entrou-se num segundo para se calcular as propriedades psicrométricas do ar nas condições de secagem.

Terminada a experiência, coletava-se o produto final pelo coletor de amostras, aumentando-se a vazão do ar. As partículas maiores eram recolhidas depois de desmontado o equipamento. O produto final foi guardado em sacos de polietileno para análises posteriores. Como o elutriado sempre foi pouco, composto de pó formado pelo atrito entre as partículas, ele era recolhido num único saco, durante todo o ensaio, e usado para a determinação da própria umidade.

### III.2.3 Ensaio para o estudo da variação de propriedades físicas durante a secagem

Os estudos da variação de propriedades físicas durante a secagem foram realizados com o objetivo de se avaliar a variação do volume e da densidade aparente das partículas, ao longo da secagem. Poder-se-ia fazer uma experiência de secagem com uma massa do material e coletar amostras para se determinar o diâmetro médio e a densidade das partículas, porém a coleta pelo dispositivo tipo pistão poderia ser seletiva na medida em que coletar-se-iam mais partículas menores e mais secas, que não representariam o universo. Optou-se, então, por se fazer várias experiências com diferentes tempos de secagem, determinando-se o diâmetro médio, a densi-

dade aparente das partículas e a umidade final na massa total do leite.

As experiências foram similares às descritas no item anterior. Fez-se a mistura da PTS com o sangue, apenas para a relação 1:2, obtendo-se de 1,2 a 1,5 kg. Pré secou-se a mistura em várias porções. Homogeneizou-se o material pré-seco, e o dividiu em quatro porções. Cada porção foi seca, no secador de leite fluidizado, por um período de tempo diferente. O diâmetro médio das partículas, para cada porção seca, foi determinado por peneiragem, e a densidade, por deslocamento de fluidos em picnômetro. O diâmetro inicial foi medido em apenas uma das quatro porções. Os tempos, em minutos, de secagem de cada porção foram os seguintes: para temperatura de 60°C: 0, 6, 21, 40 e 65; para 80°C: 0, 5, 18, 34 e 58; e para 100°C: 0, 4, 16, 27 e 60.

### III.3 Secagem em leite fixo

#### III.3.1 Descrição dos equipamentos

O secador de bandejas utilizado foi desenhado e construído no Departamento de Engenharia de Alimentos, tendo já sido usado em vários trabalhos, inclusive por Silva(1985), que o descreve detalhadamente. O equipamento será brevemente descrito, a seguir:

A) Cabine de secagem. Corpo vertical de madeira compensada de 2 cm de espessura, de secção quadrada de  $441 \text{ cm}^2$ , de 2,2 m de altura, com oito compartimentos individuais para encaixe das bandejas. Cada compartimento tem uma porta que impede vazamento do ar de secagem.

B) Bandejas. Confeccionadas em alumínio bitola 18, tendo  $400 \text{ cm}^2$  de área, e 10 cm de altura, com rebarbas de 1 cm nas extremidades superior e inferior, para permitir a sustentação no secador e garantir a passagem do ar exclusivamente através do leito. O fundo é de tela de aço inox, de malha quadrada, com 1,2 mm de abertura.

C) Ventilador. O fluxo de ar era produzido por um ventilador centrífugo da marca Asten, ligado a um motor elétrico de 2,0 cv e de 3460 rpm. A vazão do ar era controlada por uma válvula borboleta instalada na linha de sucção. O ventilador é ligado ao corpo principal por uma tubulação de cimento-amianto, de 15 cm de diâmetro, com 3 m de comprimento. Ligando a tubulação à cabine, existe um cone invertido, para suavizar a expansão do ar.

D) Medidor de vazão. Foi utilizado um medidor de bocal, instalado na entrada da linha de sucção, de diâmetro interno  $d_b = 74,86 \text{ mm}$ , calibrado por Pécora(1985). A diferença de pressão era medida num manômetro em U inclinado em  $30^\circ$ , com querosene ( $\rho_m = 0,786 \text{ g/cm}^3$ ) como líquido manométrico.

E) Sistema de aquecimento. O aquecimento do ar era feito por um sistema de três resistências elétricas, independentes, situadas entre o ventilador e a cabine de madeira, ligadas na fonte de 110 V. Uma das resistências podia ser ligada a um variador de tensão tipo Variac.

A cabine de madeira tem orifícios que permitem a instalação de termopares imediatamente antes e depois de cada bandeja, possibilitando a leitura das temperaturas de entrada e de saída, do ar de secagem, respectivamente. O sistema de medida de temperatura foi o mesmo utilizado no secador de leito fluidizado.

### III.3.2 Operação dos equipamentos

Antes de iniciar o ensaio, o equipamento era posto em funcionamento nas condições de secagem. Regulava-se a vazão, através da válvula, observando-se o manômetro ligado ao bocal. Ligava-se o sistema de aquecimento combinando-se as três resistências para atingir a temperatura exigida, para uma dada vazão. O equipamento era aquecido, demorando de 20 a 30 minutos. Enquanto isso, a mistura previamente preparada, era adicionada numa bandeja já tarada, em cargas de aproximadamente 300 g. Desse material eram tiradas duas amostras para determinação da umidade inicial.

Iniciava-se o ensaio pesando-se a bandeja carregada na balança semi-analítica. Posta no secador, sempre no terceiro com-

partimento de baixo para cima, marcava-se o tempo com um cronômetro. Acompanhava-se o ensaio observando-se a vazão, as temperaturas e a umidade da amostra.

A vazão era constantemente controlada, observando-se a diferença de pressão no manômetro inclinado. Anotou-se essa medida de quatro a seis vezes ao longo do ensaio. A temperatura de secagem era controlada, observando-se a temperatura de entrada do ar. A temperatura de saída era lida como dado do ensaio, importante para o esclarecimento do processo. Anotações das temperaturas eram feitas de 2 em 2 minutos, nos primeiros 20 minutos da experiência, e de 5 em 5 minutos, no tempo restante. A temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido, também eram lidas frequentemente, na entrada da linha de sucção.

O acompanhamento da umidade das amostras ao longo da secagem foi feita por pesagem da bandeja, na balança semi-analítica, de 3 em 3 minutos ou de 5 em 5 minutos, de acordo com ensaios preliminares. A pesagem era completada em menos de 30 segundos, para se evitar que a retirada do secador alterasse as condições de evolução da temperatura e da umidade das amostras. De posse desses dados e da umidade inicial, calcularam-se as respectivas umidades por balanço de massa. Ao final da secagem, o produto era guardado em sacos de polietileno para análises posteriores.

#### III.4 Determinação de umidade das amostras

Para a determinação da umidade das amostras coletadas no secador de leite fluidizado, empregaram-se pesa-filtros de vidro pirex de 30 e 50 ml, com tampa esmerilhada, enquanto que cadinhos de alumínio de 15 ml foram utilizados nas amostras iniciais da secagem em leite fixo. Os pesa-filtros e os cadinhos eram lavados e guardados em estufa a 105°C. Antes de cada experiência, eram tirados da estufa e colocados em dessecadores para esfriar. Depois de frios, eram tarados numa balança analítica Mettler H34 com menor divisão de 0,0001 g.

As umidades foram determinadas colocando-se as amostras para secar em estufa a 105°C até peso constante, o que ocorria depois de 24 horas. Todas as amostras foram pesadas na balança analítica. Com o peso inicial e o final das amostras, determinava-se a umidade. Todas as amostras iniciais tiveram a umidade determinada em duplicata, utilizando-se a média aritmética como a umidade inicial.

### III.5 Avaliação e caracterização dos produtos

Foram feitos estudos de granulometria para a determinação do diâmetro médio das partículas secas em leite fluidizado e das amostras do estudo da variação do volume durante a secagem. Também foram avaliadas as densidades aparentes dessas amostras. Esses estudos não foram feitos com as amostras secas em leite fixo, porque elas perderam a condição de partícula durante a secagem.



As amostras obtidas nos dois secadores foram submetidas a análises de proteínas totais e de proteínas solúveis, com o objetivo de se avaliar o efeito do tratamento térmico sobre a qualidade das proteínas da PTS e do sangue.

### III.5.1 Produtos obtidos em leite fluidizado

#### III.5.1.1 Análise da distribuição de tamanhos

Optou-se pela análise de tamanhos por peneiragem, por ser a mais adequada aos objetivos do estudo, em virtude das características das amostras, da praticidade do método, e da confiança dos resultados. O resultado da análise por peneiras é influenciado pelo tamanho relativo da amostra, pelo tempo de duração da classificação, e pela máquina vibratória utilizada. As normas gerais relativas ao assunto, são encontradas em trabalhos como o de Perry e Chilton(1980) e o de Meirelles(1984), onde há uma revisão sobre o assunto.

Para o estabelecimento das condições padrão, fizeram-se ensaios preliminares. Optou-se por uma vibração moderada (entre 3 e 4, num reostato com escala de 0 a 10) para evitar quebras das partículas durante a classificação. Escolheram-se amostras em torno de 200 g, apesar do ideal ser de 60 a 150 g para partículas

grossamente granuladas, em virtude de se utilizar toda a amostra retirada do secador. Os ensaios preliminares tiveram então, o objetivo de fixar o tempo limite, a partir do qual a variação de massa, em cada peneira, seria desprezível. O tempo foi de 20 minutos. Nessas condições, não se observaram quebras de partículas.

Nos ensaios preliminares também se selecionaram as peneiras que retinham frações mássicas consideráveis. O material demonstrou pouca dispersão de diâmetros, ficando retido em cinco peneiras, mais o fundo. O número mínimo de peneiras recomendável é de cinco. As peneiras selecionadas, do tipo Tyler, encontram-se descritas na tabela 03.

Tabela 03. Série de peneiras empregadas na análise da distribuição de tamanho dos produtos.

Tyler (mesh)	Abertura (mm)
4	4,76
6	3,36
8	2,38
10	1,68
14	1,19

A análise granulométrica foi feita então, de acordo com os padrões pré-estabelecidos. As peneiras eram taradas na balança semi-analítica e colocadas no vibrador. Em seguida, era adicionada a amostra na peneira superior. Findo o tempo de classificação, todas as peneiras foram novamente pesadas. Considerou-se como a massa total adicionada, a soma das massas retidas em todas peneiras e

no fundo. Com a massa total e as massas retidas, calculou-se a fração (xi) retida nas respectivas peneiras. O vibrador utilizado foi da marca Produtest.

#### III.5.1.2 Determinação da densidade aparente das partículas

A densidade aparente das partículas foi determinada nas amostras obtidas nos ensaios de variação das propriedades físicas, podendo-se, então, relacionar a densidade com a umidade, para uma dada condição de secagem. Esse estudo não poderia ter sido feito no sentido contrário, isto é, umidificando o material e determinando a sua densidade, uma vez que essa é função da umidade e do encolhimento das partículas, que se comporta diferentemente para diferentes condições de secagem.

O método escolhido foi o de deslocamento de fluido num picnômetro. Testou-se o mercúrio como o fluido, porém, observou-se espaços vazios entre as partículas, e no contato das partículas com a parede do picnômetro, que poderiam causar erros na determinação. Optou-se pela glicerina por ter uma tensão superficial menor que a do mercúrio, mas suficientemente grande para não penetrar nos poros das partículas. Trabalhou-se com dois picnômetros de 25 ml, calibrados com água a 23,1°C. A densidade da glicerina, calculada como a média das densidades obtidas nos dois picnômetros, é de 1,2506 g/cm<sup>3</sup>.

Os picnômetros eram lavados e enxaguados com álcool e depois com éter étílico PA, e posteriormente, secos num dessecador contendo sílica-gel. O uso de estufa poderia causar variação do volume do picnômetro, por dilatação do vidro. Depois de secos, e antes de cada análise, eram tarados. Adicionavam-se quantitativamente aos picnômetros, amostras entre 1,5 e 2,0 g, que eram retiradas aleatoriamente da amostra mãe, previamente homogeneizada. Acrescentava-se, cuidadosamente para evitar bolhas de ar, a glicerina. Retirava-se o excesso, e pesava-se o picnômetro. De posse desses dados, foi possível calcular a densidade aparente das partículas e relacioná-las com a umidade.

Todas as pesagens foram realizadas na balança analítica. Todas as densidades foram determinadas em duplicatas com o mesmo picnômetro, considerando-se como tal, a média aritmética entre as duas. O manuseio dos picnômetros foram cuidadosos, evitando-se o contato manual. Depois de cada análise, observaram-se algumas partículas, não se notando penetração de glicerina. As análises tiveram o tempo otimizado para se evitar a extração do sangue das amostras.

### III.5.2 Avaliação da qualidade proteica dos produtos

Foram feitas análises de proteína total e de proteína solúvel das amostras secas. Esses dados são importantes por fornecerem informações tecnológicas, via solubilidade das proteínas, como

as propriedades funcionais do material. Neste estudo, esses dados podem fornecer informações sobre o efeito da intensidade do tratamento térmico nas proteínas. As proteínas foram determinadas pelo método de Kjeldahl, de determinação de nitrogênio.

Inicialmente, as amostras eram preparadas para análise. Fazia-se uma trituração das amostras num liquidificador. Em seguida, o triturado era moído num moedor Braun Aromatic KSM2, para tornar-se quase pó. Pesavam-se, analiticamente, em torno de 0,5 g das amostras para análise de proteínas solúveis, e em torno de 0,2 g, em duplicata, para as de proteínas totais.

Para a extração das proteínas solúveis, transferiram-se, quantitativamente, as amostras para tubos de ensaios com tampas rosqueáveis. Sobre as amostras adicionaram-se 50 ml de uma solução de NaCl 0,6 N (com 0,1% de  $\text{NaHCO}_3$ ). Os tubos eram tampados e colocados sob agitação moderada por 20 minutos. Em seguida, os tubos eram guardados sob refrigeração por 12 horas, para permitir uma perfeita extração das proteínas. Decorrido esse tempo, a suspensão era filtrada. Do filtrado, coletaram-se 2 ml para a determinação de proteínas.

O passo seguinte, comum às duas análises, foi a digestão, que consistia em se acrescentar sobre as amostras, num tubo de digestão, 2 ml de ácido sulfúrico concentrado, para se determinar proteínas solúveis, e 4 ml, para proteínas totais, mais aproximadamente 50 mg de um catalizador a base de cobre. Os tubos eram, então, aquecidos até  $350^\circ\text{C}$ , para acelerar a digestão.

As amostras digeridas eram adicionadas num destilador de nitrogênio tipo Kjeldahl, onde eram alcalinizadas com solução de NaOH a 50%. O nitrogênio, na forma de amônia, era destilado por arraste de vapor de água, sendo condensado e recolhido num erlenmeyer contendo 15 ml de uma solução padrão de ácido bórico mais um indicador. A extração era interrompida depois que se coletava 100 ml do condensado. A solução de ácido bórico e amônia era então, titulada com ácido clorídrico 0,02 N. De posse do volume de ácido clorídrico gasto, calculou-se o teor de proteína nas amostras. As umidades das amostras foram determinadas para se calcular os teores de proteínas em base seca.

## Capítulo IV

### ANALISES DOS RESULTADOS

#### IV.1 Ensaios preliminares e pré-secagem

Os primeiros ensaios de secagem em leito fluidizado, foram realizados com a mistura de PTS/sangue nas relações de 1:1, 1:2 e 1:3. Foram feitos cinco ensaios, na temperatura de 80°C, onde se notou a potencialidade de aglomeração desses materiais. Em três ensaios a aglomeração impediu a rotação do agitador, causando inclusive, a destruição do suporte da haste do agitador. A massa formada aderiu às paredes metálicas, às pás do agitador e ao distribuidor, permitindo a passagem do ar apenas, por uma pequena área central.

Apenas dois ensaios foram conduzidos completamente, nas relações de 1:1 e 1:2. Iniciado os ensaios, houve aglomeração, mas não impedindo a agitação. Antes de completar os cinco primeiros minutos, a massa aglomerada foi destruída, começando a fluidizar no centro do leito, por causa da obstrução do distribuidor, permitindo a coleta de amostras nos tempos pré-estabelecidos. Os resultados desses ensaios estão nas tabelas D.1.1 e D.1.2 do Apêndice D.

Pode-se observar nessas tabelas, que houve uma alta taxa de secagem nos primeiros cinco minutos. Na mistura de 1:1, a umidade foi reduzida de 0,79 (ga/gss) para 0,20 (ga/gss), que corresponde a 25% do teor inicial, enquanto que, para a de 1:2, a redução foi de 1,24 (ga/gss) para 0,40 (ga/gss), correspondendo a 32% do teor inicial. As temperaturas obtidas pelo segundo termopar, aumentavam, sendo que já no primeiro minuto se observaram temperaturas superiores às respectivas de bulbo úmido do ar.

Como o objetivo deste trabalho é o de se estudar a secagem em leite fluidizado, e como nos ensaios preliminares não se observou o estado de fluidização do leite, seja pela aglomeração inicial, seja pela obstrução do distribuidor, optou-se por pré-secar as amostras, o que foi feito imediatamente antes dos ensaios de secagem. Os valores das umidades das amostras, antes e depois da pré-secagem, podem ser encontrados nos itens D.I e D.III do Apêndice D. O valor médio das umidades das amostras na relação de 1:2, no estado anterior e posterior à pré-secagem, foram de 1,27 (ga/gss) e 0,53 (ga/gss), respectivamente, havendo uma redução da umidade a 42,3% do valor inicial. Já para as amostras na relação 1:1, a média das umidades foi reduzida de 0,77 (ga/gss) para 0,44 (ga/gss) que corresponde a 57,2% do valor inicial.

Analisando-se os dados da pré-secagem, observa-se que as umidades das amostras pré-secas nas duas condições estão dentro da faixa de umidade dos primeiros cinco minutos, nos ensaios preliminares (D.I.1 e D.I.2), permitindo concluir que a umidade é o prin-



principal causador da aglomeração. Existem também, os efeitos conjuntos da temperatura, do agitador e da natureza do líquido de embebição (sangue), além da contribuição da grande superfície específica das partículas.

Nos instantes iniciais da secagem, a ação mecânica da agitação favorecia a aglomeração, causando um maior contato entre as partículas úmidas e chegando até, a comprimir os grumos formados, aumentando a coesão entre as partículas. Na pré-secagem, a ação da pá era sempre cortante para destruir os grumos e nunca comprimí-los. A temperatura agia, não pelo efeito direto do ar de secagem, mas pelo contato das amostras com as superfícies aquecidas do secador, causando aderência e endurecimento do material, favorecendo também, a aglomeração. Para se evitar esse efeito na pré-secagem, trabalhou-se sempre com pequenas amostras, evitando-se portanto, o seu contato com as paredes da bandeja, enquanto que o fundo era sempre raspado com a pá.

O efeito da natureza do líquido de embebição foi constatado ao se comparar ensaios realizados com PTS/sangue e PTS/água (ensaios de fluidização e de secagem de PTS/água foram feitos para se ajustar os equipamentos). Conseguiu-se fluidizar e secar amostras de PTS/água, com umidades superiores às umidades das amostras de PTS/sangue que não fluidizaram. Esse comportamento de diferentes tendências de aglomeração para diferentes líquidos de embebição, coincide com o comportamento representado pelo modelo desenvolvido por Tardos e col. (1985a,b), que considera a tensão super-

ficial e a densidade do líquido que envolve a superfície das partículas.

A natureza do sangue (líquido biológico, proteico, termossensível) conferiu às amostras de PTS/sangue, a capacidade de aglomeração. Era visível o depósito de material vermelho na superfície das partículas, que crescia com o aumento da proporção de sangue por PTS, que por sua vez, aumentava a coesividade das partículas, de forma que as amostras na relação 1:3 tinham a maior capacidade de aglomeração. Para se evitar esse efeito, as amostras na relação 1:2, por ter mais sólidos do sangue, deveriam secar mais que a de 1:1, na pré-secagem, porém o que se constatou foi o contrário. As amostras obtidas na relação 1:2 perderam a capacidade de aglomeração com 0,53 (ga/gss), enquanto que as de 1:1, com 0,44 (ga/gss), que se explica pelo fato de que as partículas começaram a fluidizar quando ocorreu uma redução da umidade superficial. A umidade média das amostras na relação 1:2, no ponto de fluidização, era maior por causa da maior umidade no interior das partículas, uma vez que tinham uma maior umidade inicial.

#### IV.2 Cinética de secagem em leito fluidizado

No estudo da cinética de secagem foram feitos ensaios para se avaliar a influência de alguns parâmetros, cujos resultados se encontram nos item D.I do Apêndice D. Observaram-se os efeitos da temperatura na faixa de 60°C a 100°C, para dois níveis de umi-

dades: 0,53 (ga/gss) nas amostras de 1:2 pré-secas, e 0,44 (ga/gss) nas amostras de 1:1 pré-secas. O efeito da vazão foi observado apenas na secagem de amostras obtidas da relação 1:1.

A vazão de trabalho foi mantida em torno de 1,90 ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ ), e foi seleccionada por permitir a fluidização do leito sem provocar elutriação. A garantia de que se trabalhou com velocidades superiores às respectivas velocidades de mínima fluidização, foi a observação do estado de fluidização através da coluna de vidro. Não se fez a determinação experimental da velocidade de mínima fluidização, por causa da dificuldade de se trabalhar com as amostras, que poderiam se aglomerar.

Tabela 04. Comparação da velocidade do ar em alguns ensaios com a velocidade de mínima fluidização teórica.

Exper.	$U_g$	$U_{mf}(a)$	$U_{mf}(b)$
Apênd. D	(m/s)	(m/s)	(m/s)
D.1.4	2,61	1,28	0,87
D.1.6	2,46	1,23	0,88
D.1.8	1,50	1,26	0,77
D.1.11	2,75	1,29	0,84

a - Richardson e S. Jeronimo(1979); b - Campos e Menegalli(1987).

Na tabela 04, pode-se comparar a velocidade do ar, em alguns ensaios, com a velocidade de mínima fluidização obtida das correlações de Richardson e S. Jeronimo(1979), na forma da equação 07, e de Campos e Menegalli(1987), que correlaciona a velocidade de mínima fluidização de um leito de PTS com a umidade. As propriedades do ar nas condições de secagem foram obtidas em Perry e

Chilton(1980). Utilizaram-se as propriedades das partículas na condição inicial de secagem.

Como a correlação de Campos e Menegalli(1987) foi obtida de um leito de PTS, pode-se supor que ela subestima a velocidade de mínima fluidização de PTS/s, por causa das diferenças entre as propriedades físicas dos dois leitos e da capacidade de aglomeração do segundo leito. A correlação de Richardson e S. Jerônimo(1979), que é uma forma modificada da equação de Ergun, certamente não estima também o valor da velocidade de mínima fluidização, pois ela negligencia os efeitos da porosidade do leito e da esfericidade, além da capacidade de adesão, das partículas, porém ela fornece um valor sob o qual provavelmente não ocorrerá fluidização.

Os efeitos dos parâmetros do processo na secagem são descritos a seguir. A figura 04 mostra os resultados completos obtidos num ensaio em leito fluidizado.

A vazão do ar nos experimentos foi bem controlada, mantendo-se praticamente constante ao longo dos ensaios. A velocidade de rotação do agitador também se manteve constante, pois não houve variação da qualidade da fluidização suficiente para alterar as rotações do agitador, isto é, o torque causado pelo motor era superior à força de reação causada pelo leito de partículas. As propriedades psicrométricas do ar ambiente também não variaram significativamente durante a secagem, pois o tempo dos ensaios era re-

lativamente curto, no máximo de uma hora. Outro parâmetro também bem controlado foi a temperatura do ar na entrada do leito, como se pode ver na figura 04.

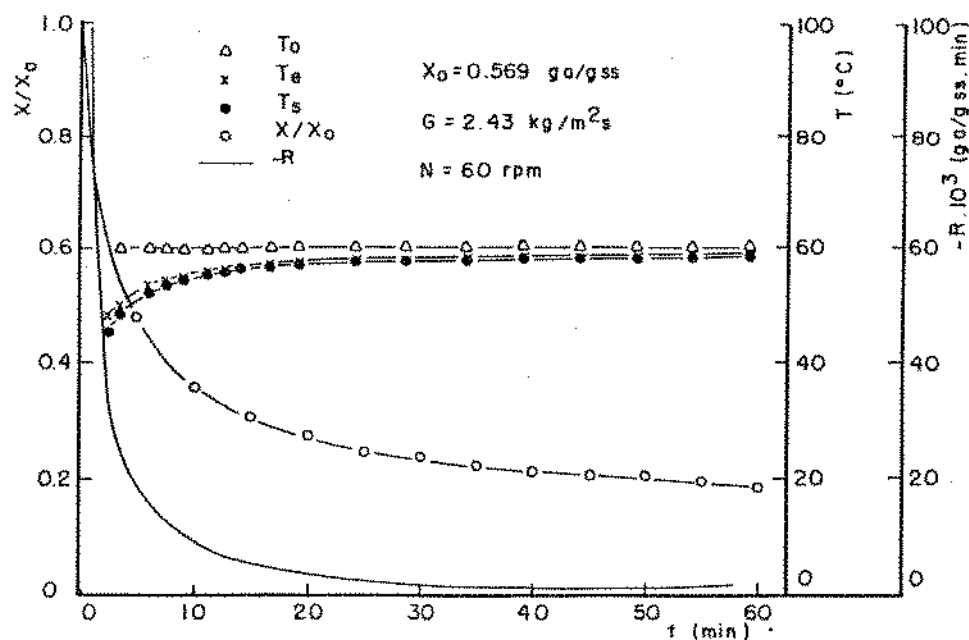


Figura 04. Resultados de um ensaio de secagem em leito fluidizado, com amostra de (1:2).

Sob as condições deste trabalho não houve elutriação de partículas, ocorrendo sim, elutriação de pó vermelho (sangue seco), liberado por atrito entre as partículas. O aumento da velocidade do ar aumentava essa elutriação, pois causava uma maior mistura no leito, enquanto que a inexistência de agitação a diminuía. As massas do elutriado variaram de 2,0 g a 10,0 g (menor que 2,5% da massa total do leito), e com unidade sempre um pouco menor que a unidade final das amostras, provavelmente por causa do diâmetro reduzido, e por estar inicialmente localizado na superfície das partículas.

Observando-se a curva de variação de umidade e da taxa de secagem com o tempo, na figura 04, percebe-se que não houve período de secagem a taxa constante, havendo sim, uma rápida queda na taxa de secagem nos primeiros dez minutos do ensaio. Os únicos dados realmente medidos nos primeiros cinco minutos, foram as temperaturas de emulsão e a de saída do ar de secagem, logo, não se conhece efetivamente o que ocorreu nesse intervalo, porque os dados da taxa de secagem foram obtidos por interpolação.

No trabalho de Meirelles(1984), o segundo termopar fornecia um valor bastante próximo da temperatura de bulbo úmido do ar, no primeiro período de secagem, pois esse termopar media a temperatura da superfície das partículas. Neste trabalho não foi observada adesão de partículas com esse termopar, logo, esse indica uma temperatura intermediária entre a do ar e a da partícula (chamada aqui de temperatura de emulsão). A temperatura de bulbo úmido do ar de secagem era de  $29,1^{\circ}\text{C}$ . A temperatura de emulsão, medida pelo segundo termopar, evoluiu acompanhando a temperatura do ar de saída, tendendo ambas, assintoticamente, para a temperatura do ar de entrada. Na primeira leitura, aos dois e meio minutos, a diferença entre as temperaturas de emulsão e a de saída, foi de  $3,8^{\circ}\text{C}$ , diminuindo para menos de  $0,8^{\circ}\text{C}$  depois dos dez primeiros minutos. Essa pequena diferença entre as temperaturas foi causada por um alto coeficiente de transferência de calor no leito. A não observação de um período no qual as temperaturas de emulsão e a de saída permanecem constantes, também indica a inexistência do primeiro período de secagem (Kitic e Viollaz(1984)).

#### IV.2.1 Influência da agitação na secagem

A secagem num leito perfeitamente fluidizado ocorre como sob condições de secagem constantes, logo, a influência da agitação inexistente. Em leitos fracamente fluidizados, a agitação tem importância no sentido de destruir os canais preferenciais de escoamento do ar e de melhorar a mistura do leito.

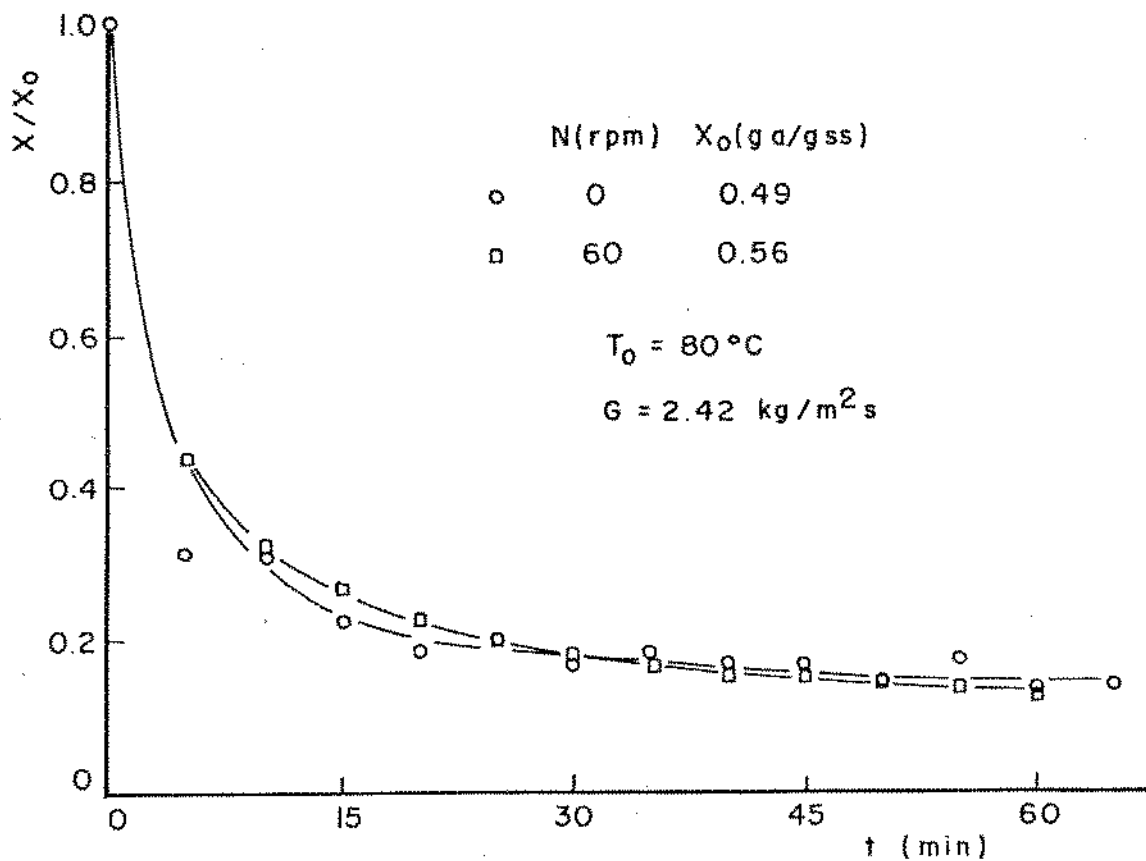


Figura 05. Influência da agitação na secagem em leito fluidizado.

Na figura 05, observa-se a influência da agitação na secagem a 80°C, em leito fluidizado. Nota-se que os pontos experimentais obtidos sem agitação são dispersos, apesar de apresentarem uma tendência que coincide com a tendência da curva formada pelos pontos obtidos sob agitação.

A dispersão dos pontos obtidos sem agitação, foi causada pela falta de homogeneidade da umidade no leito e pela dificuldade na coleta de amostras. A formação de grumos, mesmo que poucos, com diâmetros superiores à média, causou a não homogeneidade, enquanto que o leito raso, e sem agitação, dificultou a coleta de amostras. No início da secagem, a tendência foi de coletar partículas mais secas, por serem arrastadas mais facilmente.

Como nos ensaios realizados com agitação a 60 rpm obteve-se bons resultados, bem ajustados, não se estudou um possível efeito da variação da velocidade da agitação na secagem. Considerando-se que não houve formação de grumos, que o leito fluidizou, e que não houve existência do período de secagem a taxa constante, os efeitos da variação da velocidade do agitador seria desprezível logo, todos os ensaios foram feitos com velocidade de 60 rpm. Meirelles(1984), secando bagaço de cana em leito fluidizado e sob agitação, não notou diferenças significativas em secagens realizadas com a rotação do agitador variando de 40 a 136 rpm.



## IV.2.2 Repetitividade dos ensaios de secagem

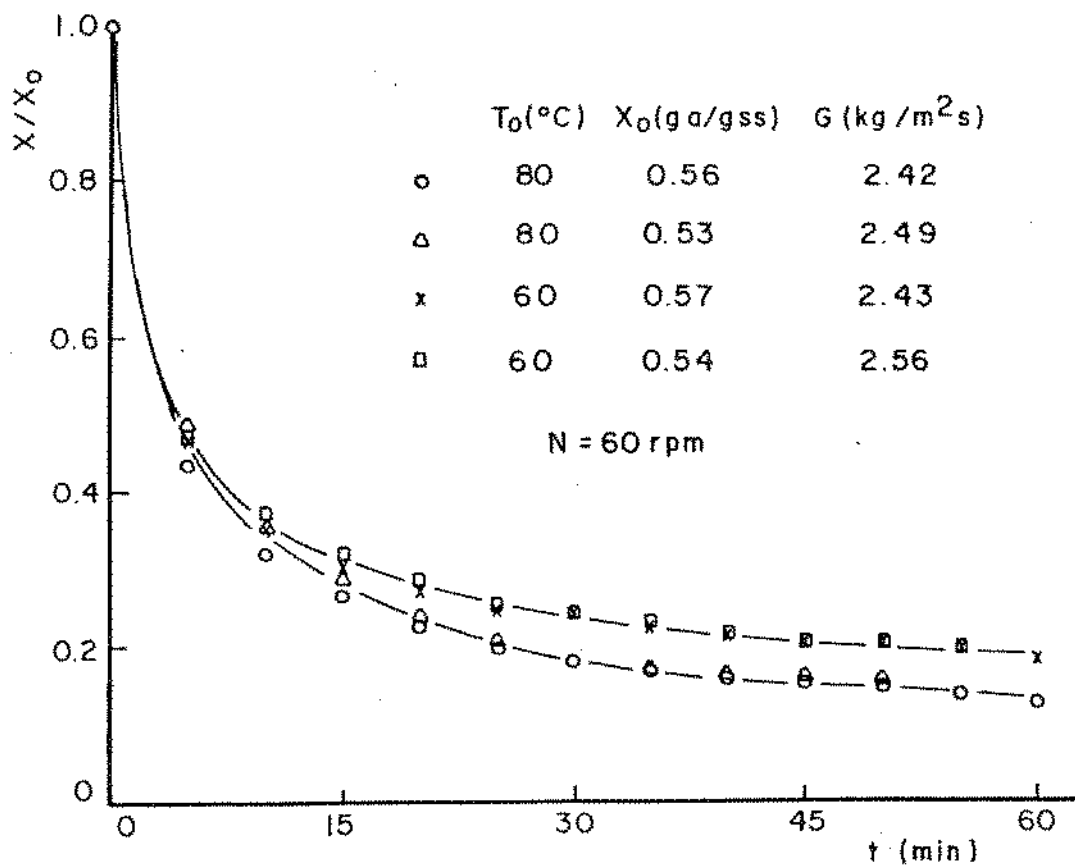


Figura 06. Repetitividade dos ensaios em leito fluidizado.

A condição de repetitividade dos experimentos foi observada através de ensaios de secagem de amostras na relação de 1:2, em duas condições de temperatura: 60°C e 80°C; conforme a figura 06 (a diferença nas umidades iniciais é devido à pré-secagem).

## IV.2.3 Influência da vazão do ar na secagem

Foram feitos três ensaios com vazões do ar diferentes para se observar a sua influência na secagem. Nota-se, na figura 07, que os resultados dos três ensaios podem ser representados por uma única curva. Conclui-se, portanto que, nas condições deste trabalho, a variação da vazão do ar não influencia a secagem.

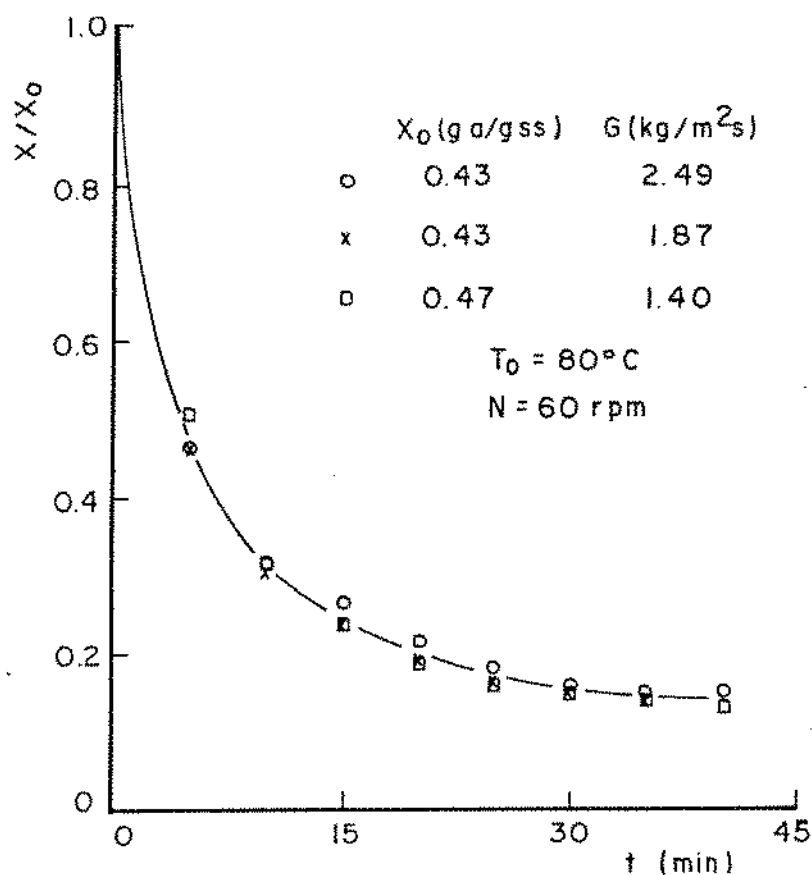


Figura 07. Influência da vazão do ar na secagem em leito fluidizado.

Vaněcěk e col. (1966) e Treybal (1981), citam que quando a difusão interna da umidade controla o processo, a velocidade do ar não influencia a taxa de secagem. Suarez e col. (1980) e Aguerre e col. (1982) sugerem que o estudo do efeito de diferentes velocidades do ar indica a resistência que domina o processo. Pode-se afirmar então, que nos ensaios representados na figura 07, a re-

sistência interna controla o processo, complementando as observações feitas a partir da figura 04. Dessa maneira, mesmo que esse estudo fosse realizado com maiores umidades (1:2), o comportamento se repetiria.

#### IV.2.4 Influência da temperatura na secagem

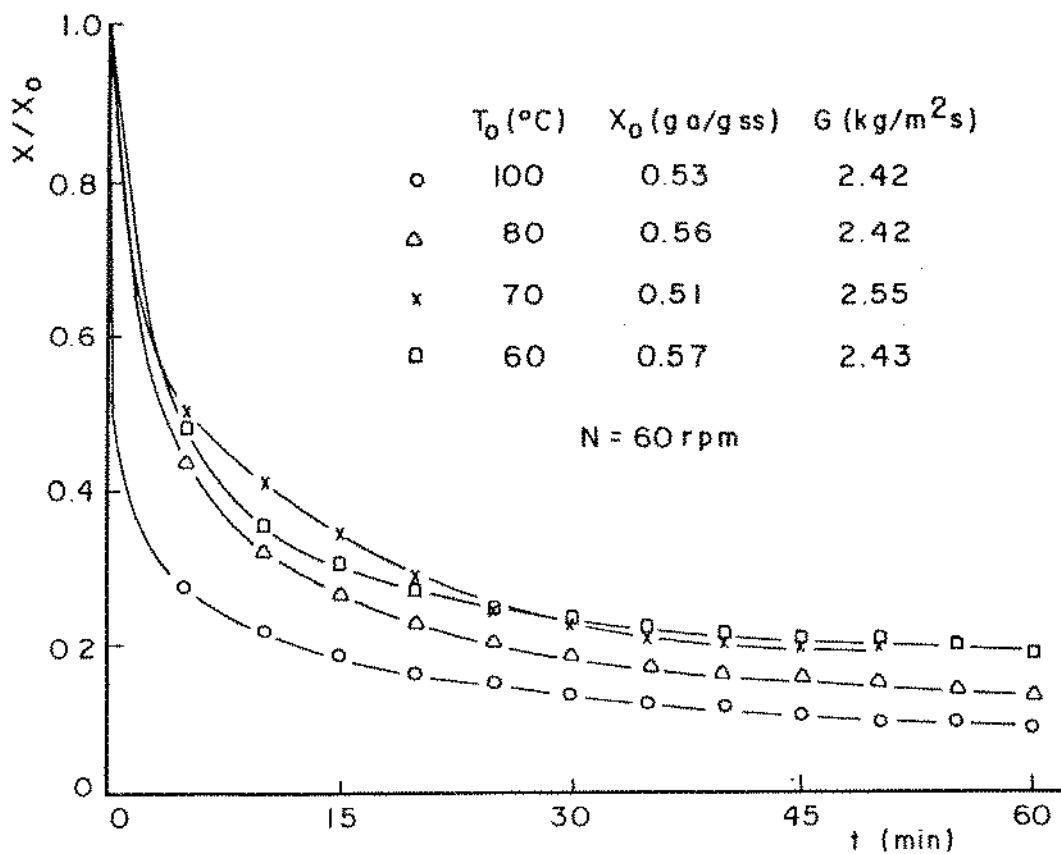


Figura 08. Influência da temperatura do ar na secagem em leito fluidizado.

Na figura 08 são mostrados os resultados experimentais, na mesma faixa de vazão, de umidade inicial (1:2) e de rotação, com temperaturas de secagem diferentes. Nota-se que o aumento da

temperatura favoreceu a secagem, não só pelo aumento do coeficiente de transferência de calor, mas por um efeito sobre a difusividade aparente. Vaněcěk e col. (1966) afirmam que o efeito da temperatura é fraco quando a resistência interna controla a secagem com energia de ativação em torno de 5000 cal/g-mol, mas que pode ser considerável quando a energia de ativação for da ordem de 10000 cal/g-mol. Dessa forma, pequenas diferenças de temperaturas, em ensaios conduzidos sob baixas temperaturas, podem não ser suficientes para causar diferenças significativas no comportamento da secagem.

#### IV.2.5 Influência da umidade inicial na secagem

A umidade inicial das amostras é função da relação de mistura de PTS/s e da pré-secagem. Como não se conseguiu pré-secar a mistura na relação 1:3, apenas se obtiveram duas faixas de umidades iniciais. Os resultados dos ensaios realizados nessas duas faixas, a 80°C, são mostrados na figura 09.

Observa-se que há uma pequena diferença nas curvas de secagem, provavelmente causada pela pequena diferença nas umidades iniciais (1:1 e 1:2). Para se conhecer a real influência da umidade inicial, ou da relação de mistura PTS/s, seria necessário ampliar a diferença entre elas e aumentar o número de ensaios com diferentes umidades iniciais. Isso ficou impossibilitado por causa da necessidade da pré-secagem.

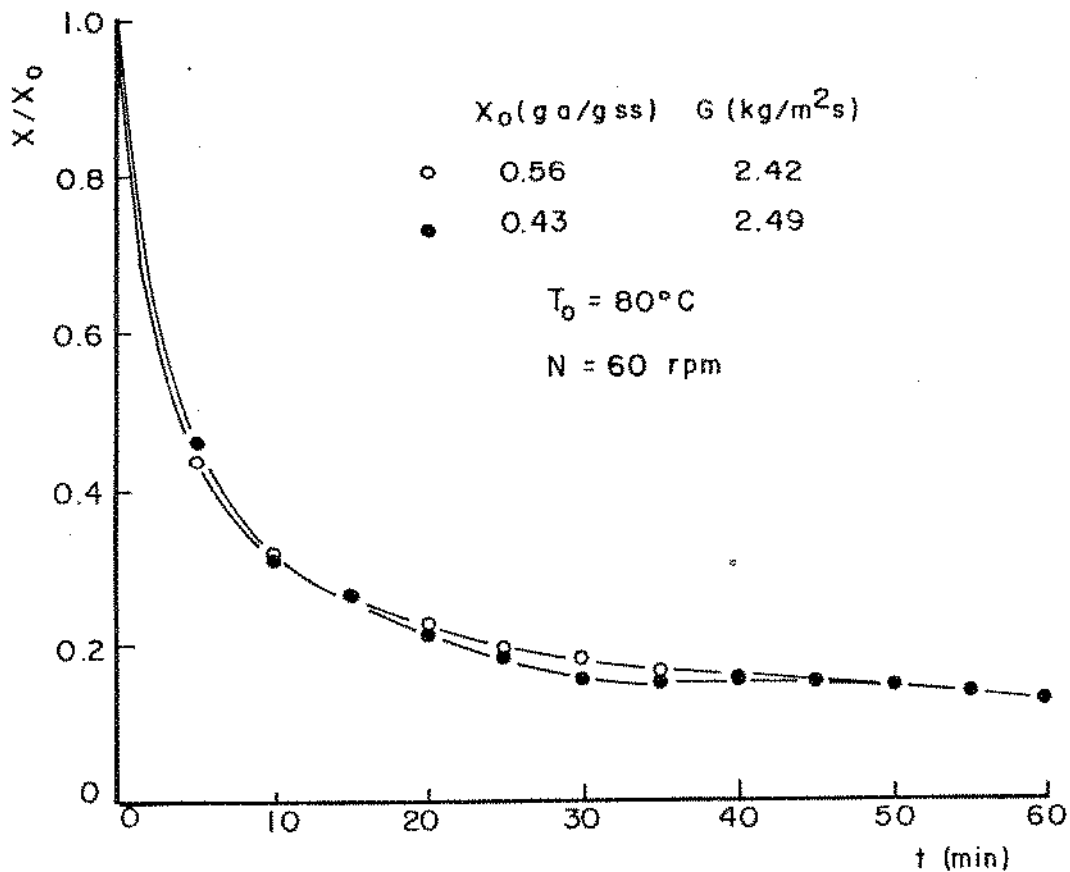


Figura 09. Influência da umidade inicial na secagem em leito fluidizado. ○ (1:2); ●(1:1).

#### IV.3 Cinética de secagem em leito fixo

O estudo da cinética de secagem em leito fixo foi realizado com a mistura de PTS/s em três proporções (1:1, 1:2 e 1:3), logo, com três níveis de umidade, e com temperaturas de secagem variando de 60°C a 80°C, havendo um ensaio com 87°C. Os resultados de todos os ensaios conduzidos em leito fixo encontram-se no item D.II do Apêndice D. Na figura 10 encontram-se os resultados completos de um ensaio.

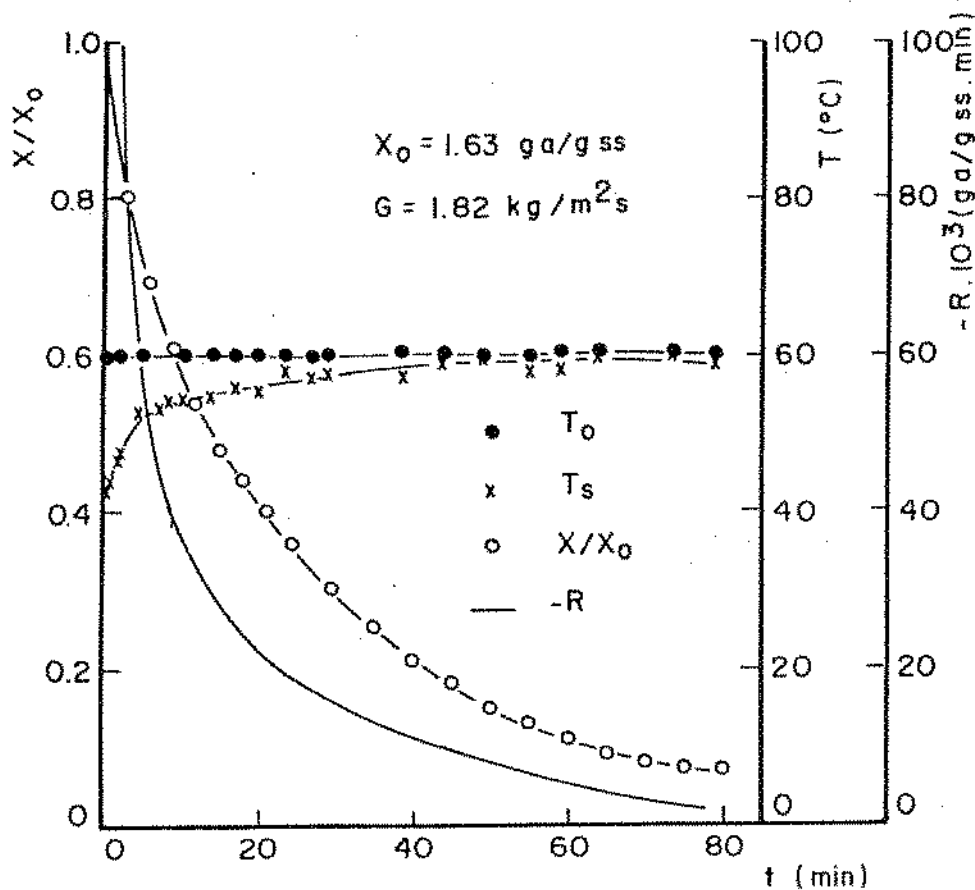


Figura 10. Resultados de um ensaio de secagem em leito fixo, com amostra de (1:3).

O comportamento da secagem em leito fixo foi análogo ao da secagem em leito fluidizado, salvo as diferenças nas condições de trabalho, principalmente da umidade inicial. Observou-se uma rápida queda na taxa de secagem nos primeiros minutos e uma rápida elevação da temperatura do ar de saída. Esse comportamento se acentuou com a elevação da temperatura ou com a redução da umidade inicial da amostra (redução do teor de sangue), mas em nenhum ensaio se notou um período de secagem a taxa constante, nem nos conduzidos nas condições mais amenas, como o representado na figura 10, na maior faixa de umidade inicial (1:3), e com a menor temperatura de secagem.

Considerando-se a ausência do período de secagem a taxa constante e que não se poderia variar amplamente a vazão do ar por causa da condição de leito fixo, não se estudou o efeito da vazão sob a cinética de secagem. A ausência do período de secagem a taxa constante pode ter ocorrido por dois fatores: pela variação da área superficial das partículas com o encolhimento (Charm(1963)); e por causa da natureza da umidade (Keey(1975)) pois, mesmo havendo umidade superficial livre, a água estava na forma de suspensão (de células e macro-moléculas) e de solução (de sais e moléculas de baixo peso molecular), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura.

O ar de secagem a 60°C tinha temperatura de bulbo úmido de 28,5°C, enquanto que a sua temperatura de saída era de 42,3°C no primeiro meio minuto do ensaio, elevando-se para acima de 50°C já nos cinco primeiros minutos. A taxa de secagem caiu de 0,11 (ga/gss.min), no primeiro minuto, para 0,036 (ga/gss.min) nos dez minutos.

O material era colocado na bandeja e posto para secar. Quando se retirava a bandeja para pesá-la, observava-se que nos instantes iniciais, as partículas apresentavam a propriedade de aderirem umas às outras, formando uma estrutura armada, porosa, que ocupava toda a área da bandeja. Com o passar do tempo, percebia-se que a estrutura ia encolhendo lateralmente, isto é, afastando-se das paredes da bandeja e aumentando a porosidade (do leito), causados pelo encolhimento das partículas e dos grumos.

Observou-se também, frentes de secagem nos primeiros minutos. As zonas de secagem caminhavam no sentido parede-centro, e fundo-superfície superior. O aumento da porosidade da estrutura fazia com que as zonas visivelmente mais úmidas no centro da bandeja, desaparecessem. O fato de que a amostra condicionada na bandeja não tivesse mais que três centímetros de altura, portanto também leito raso, amenizou o problema com as zonas de secagem.

A vazão e a temperatura do ar de secagem foram bem controladas. As propriedades psicrométricas do ar de secagem também não variaram consideravelmente ao longo do processo, que durou no máximo, oitenta minutos.

Interrompidos os ensaios de secagem, as amostras apresentaram umidades bastante superiores às respectivas umidades de equilíbrio. Isto ocorreu por causa da balança semi-analítica utilizada que não permitia distinguir satisfatoriamente, duas medidas consecutivas, depois que a taxa de secagem tendia assintoticamente para zero.

#### IV.3.1 Influência da temperatura na secagem

O efeito da temperatura do ar na secagem foi avaliado em três níveis de umidades iniciais, isto é, em três relações de mistura PTS/s (1:1, 1:2 e 1:3). Na figura 11, podem ser vistos os resultados conduzidos com as maiores umidades iniciais (1:3). Obser-



va-se que o aumento da temperatura favoreceu a secagem, mesmo com a pequena diferença entre elas.

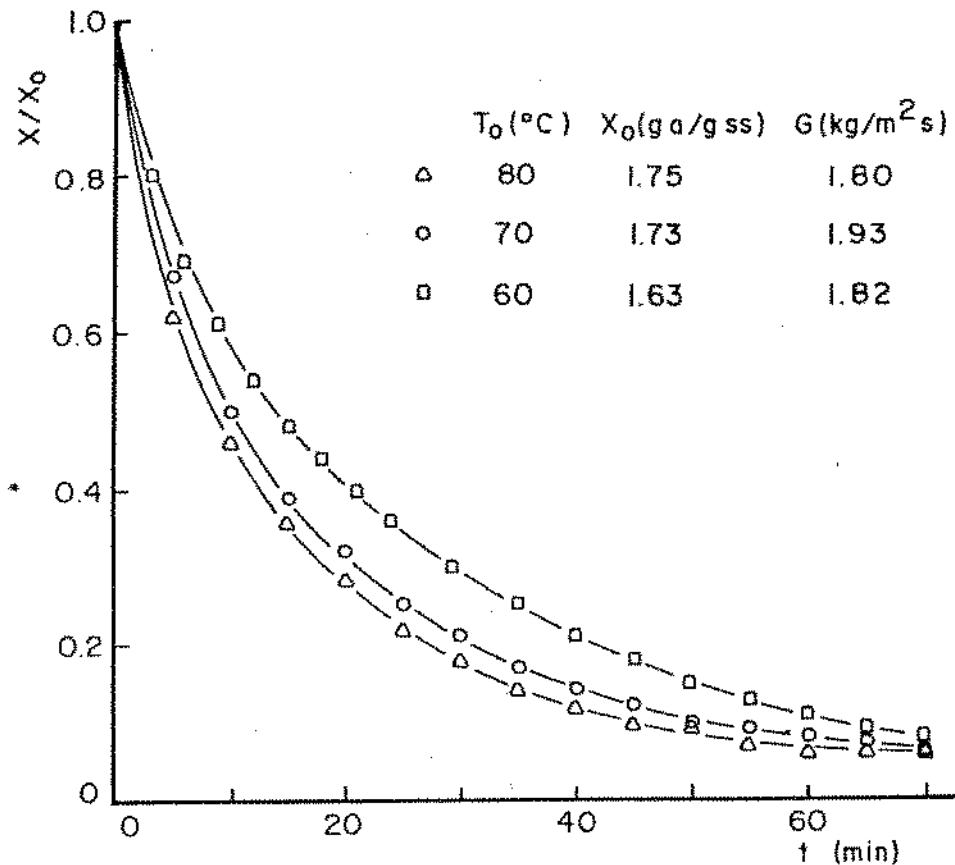


Figura 11. Influência da temperatura do ar na secagem em leito fixo, com amostras de (1:3).

Na figura 12, os resultados dos ensaios com as menores umidades iniciais (1:1), apresentam o mesmo comportamento da secagem com a temperatura, mas ilustram o aumento da perda de umidade percentual nos primeiros minutos, com a redução da umidade inicial (da relação de mistura) e com o aumento da temperatura. Na figura 11, observa-se que até os dez minutos, as umidades estão acima de 40% da umidade inicial, enquanto que na figura 12, estão abaixo de 35%, e mais diferenciadas entre si.

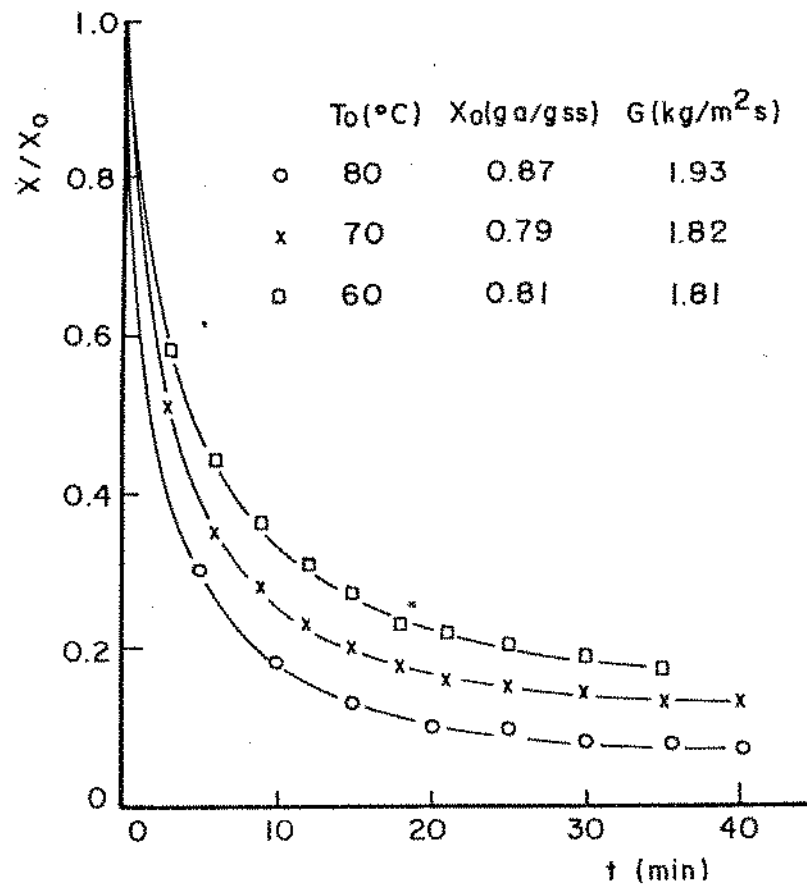


Figura 12. Influência da temperatura do ar na secagem em leito fixo, com amostras de (1:1).

#### IV.3.2 Influência da umidade inicial na secagem

Na figura 13, estão graficados os resultados dos ensaios realizados com três níveis de umidade, obtidos nas proporções de 1:1, 1:2 e 1:3, a  $80^{\circ}\text{C}$ . Observa-se o comportamento comentado no item anterior. Quanto menor a umidade inicial, maior a perda de umidade percentual nos primeiros minutos. Esse efeito ocorreu porque diminuía a camada superficial de sólidos vermelhos a medida que se diminuía a proporção de sangue, o que facilitava a secagem.

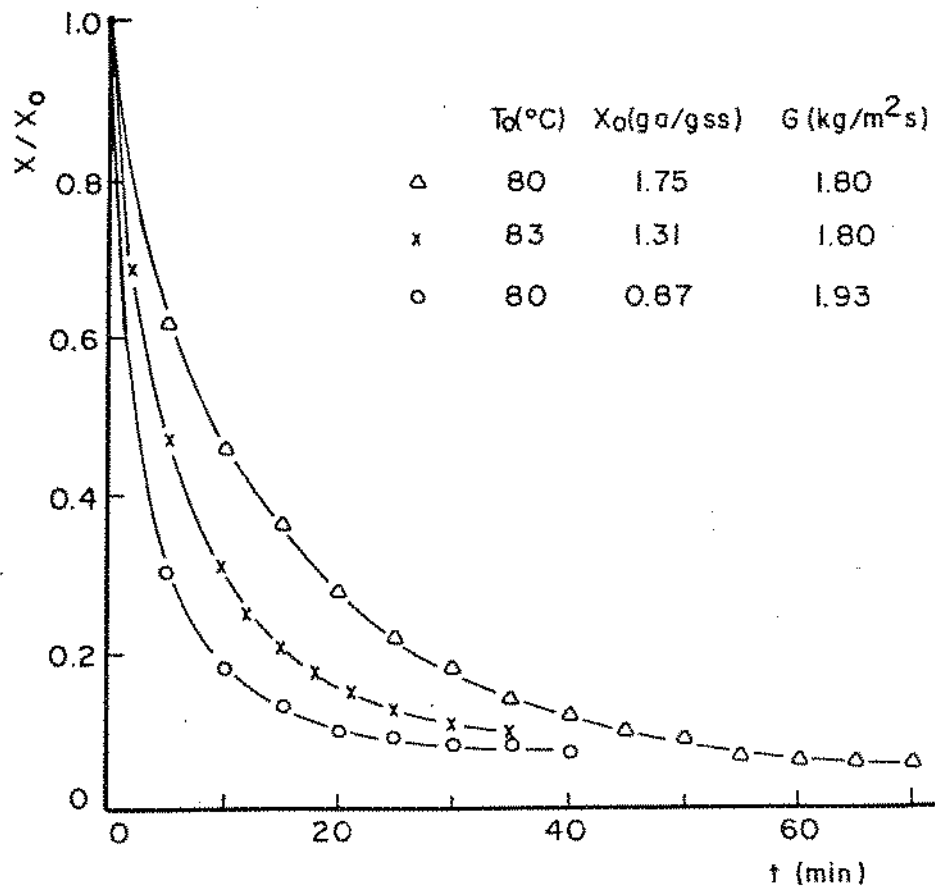


Figura 13. Influência da umidade inicial na secagem em leito fixo. o (1:1); x (1:2);  $\Delta$  (1:3).

#### IV.4 Variação de propriedades físicas durante a secagem

Para esse estudo, diversas porções da mesma amostra foram secadas nas mesmas condições, por tempos variados, com o objetivo de se obter porções com umidades diferentes. A metodologia empregada encontra-se descrita no item III.2.3. Alguns dados das condições de secagem desse estudo podem ser encontrados no item D.III do Apêndice D, junto com os dados da variação de volume.

#### IV.4.1 Variação do volume das partículas

O estudo da variação do volume das partículas foi na realidade, o estudo da variação do diâmetro médio das amostras de partículas, feito segundo a metodologia descrita no item III.5.1.1. Para o cálculo do volume, as partículas foram consideradas esferas com diâmetro igual ao diâmetro médio das mesmas. Na figura 14, estão graficados os resultados desse estudo nas três condições de temperatura: 60°C, 80°C e 100°C.

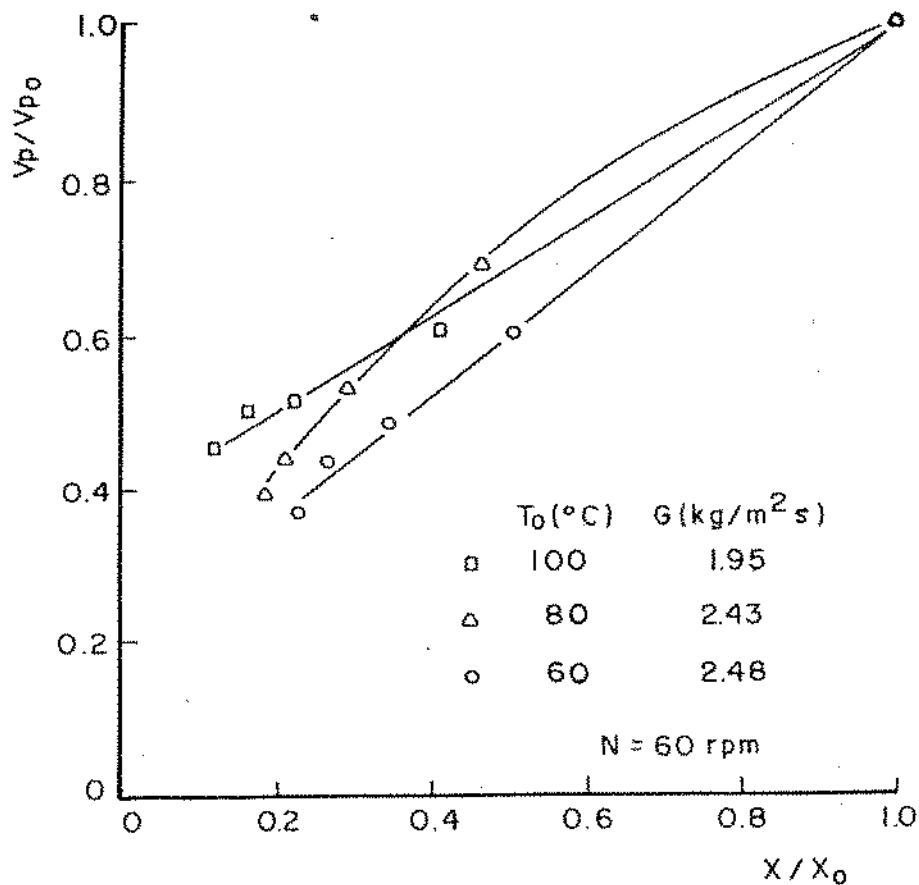


Figura 14. Variação do volume das partículas durante a secagem (1:2).

A curva e as retas mostradas na figura 14, foram obtidas por regressão linear, representando as seguintes equações, para as condições de 60°C, 80°C e 100°C, respectivamente:

$$\frac{V_p}{V_{po}} = 0,79 \frac{X}{X_o} + 0,21 \quad (08)$$

com  $r^2 = 99,68\%$

$$\frac{V_p}{V_{po}} = -0,54 \frac{X}{X_o} + 1,35 \frac{X}{X_o} + 0,18 \quad (09)$$

com  $r^2 = 99,23\%$

$$\frac{V_p}{V_{po}} = 0,61 \frac{X}{X_o} + 0,38 \quad (10)$$

com  $r^2 = 99,43\%$

onde:  $V_p$  - volume das partículas ( $\text{mm}^3$ );

$V_{po}$  - volume das partículas com a umidade inicial ( $\text{mm}^3$ );

$X$  - umidade média das partículas (ga/gss);

$X_o$  - umidade média inicial das partículas (ga/gss).

Charm(1963) afirma que no início da secagem, a variação do volume das partículas é igual ao volume da água perdida, mas que no final, o volume particular diminui menos que o volume da água perdida. Lozano e col.(1983) observaram essa queda da variação do volume na secagem de cubos de batata, de batata doce e de alho, na faixa de  $0 < X/X_0 < 0,15$ . Acima de 0,15, a variação foi linear. Com cubos de cenoura e com ervilhas, os autores observaram linearidade durante toda a secagem.

Nos ensaios conduzidos a  $60^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ , conforme a figura 14, foi observada uma linearidade entre o volume e a umidade. Na condição de  $80^{\circ}\text{C}$ , optou-se pela parábola, por ela melhor representar os pontos experimentais, apesar de não se achar na literatura, menção a tal comportamento. A regressão linear dos pontos obtidos a  $80^{\circ}\text{C}$ , dá uma reta com coeficiente angular de 0,72 e  $r^2 = 97,57\%$ , que pode ser considerado um bom índice de correlação. Dessa forma, essa virtual reta estaria localizada entre as outras duas.

O aumento da temperatura aumenta o encolhimento, enquanto que o aumento da taxa de secagem o diminui (Van Arsdel e col.(1973 a) e Keey(1975)). Os pontos experimentais na figura 14, indicam uma tendência à diminuição do encolhimento com o aumento da temperatura de secagem, conseqüentemente, quem afetou o encolhimento foi a taxa de secagem, que por sua vez aumentava com a temperatura de secagem.

#### IV.4.2. Variação da densidade aparente das partículas

Os dados relativos ao estudo da variação da densidade aparente das partículas, estão graficados na figura 15. Os pontos experimentais das densidades foram correlacionados com as respectivas umidades, formando as equações 11, 12 e 13, para 60°C, 80°C e 100°C, respectivamente.

$$\rho_{ap} = 0,1027 X + 1,0176 \quad (11)$$

com  $r^2 = 34,46\%$

$$\rho_{ap} = 0,1393 X + 1,0036 \quad (12)$$

com  $r^2 = 78,07\%$

$$\rho_{ap} = 0,1519 X + 0,9920 \quad (13)$$

com  $r^2 = 61,65\%$

onde:  $\rho_{ap}$  - densidade aparente da partícula ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $X$  - umidade média da partícula ( $\text{ga/gss}$ ).

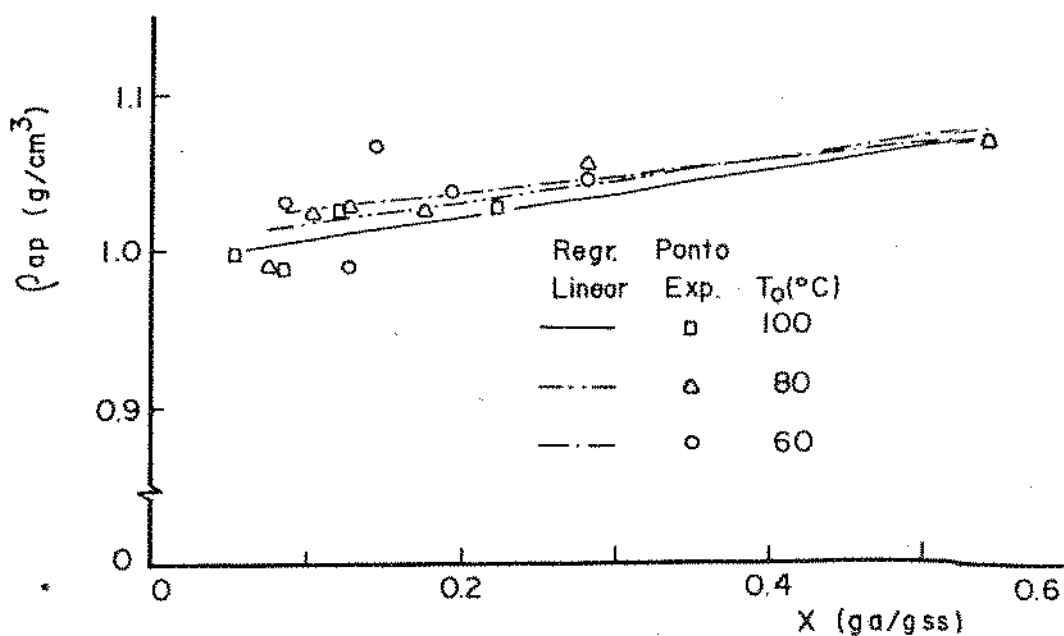


Figura 15. Variação da densidade aparente das partículas durante a secagem (1:2).

Nota-se, na figura 15, que os pontos experimentais apresentam uma dispersão bastante acentuada, que é demonstrada nos baixos coeficientes de correlação das equações 11, 12 e 13.

Em vários trabalhos publicados, também se encontram resultados dispersos, em virtude da dificuldade dessas determinações. Neste trabalho a dispersão deve-se, provavelmente, a erros experimentais, apesar dos cuidados tomados. O fluido utilizado, a glicerina, é muito viscoso, o que possibilita a incorporação de ar. A massa de partículas, por sua vez, não foi muito grande nos picnômetros de 25 ml, para facilitar o trabalho com a glicerina que poderia manter espaços vazios entre as partículas, se essas formassem um leito fundo dentro do picnômetro. Além disso, cada



ponto foi obtido da secagem de uma única amostra, que podia apresentar diferenças, mesmo sendo obtida de um único lote.

Apesar da dispersão, os pontos experimentais apresentam uma tendência lógica, que também é revelada pelas correlações obtidas, da variação da densidade com a umidade, no sentido inverso ao da variação do volume (considerações feitas no encolhimento), para as respectivas temperaturas. Ou seja, o aumento da temperatura favoreceu a diminuição da densidade ao longo da secagem. Pode-se concluir, portanto, que não se pode estudar a variação da densidade no sentido inverso, qual seja o de umidificar as partículas e determinar suas densidades, para correlacioná-las com a umidade, pois negligencia-se os efeitos observados neste trabalho, apesar das pequenas diferenças numéricas.

Pode-se observar, na figura 15, que o material não se comportou como elástico, pois a redução do volume se diferenciou da redução da massa (umidade), sendo inclusive, maior, de forma que a densidade diminuiu com a redução da umidade. Produtos formados por macromoléculas parcialmente alinhadas, podem apresentar encolhimento anisotrópico.

Na literatura não se encontra uma lei única do comportamento da densidade com a umidade. Lozano e col. (1980, 1983) secaram seis tipos de alimentos em pedaços e observaram os mais variados comportamentos da densidade com a umidade: linearidade decrescente com a umidade, e não linearidade, inclusive apresentando máximo.

Meirelles(1984) observou uma linearidade decrescente entre a densidade aparente do bagaço de cana e a umidade do material.

#### IV.5 Distribuição de tamanhos do produto obtido em leito fluidizado

É imprescindível que no estudo de secagem se avalie a dimensão característica das partículas, por ser essa um parâmetro importante: a queda da umidade varia com o quadrado dessa dimensão. Considerando-se que as partículas secas de PTS/s.são esféricas, tem-se como dimensão característica os seus diâmetros. O diâmetro médio das partículas foi determinado a partir da avaliação da distribuição de tamanhos, segundo a metodologia descrita no item III.5.1.1.

Durante a secagem de materiais biológicos, ocorre variação do diâmetro médio das partículas. Por isso é muito comum na literatura, se tomar como referência o diâmetro médio imediatamente antes da secagem. Neste trabalho, como não foi possível peneirar as amostras entre as operações de pré-secagem e secagem, pois com o passar do tempo as partículas readquiriam a capacidade de adesão, optou-se por se peneirar o produto final.

Os produtos obtidos apresentam uma certa dispersão em torno da peneira de Tyler 6, mas que não varia muito entre as amostras. Isso pode ser observado na figura 16, onde se apresenta

a distribuição de tamanhos de quatro amostras. Observa-se que as maiores variações ocorreram com as partículas de diâmetros superiores a 3,36 mm, nas amostras de maiores unidades (maior proporção de sangue). Na faixa de menores unidades (1:1), o comportamento foi o mesmo, apresentando porém, um menor diâmetro médio, provavelmente, por causa da menor massa de sólidos sanguíneos acrescentada à PTS.

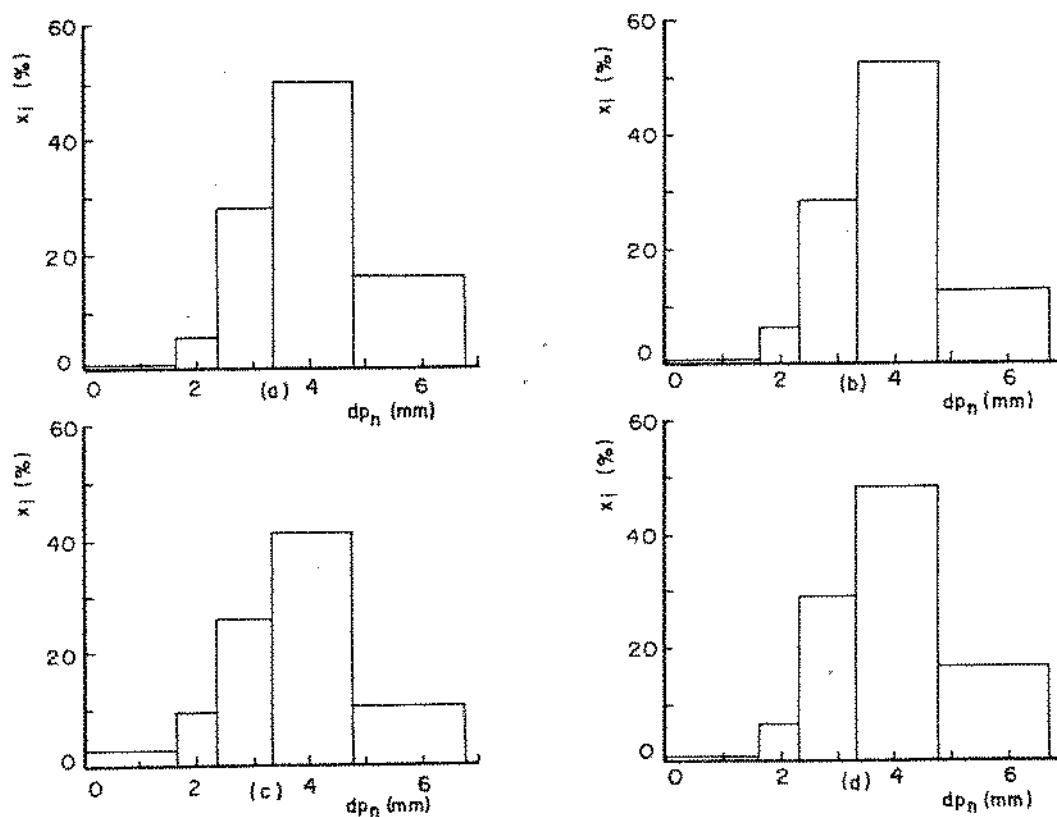


Figura 16. Curvas de distribuição de tamanhos de produtos obtidos em leito fluidizado. a) D.I.6 (1:2); b) D.I.4 (1:2); c) D.I.8 (1:1); d) D.I.11 (1:2).

Na tabela 05, encontram-se os resultados de distribuição de tamanhos das amostras obtidas em leito fluidizado. Os diâmetros médios apresentados nessa tabela foram calculados com a seguinte equação:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (14)$$

onde:  $\bar{d}_p$  - diâmetro médio das partículas (mm);

$d_{pi}$  - diâmetro médio das partículas retidas entre uma peneira e sua subsequente (mm);

$x_i$  - fração mássica das partículas com diâmetro médio igual a  $d_{pi}$ .

A equação 14 foi utilizada por se basear na área superficial das partículas, que é um fator importante num estudo de leito fluidizado (Kunii e Levenspiel(1969)).

Tabela 05. Resultados dos ensaios de distribuição de tamanho das amostras obtidas em leito fluidizado.

To (°C)	80	80	80	80	70	60	80	60	100
Xo(bs)	0,425	0,429	0,466	0,526	0,508	0,535	0,560	0,569	0,529
Tyler	Fração mássica (xi)								
4	0,128	0,097	0,103	0,263	0,257	0,236	0,128	0,160	0,161
6	0,420	0,429	0,415	0,442	0,443	0,482	0,525	0,501	0,483
8	0,349	0,359	0,359	0,216	0,217	0,215	0,282	0,279	0,289
10	0,091	0,099	0,095	0,069	0,072	0,060	0,062	0,055	0,063
14	0,013	0,016	0,028	0,010	0,011	0,008	0,003	0,006	0,004
$\bar{d}_p$ (mm)	3,32	3,25	3,19	3,69	3,67	3,71	3,54	3,58	3,55

#### IV.6 Qualidade proteica dos produtos

As análises de proteínas totais confirmaram o alto teor de proteínas dos produtos desidratados. Os produtos obtidos com 1:1 de PTS/s, apresentaram teores em torno de 63,9% (bs) de proteínas, das quais 75% é da PTS e 25%, do sangue; com 1:2, apresentaram 68,5% (bs) (60% e 40%); e com 1:3, 72,0% (bs) (50% e 50%). A relação entre as proteínas da PTS e as do sangue, foram calculadas por balanço de massa, considerando-se que a PTS tem 59,1% (bs) (obtido experimentalmente), e o sangue 18% (bu), de proteínas.

Da proteína total da PTS, 11,5% é solúvel, e considerando-se que no sangue esse valor seja de 100%, obteve-se teoricamente, o teor de proteínas solúveis que as amostras teriam se não sofressem um tratamento térmico, que seriam de 33,6%; 46,9% e 55,8% (prot. sol./prot. totais) para os produtos de 1:1, 1:2 e 1:3, respectivamente. Os valores experimentais encontram-se na tabela 06.

Tabela 06. Resultados das análises de proteínas solúveis dos produtos (% bs)

Rel. Mist.	Leito fixo			Leito Fluid.	
	1:1	1:2	1:3	1:2	
To 60,0	34,1	42,2	47,6	27,1	28,3(b)
(±C)70,0	33,8	36,9	37,8	46,3	43,9(c)
80,0	25,4	26,3(a)	28,1	39,1	

a- To=83,0°C; b- To=80,0°C e 1:1; c - To=100°C

Observa-se a influência do tratamento térmico, pois houve perda de solubilidade em todas amostras, mas diferenciado nos dois secadores. O efeito da temperatura sobre as proteínas, no leite

fluidizado, foi menor por causa da maior taxa de secagem nos primeiros minutos, pois o produto menos úmido é mais resistente, e também, porque o tempo de secagem foi menor.

Nota-se também, que a solubilidade das proteínas sofreram influência de dois fatores: temperatura e da relação PTS/s. O aumento da temperatura reduziu a solubilidade, principalmente no leite fixo. O aumento da proporção de sangue aumenta o teor de proteínas solúveis, por causa da maior quantidade de proteínas solúveis incorporadas, porém foi nessa situação que ocorreu as maiores perdas em relação à solubilidade teórica, porque, em contrapartida, as proteínas do sangue são mais termo-sensíveis e também devido à umidade elevada, que favoreceu o efeito térmico.

Contreras-Guzmán(1984b) secou PTS/s com 1:2, a 65°C e obteve um produto com 25,6% (bs) de proteínas solúveis. Esse valor é apenas comparável aos produtos secos a 80°C, neste trabalho, observando-se, portanto, que tanto o leite fixo como o fluidizado, nas condições deste trabalho, secam o produto, conservando-lhe mais a solubilidade das proteínas que o secador tipo estufa.

## Capítulo V

REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM  
EM LEITO FLUIDIZADO E EM LEITO FIXO

Foi visto nos itens IV.2 e IV.3 que as amostras de PTS/sangue secaram sempre, no período de secagem a taxa decrescente, logo, o processo foi controlado pela resistência interna. Nesse caso, a teoria clássica, por analogia com a condução transiente de calor (Keey(1975)), sugere que a queda da umidade ocorre em dois estágios: um período indutivo seguido por uma queda exponencial da umidade com o tempo. Resultados de diversos trabalhos divergem quanto ao começo desse segundo estágio. Discrepâncias dessa suposição podem ocorrer se o material não tiver uma distribuição uniforme da umidade inicial, ou por causa da variação da difusividade com a umidade (Treyball(1981)), ou ainda por causa do encolhimento durante a secagem (Viollaz e Suarez(1985)).

Para se observar esses dois estágios é necessário graficar a umidade residual contra o tempo em coordenadas semi-log. Nas figuras 17 e 18, estão graficados alguns resultados experimentais, em semi-log, obtidos em leito fluidizado e em leito fixo, respectivamente. As umidades de equilíbrio, utilizadas no cálculo da umidade residual, foram obtidas das isotermas de sorção de amostras com relação de PTS/s de 1:3, que se encontram no Apêndice A. Considerou-se como umidades de equilíbrio das amostras de 1:1 e 1:2, a respectiva umidade obtida para a amostra de 1:3.

Nota-se, nas duas figuras, que não ocorreu nenhum dos dois estágios. O período de indução não é observado, porém pode ter ocorrido no espaço de tempo anterior à coleta da primeira amostra, enquanto que a queda exponencial da umidade realmente não se verifica.

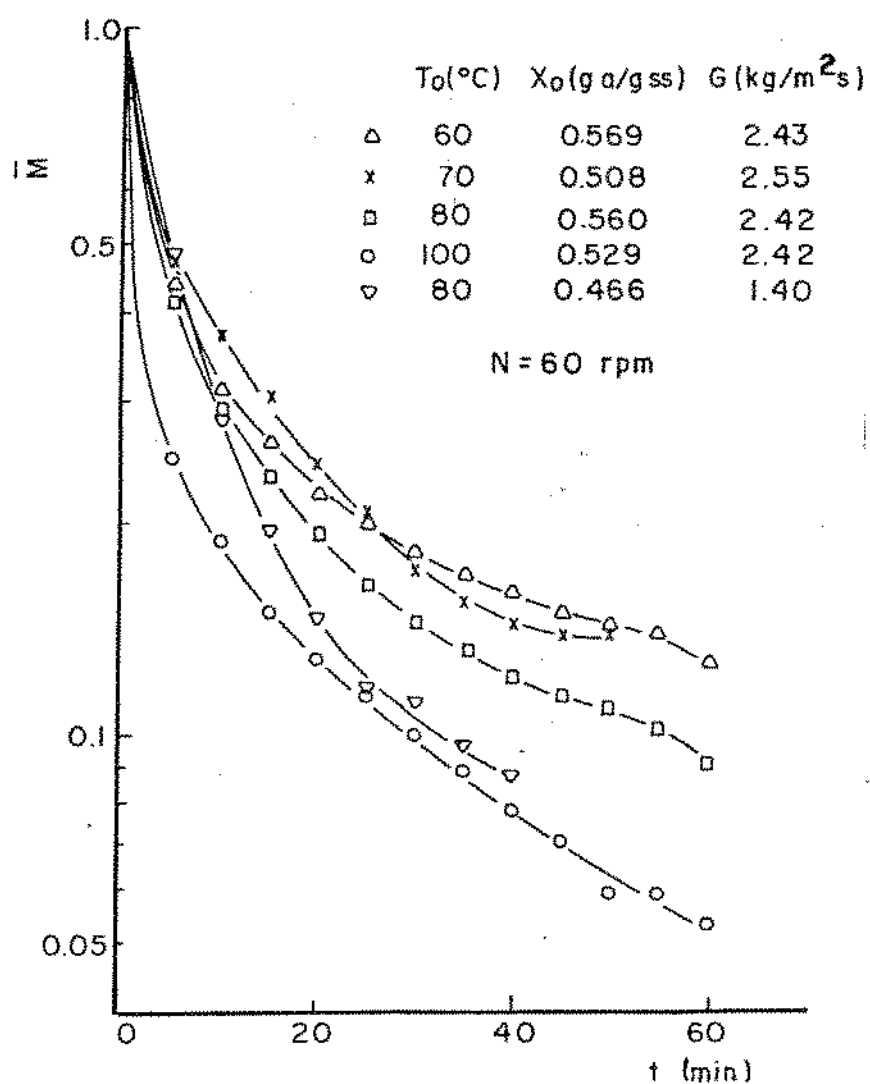


Figura 17. Curvas de secagem em leito fluidizado.



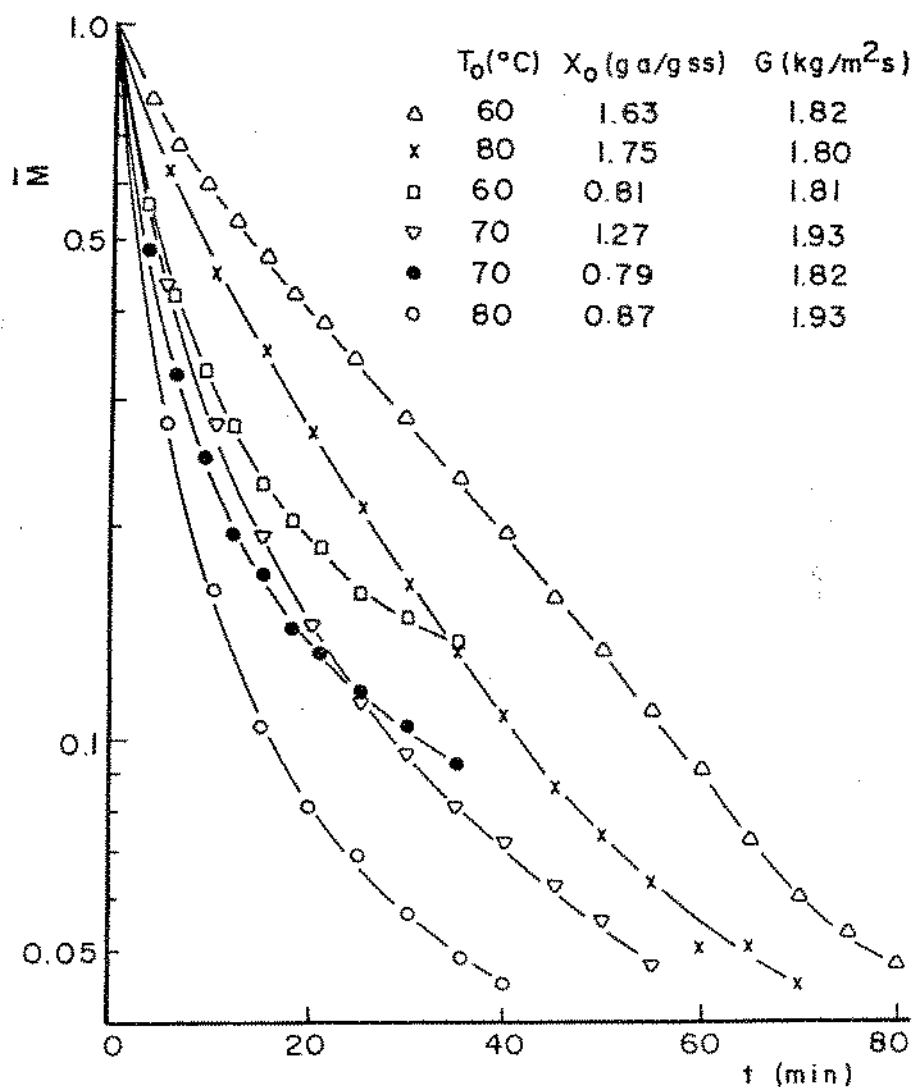


Figura 18. Curvas de secagem em leito fixo.

Pode-se descartar o efeito de uma possível desuniformidade, por causa da pré-secagem, na umidade inicial das partículas em leito fluidizado, porque em leito fixo não houve tal operação e, no entanto, o comportamento foi idêntico, apesar das diferenças das magnitudes. O encolhimento das partículas foi visível, e pode ter ocorrido ainda, um efeito da variação da difusividade com a

umidade. Logo, mesmo que a difusão da umidade seja "fickiana", não se pode utilizar a solução analítica da segunda lei de Fick para se estudar tal processo. Pode-se supor ainda, que existiu um efeito causado por dois fatores intimamente relacionados: a não uniformidade das partículas (o sangue tendia a ficar na superfície) e uma provável diferença nas umidades de equilíbrio da PTS e do sangue seco, nas mesmas temperaturas (Farinati e Suarez(1984)). Pode ser também, que a umidade da superfície não era a umidade de equilíbrio encontrada nas isotermas, pois as secagens foram realizadas com ar de baixa umidade relativa (Aguerre e col.(1984)).

Optou-se por se tentar esclarecer o comportamento dos pontos experimentais a partir da solução numérica da segunda lei de Fick, cujos resultados são apresentados no item V.2. Antes porém, no item V.1, utiliza-se uma equação empírica para representar as curvas de secagem.

#### V.1 Utilização de uma equação empírica

As equações empíricas, amplamente utilizadas na literatura, nada explicam sobre o fenômeno da secagem, mas são capazes de representar as curvas de secagem, tornando-se úteis em comparações de ensaios e, principalmente, em projetos de secadores. Neste trabalho, optou-se pela equação de Page (equação 06) pelo seu poder de ajuste de pontos, por isso muito usada para representar dados de secagem de materiais biológicos, e por ser de fácil uso, pois tem apenas, dois parâmetros.

Tabela 07. Valores das constantes da equação de Page, das curvas de secagem em leito fluidizado.

To (°C)	60	70	80	100	80
Exp.	D.1.6	D.1.12	D.1.4	D.1.11	D.1.8
K (m <sup>1</sup> )	-0,5002	-0,3480	-0,4967	-0,8280	-0,3185
n	0,3511	0,4639	0,3893	0,3059	0,5752
r <sup>2</sup>	0,9773	0,9927	0,9904	0,9947	0,9686

Os resultados dos ajustes obtidos por regressão linear, são apresentados nas tabelas 07 e 08 para os dados da secagem em leito fluidizado e em leito fixo, respectivamente. Pode-se observar que a equação de Page se ajustou muito bem aos pontos experimentais, com coeficientes de correlação superiores a 97%, podendo ser utilizada para representar as curvas de secagem.

Tabela 08. Valores das constantes da equação de Page das curvas de secagem em leito fixo.

To (°C)	60	70	80	
Exp. 1:3	D.11.1	D.11.2	D.11.3	D.11.6a
K (m <sup>1</sup> )	-0,0887	-0,1243	-0,1490	-0,1487
n	0,7986	0,7573	0,7270	0,6839
r <sup>2</sup>	0,9964	0,9968	0,9980	0,9999
Exp. 1:2	D.11.9	D.11.11		D.11.4a
K (m <sup>1</sup> )	-0,2519	-0,3802		-0,2603
n	0,5926	0,5276		0,6592
r <sup>2</sup>	0,9933	0,9905		0,9875
Exp. 1:1	D.11.8	D.11.10	D.11.5	D.11.7b
K (m <sup>1</sup> )	-0,3488	-0,4621	-0,6837	-0,4823
n	0,5089	0,4809	0,4186	0,5344
r <sup>2</sup>	0,9881	0,9800	0,9765	0,9872

a - To = 83°C; b - To = 87°C.

Não existe um comportamento generalizado que represente a dependência das constantes K e n com os parâmetros da secagem. Misra e Brooker (1980) observaram, na secagem de milho, que K varia

exponencialmente com o logarítmo da temperatura e a velocidade do ar, e que  $n$  varia logaritmicamente com a umidade relativa do ar, e diretamente com a umidade inicial do material. Daudin(1983) apresenta resultados, de vários autores, de secagem de arroz:  $K$  e  $n$  são funções da temperatura e da umidade do ar de secagem. Hutchinson e Otten(1983) secaram, em camada fina, soja e feijão branco e observaram que na secagem de soja  $K$  varia linearmente com a temperatura e  $n$  varia com o produto da temperatura com a umidade relativa do ar, enquanto que, na secagem do feijão branco,  $K$  varia com o quadrado da umidade relativa do ar e  $n$  varia como na secagem da soja.

A obtenção de correlações entre  $K$  e  $n$ , e os parâmetros de secagem está fora dos objetivos deste trabalho, entretanto o comportamento dessas constantes com a temperatura do ar de secagem pode ser observado nas figuras 19 e 20.

Na figura 19, encontram-se graficados os valores de  $K$  e  $n$  contra a temperatura de secagem em leito fluidizado. Pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento parabólico, com máximo e mínimo em  $n$  e  $K$ , respectivamente, na faixa de umidades apresentada na tabela 07. Como se trabalhou apenas com duas faixas de umidades (1:1 e 1:2), não foi possível se observar a variação das constantes com a umidade inicial.

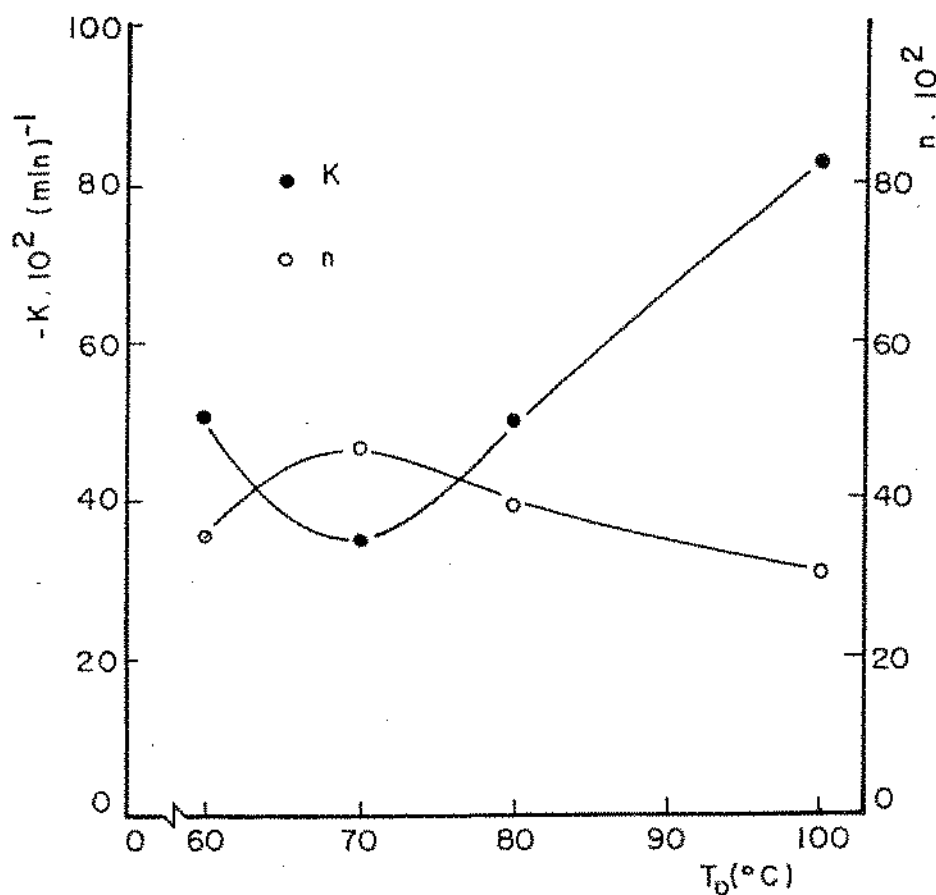


Figura 19. Dependência das constantes da equação de Page com a temperatura do ar, em leito fluidizado (1:2).

Observa-se, na figura 20, a variação das constantes da equação de Page com a temperatura de secagem, para os dados obtidos em leito fixo. Nota-se que as curvas se diferenciam entre os três níveis de umidades iniciais (1:1, 1:2 e 1:3), no sentido de que com a diminuição da umidade acentua-se a parábola, e as curvas formadas por  $K$  e  $n$ , tendem a se cruzar, como na figura 19. Pode-se observar, também, o efeito da umidade inicial, ou seja, da relação de mistura PTS/s, para uma dada temperatura.

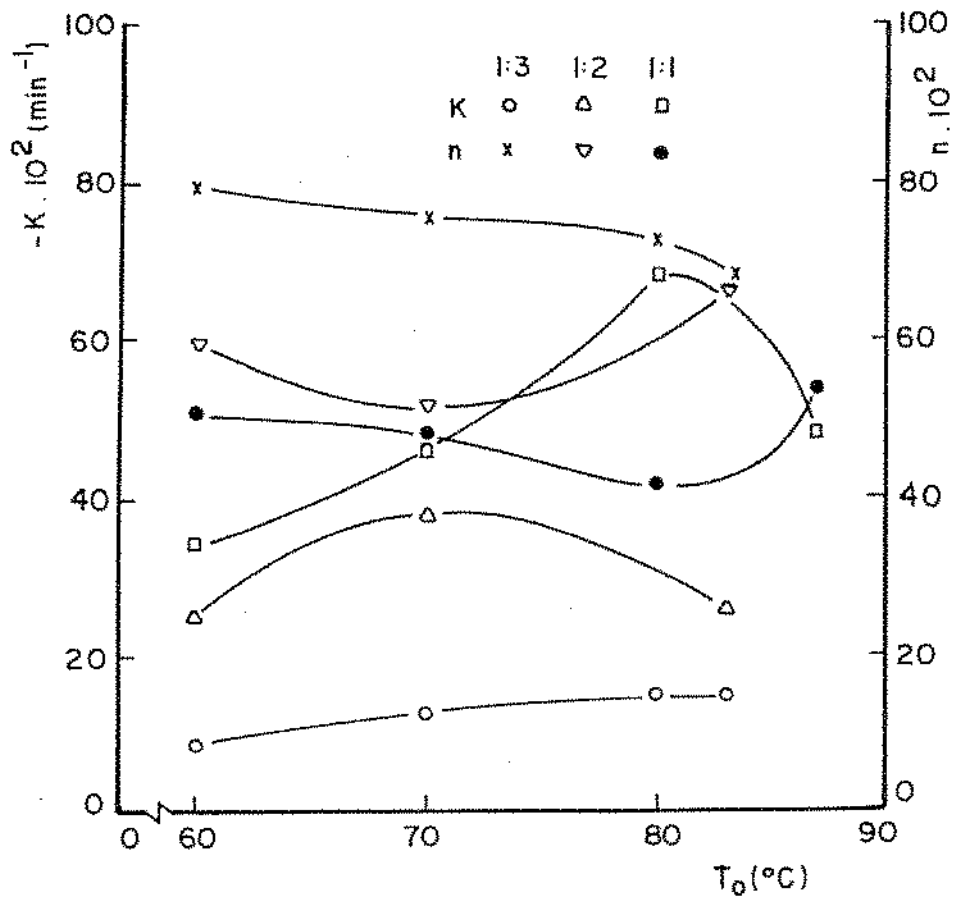


Figura 20. Dependência das constantes da equação de Page com a temperatura, em leito fixo.

## V.2 Utilização da segunda lei de Fick

Considerando-se que a migração da umidade, na secagem das amostras de PTS/s, ocorreu por difusão de líquido e vapor, que a difusividade aparente não depende da concentração de umidade, que as partículas possuem formas aproximadas de esferas e que se pode desprezar o efeito da frente de secagem em leito fixo, representa-se o processo pela segunda lei de Fick em coordenadas esféricas, como a equação 15.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{ap} \left( \frac{2}{r} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial^2 x}{\partial r^2} \right) \quad (15)$$

com as seguintes condições:

$$\text{inicial: } t = 0, \quad x = X_0 \quad (16a)$$

e de contorno:

$$r = r_p, \quad D_{ap} \frac{\partial x}{\partial r} = -k_p (P_{vs} - P_{vo}) \quad (16b)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial r} = 0 \quad (16c)$$

onde:  $x$  - umidade pontual na partícula (ga/gss);

$X_0$  - umidade média inicial (ga/gss);

$t$  - tempo (s);

$D_{ap}$  - difusividade aparente ( $m^2/s$ );

$r$  - coordenada radial (m);

$r_p$  - raio da partícula (m);

$k_p$  - coeficiente de transferência de massa (1/s);

$P_{vs}$  - pressão de vapor da água na partícula (mmHg);

$P_{vo}$  - pressão parcial do vapor de água no ar de secagem (mmHg).

A solução analítica da equação 15 (equação 04), obtida para condições constantes, inclusive o raio, não representa o processo em questão, por causa do encolhimento. Optou-se então, por se resolver a equação 15 numericamente, considerando-se o movimento de fronteira, pelo método de Murray e Landis, utilizado por Nebra e Ismail(1980) e por Gabitto e Aguerre(1985).

O método de Murray e Landis, que emprega diferenças finitas, consiste em se representar a partícula por um sistema de malha variável, considerando-se passos iguais na direção temporal e mantendo-se o número de pontos nodais na direção espacial. Isto faz com que o tamanho da malha, na dita direção, varie (aumenta ou diminui) à medida em que a interface se movimenta, uma vez que um extremo da malha estará na superfície da partícula, e o outro no centro.

No trabalho original, os autores utilizaram uma técnica explícita em diferenças finitas para resolver a equação diferencial. Gabitto e Aguerre(1985) modificaram o método de Murray e Landis, resolvendo a equação com uma técnica implícita, e observaram que essa técnica é mais estável que a outra, apesar dos resultados se ajustarem.

A técnica implícita, no método das diferenças finitas, consiste no cálculo do valor da umidade dos pontos nodais  $M_{n-1}$ ,  $M_n$ , e  $M_{n+1}$ , no tempo  $t_{i+1}$ , a partir dos valores de  $M_n$  no tempo  $t_i$ . A solução da equação diferencial se resume à solução simultânea de um sistema de equações. Maiores detalhes podem ser encontrados em Carnahan e col.(1969).

Foi feito um programa computacional em BASIC, para a integração numérica da equação 15. O sistema de equações foi resolvido pelo método de substituição de Gauss, obtendo-se o perfil de



umidades, que foi integrado utilizando-se a regra de Simpson composta, para o cálculo da umidade média. Para se avaliar a condição de contorno, ou seja, a equação 16b, estimou-se o coeficiente de transferência de massa através de correlações encontradas na literatura. Maiores detalhes, além do desenvolvimento matemático, podem ser encontrados no Apêndice C.

Inicialmente se tentou ajustar a solução numérica da equação 15, considerando-se o encolhimento das partículas e a difusividade constante, com a curva de secagem experimental. Porém os resultados não foram satisfatórios, como se pode observar no exemplo graficado na figura 21.

Optou-se então, por se considerar o efeito da variação da difusividade com a umidade durante a secagem. A solução analítica da segunda lei de Fick com difusividade variável exige que se conheça a função que representa a dependência dessa com o perfil de umidades na partícula (Aguerre e col.(1985)), o que a torna de difícil aplicação, ainda mais considerando-se um encolhimento paralelo. Para se resolver esse problema, considerou-se que a difusividade é função apenas, da umidade média, isto é, ela varia ao longo da secagem, mas despreza-se a sua variação dentro da partícula. Dessa forma, pode-se integrar a equação 15 com a consideração expressa na equação 17.

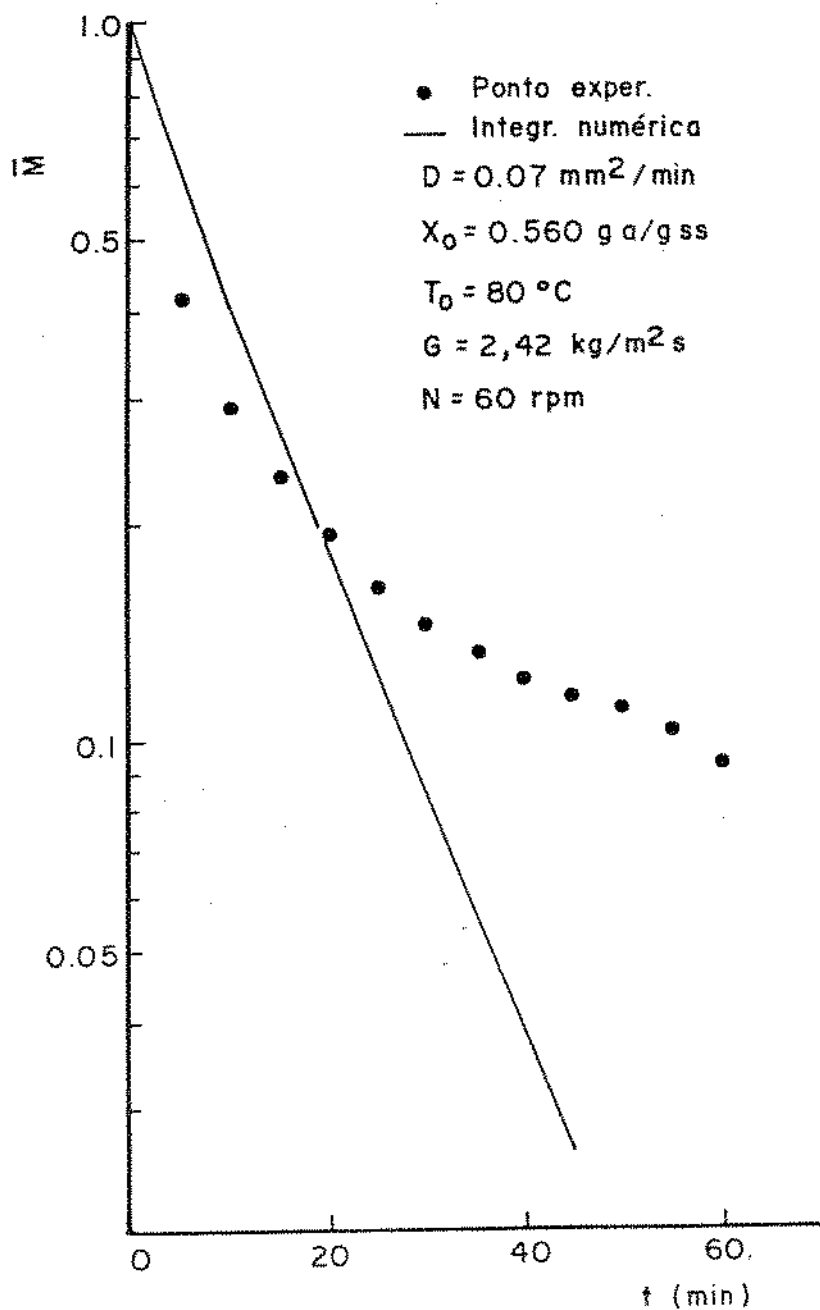


Figura 21. Comparação entre resultados experimentais e calculados, de secagem em leito fluidizado, considerando a difusividade constante.

$$D_{ap} = D_{ap}(X)$$

(17)

onde:  $D_{ap}$  - difusividade aparente (equação 15) ( $m^2/s$ );

$D_{ap}(X)$  - difusividade aparente função da umidade média da partícula ( $m^2/s$ ).

Com essa alteração, a solução numérica da equação 15 se ajusta aos pontos experimentais (ou aos respectivos pontos obtidos por interpolação gráfica), em virtude da variação da difusividade, e como só um valor da difusividade permite o ajuste de cada ponto, obtém-se a relação entre esses dois parâmetros.

A técnica empregada exige que se conheça, antecipadamente, a lei do encolhimento do material em questão. Apesar do estudo de variação de tamanhos ter sido feito apenas, em leito fluidizado, com amostra obtida na relação 1:2 e a  $60^{\circ}C$ ,  $80^{\circ}C$  e  $100^{\circ}C$ , utilizaram-se as equações que representam a variação do volume das partículas com a umidade na solução numérica relativa à secagem em leito fluidizado da amostra de 1:1, a  $80^{\circ}C$ , e na secagem das amostras (1:1, 1:2 e 1:3) em leito fixo, considerando-se que as curvas de secagem, nos dois leitos, apresentam as mesmas tendências.

O programa exigia também, como dado de entrada, o raio inicial das partículas. Porém, como só se determinou experimentalmente o raio final, optou-se por se determinar o raio inicial a partir do raio final e da respectiva umidade, com o uso das equações do encolhimento.

Outra consideração feita foi a de que são válidas as equações 08, 09 e 10 em umidades inferiores à mínima umidade nas quais foram determinadas, isto é, desprezou-se os desvios da linearidade que porventura ocorreram em baixas umidades.

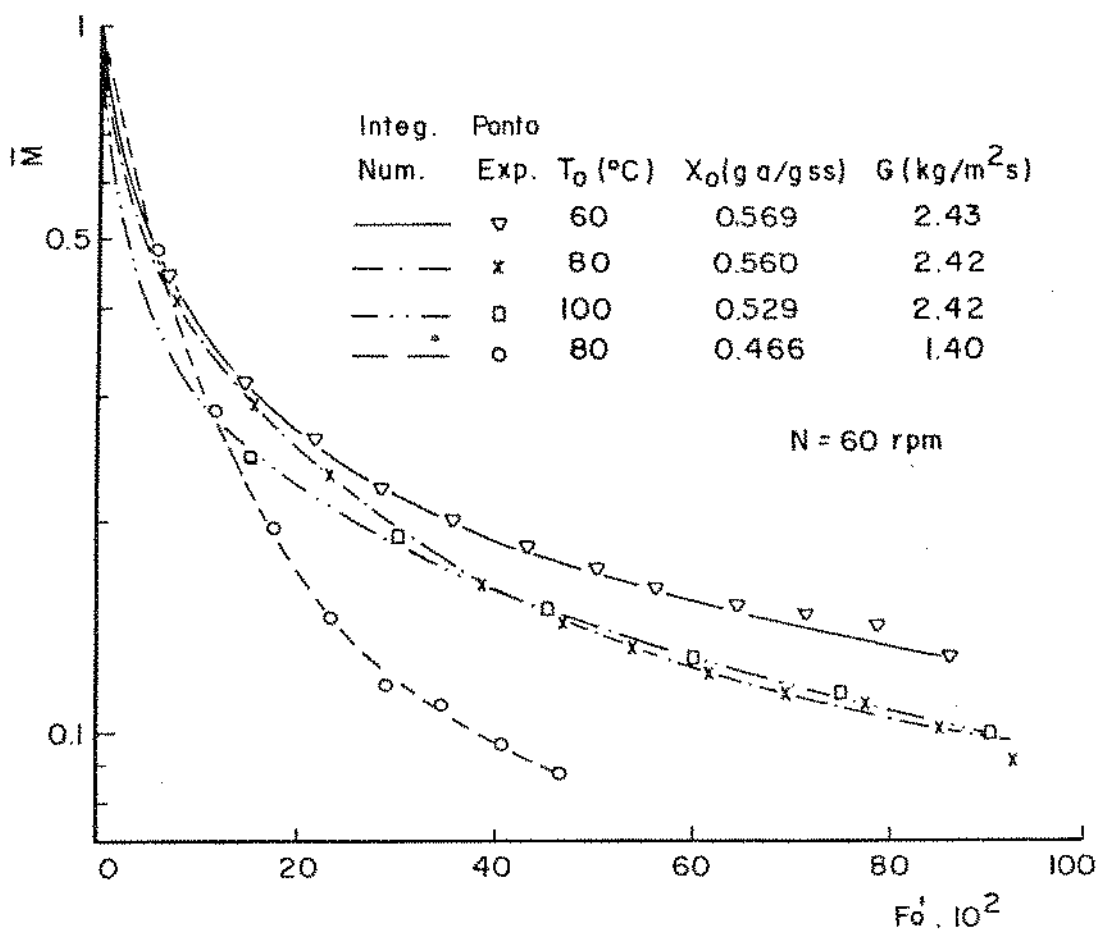


Figura 22. Comparação entre resultados experimentais e calculados, da secagem em leito fluidizado, considerando a difusividade variável.  $Fo'$  baseado na difusividade e raio iniciais.

Na figura 22, encontram-se graficadas as umidades experimentais obtidas em leito fluidizado, e as curvas obtidas pela solução numérica da segunda lei de Fick, onde se nota um bom ajuste entre as duas. Como o número de Fourier é baseado na difusividade

aparente, e no raio, iniciais, isto é, relativos aos primeiros cinco minutos de secagem, as curvas apresentam tendências alteradas, como o cruzamento das curvas obtidas a 80°C e 100°C, no maior nível de umidade (1:2). Nesses ensaios, o número de Reynolds modificado (Rep') variou de 1305 a 1789, no maior nível de umidades (1:2), e foi de 950, no de menor (1:1).

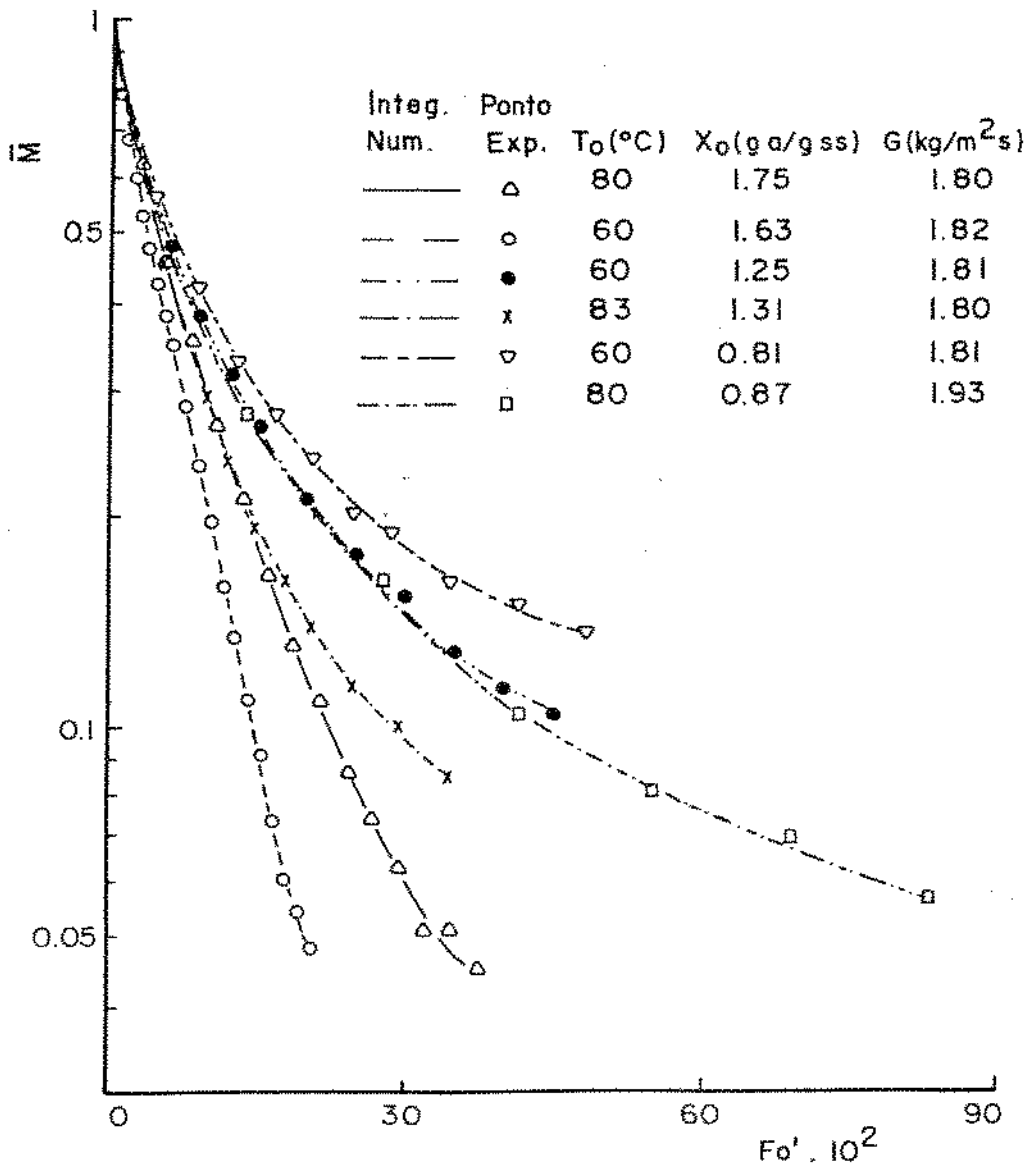


Figura 23. Comparação entre resultados experimentais e calculados, da secagem em leito fixo, considerando a difusividade variável. Fo' baseado na difusividade e raio iniciais.

Na figura 23, estão os resultados calculados e os experimentais dos ensaios de secagem conduzidos em leito fixo, onde também se nota um bom ajuste. Nesses ensaios, o número de Reynolds modificado (Rep) variou de 224 a 245.

O programa fornecia os valores de umidades calculados, que estão graficados nas figuras 22 e 23, e os valores do número de Biot e da difusividade aparente. Correlacionou-se a difusividade obtida com a média aritmética das umidades médias das partículas, relativas aos tempos  $t_i$  e  $t_{i+1}$ . Na figura 24, encontram-se as relações entre as difusividades aparentes e a umidade das partículas, obtidas a partir dos dados de secagem em leito fluidizado.

Na figura 24, observa-se a tendência da difusividade de decrescer durante a secagem, para valores de umidades abaixo de 0,45 (ga/gss) (1:1). Observa-se também, o efeito da temperatura de aumentar a difusividade para uma dada umidade, porém, observa-se que esse efeito diminui com a diminuição da umidade das partículas, o que pode indicar um efeito da umidade sobre a energia de ativação. Comparando-se as duas curvas obtidas a 80°C, pode-se notar que a redução da umidade inicial, ou seja, do teor de sangue na amostra, favorece a difusividade. Esse efeito será discutido adiante. A redução da difusividade durante a secagem pode ser causado também, pelo encolhimento, que diminui o volume dos poros das partículas.

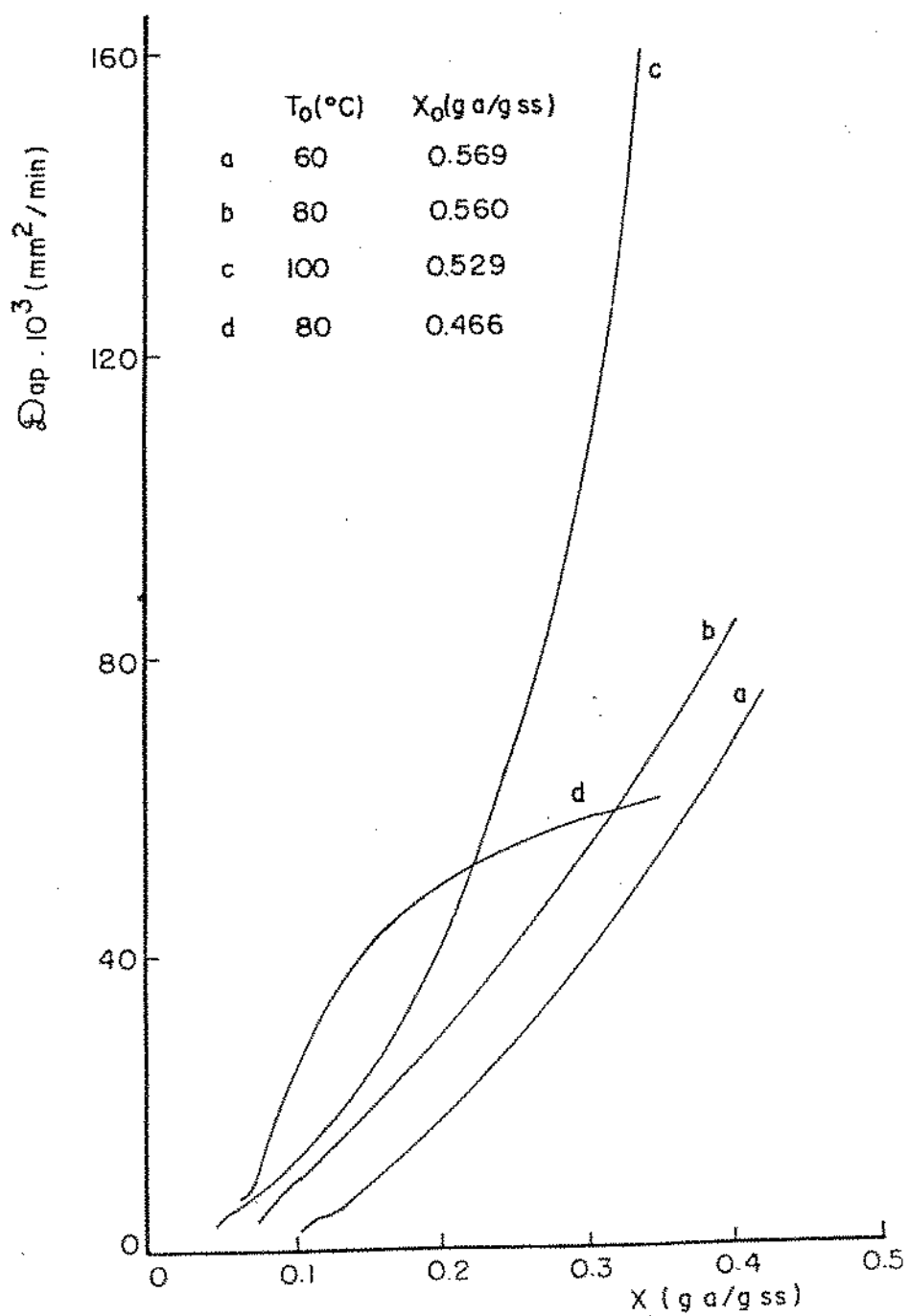


Figura 24. Variação da difusividade aparente com a umidade durante a secagem em leito fluidizado. a, b, c) (1:2); d) (1:1).

Nas figuras 25 e 26, estão graficados os valores da difusividade contra a umidade, obtidos dos dados da secagem em leito fixo, a 80°C e 60°C, respectivamente.

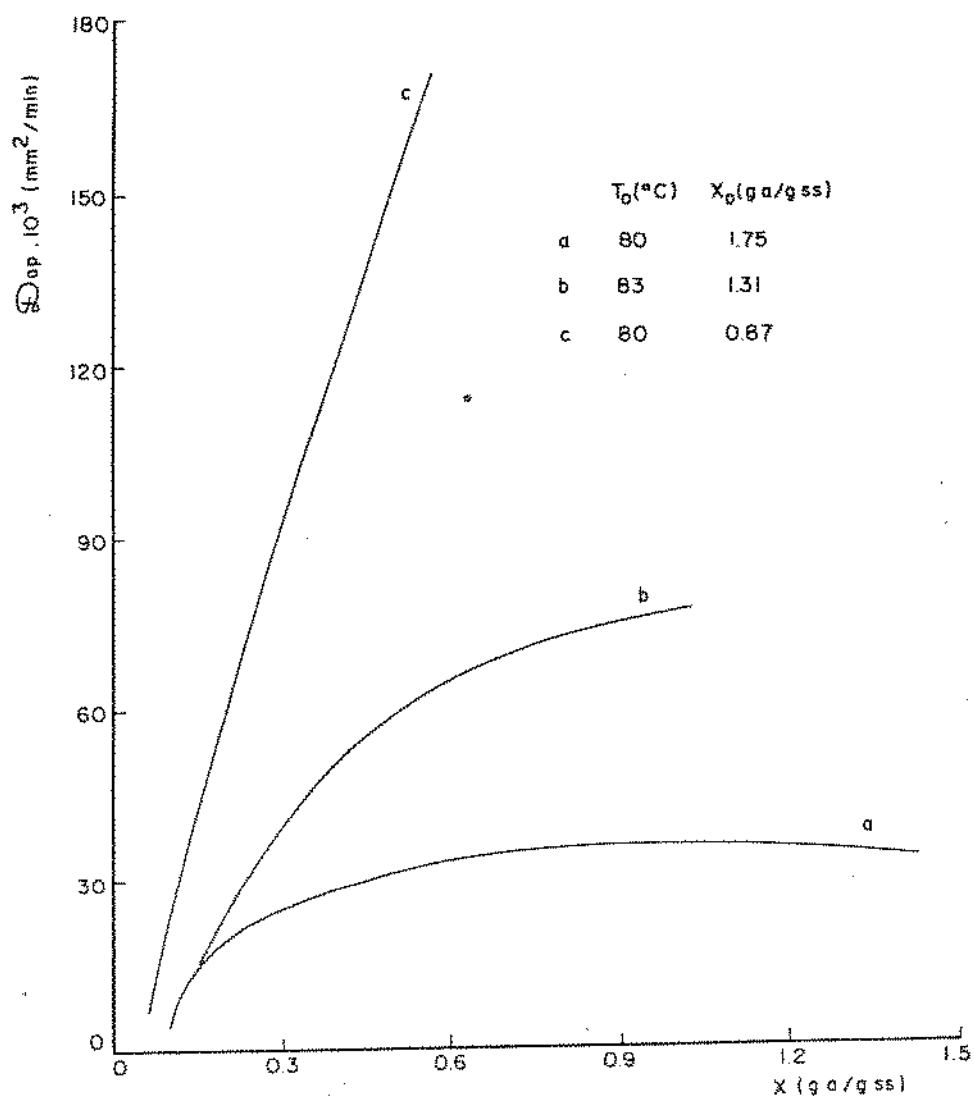


Figura 25. Variação da difusividade aparente com a umidade durante a secagem a 80°C, em leito fixo. a) (1:3); b) (1:2); c) (1:1).

As figuras 25 e 26 também mostram a tendência da difusividade diminuir ao longo da secagem. Comparando-se as duas figu-



ras, percebe-se que o efeito da temperatura, e o da umidade inicial (relação de mistura) são análogos aos respectivos efeitos em leito fluidizado. Comparando-se as curvas da figura 25, relativa à menor umidade inicial (1:1), com as curvas b e d, da figura 24, se observa um comportamento praticamente idêntico, ressaltando-se ainda, as diferenças entre os valores iniciais.

A dependência da difusividade aparente com a temperatura, como mostrada nas figuras 24, 25 e 26, coincide com a teoria, pois a difusividade aumenta com a temperatura. As difusividades de materiais biológicos apresentam essa dependência, sendo geralmente, representada por uma equação tipo Arrhenius.

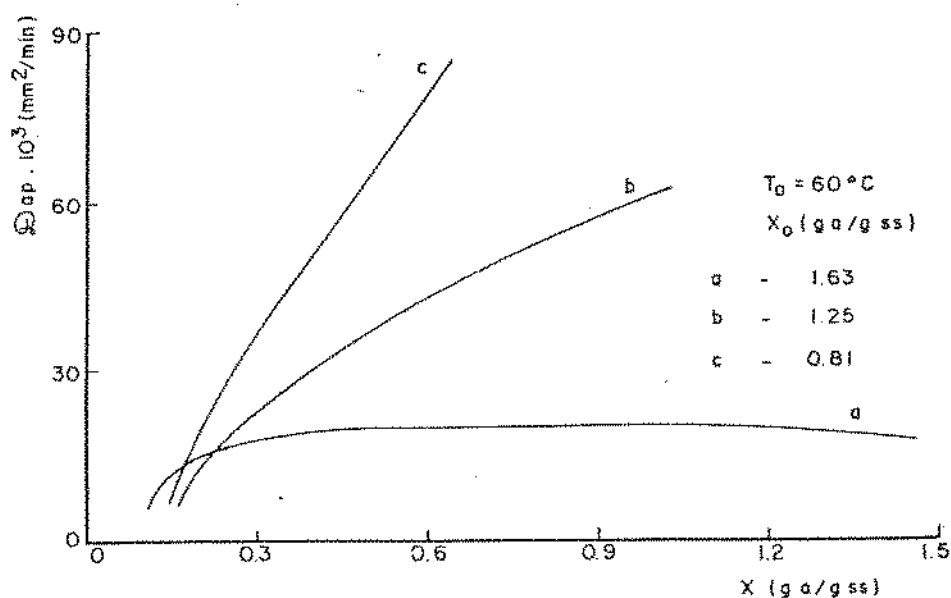


Figura 26. Variação da difusividade aparente com a umidade durante a secagem a 60°C, em leito fixo. a) (1:3); b) (1:2); c) (1:1).

O efeito da umidade inicial sobre a difusividade, na secagem de materiais biológicos, é geralmente demonstrado como positivo, isto é, o aumento da umidade inicial aumenta a difusividade. Kitic e Viollaz(1984), secaram soja em leito fluidizado e em camada fina, e observaram que a difusividade aparente cresce exponencialmente com a umidade inicial, na faixa de 0,30 (ga/gss) e 1,0 (ga/gss). Entretanto, no presente trabalho, se encontra uma relação inversa. Deve-se ressaltar porém, o caráter do umidecimento por embebição com sangue. As amostras com maior umidade possuem também, uma maior quantidade de sólidos sanguíneos incorporados e que, provavelmente, obstruíram os poros abertos das partículas de PTS, causando conseqüentemente, a redução da difusividade aparente. Dessa maneira, a amostra de menor umidade inicial, logo, com menor teor de sólidos sanguíneos, apresentava uma maior porosidade aberta e portanto, uma maior difusividade aparente.

A relação entre a difusividade e a umidade média das partículas é um fenômeno muito complexo, e por isso talvez, pouco estudado. Encontra-se menção a esse fenômeno em obras clássicas, como em Keey(1975), onde se apresentam ilustrações de Luikov e De Vries, mostrando que a difusividade diminui com a redução da umidade, passando por um mínimo e por um máximo. Não existe um valor fixo da umidade no qual ocorre o máximo ou o mínimo. Fortes e Okos(1981a) também observaram esse comportamento na secagem de extrusados de farinha de milho. Esse comportamento da difusividade com a umidade é causado pela soma das difusividades da fase líquida com a da fase vapor. Em se aceitando essa teoria, poder-se-ia

supor que, neste trabalho, a variação da difusividade na secagem, sempre decrescente, ocorreu por ter havido predominância da difusividade da fase líquida, porém, tal conclusão demanda mais trabalho, no sentido de se estimar, e diferenciar, os fluxos de vapor e de líquido na difusão da umidade.

Na solução numérica da segunda lei de Fick, a difusividade era incrementada até se ajustar o ponto calculado e o experimental, mas a variação do raio também era incrementada passo a passo, de forma que quem variava, durante a execução do programa, era o número de Fourier, ou mais precisamente, a relação  $D_{ap}/r_p^2$ , porque  $\Delta t$  era constante. A observação dessa relação pode tirar, em parte, o efeito da utilização das equações da variação do volume das partículas com a umidade, no tratamento dos dados obtidos em leito fixo. Essa variação pode ser vista na figura 27 e 28, para os dados obtidos em leito fluidizado e em leito fixo, respectivamente.

Nota-se, na figura 27, que a relação  $D_{ap}/r_p^2$  diminuiu durante a secagem, indicando que a difusividade diminuiu mais que o raio da partícula, confirmando a dependência da difusividade aparente com a umidade. Essa confirmação também pode ser obtida das curvas b e c da figura 28, enquanto que na curva a a relação apresenta um aumento com a diminuição da umidade, causada pela redução do raio, pois a difusividade aparente se manteve praticamente constante durante a maior parte do tempo de secagem. A variação da relação  $D_{ap}/r_p^2$  com a umidade, para a secagem a  $80\pm C$  em leito fi-

xo, apresenta a mesma forma que as apresentadas na figura 28, sempre obedecendo a dependência com a temperatura.

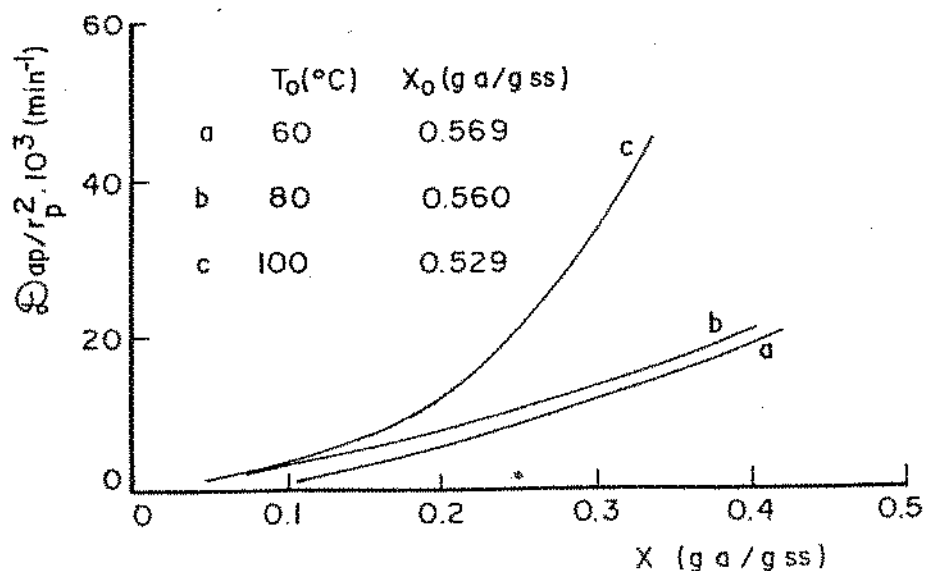


Figura 27. Variação da relação  $D_{ap}/r_p^2$  com a umidade durante a secagem em leito fluidizado (1:2).

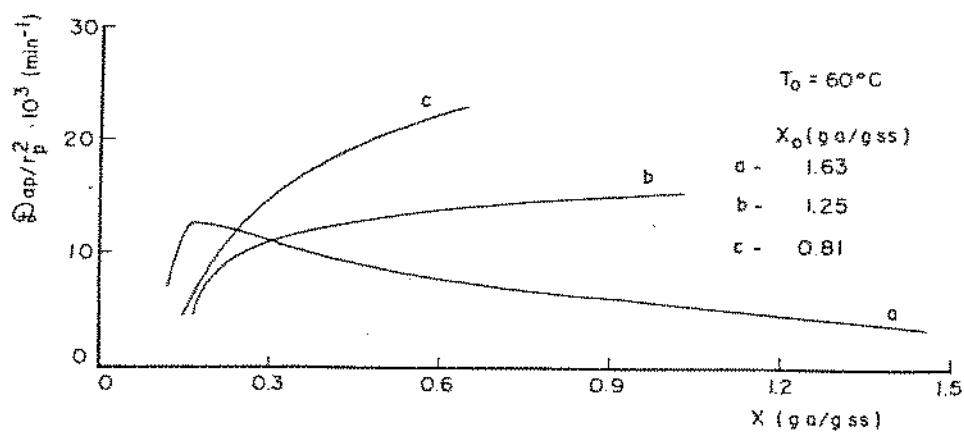


Figura 28. Variação da relação  $D_{ap}/r_p^2$  com a umidade durante a secagem a  $60^{\circ}\text{C}$ , em leito fixo. a) (1:3); b) (1:2); c) (1:1).

Outras observações foram feitas através da solução numérica da segunda lei de Fick. O número de Biot variou, ao longo da secagem, entre  $10^6$  e  $10^7$ , chegando até, eventualmente, a  $10^8$ . Dessa forma, a umidade da superfície foi, sempre, igual à umidade de equilíbrio.

Os valores da difusividade aparente variaram entre as ordens de grandeza, de  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$  ( $m^2/s$ ), mantendo-se coerentes com valores encontrados na literatura. Daudin(1983) cita valores de difusividade obtidos por vários autores a  $50^\circ C$ , observando-se que a difusividade da maçã e a do abacate se assemelham aos valores obtidos, teoricamente, nos primeiros cinco minutos de secagem ( $10^{-9} m^2/s$ ). Numa faixa intermediária do tempo de secagem, a difusividade obtida ( $10^{-10} m^2/s$ ) se assemelha às da beterraba, da mandioca e da batata, enquanto que os valores obtidos nos tempos finais de secagem ( $10^{-11} m^2/s$ ) se ajustam aos valores da difusividade do sorgo, da soja, do milho e do trigo.

## Capítulo VI

## CONCLUSÕES

a) A mistura PTS/s tem tendência a aglomeração, que aumenta com a temperatura e com a proporção de sangue na mistura, impedindo a fluidização. O produto perde essa capacidade quando se reduz a umidade superficial, o que foi feito numa operação de pré-secagem.

b) A secagem da PTS/s, nas três proporções, ocorre sempre, no período de taxa decrescente, tanto no leito fluidizado, como no fixo. Tal efeito pode ser causado pela natureza do líquido (sangue) de forma que a umidade superficial sempre tem uma pressão de vapor inferior àquela da água pura, e pela redução da área superficial das partículas (encolhimento). Dessa forma, a vazão do ar não influencia as secagens, nas condições experimentais deste trabalho.

c) Nas secagens em leito fluidizado, o aumento da temperatura aumenta significativamente a velocidade de secagem, enquanto que os efeitos da agitação e da umidade inicial não são importantes. A diferença entre os leitos agitados e os não agitados, é a não homogeneidade do segundo, enquanto que o pequeno efeito das umidades iniciais (1:1 e 1:2) é causado pela pequena diferença das umidades das amostras pré-secas.

d) No leito fixo, tanto a temperatura quanto as umidades iniciais (1:1, 1:2 e 1:3) tem efeitos significativos nas secagens. O efeito da temperatura aumenta com a redução da umidade inicial, ou seja, da relação de mistura.

e) Durante a secagem, propriedades físicas como o diâmetro, e a densidade aparente, das partículas variam. Elas reduzem linearmente com a redução da umidade. O aumento da temperatura de secagem diminui a variação do volume e aumenta a variação da densidade, por aumentar a taxa de secagem.

f) A equação de Page se ajusta aos dados experimentais, representando as curvas de secagem. A integração numérica da segunda lei de Fick, pelo método de Murray e Landis (de fronteira móvel), considerando-se apenas o encolhimento das partículas, não representa o fenômeno de secagem de PTS/s.

g) A solução numérica acima descrita, considerando-se difusividade variável com a umidade média das partículas, pode representar o fenômeno, permitindo-se observar uma virtual redução da difusividade durante a secagem.

h) A difusividade aumenta com a temperatura, porém esse efeito se reduz com a redução da umidade das amostras, indicando que a energia de ativação de sorção é fortemente dependente da umidade das amostras.

i) O aumento da umidade inicial, isto é, da quantidade de sangue na PTS, diminui a difusividade. Esse efeito é provavelmente causado pela obstrução dos poros abertos da PTS, pelos sólidos do sangue. Esse efeito é tão forte na relação 1:3, que mantém a difusividade praticamente constante durante a secagem.

j) Os produtos obtidos em leite fluidizado, apresentam uma distribuição de tamanhos pouco dispersa, situando-se em torno da bandeja de tyler 6. O diâmetro médio das partículas é de 3,2 mm nas amostras de 1:1, e de 3,6 mm, nas de 1:2. Não se determinou os diâmetros das amostras secas em leite fixo, porque elas perderam a condição de partículas.

k) Os produtos obtidos apresentam-se com alto teor de proteínas. O efeito de tratamento térmico, avaliado através da diminuição da solubilidade das proteínas, é relativamente pequeno, aumentando com o aumento da temperatura e da umidade (relação de sangue por PTS). Apesar das pequenas diferenças, pode-se concluir que esse efeito é menor no leite fluidizado por causa da maior taxa de secagem, que além de diminuir o tempo de secagem, reduz rapidamente a umidade das amostras, para valores nos quais a estabilidade das proteínas é maior.



## Apêndice A

## ISOTERMAS DE SORÇÃO

Foram determinadas isotermas de sorção (Iguti e Menegalli(1987)), de amostras preparadas na relação de 1:3 de PTS/sangue, em quatro temperaturas: 40°C, 50°C, 60°C e 70°C, segundo o método de Spiess e Wolf(1983), de determinação de isotermas em temperaturas elevadas. Os resultados das quatro determinações se encontram na figura A.01.

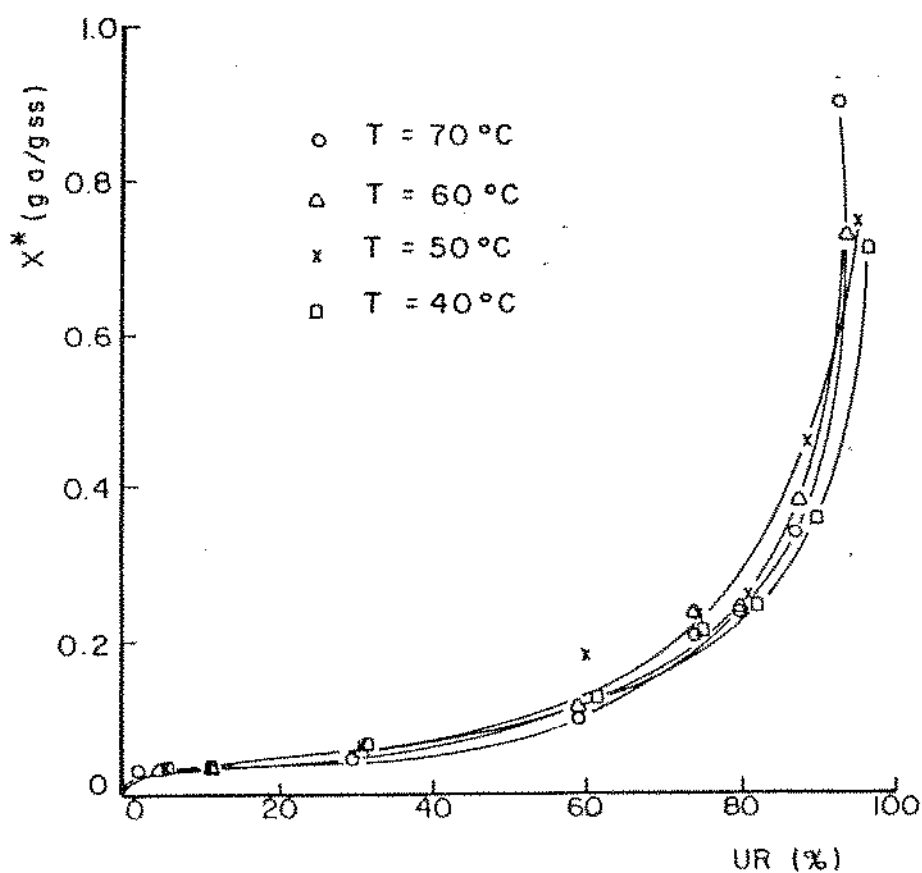


Figura A.01. Isotermas de sorção da amostra de (1:3).

Observa-se, na figura A.01, que as isotermas podem ser classificadas como do tipo III, de acordo com a classificação de Brunauer (Mittal e Usborne(1985)), significando que existe pouca sorção química ou adsorção em monocamada, e nada de condensação capilar. A maior parte da água é adsorvida em multicamadas.

As isotermas foram utilizadas para a obtenção da umidade de equilíbrio nas condições do ar de secagem, e para a obtenção do coeficiente de partição, necessário na avaliação do número de Biot.

Como também foram realizados ensaios de secagem nas temperaturas de 80°C e 100°C, considerou-se necessário fazer uma extrapolação dos dados experimentais, pois notou-se que a utilização da umidade final ao invés da umidade de equilíbrio, no cálculo da umidade residual, alterava o comportamento das curvas de secagem. Como o efeito da temperatura sobre a pressão de vapor pode ser representado pela equação de Clausius-Clapeyron (Mittal e Usborne(1985)), optou-se por fazer a extrapolação relacionando-se o logaritmo da umidade relativa com o inverso da temperatura absoluta, para uma dada umidade de equilíbrio. Foram feitas regressões lineares entre os pontos obtidos para diversas umidades de equilíbrio, e a partir das correlações, obteve-se o valor da umidade relativa, nas temperaturas de 80°C e 100°C. As curvas obtidas se encontram na figura A.02.

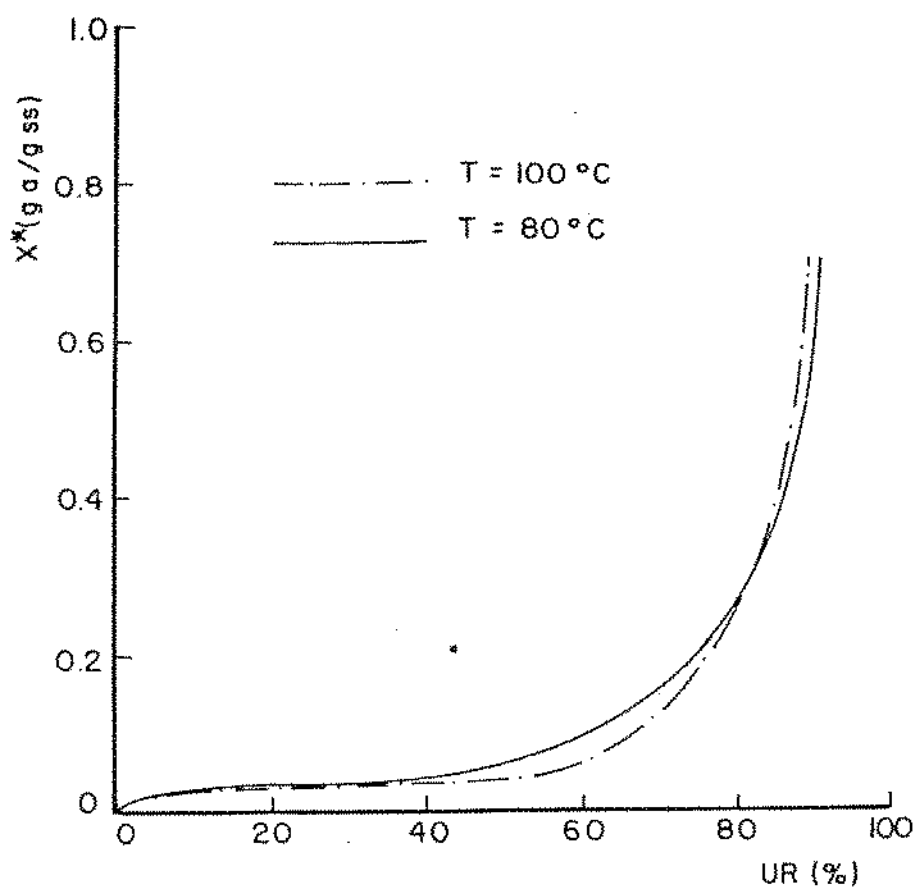


Figura A.02. Isotermas de sorção da amostra de (1:3) obtidas por extrapolação.

Como se utilizou uma grande quantidade de pares de pontos experimentais e interpolados da figura A.01, pois não se estabeleceram critérios para seleção desses pontos, o comportamento e a forma das isotermas experimentais foram repetidas nas isotermas obtidas por extrapolação, como se pode observar na figura A.02.

## Apêndice B

## CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO E DOS TERMOPARES

## B.1 Resultados da calibração da placa de orifício

Os dados relativos a construção da placa de orifício se encontram no item III.2.1, bem como a bibliografia consultada.

A equação teórica que relaciona a perda de pressão na placa de orifício com a vazão do fluido em escoamento pode ser facilmente obtida através de um balanço de massa e de quantidade de movimento, porém, essa equação superestima a vazão, isto é, a vazão teórica, para uma dada diferença de pressão, é maior que a vazão real que causa aquela diferença de pressão. Para igualar o valor teórico e o real, a equação é precedida pelo coeficiente de descarga da placa de orifício, como se mostra a seguir:

$$\dot{V} = C_o A_o \sqrt{\frac{2 \rho_m g \Delta H}{\rho_f (1 - \beta^4)}} \quad \text{B.01}$$

onde:  $\dot{V}$  - vazão volumétrica do fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $C_o$  - coeficiente de descarga da placa de orifício;  
 $A_o$  - área do orifício ( $\pi d_o^2/4$ ) ( $\text{m}^2$ );  
 $\rho_m$  - densidade do líquido manométrico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_f$  - densidade do fluido em escoamento ( $\text{kg/m}^3$ );

$g$  - constante da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

$\Delta H$  - diferença de altura do líquido manométrico (m);

$\beta$  - razão entre o diâmetro do orifício e o da tubulação (do/dt).

O valor do coeficiente de descarga depende da razão entre o diâmetro do orifício e o da tubulação e do número de Reynolds do orifício ( $Re_o$ ), e pode ser obtido na literatura (Perry e Chilton(1980) e Foust e col.(1982)), entretanto, para medidas mais precisas, a placa de orifício deve ser calibrada.

Tabela B.01. Resultados da calibração da placa de orifício

$\Delta H$ (mm)	$V_p \times 10^3$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$Re_o \times 10^{-7}$	$Co$
452,0	54,0	3,8	0,61
450,0	54,1	3,9	0,63
443,0	53,7	3,8	0,62
419,0	53,0	3,8	0,63
392,0	51,5	3,7	0,63
387,0	50,0	3,6	0,61
365,0	49,3	3,5	0,62
335,0	46,7	3,3	0,62
327,0	46,5	3,3	0,62
310,0	45,9	3,3	0,63
280,0	45,0	3,2	0,65
280,0	42,6	3,0	0,62
245,0	40,0	2,9	0,62
240,0	40,4	2,9	0,63
205,0	37,4	2,7	0,63
193,0	35,1	2,5	0,61
182,0	34,6	2,5	0,62
150,0	32,0	2,3	0,64
135,0	30,5	2,2	0,64
98,0	25,1	1,8	0,62
96,0	24,8	1,8	0,62
67,0	20,9	1,5	0,62
61,0	19,6	1,4	0,61
41,0	16,0	1,1	0,61
40,0	15,5	1,1	0,60

Na tabela B.01 encontram-se os resultados da calibração da placa de orifício. A vazão volumétrica é apresentada como vazão padrão, relativa a  $21,1\pm C$  e 760 mmHg, para se evitar o efeito da variação da temperatura durante a calibração (foi instalado um termopar a juzante do medidor padrão). O coeficiente de descarga foi calculado pela razão entre a vazão experimental e a teórica, para a diferença de pressão lida no manômetro. Observa-se que os valores do coeficiente de descarga, na faixa deste trabalho, situam-se próximos da média (0,62), isto é, que não variam com o número de Reynolds, e que coincidem com valores da bibliografia.

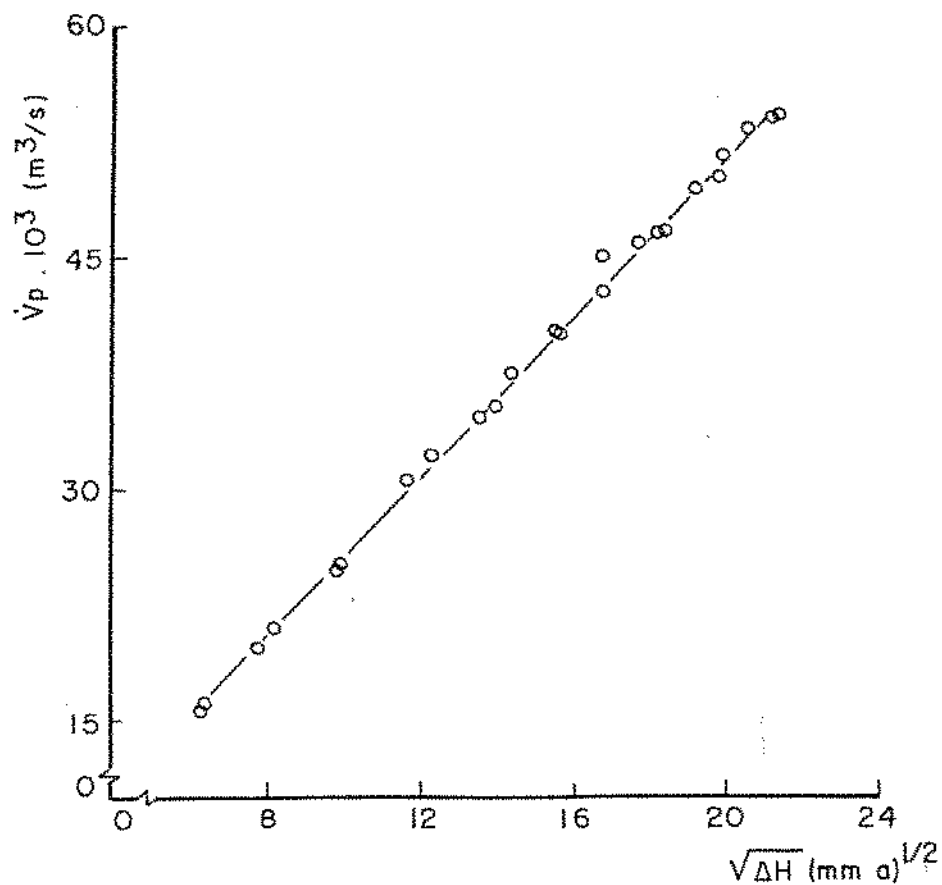


Figura B.01. Calibração da placa de orifício.

Como a equação B.01 demonstra que a vazão é função da raiz quadrada da diferença de pressão, os pontos experimentais podem se apresentar de forma linear, graficando-se a vazão contra a raiz quadrada da diferença de pressão. Na figura B.01 é apresentada a linearização dos pontos experimentais.

A reta compreendida entre os pontos foi obtida por regressão linear dos dados experimentais, e é representada pela seguinte correlação:

$$\dot{V}_p = 2,59 \cdot 10^3 \sqrt{\Delta H} - 0,31 \cdot 10^3 \quad \text{B.02}$$

com  $r^2 = 99,87\%$ ;

onde:  $\dot{V}_p$  - vazão padrão do ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\Delta H$  - diferença de altura do líquido manométrico (mmca).

Para se obter a vazão real é necessário então, se corrigir o efeito da temperatura e da pressão para as condições de trabalho, usando-se a seguinte expressão:

$$\dot{V}_r = \dot{V}_p \left( \frac{273,16 + T_g}{273,16 + 21,1} \right) \left( \frac{760}{P_b} \right) \quad \text{B.03}$$

onde:  $\dot{V}_r$  - vazão real a  $T_g$  e  $P_b$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

Tg - temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

Pb - pressão barométrica (mmHg).

## B.2 Resultados da calibração dos termopares

A calibração foi, na realidade, do sistema termopares-indicador de temperatura, sendo feita com dois termopares ligados ao indicador. Obteve-se resultados iguais entre os dois termopares, como se mostra na tabela B.02, comprovando que a calibração de um termopar é válida para outros da mesma origem.

Tabela B.02. Resultados experimentais da calibração dos termopares.

T real ( $^{\circ}\text{C}$ )	T lida1 ( $^{\circ}\text{C}$ )	T lida2 ( $^{\circ}\text{C}$ )
25,5	21,5	21,6
30,0	26,2	26,2
35,0	31,4	31,4
40,0	36,4	36,4
45,0	41,6	41,6
50,0	46,6	46,6
55,0	51,7	51,7
57,0	53,6	53,5
60,0	56,6	56,6
65,0	61,8	61,8
70,0	66,9	66,9
75,0	72,1	72,1
80,0	77,4	77,4
85,0	82,3	82,3
90,0	87,5	87,5

Graficando-se os pontos experimentais, nota-se que há uma relação linear entre as temperaturas, como mostra a figura B.02. A reta apresentada entre os pontos, obtida por regressão linear, é representada pela equação B.04.



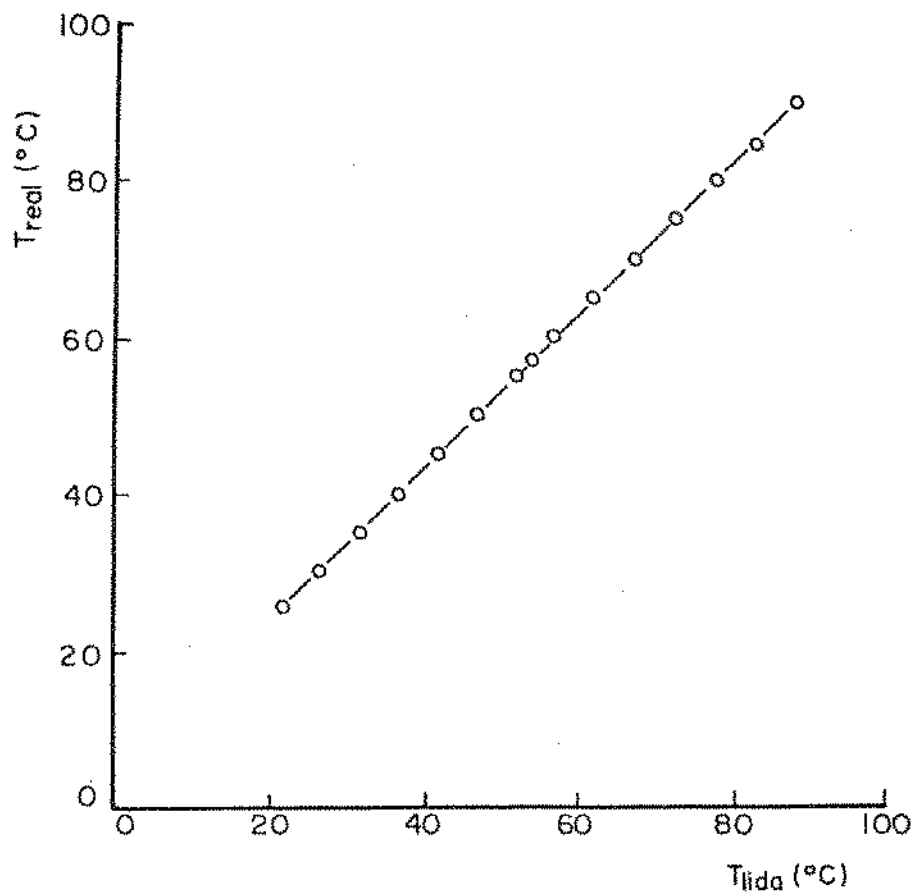


Figura B.02. Calibração dos termopares.

$$T_{\text{real}} = 0,98 T_{\text{lida}} + 4,35$$

B.04

com  $r^2 = 99,99\%$ ;

onde:  $T_{\text{real}}$  - temperatura real de trabalho ( $\pm C$ );

$T_{\text{lida}}$  - temperatura lida no indicador ( $\pm C$ ).

## Apêndice C

## INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DA SEGUNDA LEI DE FICK

## C.1 Formulação matemática

A integração de uma equação diferencial torna-se facilitada quando feita na forma adimensional. Para adimensionalizar a segunda lei de Fick (equação 15 modificada com a 17), foi necessário se definir as seguintes variáveis adimensionais:

$$M = \frac{x - X^*}{X_0 - X^*} \quad \text{C.01a}$$

$$S = \frac{r}{r_{p0}} \quad \text{C.01b}$$

onde:  $x$  - umidade pontual na partícula (ga/gss);  
 $X_0$  - umidade média inicial (ga/gss);  
 $X^*$  - umidade média de equilíbrio (ga/gss);  
 $r$  - coordenada radial (mm);  
 $r_{p0}$  - raio da partícula no tempo  $t = 0$  (mm).

Tomando-se os respectivos diferenciais, substituindo e rearranjando na equação 15, a segunda lei de Fick se apresenta, em coordenadas esféricas, como:

$$\frac{\partial M}{\partial Fo} = \frac{2}{S} \frac{\partial M}{\partial S} + \frac{\partial M}{\partial S} \quad C.02$$

com as seguintes condições:

$$\text{inicial: } Fo = 0, \quad M = 1 \quad C.03a$$

e de contorno:

$$S = 1, \quad \frac{\partial M}{\partial S} = - Bi Ms \quad C.03b$$

$$S = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial S} = 0 \quad C.03c$$

onde: M - umidade residual;

Fo - número de Fourier de massa;

S - coordenada radial;

Bi - número de Biot de massa;

Ms - umidade adimensional da superfície das partículas.

A equação C.02 ainda não pode ser integrada, pois ela não representa um sistema de malha móvel (ela pode ser utilizada num método de malha fixa, no qual o número de pontos nodais decresce à medida que a superfície se desloca). Para deixá-la nas condições de ser integrada, usar-se-á a seguinte derivada substancial:

$$\frac{dM}{dFo} = \left. \frac{\partial M}{\partial Fo} \right|_n + \left. \frac{\partial M}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial Fo} \right|_n \quad C.04$$

mais a expressão que relaciona a posição de um ponto nodal arbitrário, com a posição da interface:

$$S = \frac{n}{N} Sp \quad \text{C.05}$$

onde:  $S$  - coordenada radial adimensional ( $r/r_{po}$ );  
 $n$  - ponto nodal arbitrário;  
 $N$  - número de pontos nodais;  
 $Sp$  - raio da partícula adimensional ( $r_p/r_{po}$ ).

e a relação derivada da equação C.05:

$$\frac{\partial S}{\partial Fo} = \frac{n}{N} \frac{\partial Sp}{\partial Fo} \quad \text{C.06}$$

Substituindo as equações C.04, C.05 e C.06 na equação C.02, obtém-se a equação diferencial representativa do sistema de malha móvel:

$$\frac{dM}{dFo} = \left( \frac{2N}{nSp} + \frac{n}{N} \left( \frac{\partial Sp}{\partial Fo} \right) \right) \frac{\partial M}{\partial S} + \frac{\partial^2 M}{\partial S^2} \quad \text{C.07}$$

com as seguintes condições:

inicial:  $F_0 = 0$ ,  $M = 1$

de contorno:

$$S = 1, \quad \frac{\partial M}{\partial S} = -BIMs$$

$$S = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial S} = 0$$

A equação C.07 expressa a segunda lei de Fick, representando o processo de secagem com encolhimento e com difusividade variável com a umidade média.

## C.2 Utilização do método para a determinação da difusividade aparente

Vários autores utilizam a equação C.07 em estudos de simulação de secagem, com objetivo de melhor esclarecer o processo de secagem, e de avaliar a utilização da equação 04 na determinação da difusividade. No presente trabalho, a equação C.07 foi resolvida e comparada com dados experimentais, para a obtenção da relação entre a difusividade aparente e a umidade.

Considerando-se que se pode expressar a equação C.07 em diferenças finitas, obtém-se, depois de rearranjada:

$$M_{n, i+1} - M_{n, i} = \lambda_2 K \frac{(M_{n+1, i+1} + M_{n-1, i+1})}{2} + \lambda_1 (M_{n-1, i+1} - 2M_{n, i+1} + M_{n+1, i+1})$$

C.08

$$\text{onde: } \lambda_1 = \frac{\Delta F_0}{\Delta S^2} \quad \text{C.09a}$$

$$\lambda_2 = \frac{\Delta F_0}{\Delta S} \quad \text{C.09b}$$

$$K = \frac{2N}{nSp} + \frac{n}{N} \left( \frac{\partial Sp}{\partial F_0} \right) \quad \text{C.09c}$$

$i$  - índice da coordenada temporal;

$n$  - índice da coordenada espacial;

com as seguintes condições:

$$\text{inicial: } F_0 = 0, \quad M = 1 \quad \text{C.10a}$$

e de contorno:

$$S = 1, \quad \frac{(M_N - M_{N-1})}{\Delta S} = -B_1 M_N \quad \text{C.10b}$$

$$S = 0, \quad M_0 = M_1 \quad \text{C.10c}$$

O diferencial de unidade da derivada em relação a  $F_0$ , foi representado pela diferença finita adiantada, para se poder relacionar os valores das unidades nos tempos  $t_i$  e  $t_{i+1}$ , o que é uma exigência da técnica implícita. Como o diferencial de segundo grau foi representado por sua definição, que apresenta as unidades nos três pontos nodais, optou-se pela diferença central no diferencial de primeiro grau em relação a  $S$ , para se obter dois valores em cada nodo, na equação completa. Já na avaliação da condição de contorno, ou seja, da equação C.10b, utilizou-se a diferença finita atrasada para se relacionar a unidade da superfície com a sua subsequente.

Na técnica explícita, os termos  $\lambda_1$  e  $\lambda_2 K$  seriam os parâmetros de estabilidade da solução numérica, isto é, os seus valores deveriam estar dentro das condições de estabilidade, pois caso contrário, o resultado fornecido seria a solução da equação diferencial. Na técnica implícita, o mesmo não ocorre, porém, os resultados se aproximam da real solução à medida que se toma menores valores de  $\Delta t$  e de  $\Delta r$ .

A equação C.08 é rearranjada para se apresentar da seguinte forma:

$$-\left(\lambda_1 - \frac{\lambda_2 K}{2}\right) M_{n-1, 1+1} + (1 + 2\lambda_1) M_{n, 1+1} - \left(\lambda_1 + \frac{\lambda_2 K}{2}\right) M_{n+1, 1+1} = M_{n, 1} \quad \text{C.11}$$

Dessa maneira, a integração da equação 15 consiste na solução de um sistema de  $(N-2)$  equações formadas pelo desenvolvimento da equação C.11 (na forma de uma matriz triangular), de  $n=1$  até  $n=(N-1)$ , além da equação representativa da lei do encolhimento. As condições de contorno entram no sistema de equações, na primeira equação ( $n=1$ ) para  $S=0$ , e na última ( $n=N-1$ ), para  $S=1$ .

Para se avaliar a equação C.09c foi necessário determinar o raio da partícula e sua derivada em relação a  $F_0$ , aplicando-se a diferença finita atrasada, tal como:

$$\frac{\Delta S_p}{\Delta F_o} = \frac{r_{p1} - r_{p1-1}}{\Delta F_o \cdot r_{p0}} \quad C.12$$

O raio da partícula no tempo  $t_1$ , e no tempo  $t_{1-1}$ , foi calculado a partir da relação experimental entre o volume e a umidade, para os respectivos tempos de secagem. O termo  $\Delta F_o$  foi avaliado como segue:

$$\Delta F_o = \frac{D_{ap}(X) \Delta t}{r_{p0}^2} \quad C.13$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as coletas de amostras nos ensaios de secagem, e  $D_{ap}(X)$  foi incrementado no programa, com o objetivo de se ajustar os valores da umidade residual média calculado, com os experimentais. Para completar as equações C.09,  $\Delta S$  foi igual a  $1/N$ , porque o número de pontos nodais era constante.

Foi necessário ainda, avaliar o número de Biot (equação C.03b): o raio da partícula foi mantido constante e igual ao seu valor inicial, pois se considerou que o efeito da redução do raio era desprezível em relação ao alto valor do coeficiente de transferência de massa. O coeficiente de partição foi avaliado da inclinação de dois pontos consecutivos, interpolados graficamente, das isotermas de sorção. A difusividade tinha o mesmo valor incrementado na equação C.13, e finalmente, para se avaliar o coeficiente de transferência de massa, utilizou-se correlações empíricas encontradas na literatura.



Para se representar o coeficiente de transferência de massa na secagem em leito fluidizado, utilizou-se a analogia de Chilton-Colburn:

$$J_h = J_d \quad \text{C.14}$$

onde:  $J_h$  - fator de Chilton-Colburn de transferência de calor;  
 $J_d$  - fator de Chilton-Colburn de transferência de massa.

para se aplicar a equação de Vazquez e Calvelo (Vazquez e Calvelo(1983)) na seguinte forma:

$$J_d = 0,204 \text{ Rep}^{-0,563} \text{ Ga}^{0,179} \quad , \text{ Rep}' > 1000 \quad \text{C.15}$$

onde:  $\text{Rep}'$  - número de Reynolds modificado;  
 $\text{Ga}$  - número de Galileu;

sendo que a porosidade do leito foi obtida da relação entre a carga de sólidos e a altura do leito, medida no início da secagem.

Para se trabalhar os dados obtidos em leito fixo, aplicou-se a equação de Ranz (Kunii e Levenspiel(1966)):

$$Sh = 2,0 + 1,8 Rep^{1/2} Sc^{1/3}, \quad Rep > 80 \quad C.16$$

onde: Sh - número de Sherwood;  
 Rep - número de Reynolds modificado;  
 Sc - número de Schmidt;

sendo que a difusividade do vapor de água no ar foi avaliada pela correlação de Schirmer (Dăscălescu(1969)):

$$D_{vg} = 0,083 \frac{(T_g + 273)^{1,81}}{273} \quad C.17$$

onde:  $D_{vg}$  - difusividade do vapor de água no ar na temperatura  $T_g$  ( $m^2/h$ );

$T_g$  - temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ).

## Apêndice D

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

D.1 Resultados experimentais dos ensaios de secagem em leito fluidizado

Tabela D.1.1 (1:1)

Condições Experimentais:	Lo=
$G = 2,73 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	Yo= 9,2 g vapor/kg ar seco
Wo= 324,97 g	Xo= 0,79 ga/gss
We= 43,3 g	Xe= 0,06 ga/gss
d <sub>pf</sub> =	N= 60 rpm

t (min)	To (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0				1,00
1,0		39,7	44,1	
2,3		48,8	55,7	
3,0		54,0	59,8	
5,0				0,25
6,7		67,7	70,8	
9,0	79,5	69,2	71,4	
10,0				0,15
11,0	79,0	69,5	71,6	
12,5	80,0	70,0	72,7	
14,0	80,1	70,7	73,3	
15,0				0,11
16,0	80,4	70,7	74,1	
19,0	80,0	70,8	74,1	
20,0				0,09
21,5	79,8	70,3	74,0	
24,0	79,5	70,3	74,2	
25,0				0,04
29,0	80,0	70,8	74,5	
30,0				0,08
34,0	80,0	70,8	74,8	
35,0				0,05

Tabela D.I.2 (1:2)

Condições experimentais:	Lo=
$G = 2,79 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	Yo= 13,8 g vapor/kg ar seco
Wo= 351,49 g	Xo= 1,24 ga/gss
We= 49,1 g	Xe= 0,06 ga/gss
dpf=	N= 60 rpm

t (min)	To (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0				1,00
1,0		29,4	37,3	
2,0		30,6	43,1	
5,0				0,32
6,0		45,1	59,5	
7,5	79,6			
8,5		55,3	67,1	
10,0				0,14
11,0	79,9	60,9	69,6	
12,0		62,3	70,5	
15,0				0,10
16,0	80,0	67,5	71,8	
18,5	80,3	67,0	72,3	
20,0				0,09
23,0	80,2	67,9	72,7	
25,0				0,06
28,0		68,5	73,0	
30,0				0,06
32,5		68,9	73,1	
34,0	80,0			
35,0				0,06
38,0	79,9			
39,0		69,1	73,6	
40,0				0,05

Tabela D.1.3 (1:2)

Condições experimentais:	Lo=
$G = 2,41 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	Yo= 16,3 g vapor/kg ar seco
Wo= 431,05 g	Xo= 0,493 ga/gss
We= 2,05 g	Xe= 0,057 ga/gss
dpf=	N= 0 rpm

t (min)	To (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0				1,000
3,0	80,0	74,7	70,4	
4,0	80,2	76,4	72,8	
5,0				0,310
7,5	79,2	76,2	73,0	
9,0	80,0	76,6	74,3	
10,0				0,306
13,0	79,9	77,7	76,0	
14,0	79,5	78,3	76,1	
15,0				0,221
17,0	79,8	78,3	76,4	
19,0	80,1	79,5	78,0	
20,0				0,187
23,0	79,9	79,7	77,8	
25,0				0,201
29,0	79,9	79,7	78,3	
30,0				0,166
34,0	80,2	79,9	77,8	
35,0				0,183
38,0	79,7	79,6	77,1	
40,0				0,168
44,0	79,7	80,3	77,3	
45,0				0,168
49,0	79,9	79,6	77,6	
50,0				0,144
54,0	80,3	80,8	77,8	
55,0				0,174
59,0	80,7	81,2	79,5	
60,0				0,132
64,0	79,5	79,8	77,4	
65,0				0,136

Pré-secagem:  
To= 80°C

Xo=1,28 ga/gss

Tabela D.I.4 (1:2)

Condições experimentais:	$Lo = 8,0 \text{ cm}$
$G = 2,42 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Yo = 15,3 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$Wo = 428,89 \text{ g}$	$Xo = 0,560 \text{ ga/gss}$
$We = 10,08 \text{ g}$	$Xe = 0,062 \text{ ga/gss}$
$d_{pf} = 3,54 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	To (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0				1,000
2,0	79,3	65,3	61,7	
3,5	80,1	69,5	67,5	
4,5	80,1	70,6	69,3	
5,0				0,438
6,0	79,8	73,2	71,5	
8,0	80,2	74,9	73,9	
9,0	80,4	75,7	74,3	
10,0				0,320
12,0	80,1	76,9	75,4	
14,0	79,9	77,4	76,0	
15,0				0,264
16,3	79,9	77,7	76,4	
19,0	80,1	78,1	76,8	
20,0				0,225
21,5	79,9	78,5	77,2	
24,5	79,9	78,6	77,3	
25,0				0,198
26,0	79,9	78,6	77,5	
29,0	79,9	78,9	77,7	
30,0				0,180
31,0	80,0	79,0	77,8	
35,5				0,166
38,0	80,1	79,3	78,0	
40,0				0,155
42,0	79,9	79,1	77,9	
45,0				0,150
49,0	79,9	79,3	77,9	
50,0				0,145
54,0	79,5	79,1	77,7	
55,0				0,138
59,0	79,8	79,2	77,7	
60,0				0,127

Pré-secagem:  
To = 80°C

Xo = 1,31 ga/gss

Tabela D.I.5 (1:2)

Condições experimentais:	$L_0 = 8,0 \text{ cm}$
$G = 2,49 \text{ kg/m s}^2$	$Y_0 = 17,3 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 422,08 \text{ g}$	$X_0 = 0,526 \text{ ga/gss}$
$W_e = 3,87 \text{ g}$	$X_e = 0,073 \text{ ga/gss}$
$dpf = 3,69 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	$T_0$ (°C)	$T_e$ (°C)	X/ $X_0$
0,0			1,000
1,5	79,6	65,1	
3,0	80,0	69,8	
4,0	80,2	71,8	
5,0			0,483
6,5	80,2	74,1	
9,0	80,4	75,5	
10,0			0,356
11,0	80,0	75,8	
15,0			0,285
16,5	80,0	77,1	
20,0			0,236
21,0	80,4	77,4	
24,0	80,1	77,6	
25,0			0,205
27,5	80,3	77,8	
33,5	80,0	77,9	
35,0			0,169
38,0	80,0	77,6	
40,0			0,160
43,0	80,1	77,8	
45,0			0,158
49,0	79,8	77,3	
50,0			0,158

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80^\circ\text{C}$

$X_0 = 1,22 \text{ ga/gss}$

Tabela D.1.6 (1:2)

Condições experimentais:	$L_0 = 8,0 \text{ cm}$
$G = 2,43 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Y_0 = 14,7 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 426,97 \text{ g}$	$X_0 = 0,569 \text{ ga/gss}$
$W_e = 10,41 \text{ g}$	$X_e = 0,075 \text{ ga/gss}$
$dpf = 3,58 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	$T_0$ ( $\pm C$ )	$T_e$ ( $\pm C$ )	$T_s$ ( $\pm C$ )	X/ $X_0$
0,0				1,000
2,5	60,0	48,6	45,4	
3,5	60,3	50,1	48,4	
5,0				0,478
6,0	60,0	53,4	52,1	
7,5	59,7	54,4	53,4	
9,0	59,8	55,1	54,2	
10,0				0,355
11,0	59,8	55,8	55,0	
12,5	59,8	56,3	55,6	
14,0	59,9	56,8	56,0	
15,0				0,306
16,5	59,9	57,0	56,3	
19,0	60,0	57,5	56,8	
20,0				0,270
24,0	60,0	58,0	57,4	
25,0				0,248
28,5	59,9	58,1	57,6	
30,0				0,232
34,0	59,9	58,3	57,8	
35,0				0,220
39,0	60,0	58,3	58,0	
40,0				0,211
44,0	59,9	58,5	58,1	
45,0				0,202
49,0	60,0	58,6	58,1	
50,0				0,202
54,0	59,9	58,6	58,2	
55,0				0,193
59,0	60,0	58,7	58,3	
60,0				0,181

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80 \pm C$

$X_0 = 1,30 \text{ ga/gss}$



Tabela D.1.7 (1:2)

Condições experimentais:	Lo=
$G = 2,56 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	Yo= 16,8 g vapor/kg ar seco
Wo= 373,40 g	Xo= 0,535 ga/gss
We= 4,25 g	Xe= 0,081 ga/gss
dpf= 3,71 mm	N= 60 rpm

t (min)	To (°C)	Te (°C)	X/Xo
0,0			1,000
1,0	59,3	47,1	
2,5	60,2	51,9	
4,0	59,8	53,4	
5,0			0,473
6,0	60,0	55,4	
8,0	60,2	56,6	
9,0	60,0	56,9	
10,0			0,370
11,0	59,9	57,5	
14,0	59,6	57,3	
15,0			0,320
19,0	59,7	57,7	
20,0			0,288
23,0	60,2	58,6	
25,0			0,250
28,0	59,6	58,3	
30,0			0,247
33,0	59,5	58,4	
35,0			0,230
38,0	59,9	58,6	
40,0			0,215
44,0	60,0	59,0	
45,0			0,207
49,0	60,0	59,1	
50,0			0,202
55,0			0,189

Tabela D.1.8 (1:1)

Condições experimentais:	$L_0 = 8,0 \text{ cm}$
$G = 1,40 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Y_0 = 14,5 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 447,45 \text{ g}$	$X_0 = 0,466 \text{ ga/gss}$
$W_e = 2,53 \text{ g}$	$X_e = 0,074 \text{ ga/gss}$
$d_{pf} = 3,19 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

$t$ (min)	$T_0$ (°C)	$T_e$ (°C)	$X/X_0$
0,0			1,000
1,3	80,0	48,0	
2,0	80,0	54,4	
4,0	80,1	63,5	
5,0			0,506
8,0	80,2	69,8	
10,0			0,313
12,5	80,4	73,0	
14,0	79,7	73,6	
15,0			0,232
16,5	80,0	74,6	
20,0			0,185
21,0	80,2	75,3	
24,0	80,0	75,5	
25,0			0,155
28,0	80,1	76,0	
30,0			0,148
33,5	80,0	75,9	
35,0			0,135
39,0	80,0	76,3	
70,0			0,127

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80^\circ\text{C}$

$X_0 = 0,78 \text{ ga/gss}$

Tabela D.I.9 (1:1)

Condições experimentais:

$$G = 1,87 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$W_o = 368,16 \text{ g}$$

$$W_e = 4,43 \text{ g}$$

$$d_{pf} = 3,25 \text{ mm}$$

$$L_o = 7,0 \text{ cm}$$

$$Y_o = 14,4 \text{ g vapor/kg ar seco}$$

$$X_o = 0,429 \text{ ga/gss}$$

$$X_e = 0,062 \text{ ga/gss}$$

$$N = 60 \text{ rpm}$$

t (min)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	X/X <sub>o</sub>
0,0			1,000
1,0	80,2	58,7	
2,0	80,2	64,4	
4,0	80,3	70,1	
5,0			0,466
6,0	80,1	73,2	
7,5	79,8	74,4	
9,0	80,0	75,2	
10,0			0,301
11,0	79,9	76,1	
15,0			0,238
17,0	79,8	77,3	
20,0			0,191
22,0	79,9	77,5	
24,0	80,1	78,0	
25,0			0,168
29,0	80,1	78,0	
30,0			0,149
35,0			0,140
40,0			0,140

Pré-secagem:

$$T_o = 80 \pm 0,1 \text{ °C}$$

$$X_o = 0,76 \text{ ga/gss}$$

Tabela D.I.10 (1:1)

Condições experimentais:	$L_0 = 11,0 \text{ cm}$
$G = 2,49 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Y_0 = 16,0 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 457,32 \text{ g}$	$X_0 = 0,425 \text{ ga/gss}$
$W_e = 10,9 \text{ g}$	$X_e = 0,058 \text{ ga/gss}$
$dpf = 3,32 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_e$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	X/ $X_0$
0,0			1,000
1,5	79,8	65,9	
2,5	80,1	69,1	
4,0	79,9	71,4	
5,0			0,461
5,5	79,8	73,5	
7,0	79,9	75,0	
8,5	79,8	75,7	
10,5			0,313
11,5	79,8	76,4	
14,0	79,6	76,8	
15,0			0,264
17,0	79,8	77,4	
20,0			0,214
21,5	79,7	77,4	
24,0	80,0	78,0	
25,0			0,181
29,0	79,6	78,0	
30,0			0,155
33,0	79,8	77,9	
35,0			0,151
37,0	80,3	78,2	
39,0	80,1	78,1	
40,0			0,151

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80^{\circ}\text{C}$

$X_0 = 0,74 \text{ ga/gss}$

Tabela D.I.11 (1:1)

Condições experimentais:	$L_0 = 8,0 \text{ cm}$
$G = 2,42 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Y_0 = 17,6 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 445,80 \text{ g}$	$X_0 = 0,529 \text{ ga/gss}$
$W_e = 15,0 \text{ g}$	$X_e = 0,044 \text{ ga/gss}$
$d_{pf} = 3,55 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	$T_0$ ( $\pm C$ )	$T_e$ ( $\pm C$ )	$T_s$ ( $\pm C$ )	X/ $X_0$
0,0				1,000
1,5	99,7	78,9	73,0	
2,5	100,0	83,7	79,7	
4,0	99,7	87,9	85,1	
5,0				0,274
7,0	99,5	92,0	90,3	
9,0	100,5	94,2	92,6	
10,0				0,217
12,0	100,7	96,0	94,4	
14,0	100,7	96,1	94,6	
15,0				0,180
17,0	100,7	96,5	95,2	
19,0	99,7	96,5	95,1	
20,0				0,159
23,0	99,5	96,8	95,6	
25,0				0,146
29,0	99,5	97,2	96,0	
30,0				0,130
33,0	100,1	97,5	96,2	
35,0				0,119
38,0	99,9	98,1	96,5	
40,0				0,110
45,0				0,102
48,0	99,9	98,0	96,4	
50,0				0,091
54,0	99,5	97,7	96,0	
55,0				0,091
59,0	100,1	97,8	96,3	
60,0				0,085

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80 \pm C$

$X_0 = 1,31 \text{ ga/gss}$

Tabela D.1.12 (1:2)

Condições experimentais:	$L_0 = 8,0 \text{ cm}$
$G = 2,55 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$Y_0 = 16,8 \text{ g vapor/kg ar seco}$
$W_0 = 436,07 \text{ g}$	$X_0 = 0,508 \text{ ga/gss}$
$W_e = 4,35 \text{ g}$	$X_e = 0,084 \text{ ga/gss}$
$dpf = 3,67 \text{ mm}$	$N = 60 \text{ rpm}$

t (min)	$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_e$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	X/ $X_0$
0,0			1,000
1,5	70,1	58,3	
4,0	70,3	63,1	
5,0			0,502
6,0	69,4	64,9	
8,0	70,0	65,8	
10,0			0,411
12,0	70,1	67,2	
14,0	70,5	68,0	
15,0			0,348
16,0	69,8	67,9	
18,0	70,1	68,1	
20,0			0,291
21,0	70,2	68,5	
25,0			0,256
27,5	69,9	68,2	
30,0			0,220
34,0	69,9	68,5	
35,0			0,207
38,0	70,1	68,7	
40,0			0,197
43,0	69,8	68,5	
45,0			0,191
49,0	70,0	68,9	
50,0			0,191

Pré-secagem:  
 $T_0 = 80^{\circ}\text{C}$

$X_0 = 1,22 \text{ ga/gss}$

## D.II Resultados experimentais dos ensaios de secagem em leito fixo

Tabela D.II.1

Condições experimentais:		(1:3)	
	$G = 1,82 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$		$Y_0 = 13,2 \text{ g vapor/kg ar seco}$
	$W_0 = 295,46 \text{ g}$		$X_0 = 1,63 \text{ ga/gss}$
t (min)	$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	X/ $X_0$
0,0			1,00
0,5	59,9	42,3	
1,0		43,7	
2,0	59,9	46,5	
2,5		47,5	
3,0			0,80
5,0	59,9	52,9	
6,0			0,69
7,5		53,4	
8,5	59,9	54,4	
9,0			0,61
10,5	59,7	54,5	
12,0			0,54
14,0	59,8	54,7	
15,0			0,48
17,0	60,3	56,2	
18,0			0,44
20,0	60,0	55,6	
21,0			0,40
23,5	60,5	58,5	
24,0			0,36
27,0	59,9	57,8	
29,5			0,30
34,0	60,3	57,9	
35,0			0,25
38,5	60,5	57,5	
40,0			0,21
44,0	60,3	59,0	
45,0			0,18
49,0	59,9	59,2	
50,0			0,15
55,0	59,5	57,9	0,13
59,0	60,5	58,6	
60,0			0,11
64,0	60,0	59,6	
65,0			0,09
70,2			0,08
73,5	60,6	60,1	
75,0			0,07
79,0	60,1	58,9	
80,0			0,07

Tabela D.II.2

Condições experimentais:

(1:3)

 $G = 1,93 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 
 $Y_0 = 16,7 \text{ g vapor/kg ar seco}$ 
 $W_0 = 300,89 \text{ g}$ 
 $X_0 = 1,73 \text{ ga/gss}$ 

t (min)	To (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0			1,00
1,5	70,0	53,9	
3,0	70,3	59,2	
4,0	70,3	61,7	
5,0			0,67
6,5	70,5	63,3	
8,0		64,3	
9,5	69,8	65,0	
10,0			0,50
12,5	69,8	65,9	
14,5	69,6	66,6	
15,0			0,39
17,5	70,0	68,9	
19,5	70,4	69,2	
20,0			0,32
24,0	70,0	69,6	
25,0			0,25
29,0	70,0	68,8	
30,0			0,21
34,0	69,6	69,4	
35,0			0,17
39,0	70,4	70,4	
40,0			0,14
44,0	69,5	69,7	
45,0			0,12
50,0			0,10
55,0			0,09
59,0	70,1	70,1	
60,0			0,08
64,0	70,4	71,0	
65,0			0,07
69,0	70,0	70,0	
70,0			0,06
74,0	69,8	69,8	
75,0			0,06
79,5	69,5	69,5	
80,0			0,06



Tabela D.II.3

Condições experimentais: (1:3)  
 $G = 1,80 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $Y_0 = 12,2 \text{ g vapor/kg ar seco}$   
 $W_0 = 302,83 \text{ g}$   $X_0 = 1,75 \text{ ga/gss}$

t (min)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	X/X <sub>0</sub>
0,0			1,00
0,5	80,4	79,5	
1,0		60,2	
2,0	80,4	64,2	
3,0	80,4	67,1	
4,0		69,2	
5,0			0,62
7,0	80,1	71,7	
9,0	80,4	73,2	
10,0			0,46
12,0	80,0	74,3	
14,5	80,2	74,9	
15,0			0,36
19,0	80,2	77,1	
20,0			0,28
24,0	80,5	77,6	
25,0			0,22
29,0	80,4	77,6	
30,0			0,18
34,0	80,1	77,0	
35,0			0,14
39,0	80,0	79,1	
40,0			0,12
44,0	80,0	78,1	
45,0			0,10
49,0	80,5	78,5	
50,0			0,09
54,0	80,5	78,4	
55,0			0,07
59,0	79,8	79,5	
60,0			0,06
64,0	79,8	78,0	
65,0			0,06
69,0	79,5	77,5	
70,0			0,06

Tabela D.II.4

Condições experimentais:		(1:2)	
2			
G= 1,80 kg/m s		Yo= 11,2 g vapor/kgar seco	
Wo= 306,67 g		Xo= 1,31 ga/gss	
t (min)	To (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0			1,0
2,0	83,5		0,69
3,7	83,5	68,5	
4,5	83,5	70,7	
5,0			0,47
6,5	83,5	69,2	
7,5	83,5	70,9	
9,5			0,31
11,5	82,8	75,3	
12,0			0,25
12,7	83,1	72,9	
14,5	83,2	73,8	
15,0			0,21
16,0	83,4	76,4	
18,0			0,18
19,0	83,0	75,2	
21,0			0,15
22,3	83,2	77,7	
24,5	83,3	78,1	
25,0			0,13
26,5	83,5	76,6	
30,0			0,11
31,5	83,5	77,9	
35,0			0,10
37,0	83,1	77,2	
39,0	83,1	77,4	

Tabela D.II.5

Condições experimentais:

(1:1)

$$G = 1,93 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$Y_0 = 11,9 \text{ g vapor/kg ar seco}$$

$$W_0 = 264,07 \text{ g}$$

$$X_0 = 0,87 \text{ ga/gss}$$

t (min)	To (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0			1,00
0,5		42,6	
1,0		48,1	
1,5		54,4	
2,0		59,8	
2,5	80,2	63,9	
4,0	80,3	70,7	
5,0			0,30
6,5	80,0	75,7	
9,0	80,4	77,5	
10,0			0,18
11,5		78,2	
14,0	81,0	79,3	
15,0			0,13
19,0	80,0	79,1	
20,0			0,10
25,0			0,09
26,5	79,9	78,9	
29,5	79,9	78,7	
30,0			0,08
34,5	79,6	79,0	
35,5			0,08
39,5	79,6	78,6	
40,0			0,07

Tabela D.II.6

Condições experimentais: (1:3)  
 $G = 1,80 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $Y_0 = 11,1 \text{ g vapor/kg ar seco}$   
 $W_0 = 294,46 \text{ g}$   $X_0 = 1,57 \text{ ga/gss}$

t (min)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	X/X <sub>0</sub>
0,0			1,00
1,0	82,6	61,5	
2,0	82,6	64,9	
3,0			0,73
4,0	82,6	67,9	
5,5	83,0	70,7	
6,0			0,61
7,5	82,8	71,8	
9,0			0,52
10,0	82,8	73,7	
11,0	83,0	74,8	
12,0			0,45
13,5	83,4	74,1	
15,0			0,39
16,5	83,2	75,1	
18,0			0,35
20,0	82,9	74,8	
21,0			0,31
24,0	82,8	74,8	
25,0			0,27
28,0	82,9	74,5	
30,0			0,23
34,5	82,8	77,3	
35,0			0,20
39,5	83,3	76,2	
40,0			0,17
44,0	83,5	78,4	
45,0			0,15
47,0	83,5	78,0	
48,0			0,13

Tabela D.II.7

Condições experimentais:		(1:1)	
$G = 1,80 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$		$Y_0 = 14,5 \text{ g vapor/kg ar seco}$	
$W_0 = 288,26 \text{ g}$		$X_0 = 0,77 \text{ ga/gss}$	
t (min)	$T_0$ (°C)	$T_s$ (°C)	X/ $X_0$
0,0			1,00
0,5	86,5	50,6	
2,0	86,5	64,0	
3,0			0,45
4,5	86,9	74,9	
6,0			0,30
8,0	87,0	78,0	
9,0			0,22
11,0	87,2	79,3	
12,0			0,17
14,0	87,3	80,7	
15,0			0,14
17,0	87,5	81,0	
18,0			0,13
20,0	87,5	81,5	
21,0			0,12
22,5	87,8	82,0	
24,0	87,8	82,3	
25,0			0,10

Tabela D.II.8

Condições experimentais: (1:1)  
 $G = 1,81 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $Y_0 = 11,3 \text{ g vapor/kg ar seco}$   
 $W_0 = 302,93 \text{ g}$   $X_0 = 0,81 \text{ ga/gss}$

t (min)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	X/X <sub>0</sub>
0,0			1,00
0,5	60,7	36,8	
1,5	59,7	44,4	
2,5	59,8	48,6	
3,0			0,58
5,3	58,8	52,5	
6,0			0,44
8,5	59,8	55,2	
9,0			0,36
11,0	59,9	56,6	
12,0			0,31
14,5	60,5	57,8	
15,0			0,27
17,5	59,9	58,4	
18,0			0,23
20,0	60,3	59,4	
21,0			0,22
24,0	59,6	58,3	
25,0			0,20
29,5	59,5	58,3	
30,0			0,19
32,0	60,0	58,6	
34,0	60,0	59,1	
35,0			0,17

Tabela D.11.9

Condições experimentais: (1:2)  
 $G = 1,81 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $Y_0 = 11,6 \text{ g vapor/kg ar seco}$   
 $W_0 = 308,4 \text{ g}$   $X_0 = 1,25 \text{ ga/gss}$

t (min)	$T_0$ (°C)	$T_s$ (°C)	X/ $X_0$
0,0			1,00
0,5	60,0	34,0	
1,3	60,2	38,5	
2,5	60,3	42,1	
3,0			0,65
5,0	60,0	48,0	
6,0			0,50
7,5	60,6	52,2	
9,0			0,40
11,0	59,5	55,1	
12,0			0,34
14,0	59,9	55,9	
15,0			0,29
19,5	59,4	56,4	
20,0			0,23
24,0	60,1	57,9	
25,0			0,20
29,3	59,8	57,7	
30,0			0,18
35,0			0,15
38,0	59,5	58,0	
40,0			0,14
44,5	59,8	59,0	
45,0			0,13

Tabela D.II.10

Condições experimentais:		(1:1)	
2			
G= 1,82 kg/m s		Yo= 14,0 g vapor/kg ar seco	
Wo= 311,93 g		Xo= 0,79 ga/gss	
t (min)	To (°C)	Ts (°C)	X/Xo
0,0			1,00
1,0	69,7	48,3	
2,0	69,5	55,2	
3,0			0,51
5,0	70,5	64,1	
6,0			0,35
8,0	70,1	66,1	
9,0			0,28
11,0	69,6	67,5	
12,0			0,23
14,0	69,9	67,9	
15,0			0,20
17,3	69,8	68,3	
18,0			0,18
20,0	69,6	68,6	
21,0			0,16
24,5	69,6	68,8	
25,0			0,15
29,7	70,5	69,3	
30,0			0,14
34,5	70,0	68,9	
35,0			0,13
38,0	70,3	69,7	
39,0	70,5	69,7	
40,0			0,13



Tabela D.II.11

Condições experimentais: (1:2)  
 $G = 1,93 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$   
 $W_o = 299,91 \text{ g}$   
 $Y_o = 16,5 \text{ g vapor/kg ar seco}$   
 $X_o = 1,27 \text{ ga/gss}$

t (min)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	X/X <sub>o</sub>
0,0			1,00
1,0	69,6	53,1	
2,0	69,8	57,9	
3,0	69,7	61,0	
4,0	69,6	63,2	
5,0			0,45
7,0	70,0	63,3	
9,0	70,0	65,3	
10,0			0,29
14,0	69,5	68,6	
15,0			0,21
19,0	70,3	70,0	
20,0			0,17
24,0	70,2	69,8	
25,0			0,13
29,5	69,5	69,8	
30,0			0,12
34,0	70,2	70,0	
35,0			0,10
39,5	69,6	70,0	
40,0			0,09
44,0	71,0	70,5	
45,0			0,09
49,0	69,8	70,3	
50,0			0,08
54,0	69,5	70,0	
55,0			0,07

D.III Resultados experimentais do estudo de redução de volume das partículas

Tabela D.III.1

Condições experimentais: (1:2)  
 $G = 2,43 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $N = 60 \text{ rpm}$   
 $T_0 = 80^\circ\text{C}$   $X_0 = 0,541 \text{ ga/gss}$

t (min)	Fração mássica nas peneiras					$\bar{d}_p$ (mm)
	4	6	8	10	14	
0,0	0,625	0,290	0,063	0,019	0,005	4,67
5,0	0,450	0,371	0,127	0,040	0,012	4,13
18,0	0,311	0,429	0,182	0,061	0,016	3,78
34,0	0,212	0,455	0,237	0,080	0,015	3,55
58,0	0,165	0,452	0,267	0,103	0,013	3,42

$V_p/V_{p0}$	$X/X_0$
1,00	1,000
0,69	0,465
0,53	0,289
0,44	0,211
0,39	0,184

Pré-secagem:  $T_0 = 80^\circ\text{C}$

$X_0 = 1,18 \text{ ga/gss}$

Tabela D.III.2

Condições experimentais: (1:2)  
 $\frac{2}{G = 2,48 \text{ kg/m s}} \quad N = 60 \text{ rpm}$   
 $T_o = 60^\circ\text{C} \quad X_o = 0,545 \text{ ga/gss}$

t (min)	Fração mássica nas peneiras					$\bar{d}_p$ (mm)
	4	6	8	10	14	
0,0	0,586	0,313	0,071	0,024	0,006	4,55
6,0	0,359	0,401	0,160	0,061	0,019	3,84
21,0	0,253	0,434	0,214	0,075	0,024	3,58
40,0	0,198	0,420	0,249	0,110	0,024	3,45
65,0	0,132	0,420	0,308	0,122	0,018	3,26

$V_p/V_{p0}$	$X/X_o$
1,00	1,000
0,60	0,506
0,49	0,344
0,44	0,266
0,37	0,227

Pré-secagem:  $T_o = 80^\circ\text{C} \quad X_o = 1,25 \text{ ga/gss}$

Tabela D.III.3

Condições experimentais: (1:2)  
 $\frac{2}{G = 1,95 \text{ kg/m s}} \quad N = 60 \text{ rpm}$   
 $T_o = 100^\circ\text{C} \quad X_o = 0,545 \text{ ga/gss}$

t (min)	Fração mássica nas peneiras					$\bar{d}_p$ (mm)
	4	6	8	10	14	
0,0	0,591	0,319	0,069	0,022	0,005	4,59
4,0	0,366	0,403	0,161	0,052	0,019	3,89
16,0	0,286	0,426	0,202	0,065	0,022	3,68
27,0	0,285	0,427	0,195	0,068	0,025	3,65
60,0	0,223	0,445	0,231	0,077	0,023	3,52

$V_p/V_{p0}$	$X/X_o$
1,00	1,000
0,61	0,411
0,52	0,221
0,50	0,162
0,45	0,115

Pré-secagem:  $T_o = 80^\circ\text{C} \quad X_o = 1,20 \text{ ga/gss}$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUERRE, R.J., GABITTO, J.F. and CHIRIFE, J. (1985), "Utilization of Fick's Second Law for the Evaluation of Diffusion Coefficients in Food Processes Controlled by Internal Diffusion", *Journal of Food Technology*, 20:623-629.
- 2 AGUERRE, R.J., SUAREZ, C. and VIOLLAZ, P.E. (1982), "Drying Kinetics of Rough Rice Grain", *Journal of Food Technology*, 17:679-686.
- 3 AGUERRE, SUAREZ, C. and VIOLLAZ, P.E. (1984), "Analysis of the Interface Conditions During Drying of Rice", *Journal of Food Technology*, 19:315-323.
- 4 AGUILERA, J.M., KOSIKOWSKI, F.V. and HOOD, L.F. (1976), "Ultrastructural Changes Occurring During Thermoplastic Extrusion of Soybean Grits", *Journal of Food Science*, 41:1209-1213.
- 5 AKERS, J.M. (1973), "Utilization of Blood", *Food Manufacture*, 48(4):31-32.
- 6 ANDERSSON, Y. (1974), "The Influence of Moisture Content on Rheological Properties of Textured Soy Proteins", *Proc. IV Int. Congress. Food Science and Technology*, Vol. 11, p. 221-229.
- 7 ANDROUTSOPOULOS, G.P. and LINARDOS, Th., J. (1986), "Effects of Drying upon Lignite Macro-pore Structure", *Powder Technology*, 47:9-15
- 8 BAXERRES, J.L., YOW, Y.S. et GIBERT, H. (1983), "Etude du Séchage

- de Produits Alimentaires en Couche Fluidisée", *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.*, 16:27-31.
- 9 BEAN, H.S. (1971), *Fluid Meters, Their Theory and Application*, 6<sup>th</sup> Edition, The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
  - 10 BIRD, R.B., STEWART, W.E. and LIGHTFOOT, E.N. (1960), *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, USA.
  - 11 BRIAN, R. (1976), "Textured Protein Products", *Journal Am. Oil Chemists' Soc.*, 53:325-326.
  - 12 BUNN, J.M., HENSON Jr., W.H. and WALTON, L.R. (1972), "Drying Equations for High Moisture Materials", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 17(4):343-347.
  - 13 CAMPBELL, M.F. (1981), "Processing and Product Characteristics for Textured Soy Flours, Concentrates and Isolates", *Journal Am. Oil Chemists' Soc.*, 58:336-338.
  - 14 CAMPOS, G.R. y MENEGALLI, F.C. (1987), "Secado de Proteína Texturizada de Soja en Lecho Fluidizado. I. Estudio de la Fluidodinámica del lecho", presentado para publicación en la *Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos*.
  - 15 CARNAHAN, B., LUTHOR, H.A. and WILKES, J.D. (1969), *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons, New York, USA.
  - 16 CHANDRA, P.K. and SINGH, R.P. (1984), "Thin-Layer Drying of Parboiled Rice at Elevated Temperatures", *Journal of Food Science*, 49:905-909.
  - 17 CHARM, S.E. (1963), *The Fundamentals of Food Engineering*, The AVI Publishing Company, INC., Westport, USA.
  - 18 CHIANG, W-C. and PETERSEN, J.N. (1985), "Thin Layer Air Drying

- of French Fried Potatoes", *Journal of Food Technology*, 20:67-78.
- 19 CONSIDINE, D.M. (1975), *Process Instruments and Controls Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
  - 20 CONTRERAS GUZMAN, E.S. (1984a), *Desenvolvimento de Novos Produtos na Base de Plasma Bovino, Relatório Técnico nº 1*, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
  - 21 CONTRERAS GUZMAN, E.S. (1984b), *Desenvolvimento de Novos Produtos na Base de Plasma Bovino, Relatório Técnico nº 2*, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
  - 22 CONTRERAS GUZMAN, E.S. (1984c), *Desenvolvimento de Novos Produtos na Base de Plasma Bovino, Anais da V Reunião do Consórcio de Instituições Brasileiras na Área de Nutrição, (CIBRAN)*, Campinas, SP, 16-18 de dezembro.
  - 23 CRANK, J. (1975), *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford, UK.
  - 24 CUMMING, D.B., STANLEY, D.W. and De MAN, J.M. (1972), "Texture-structure Relationships in Texturized Soy Protein. II. Textural Properties and Ultrastructure of an Extruded Soybean Product". *Can. Inst. Food Sci. Technol. Journal*, 5 (3):124-128.
  - 25 DASCULESCU, A. (1969), *Le Séchage et ses Applications Industrielles*, Traduit par A. PANAITESCO, DUNOD, Paris, France.
  - 26 DAUDIN, J.D. (1983), "Calcul des Cinétiques de Séchage par l'air Chaud des Produits Biologiques Solides", *Sciences*

- des Aliments, 3:1-36.
- 27 DOEBELIN, E.O. (1975), Measurement Systems, Application and Design, Revised Edition, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo, Japan.
- 28 FARINATI, L.E. AND SUAREZ, C. (1984), "Technical Note: A Note on the Drying Behavior of Cottonseed", Journal of Food Technology, 19:739-744.
- 29 FERNANDO, T. (1981), "Concentration of Animal Blood by Ultrafiltration", Biotechnology and Bioengineering, 23(1): 19-27.
- 30 FINZER, J.R.D. (1984), Secagem de Fatias de Cebola em Leito Vibro Fluidizado, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
- 31 FITO, P.J., SANZ, F.J, y ARANDA, V. (1977), "Secado de Salvado de Arroz em Lecho Vibro-Fluidizado. III. Período de Velocidade de Secado Decreciente", Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos, 17(1):140-147.
- 32 FORTES, M. and OKOS, M.R. (1981a), "Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Capillary Extruded Products", AIChE Journal, 27(2):255-262.
- 33 FORTES, M. and OKOS, M.R. (1981b), "A Non-equilibrium Thermodynamics Approach to Transport Phenomena in Capillary Porous Media", Transactions of the ASAE, 24(3):756-760.
- 34 FORTES, M. and OKOS, M.R. (1981c), "Non-equilibrium Thermodynamics Approach to Heat and Mass Transfer in Corn Kernels", Transactions of the ASAE, 24(3):761-769.
- 35 FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W. MAUS, L. and ANDERSEN, L.B. (1982), Princípios das Operações Unitárias, Segunda Edição

- ção, Traduzido por H. MACEDO, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ.
- 36 GABITTO, J.F. y AGUERRE, R.J. (1985), "Solucion Numerica del Proceso de Secado com Cambio de Volumen", Revista Latinoam. Transf. Cal. Mat., 9:231-240.
  - 37 GANGOPADHYAY, H. and CHAUDHURI, D.R. (1979), "Comparative Studies on Dehydration of Peas in Fluidized Bed and Conventional Tray Drier", Journal of Food Science and Technology, 16(5):206-207.
  - 38 GRAHAM, A. (1978), "The Collection and Processing of Edible Blood", CSIRO Fd. Res., 38(1):16-22.
  - 39 GUSTAFSON, R.J. and HALL, G.E. (1972), "Density and Porosity Changes of Shelled Corn During Drying", Transactions of the ASAE, 15(3):523-525.
  - 40 HÄGERDAL, B. and MARTENS, H. (1976), "Influence of Water Content on the Stability of Myoglobin to Heat Treatment", Journal of Food Science, 41:933-937.
  - 41 HÄLLSTROM, A. and WIMMERSTEDT, R. (1983), "Drying of Porous Granular Materials", Chemical Engineering Science, 38(9): 1507-1516
  - 42 HANSEN, J.R. (1978), "Dehydration and Hydration Kinetics of Soybean Proteins", Journal of Agricultural and Food Chemistry, 26(2):297-301.
  - 43 HARPER, J.M. (1986), "Extrusion Texturization of Foods", Food Technology, 40(3):70-76.
  - 44 HOEBINK, J.H.B.J. and RIETEMA, K. (1980a), "Drying Granular Solids in Fluidized Bed. I. Description on Basis of Mass and



- Heat Transfer Coefficients", *Chemical Engineering Science*, 35(10):2135-2140.
- 45 HOEBINK, J.H.B.J. and RIETEMA, K. (1980b), "Drying Granular Solids in Fluidized Bed. II. The Influence of Diffusion Limitation on the Gas-solid Contacting Around Bubble", *Chemical Engineering Science*, 35(11):2257-2265.
- 46 HUTCHINSON, D. and OTTEN, L. (1983), "Thin Layer air Drying of Soybean and White Beans", *Journal of Food Technology*, 18: 507-522.
- 47 IGBEKA, J.C. (1982), "Simulation of Moisture Movement During Drying a Starch Food Product-cassava", *Journal of Food Technology*, 17:27-36.
- 48 IGUTI, F. e MENEGALLI, F.C. (1987), Determinação de Isotermas de Sorção de Produtos Alimentícios, Relatório para FAPESP, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, SP.
- 49 KAZEMZADEH, M., AGUILERA, J.M. and RHEE, K.C. (1982), "Use of Microscopy in the Study of Vegetable Protein Texturization", *Food Technology*, 36(4):111-118.
- 50 KEEY, R.B. (1975), *Drying: Principles and Practice*, First Edition Reprinted, Pergamon Press, Exeter, GB.
- 51 KITIC, D. and VIOLLAZ, P.E. (1984), "Comparison of Drying Kinetics of Soybeans in Thin Layer and Fluidized Beds", *Journal of Food Technology*, 19:399-408.
- 52 KUNII, D. and LEVENSPIEL, O. (1969), *Fluidization Engineering*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- 53 LABUZA, T.P., TANNENBAUM, S.R. and KAREL, M. (1970), "Water Content and Stability of Low-moisture and Intermediate-mois-

- ture Foods", Food Technology, 24:35-41.
- 54 LANGHOFF, L. (1980), "Prelievo, Raccolta, Essiccazione del Sangue di Macellazione per Consumo Umano", Industrie Alimentari, 20:922-926.
- 55 LEQUERICA, J.L., FLORS, A. y CERNI, R. (1974), "Estudio del Secado de Arroz Sancochado por la Técnica de Fluidificación", Revista de Agroquímica e Tecnología de Alimentos, 14(3): 439-450.
- 56 LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E. and URBICAIN, M.J. (1980), "Total Porosity and Open-pore Porosity in the Drying of Fruits", Journal of Food Science, 45:1403-1407.
- 57 LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E. and URBICAIN, M.J. (1983), "Shrinkage, Porosity and Bulk Density of Foodstuffs at Changing Moisture Contents", Journal of Food Science, 48:1497-1502, 1553.
- 58 MEIRELLES, A.J.A. (1984), Secagem de Bagaço de Cana em Leito Fluidizado, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
- 59 MISRA, M.K. and BROOKER, D.B. (1980), "Thin Layer Drying and Rewetting Equations for Shelled Yellow Corn", Transactions of the ASAE, 23(5):1254-1260.
- 60 MISRA, R.N. and YOUNG, J.H. (1980), "Numerical Solution of Simultaneous Moisture Diffusion and Shrinkage During Soybean Drying", Transactions of the ASAE 23(5):1277-1282.
- 61 MITTAL, G.S. and USBORNE, W.R. (1985), "Moisture Isotherms for Uncooked Meat Emulsions of Different Composition", Journal of Food Science, 50:1576-1579.

- 62 NEBRA, S.A. y ISMAIL, K.A.R. (1980), "Estudio Analítico-numérico de um Almacenedor de Calor Latente", *Revista Latinoam. Transf. Cal. Mat.*, 4:133-142.
- 63 OSNER, R.C. and JOHNSON, R.M. (1986), "Nutritional Changes in Proteins During Heat Processing", *Journal of Food Technology*, 3:81-86.
- 64 OWER, E. and PANKHURST, R.C. (1977), *The Measurement of Air Flow*, 5ª Edition, Pergamon Press, Oxford, GB.
- 65 PARRY, J.L. (1985), "Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review", *Journal of Agricu. Engng. Res.*, 32:1-29.
- 66 PÉCORA, A.A.B. (1985), *Estudo Experimental do Escoamento Gás-sólido em Fase Diluída com Transferência de Calor e Massa*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
- 67 PERAZA, A.L., PENA, J.G., SEGURAJAUREGUI, J.S. and VIZCARRA, M. (1986), "Dehydration and Separation of Grape Pomace in a Fluidized Bed System", *Journal of Food Science*, 51(1):206-210.
- 68 PERRY, R.H. e CHILTON, C.H. (1980), *Manual de Engenharia Química*, 5ª Edição, Traduzido por H. MACEDO, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ.
- 69 PHAM, Q.T. (1983), "Behavior of a Conical Spouted-bed Drier for Animal Blood", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61:426-434.
- 70 PISKE, D. (1982), "Aproveitamento de Sangue de Abate para Ali-

- mentação Humana. I. Uma Revisão", *Bol. ITAL*, 19(3):253-308.
- 71 QUAGLIA, G.B. ed ALESSANDRONI, A. (1977), "Sangue di Macellazione: Uma Potencial fonte di Proteine per l'Alimentazione Umana. Nota 1", *Industrie Alimentari*, 16(10):112-116.
- 72 RAKOSKY, Jr., J. (1970), "Soy Products for the Meat Industry", *Journal of Agricu. Food Chem.*, 18(6):1005-1009.
- 73 RÉ, M.I. e FREIRE, J.T. (1986), Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro, *Anais do III Cong. Latinoam. Transf. Cal. e Mat.*, Volume 3, São Paulo, SP, 12 a 15 de maio.
- 74 RICHARDSON, J.F. and S. JERONIMO, M.A. (1979), "Velocity-voidage Relations for Sedimentation and Fluidization", *Chem. Eng. Science*, 34(12):1419-1422.
- 75 RUSTAD, T. and NESSE, N. (1983), "Heat Treatment and Drying of Capelin Mince. Effect on Water Binding and Soluble Protein", *Journal of Food Science*, 48(4):1320-1322.
- 76 SANZ, F.J., FITO, P.J. y REQUENI, V. (1977), "Secado de Salvado de Arroz en Lecho Vibro-fluidizado. III. Estudio de la Cinética del secado en el Período de Velocidade de Secado Constante", *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 17(1):131-139.
- 77 SILVA, R.Z.M. da (1985), Avaliação de Condições de Armazenamento na Deteriorização da Qualidade de Fatias de Cebola Desidratadas, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP.
- 78 SINGH, R., BARRE, H.J. and HANDY, M.Y. (1972), "Drying Spherical Porous bodies", *Transactions of the ASAE*, 15(2):338-341.

- 79 SPIESS, W.E.L. and WOLF, W.R. (1983), The Results of the COST 90 Project on Water Activity. In: JOWITT, R. et alii, Physical Properties of Foods, Applied Science Publisher, London, GB.
- 80 SPINK, L.K. (1973), Principles and Practice of Flow Meter Engineering, 9<sup>th</sup> Edition, The Foxboro Company, Foxboro, USA.
- 81 STANISH, M.A., SCHAJER, G.S. and KAYRHAN, F. (1986), "A Mathematical Model of Drying for Hygroscopic Porous Media", AICHE Journal, 32(8):1301-1311.
- 82 STANLEY, D.W. (1986), "Chemical and Structural Determinants of Texture of Fabricated Foods", Food Technology, 40(3):65-68, 76.
- 83 SUAREZ, C., VIOLLAZ, P.E. and CHIRIFE, J. (1980), "Diffusional Analysis of Air Drying of Grain Sorghum", Journal of Food Technology, 15:523-531.
- 84 TALMON, Y., DAVIS, H.T. and SCRIVEN, L.E. (1983), "Moving Boundary Problems in Simple Shapes Solved by Isotherm Migration", AICHE Journal, 29(5):795-800.
- 85 TARDOS, G., MAZZONE, D. and PFEFFER, R. (1985a), "Destabilization of Fluidized Beds due to Agglomeration. Part I: Theoretical Model", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 63(3):377-383.
- 86 TARDOS, G., MAZZONE, D. and PFEFFER, R. (1985b), "Destabilization of Fluidized Beds due to Agglomeration. Part II: Experimental Verification", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 63(3):384-389.
- 87 TESSIER, J.-P. (1980), "Application des Membranes Semi-permea-

- bles à la Valorization du Plasma Bovin", RTVA, 19(159):19-25.
- 88 THONGLIMP, V., HIQUICY, N. et LAGUERRIE, C. (1984), "Vitesse Minimale de Fluidisation et Expansion de Couches Fluidisées par un Gaz", Powder Technology, 38:233-253.
- 89 TOSI, E., MASCIARELLI, R. y CIAPPINI, M. (1984), "Secado de Maíz (Zea Mays) en Lecho Fluidizado. Estudio de la Fluidodinámica del Lecho", Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, 24(4):510-518.
- 90 TRAVAGLINI, D.A. (1979) (coordinador), Curso sobre Alimentos Desidratados, ITAL, Campinas, SP.
- 91 TREYBAL, R.E. (1981), Mass-transfer Operations, Third Edition, McGraw-Hill International Book Company, Tokio, Japan.
- 92 TUOHY, J.J. (1980), "Physical Properties of Textured Whey Protein. II. Bulk Density, Water Binding Capacity and Protein Solubility", Ir. Journal of Food Sci. Technol., 4(2):111-123.
- 93 VAN ARSDEL, W.B., COPLEY, M.J. and MORGAN, A.I. (1973a), Food Dehydration, Second Edition, V.1, The AVI Publishing Company, Inc., Westport, USA.
- 94 VAN ARSDEL, W.B., COPLEY, M.J. and MORGAN, A.I. (1973b), Food Dehydration, Second Edition, V.2, The AVI Publishing Company, Inc., Westport, USA.
- 95 VAN DENDER, A.G., BALDINI, V.L.S. e MELO, E.M. (1986), "Efeito da Desidratação sobre as Qualidades Proteicas dos Alimentos", Bol. ITAL, 23(2):147-168.
- 96 VANĚCĚK, V., MARKVART, M. and DRBOHLAV, R. (1966), Fluidized bed

Drying, English Translation by J. LANDAU, Leonard Hill, London, GB.

- 97 VAZQUEZ, A. and CALVELO, A. (1980), "Gas-particle Heat Transfer Coefficient in Fluidized Pea Beds", *Journal of Food Process Engineering*, 4(1):53-70.
- 98 VAZQUEZ, A. and CALVELO, A. (1983), "Gas-particle Heat Transfer Coefficient for Fluidization on Different Shaped Foods", *Journal of Food Science*, 48:114-118.
- 99 VIOLLAZ, P.E. and SUAREZ, C. (1985), "Drying of Shrinking Bodies", *AIChE Journal*, 31(9):1566-1568.
- 100 WAIBEL, P.E., CUPERLOVIC, M., HURRELL, R.F. and CARPENTER, K.J. (1977), "Processing Damage to Lysine and Other Amino Acids in the Manufacture of Blood Meal", *Journal of Agric. Food Chem.*, 25(1):171-175.
- 101 WEN, C.Y. and YU, Y.H. (1966), "Mechanics of Fluidization", *Chemical Engineering Progress, Symposium Series*, 62(62):100-111.
- 102 WISMER-PEDERSEN, J. (1979), "Utilization of Animal Blood in Meat Products", *Food Technology*, 38(8):76-80.
- 103 WOLF, W.J. (1970), "Soybean Proteins: Their functional, Chemical, and Physical Properties", *J. Agric. Food Chem.*, 18(6):969-976.
- 104 WOOD, P.S. and FRANKLIN, J.E. (1974), "Texturized Soya Proteins", *Food Processing Industry*, :32-34.