

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

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Javier Telis Romero,
e aprovada pela Comissão Julgadora em
01.06.88.

Campinas, 01 de Junho de 1988.


Presidente da Banca

"SECAGEM DE PROTEÍNA TEXTURIZADA DE
SOJA EM LEITO ESTATICO E DESLIZANTE"

JAVIER TELIS ROMERO
ENGENHEIRO QUIMICO

Profa. Dra. FLORENCIA CECILIA MENEGALLI

10/88

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

Maio
Campinas (SP), 1988

ERRATA

- Página 6 - No fluxograma de processamento na 4ta etapa
leia-se "condicionamento" e não "condicionamien-
to"
- Página 28 - Na linha três leia-se "necessária" em lugar de
"necesaria"
- Página 37 - Na linha sete do segundo parágrafo leia-se
"precisão e não "presição"
- Página 41 - No item III.1.4 leia-se III.1.5
- Página 53 - Na figura IV.1 o fluxo mássico de gás (G) é
0.170
- Página 56 - Na figura IV.3 o fluxo massico de gás (G) é
0.170
- Página 62 - Na figura IV.9 está sobrando na legenda $X_o =$
0.21 Kga/Kgas
- Página 84 - Na linha 6 leia-se "densidade aparente do sólido
do lugar de densidade real do sólido"
- Página 84 - Na linha 10 leia-se "porosidade do leito em lugar
de porosidade do sólido"

A todos aqueles que se encontram hoje em estado de coma, desejando-lhes que um dia possam sair dessa situação e integrar-se produtivamente à sociedade

Em especial a meus pais e irmãos pelo seu carinho, seus ensinamentos e a confiança que sempre depositaram em mim.

AGRADECIMENTOS

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

A Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade oferecida.

Ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (CONACYT) pelo auxílio financeiro e CAPES pelo auxílio parcial.

Ao Eng. Gerardo Telis pelas sugestões e motivações ao longo deste trabalho.

Ao acadêmico Cláudio Gomide pelo auxílio na montagem e obtenção de dados experimentais e ao funcionário José Bulhões (Paraíba), pelo auxílio na montagem e construção do equipamento.

Aos colegas da Pós do DEA pela amizade, conselhos e correções do português que tornaram possível a realização deste trabalho, em especial ao Finzer e Humbertinho.

A Energe S.A., pela concessão da Proteína Texturizada de Soja.

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

INDICE

I INTRODUÇÃO	1
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
II.1 Proteína texturizada de soja (PTS).....	4
II.2 Secagem de alimentos.....	9
II.3 Secagem descontínua (leito estático).....	12
II.4 Secagem contínua (leito deslizante).....	18
II.4.1 Secadores em leito deslizante.....	25
II.4.2 Distribuição do tempo de residência no seca- cador.....	27
III DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
III.1 Matéria-prima.....	34
III.1.1 Umidificação do sólido.....	35
III.1.2 Determinação de umidade das amostras....	36
III.1.3 Determinação das isotermas de sorção....	36
III.1.4 Diâmetro equivalente da PTS.....	39
III.1.5 Raio equivalente da partícula.....	41
III.1.6 Calor específico da PTS.....	42
III.2 Equipamento.....	43
III.2.1 Descrição do equipamento em leito estáti- co.....	43
III.2.2 Descrição do equipamento em leito desli- zante.....	45
III.3 Operação dos equipamentos.....	48
III.4.1 Ensaios de secagem em leito estático....	48
III.4.2 Ensaios de secagem em leito deslizante..	50

III.4.2.1 Distribuição de tempos de resi-	
dência.....	50
III.4.2.2 Ensaios de secagem.....	50
IV SECAGEM DE PTS EM LEITO ESTATICO.....	52
IV.1 Análises dos resultados.....	52
IV.1.1 Efeito da vazão de ar na secagem.....	56
IV.1.2 Efeito da temperatura do ar na secagem.....	59
IV.1.3 Efeito da espessura do leito na secagem....	61
IV.2 Cinética de secagem em leito estático.....	62
V SECAGEM DE PTS EM LEITO DESLIZANTE.....	73
V.1 Distribuição de tempos de residência.....	73
V.2 Análises dos resultados.....	78
V.2.1 Efeito da vazão da ar na secagem.....	81
V.2.2 Efeito da temperatura do ar na secagem.....	82
V.2.3 Efeito da vazão de sólidos na secagem	84
V.3 Comparação do comportamento da secagem em leito es-	
tático com leito deslizante em função das mesmas va-	
riáveis.....	86
VI CONCLUSÕES.....	91
APÊNDICES	
A Calibração da placa de orifício e termopares.....	94
B Diâmetro equivalente da PTS.....	98
C Isotermas de sorção.....	100
D Resultados experimentais.....	103
E Cálculo das taxas de secagem.....	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

RESUMO

A secagem de proteína texturizada de soja (PTS), em leito estático e em leito deslizante, foi estudada neste trabalho. Os autores verificaram que, para as condições usadas, a temperatura é o parâmetro que mais influencia a secagem do material.

Durante as experiências em leito estático variou-se a vazão de ar (G), a temperatura do ar (T) e a espessura do leito (E). Desse estudo, dois períodos de velocidades de secagem decrescente foram observados e representados por uma equação do tipo:

$$M = B \text{ EXP } (-A t)$$

onde $A = f(T, G, E)$

$$B = f(T, G, E)$$

M = conteúdo de umidade residual

t = tempo

A validade deste modelo foi comprovada, comparando as correlações obtidas com às curvas de secagem experimentais. Obtiveram-se coeficientes de correlação próximos da unidade.

Foi construído um secador de leito deslizante a partir de chapa de alumínio, tendo como principais dimensões: 60 cm de comprimento e 225 cm² de área de seção transversal. Estudou-se a secagem em função da vazão de ar e sólido, e a temperatura do gás. Os resultados obtidos podem ser utilizados para mudança de escala, considerando a temperatura do gás e o tempo de residência.

SUMMARY

The drying of texturized soy protein (TSP) was studied, using batch and continuous bed driers. The authors determined that the temperature was the parameter with the most influence on the drying of the material.

The effects of flow (G) and temperature (T) of the gas, and the bed thickness (E), were analyzed during the tests of the fixed bed drier. Two falling rate periods were observed and could be represented by the following equation:

$$M = B \text{ EXP } (-A t)$$

where: $A = f(T, G, E)$

$$B = f(T, G, E)$$

M = residual moisture content

t = time

Analysis showed the validity of this model when it was applied to the experimental drying curves. The correlation coefficient was approximately one.

A continuous bed drier was constructed of aluminium sheets, with dimensions of 60 cm of length and 225 cm² cross sectional area. The drying parameters studied for this equipment were: gas flow, feed rate of TSP and gas temperature. The results obtained could be applied to scaling up, taking into account gas temperature and the residence time.

NOMENCLATURA

a	Superfície exposta por unidade de volume	(m^2 / m^3)
A	Área do orifício	(m^2)
C	Calor específico a pressão constante	$(Kcal/Kg \text{ } ^\circ C)$
dp	Diâmetro da partícula	(mm)
d	Diâmetro do orifício da placa	(cm)
D	Diâmetro do duto do gás	(cm)
Dap	Difusividade aparente	(m^2 / s)
Ea	Energia de ativação	$(cal/g\text{-mol})$
g	Aceleração da gravidade	(m/s^2)
h	Coefficiente de transferência de calor	$(Kcal/h \text{ } m^2)$
H	Entalpia	$(Kcal/Kg)$
Na	Fluxo mássico	$(Kg/m^2 \text{ } h)$
Nv	Taxa de secagem por unidade de superfície exposta em secagem contínua	$(Kg/m^2 \text{ } s)$
P	Pressão total	(Atm)
Qp	Quantidade de calor perdido	$(Kcal/hr)$
r	Raio da partícula	(m)
-R	Taxa de secagem por unidade de superfície	$(Kg/m^2 \text{ } s)$

exposta em secagem descontínua

R	Constante universal dos gases	(cal/g-mol °K)
S	Area de seção transversal	(cm) ²
t	Tempo	(min)
tr	Tempo de residência medio	(min)
Tbu	Temperatura de bulbo umido	(°C)
Tsc	Temperatura do sólido calculado	(°C)
Tse	Temperatura do sólido experimental	(°C)
Vp	Vazão padrão	(m ³ /seg)
Vr	Vazão real	(m ³ /seg)
W	Vazão massica	(Kg/seg)
X	Umidade do sólido em base seca	(Kg água/Kg sólido seco)
Y	Umidade do gás	(Kg de vapor/Kg gás seco)
Z	Comprimento do secador	(cm)
ε	Porosidade	
λ	Calor latente de vaporização	(Kcal/Kg)
μ	Viscosidade	
ρ	Massa específica	(Kg/m ³)

ADIMENSIONAIS

Re	Número de Reynolds	$V D / \mu$
Pr	Número de Prandtl	$C_p \mu / k$
Nu	Número de Nusselt	$h L / k$

SUBSCRITOS

a	ar
eq	equilíbrio
g	gás
l	líquido
s	sólido
o	inicial
v	vapor de água
1	topo do secador
2	base do secador

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação comum e importante na indústria de processamento de alimentos que envolve fatores críticos como qualidade final do produto e consumo de energia. O entendimento dos fenômenos envolvidos em tais operações é imprescindível para a formulação de modelos que permitam cálculos e projetos de sistemas de secagem.

Proteína de soja texturizada (PTS) foi o sólido escolhido para o estudo, pois o seu processamento exige uma etapa de secagem. A PTS tem enorme uso nas indústrias de alimentos, sobretudo nas de produtos cárneos.

Atualmente este produto é seco em esteiras contínuas e leitos fluidizados. Como estes equipamentos demandam um elevado consumo de energia para a movimentação do gás e do sólido, desenvolveu-se um secador contínuo de tecnologia mais simples, que envolve menores investimentos e que acarreta poucas modificações.

Além do desenvolvimento tecnológico, esta pesquisa visa o estudo da secagem de materiais biológicos, analisando-se as cinéticas do processo de secagem, considerando-se não apenas os parâmetros externos, mas também o efeito dos diferentes parâmetros do processo de extrusão da PTS.

A pesquisa envolveu as seguintes etapas:

- Pesquisa exploratória para um estabelecimento das equações que regem o fenômeno e levantamento dos parâmetros de secagem através de experimentos em leito estático.
- Construção do secador em leito deslizante.
- Estudo da distribuição dos tempos de residência (DTR).
- Análise do desempenho do secador contínuo em função das diversas variáveis do processo.

Considerando-se que este trabalho envolve a PTS em secagem em leito estático, leito deslizante, distribuição de tempos de residência e a influência das características da matéria prima, fez-se uma revisão bibliográfica abrangendo cada um destes itens, que se encontram no capítulo II.

No capítulo III, encontram-se os materiais e os métodos utilizados em todos os ensaios, além de mostrar-se detalhadamente a construção e funcionamento do secador de leito deslizante.

No capítulo IV são apresentados as curvas da cinética de secagem em leito estático, assim como a representação matemática do processo, através de equações empíricas.

No capítulo V são apresentados os resultados de distribuição de tempo de residência no secador em leito deslizante, além de apresentar e analisar os perfis de umidade e taxas de secagem ao longo do secador em função das diversas variáveis como temperatura do gás, vazões de gás e sólido e diferentes tamanhos dos sólidos. Neste último capítulo fazemos uma comparação da secagem em leito estático com a de leito deslizante.

As isotermas de sorção, os resultados de distribuição de tamanho, calibrações da placa de orifício e termopares, além de todos os resultados experimentais são apresentados nos apêndices A, B, C, D e E.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 Proteína texturizada de soja (PTS)

Os concentrados proteicos e a proteína isolada de soja, são produtos comercializados normalmente em forma de grânulos ou pó, produzidos por extrusão da farinha desengordurada de soja (Wood e Franklin, 1974 e Brian, 1976), porém, também se texturizam isolados e concentrados proteicos de soja. As diferentes formas com que a proteína de soja é comercializada são isolados proteicos, concentrados proteicos e farinhas. Wolf (1970) e Rakosky, Jr. (1970) descrevem as operações para a obtenção dos três diferentes produtos de soja, diferenciando-os quanto ao teor de proteínas: farinha, de 40% a 50%; concentrado, cerca de 70%; e o 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).

Sobral (1987) explica mais detalhadamente os dois principais métodos para a fabricação de PTS. Na figura 11.1 é apresentado um processo de obtenção de PTS por extrusão.

Mustakas et al(1964) estudaram a aplicação da extrusão na produção de farinhas integrais de soja. Segundo os autores, neste processo o produto vai sendo gradualmente submetido a temperaturas e pressões crescentes dentro do extrusor e ao sair da matriz, a brusca redução de pressão causa a expansão do material, dessa forma o produto é expandido e resfriado, devido à evaporação de parte da umidade nele contida. O alto valor nutritivo das farinhas de soja é prejudicado pela presença de inibidores nutricionais, sendo que com o tratamento térmico durante a extrusão estes são inativados, permitindo um melhor aproveitamento das proteínas existentes.

Mustakas et al(1970) em experiências posteriores sobre o cozimento por extrusão, verificaram que os parâmetros de temperatura, umidade e tempo de retenção são os fatores mais significativos relacionados com as características nutricionais e físicas das farinhas integrais de soja.

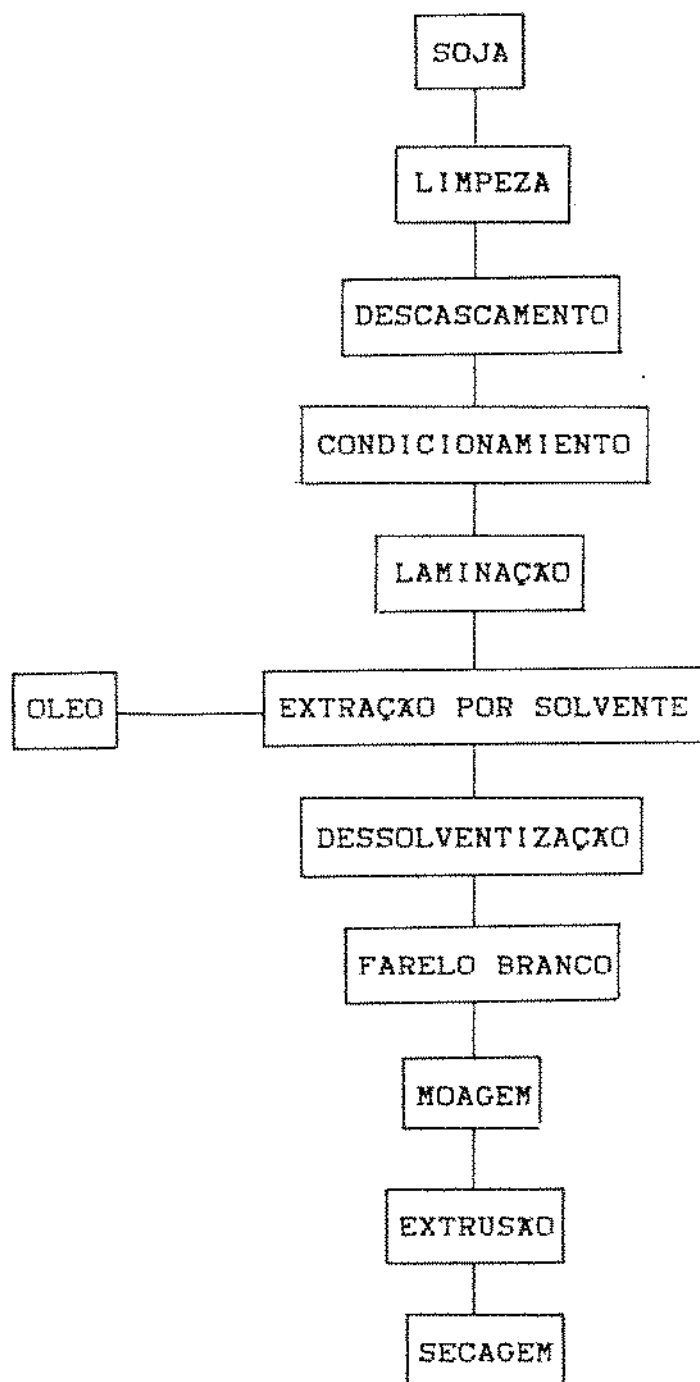


Figura 11.1 Fluxograma de processamento de soja para obtenção de PTS e óleo.

Fonte: NUTRIMENTAL S.A.

Extrusores são descritos em vários trabalhos, como os de Aguilera et al. (1976) e Harper (1986).

Teoricamente toda a proteína pode ser "fiada", isto é, transformada em fios, mas na prática as proteínas vegetais, principalmente soja, são as mais indicadas para isto, por causa de suas propriedades intrínsecas e seu peso molecular médio, aliados ao seu alto valor nutritivo.

Os produtos texturizados podem ser comercializados na forma desidratada. Nesse caso, antes de seu uso, devem ser colocados por alguns minutos em água fervente para reabsorverem a umidade perdida durante o processo de desidratação.

A grande vantagem da forma seca é que os alimentos assim comercializados podem ser armazenados à temperatura ambiente, sem refrigeração, durante um longo período sem perda apreciável da qualidade.

Entre as propriedades funcionais relacionadas às proteínas de soja, nas suas várias formas, citam-se as seguintes: retenção de água e gordura, emulsificação, formação de espuma e filme, geleificação, além do aumento da coesividade e adesividade de diversos produtos (Smith e Circle, 1972).

Lemanik e Ziemba (1962) verificaram que os produtos de soja podiam aumentar o valor nutricional de alimentos formulados,

além de prolongar a vida de prateleira, ajudar a emulsificação, diminuir o custo de ingredientes, reduzir o tempo de processamento e melhorar o manuseio.

A proteína texturizada de soja apresenta grande consumo na indústria de embutidos, principalmente os de massa fina; como complemento na preparação de sopas e molhos, e de pratos pré-elaborados, como pizzas, lasanhas e ravióles. Um agregado de até 15% em produtos cárneos não diminui em nada o valor nutritivo do mesmo, sendo que a PTS possui uma alta retenção de água e excelente capacidade de manter a emulsão das gorduras, o que confere ao produto cárneo uma textura macia, sem alteração do gosto.

Os alimentos produzidos a base de proteínas texturizadas de soja contém, normalmente 33-36 % de proteínas, sendo o restante composto de gorduras animais ou vegetais, produtos aromatizantes, sais minerais, vitaminas ou outros aditivos.

Vários pesquisadores, entre eles Aguilera et al. (1976), Stanley (1986), Cumming et al. (1972) e Anderson (1974) estudaram a PTS sob o ponto de vista tecnológico, existindo, porém, pouca informação sobre a cinética do processo de secagem de PTS, a não ser as mencionadas por Brian (1976) e Tuchy (1980) que são apenas ilustrativas. Sobral (1987) estudou a cinética de secagem de sangue em suporte de proteína de soja em leite fluidizado e estático.

Trabalhos de interesse na secagem de produtos extrusados são os feitos por Fortes e Okos (1981) e Hansen (1978 a.b).

Industrialmente este produto tem sido seco em esteiras contínuas e atualmente começou a ser seco em secadores de leito fluidizado.

11.2 Secagem de alimentos

A diminuição de umidade de alimentos é um método de preservação muito antigo, e conserva os alimentos devido ao abaixamento da atividade de água. Atividade de água é uma propriedade, definida primeiramente por Scott (1957) e Salwin e Slawson (1959), sendo um dos parâmetros mais importantes no controle de desenvolvimento de microrganismos e deterioração em alimentos. Com o abaixamento da pressão de vapor da água no sólido, consegue-se retardar consideravelmente as reações enzimáticas, oxidação de lipídeos, hidrólise e escurecimento. Para uma determinada composição em matéria seca, à medida que o alimento tem seu conteúdo de água diminuído, a atividade também diminuirá e vice-versa. Esta relação não é linear, e pode ser representada pela chamada curva de sorção ou isoterma de sorção. Este gráfico interrelaciona o conteúdo de água (expresso como massa de água por unidade de massa do material seco) de um alimento com sua atividade de água ou umidade relativa de equilíbrio à temperatura constante. A figura 11.2 ilustra uma isoterma típica para alimentos.

As isotermas de sorção podem ser obtidas de duas maneiras, por secagem ou retirada de água do alimento (dessorção) ou por hidratação de amostras previamente secas (adsorção). As duas isotermas geralmente apresentam valores diferenciados para algumas faixas de atividade de água, indicando diferentes associações da água aos solutos nos dois processos referenciados, ou pelo menos de diferentes intensidades de associação (Labuza, T.P. 1968). Esta diferença é conhecida como histerese.

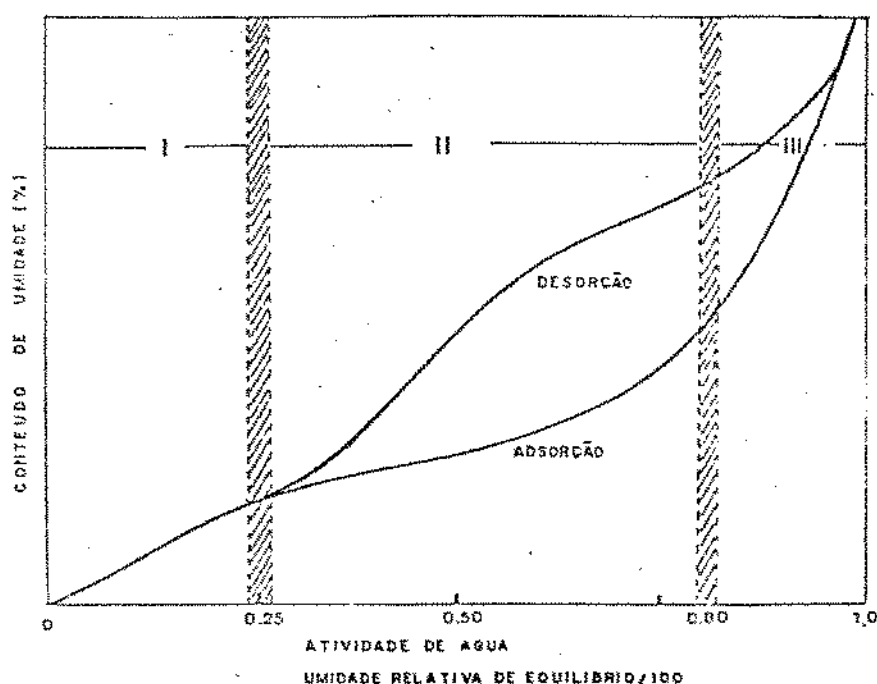


Figura 11.2 Isoterma de sorção típica para alimentos

O conteúdo de água de um alimento é expresso, usualmente, pelo teor absoluto de umidade contido no mesmo. No entanto, este valor não permite saber como a água está associada ao sólido, e menos ainda quais as propriedades que a mesma teria. Um fator im-

portante é a observação do processo de retirada da mesma durante a secagem. Duas etapas, envolvendo níveis de energia diferenciados, são constatados. A primeira envolve energia ao nível de calor latente de vaporização, e a segunda, com menos água a eliminar, necessita maior nível de energia. Estes fatos levam à admissão da existência de moléculas de água com propriedades e características de associação diferentes no mesmo alimento. Os conceitos desses tipos de umidade são facilmente encontrados na literatura, como em Dăscălescu (1969), Treybal (1981) e Foust et al. (1982).

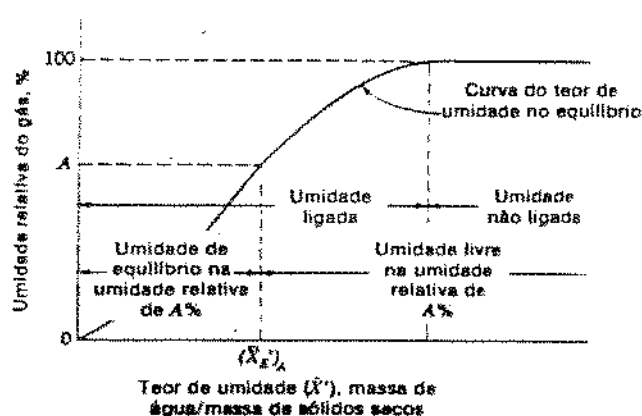


Figura 11.3 Tipos de umidade envolvidas na secagem de sólidos

A figura 11.3 mostra as diversas formas em que a água se apresenta no sólido. Nesta última figura, quando é alcançada a umidade relativa de 100%, a água exercerá a sua pressão de vapor total. Qualquer água adicional exercerá a mesma pressão de vapor e estará em equilíbrio com o ar saturado. A umidade extra atua

como uma água não ligada e é denominada "umidade não ligada". A umidade retida no sólido em equilíbrio com o ar parcialmente saturado é a "umidade ligada"; que exerce uma pressão de vapor mais baixa que a da água pura, devido a diversas razões (Foust et al, 1982). A mesma pode estar em poros capilares finos, com superfícies fortemente curvas, ou pode conter uma grande proporção de sólidos dissolvidos, ou então pode estar em combinação física numa estrutura orgânica natural. O grau de abaixamento da pressão de vapor, devido a estes mecanismos, pode variar amplamente com as variações do teor de umidade. A umidade retida em excesso, além do teor de umidade de equilíbrio é a "umidade livre".

Durante a secagem de um sólido, ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: transferência de calor para evaporar o líquido e transferência de massa na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido e na de vapor a partir da sua superfície.

A secagem ocorre, basicamente em dois períodos denominados período de taxa constante e período de taxa decrescente.

A taxa de secagem de um material, depende de quão rapidamente a água pode ser evaporada. De início, a água evapora-se como que saindo de uma superfície livre (taxa constante de secagem), mas à medida que um material poroso seca, a velocidade de secagem começa a ser controlada por difusão de massa dentro das partículas. Em meios de alta porosidade, os mecanismos de transporte podem ser ainda mais complexos (Stanish et al, 1986).

11.3 Secagem descontínua (leito estático)

Nonhebel e Moss (1971) afirmam que não há uma teoria única de secagem que abranja todos os tipos de equipamentos e materiais. Variações de fatores como: formato e tamanho das partículas, mecanismo de migração da umidade através do sólido e método de fornecimento de calor impedem um tratamento unificado. Os mesmos apresentam uma listagem de 34 diferentes parâmetros envolvidos na secagem.

No estudo da secagem, após a obtenção das curvas e caracterização dos períodos de secagem, faz-se necessário a descrição matemática do processo de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem, ou em projeto de secadores.

No período de secagem à velocidade constante, a taxa de evaporação da água, do sólido úmido para o gás, é controlada pela resistência externa. Como todo o calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem constante conforme Nonhebel e Moss (1971).

$$N_a = \frac{h (T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (11.1)$$

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

λ - calor latente de vaporização da água a T_{bu} (kcal/kg);

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

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

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

O coeficiente de transferência de calor na secagem por convecção forçada é apresentado na forma generalizada através de uma equação da seguinte forma:

$$Nu = a Re^b Pr^c \quad (11.2)$$

onde: Nu - número de Nusselt;

Re - número de Reynolds;

Pr - número de Prandtl;

a, b, c - Constantes.

Na secagem de alimentos, predomina o período de taxa decrescente. Algumas teorias foram propostas para a interpretação do movimento de umidade dentro de alimentos, durante o processo. A teoria principal utilizada para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas neste período (Becker 1955, Lewis 1921, Sherwood 1929, Mc Cready 1933, Van Arsdel 1947, Chu, S.T. e Hustrulid 1968, Suarez 1980, Aguerre et al 1982, 1984, 1985, Farinati e Suarez 1984), se baseia na segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla D \nabla X \quad (11.3)$$

Esta equação resulta da simplificação criteriosa de um sistema geral de equações, proposto por Luikov (1966). Segundo ele, o sistema geral de equações diferenciais, que descreve a variação de umidade, temperatura e pressão durante a secagem de sólidos, é a seguinte:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} X + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P \quad (11.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} X + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P \quad (11.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} X + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P \quad (11.6)$$

Como a secagem de sólidos ocorre sob circunstâncias particulares, é possível simplificar estas equações. Considerando-se que a influência do gradiente de pressão total sobre o movimento da umidade só é importante em temperaturas bem acima do limite das empregadas na secagem de alimentos e produtos agrícolas, e,

levando-se em conta também que os acoplamentos dos efeitos dos gradientes de temperatura e umidade, numa análise de secagem, só aparecem em um número muito limitado de tipos de alimentos (Husain et al. 1972), as equações diferenciais reduzem-se, então, a:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \nabla^2 K_{11} X \quad (11.7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \nabla^2 K_{22} T$$

Além disto, se desconsiderarmos os gradientes de temperatura na partícula, as equações de Luikov resumem-se a:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \nabla^2 K_{11} X \quad (11.8)$$

Onde ,no caso da secagem, o coeficiente K_{11} é a própria difusividade da água no material.

Portanto, estas considerações justificam o uso da lei de Fick (Equação 11.3) que para o fluxo líquido, fluindo unidirecionalmente, assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \text{Dap} \nabla X \quad (11.9)$$

onde : X - umidade (kg de água /kg de sólido seco);

t - tempo (s);

Dap - difusividade aparente (m^2/s).

A integração da equação 11.9 requer que as condições de contorno sejam conhecidas e que as características de D sejam especificadas. Nos casos mais simples D pode ser considerado constante. Com esta restrição e admitindo que no estado inicial a umidade esteja uniformemente distribuída e a resistência externa é desprezível ou seja a concentração superficial é a de equilíbrio, a solução obtida por Sherwood (1921) e Newman (1931) para uma esfera é :

$$M = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} \left(-n^2 \pi^2 \right) \frac{\text{Dap} t}{r^2} \quad (11.10)$$

onde: M - umidade residual média ;

X - umidade média da partícula (kg/kgss) ;

Xeq - umidade de equilíbrio (kg/kgss) ;

Xo - umidade inicial (kg/kgss) ;

Dap - difusividade aparente (m^2/s) ;

t - tempo (s) ;

r - raio da partícula (m).

Em leitos profundos as equações 11.1 e 11.10 deverão ser integradas ao longo do leito.

11.4 Secagem contínua

A secagem em bateladas oferece vantagens em termos de controle do processo, mas a maioria das plantas modernas de secagem trabalham continuamente (Keey 1972). A operação contínua geralmente integra-se mais facilmente com o resto do processo e assegura uma maior uniformidade do produto seco com um menor custo unitário.

A secagem em um secador contínuo com fluxos paralelos ou contracorrentes pode ser tratada diretamente através dos balanços de matéria e energia, e as expressões podem ser deduzidas para as taxas de transferência de calor e massa (Tsao & Wheelock 1967).

Um secador contínuo com escoamento contracorrente pode ser representado como na figura 11.4. Os sólidos entram com um conteúdo de umidade X_1 e temperatura T_{s1} , e saem com um conteúdo de umidade X_2 e temperatura T_{s2} . O gás entra com umidade Y_2 e temperatura T_{g2} e sai com umidade Y_1 e temperatura T_{g1} . Por conveniência, as correntes de sólidos e gás são expressados em base seca e se considera a direcção Z positiva no sentido do avanço do sólido.

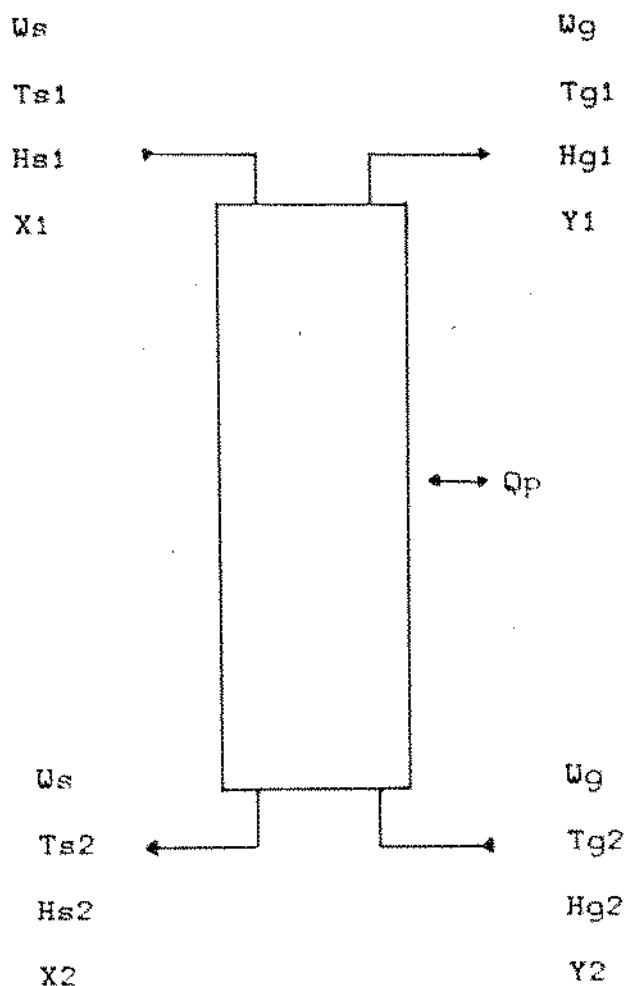


Figura II.4 Secador contínuo

onde :

- W_s - Vazão mássica de sólido (kg/s);
- W_g - Vazão mássica de gás (kg/s);
- T_{s1} - Temperatura do sólido no topo do secador ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{s2} - Temperatura do sólido na base do secador ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{g1} - Temperatura do gás no topo do secador ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{g2} - Temperatura do gás na base do secador ($^{\circ}\text{C}$);
- H_{s1} - Entalpia do sólido no topo do secador (kcal/kg);
- H_{s2} - Entalpia do sólido na base do secador (kcal/kg);
- H_{g1} - Entalpia do gás no topo do secador (kcal/kg);
- H_{g2} - Entalpia do gás na base do secador (kcal/kg);
- X_1 - Umidade do sólido no topo do secador (kg/kgss);
- X_2 - Umidade do sólido na base do secador (kg/kgss);
- Y_1 - Umidade do gás no topo do secador (kg/kgas);
- Y_2 - Umidade do gás na base do secador (kg/kgas);
- Q_p - Perdas de calor (kcal/s).

Para um elemento de camada de espessura dZ , perpendicular a direção dos fluxos, com seção S transversal constante (fig. 11.5), as seguintes equações podem ser escritas, segundo Mujumdar (1981), para um escoamento empistornado:

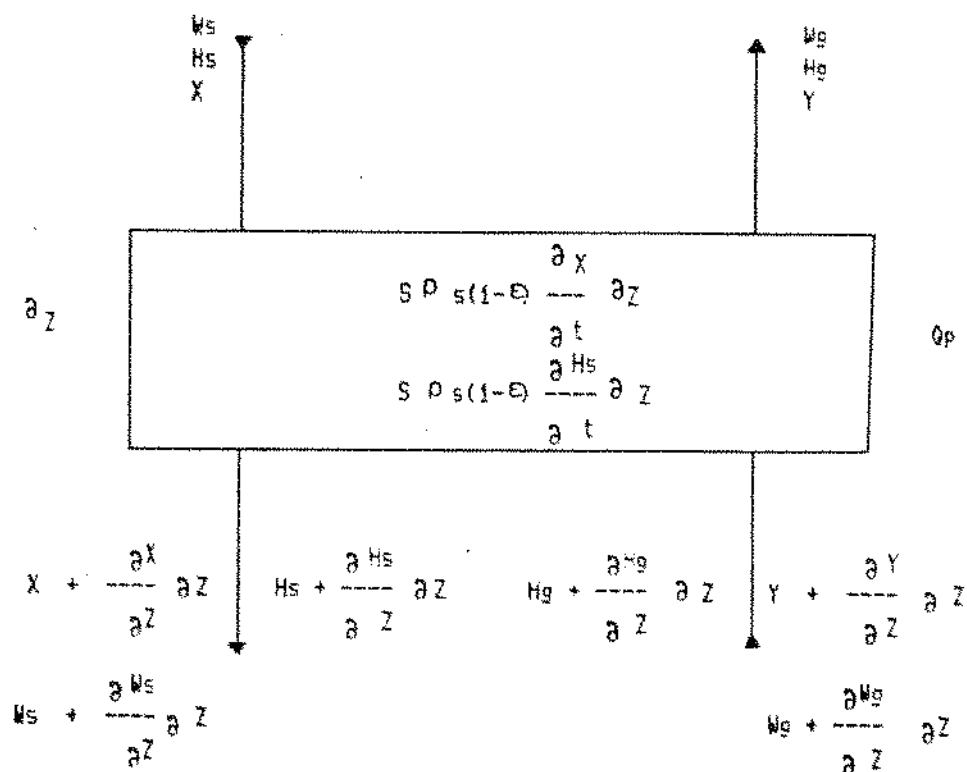


Figura 11.5 Balanço em um elemento diferencial.

$$[\text{Acúmulo}] = [\text{Entra}] - [\text{Sai}] \quad (11-11)$$

$$\frac{\partial(\rho_s(1-\epsilon)X)}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial(W_g Y)}{\partial Z} - \frac{1}{S} \frac{\partial(W_s X)}{\partial Z} \quad (11-12)$$

ou

$$\frac{1}{S} \frac{\partial (W_s X)}{\partial Z} - \frac{1}{S} \frac{\partial (W_g Y)}{\partial Z} + \frac{\partial (\rho_s (1-\epsilon) X)}{\partial t} = 0 \quad (II-13)$$

Nas equações II-12 e II-13 a acumulação da fase gasosa foi desprezada, já que é muito pequena em comparação com a da fase sólida. Além disso, a massa transferida entre ambas as fases pode ser escrita como:

$$\frac{1}{S} \frac{\partial (W_g Y)}{\partial Z} = \frac{1}{S} \frac{\partial (W_s X)}{\partial Z} + \frac{\partial (\rho_s (1-\epsilon) X)}{\partial t} = -Nva \quad (II-14)$$

Onde Nva é massa de água transferida por unidade de tempo e de volume de equipamento.

No estado estacionário o termo de acumulação desaparece, W_s e W_g tornam-se constantes e as seguintes equações simples podem ser obtidas:

$$W_s dX - W_g dY = 0 \quad (II-15)$$

$$W_s dX = W_g dY = -Nva S dZ \quad (II-16)$$

A taxa de secagem média pode ser obtida para um ΔZ do secador. Integrando equação II-16, temos:

$$W_s \int_{X_1}^{X_2} dX = W_g \int_{Y_1}^{Y_2} dY = - Nva S \int_{Z_1}^{Z_2} dZ \quad (11-17)$$

$$W_s (X_2 - X_1) = W_g (Y_2 - Y_1) = - Nva S (Z_2 - Z_1) \quad (11-18)$$

A taxa de secagem média pode ser calculada como:

$$\frac{W_s (X_1 - X_2)}{S (Z_2 - Z_1)} = Nva \quad (11-19)$$

Da equação 11.18, pode-se calcular a umidade de saída do gás (Y_1) como:

$$\frac{W_s}{W_g} (X_1 - X_2) + Y_2 = Y_1 \quad (11-20)$$

Para a maioria das operações de secagem, o balanço global de energia se reduz a um balanço de entalpia porque os efeitos de energia cinética, potencial e outras formas de energia são desprezíveis. O balanço global de entalpia para um elemento de camada dZ de espessura, perpendicular a direção dos fluxos com seção S constante (figura 11.5), pode ser escrito (Mujumdar 1981) como:

$$[\text{Perdas}] + [\text{Acúmulo}] = [\text{Entra}] - [\text{Saí}] \quad (11-21)$$

$$Q_{pa} + \frac{\partial(\rho_s(1-\epsilon)H_s)}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial(W_g H_g)}{\partial Z} - \frac{1}{S} \frac{\partial(W_s H_s)}{\partial Z} \quad (11-22)$$

$$Q_{pa} + \frac{1}{S} \frac{\partial(W_s H_s)}{\partial Z} - \frac{1}{S} \frac{\partial(W_g H_g)}{\partial Z} + \frac{\partial(\rho_s(1-\epsilon)H_s)}{\partial t} = 0 \quad (11-23)$$

Na equação 11-22 e 11-23 a acumulação da fase gasosa foi desprezada, já que é muito pequena em comparação com a da fase sólida.

No estado estacionário o termo de acumulação desaparece, W_s e W_g vêm a ser constantes. Com estas suposições, a equação 11.22, se transforma:

$$Q_{pa} + \frac{W_s}{S} \frac{\partial H_s}{\partial Z} = \frac{W_g}{S} \frac{\partial H_g}{\partial Z} \quad (11-24)$$

ou

$$Q_{pa} S dZ + W_s dH_s - W_g dH_g = 0 \quad (11-25)$$

Integrando:

$$Q_{pa} S \int_{Z_1}^{Z_2} dZ + W_s \int_{H_{s1}}^{H_{s2}} dH_s = W_g \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} dH_g \quad (11-26)$$

$$Q_{pa} S (Z_2 - Z_1) + W_s (H_{s2} - H_{s1}) = W_g (H_{g1} - H_{g2}) \quad (11-27)$$

A entalpia do ar úmido pode ser obtida através da seguinte correlação (Tsao e Wheelok 1967).

$$H_g = C_a T_g + (\lambda + C_v T_g) Y \quad (11-28)$$

λ calor latente à temperatura de referência 0 °C

Substituindo os valores para sistema ar-água:

$$H_g = 0.24 T_g + (597.2 + 0.45 T_g) Y \text{ kcal/kg a.s.} \quad (11-29)$$

A entalpia do sólido úmido por:

$$H_s = C_s T_s \quad (11-30)$$

onde: C_s é o calor específico do sólido úmido

As relações de equações de entalpias 11-28 a 11-30 estão baseadas nos seguintes estados de referência, a entalpia é zero para ar seco a 1 atmosfera e 0 °C, sólido seco a 1 atmosfera e 0 °C, e água líquida a 1 atmosfera e 0 °C.

O balanço global de energia é útil na avaliação da temperatura de saída do sólido, desde que sejam conhecidas as vazões mássicas do sólido e do gás, as umidades nas correntes de entrada e saída do sólido e do gás, as temperaturas do gás na entrada e saída do secador, a temperatura do sólido na entrada e as perdas quando o sistema não é adiabático.

II.4.1 Secador em leito deslizante

Massarani e Valença (1982, 1984) desenvolveram um secador contínuo, em leito deslizante com fluxos cruzados para bagaço de cana. O sistema proposto para a secagem do PTS é uma variante do secador desenvolvido por estes. Consiste basicamente de um silo secador, de seção retangular, onde o sólido desloca-se por gravidade, em leito deslizante; o gás percorre o leito em direção contracorrente ou em escoamento cruzado à do escoamento sólido. O sistema proposto constitui-se, portanto, numa versão pouco ortodoxa do clássico secador de esteira (Dalpascuale e Bakker - Arkeema 1981).

Mujumdar (1981) apresenta a relação entre o coeficiente de transferência de calor (h) com relação a queda de pressão por unidade de comprimento de leito ($\Delta P/H$) de diversos secadores para materiais granulares (fig. II.6). Pode-se observar que, localizados na zona de máxima eficiência de transferência de calor, encontram-se os leitos de jorro, os fluidizados e os leitos de tipo deslizante.

Diversos tipos de projeto de câmara são apresentados na figura 11.7 para leitos móveis, onde o produto escoa devido a ação da gravidade e o ar escoa em diferentes direções: co-corrente, contra-corrente e fluxos cruzados.

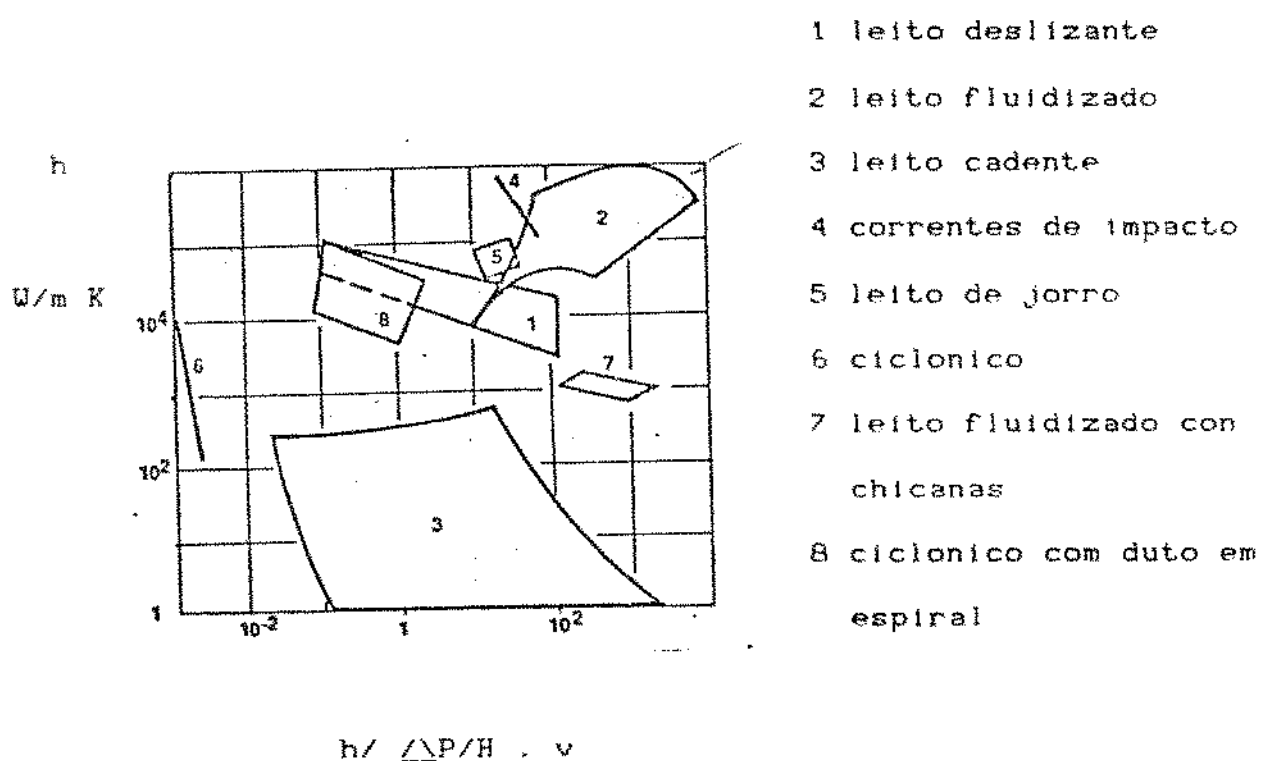


Figura 11.6 Eficiência de transferência de calor com respeito a custo de bombeamento.

Fonte: Mujumdar (1981)

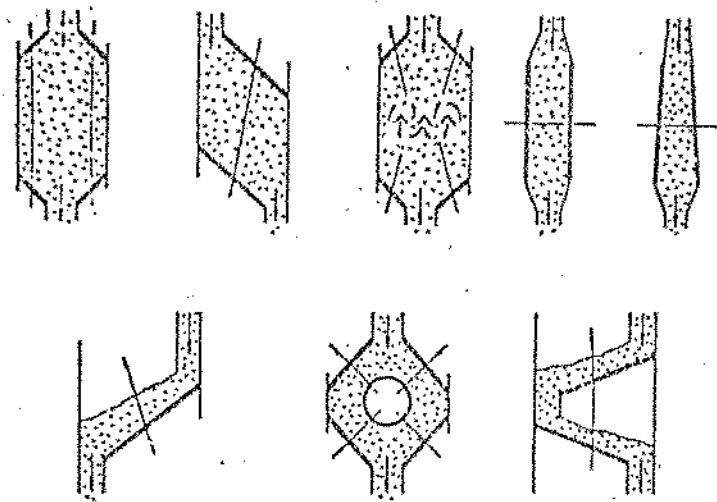


Figura II.7. Diversos tipos de câmara de secagem para leito móvel.

Fonte : Mujumdar (1981)

II.4.2 Distribuição do tempo de residência no secador

A distribuição do tempo de residência para as partículas sólidas é muito importante para o cálculo correto da redução de umidade em secadores contínuos. Uma partícula pode deixar a câmara de secagem muito rapidamente, porém outras podem ficar muito tempo no secador. É comprovado que os tempos de residência para partículas individuais não são iguais. O produto que sai do secador é composto de grânulos com histórias de secagem diferentes (Keey 1975).

A unidade final média será função da distribuição dos tempos de residência. A informação da distribuição do tempo de residência (DTR) é necessária também para o controle da qualidade do produto, sendo que o produto pode ser danificado se forem aplicados tempos de residência prolongados em altas temperaturas.

Pela teoria desenvolvida pelos engenheiros químicos para o estudo de distribuição de tempos de residência em reatores, pode-se calcular a distribuição do tempo de permanência das partículas no secador, usando-se o mesmo conceito para ambos os casos. Os reatores contínuos se classificam em dois tipos básicos:

a) Reator tubular ideal: É aquele que permite um escoamento empistonado do fluido, isto é, qualquer elemento de fluido permanece exatamente o mesmo tempo no equipamento. Sendo este tempo, o tempo médio de residência (t_r) :

$$t_r = \frac{\text{Volume do reator}}{\text{Vazão do fluido}} \quad (11-31)$$

b) Reator de mistura ideal: A agitação e mistura são tão perfeitas, que um elemento de fluido, assim que entra no reator pode estar instantaneamente em qualquer lugar, e portanto tem tantas chances de sair como qualquer outro elemento (ou seja, exatamente oposto do reator tubular ideal).

Na prática existem sempre combinações destes tipos básicos.

Embora os reatores reais nunca sigam completamente os padrões de escoamento ideal, uma grande parte deles se aproxima com erro desprezível, do comportamento ideal. Em outros casos o desvio do comportamento ideal pode ser considerável, causado pela formação de canais ou pela reciclagem de fluido ou ainda pela criação de regiões estagnantes no recipiente. Levenspiel (1972) mostra modelos de escoamento não ideal reproduzidos na fig. 11.8. Estes problemas estão intimamente ligados à ampliação de escala.

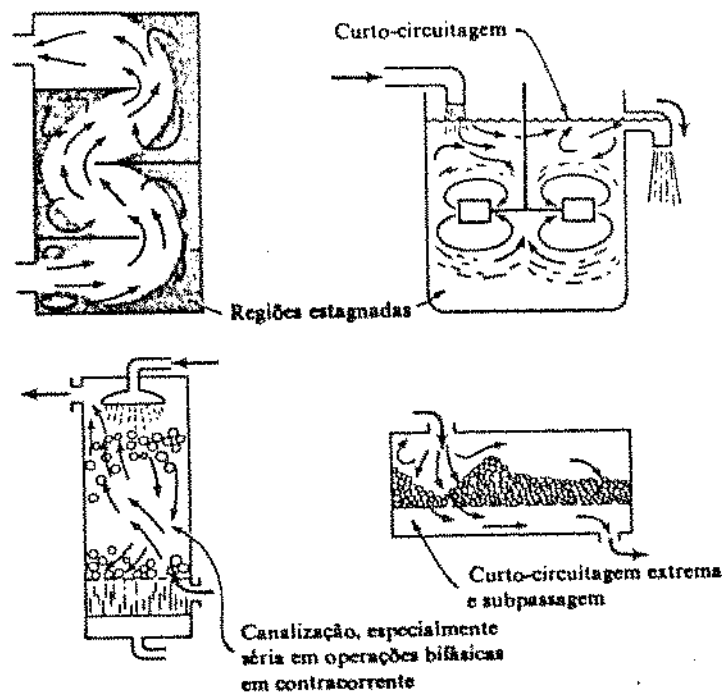


Figura 11.8 Modelos de escoamento não ideal que podem existir em equipamentos de processo.

Fonte: Levenspiel (1972)

Para a determinação do grau de não idealidade do secador (através da DTR) são utilizadas um certo número de técnicas experimentais que podem ser definidas como técnicas de estímulo e resposta. São três os tipos clássicos de estímulos, baseados em traçadores (geralmente sólidos marcados):

a) Entrada em degrau: a partir do tempo t a alimentação de sólido de entrada passa a conter uma concentração uniforme C_0 do sólido marcado.

b) Entrada em pulso: injeção instantânea, no tempo t de uma massa m do sólido marcado na concentração C_0 .

c) Entrada cíclica: variação cíclica da concentração do sólido marcado na entrada.

É evidente que elementos de sólido que percorrem diferentes caminhos no secador podem gastar tempos diferentes para passarem através do secador. A distribuição desses tempos para a corrente de saída que deixa o secador é chamada distribuição de idade de saída E , ou a distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido.

É conveniente representar a DTR de tal maneira que a área sob a curva seja unitária, isto é:

$$\int_0^{\infty} E \, dt = 1 \quad (11-32)$$

Este procedimento é chamado normalização da distribuição.

A fig. 11.9 mostra essa distribuição na forma normalizada

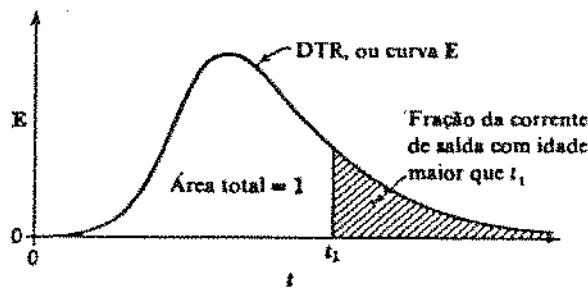


fig. 11.9 Distribuição do tempo de residência

Com essa representação, a fração da corrente de saída com idade entre t e $(t + dt)$ é:

$$E \, dt \quad (11-33)$$

A fração de idade inferior a t_1 , é:

$$\int_0^{t_1} E \, dt \quad (11-34)$$

Enquanto que a fração de idade superior a t_1 , mostrado pela área tracejada da fig. 11.9 é:

$$\int_{t_1}^{\infty} E \, dt = 1 - \int_0^{t_1} E \, dt \quad (11-35)$$

Seja $F(t)$ definida por Danckwerts (1953) para um sistema de escoamento contínuo, como a fração volumétrica da vazão na saída que permaneceu no sistema por um tempo menor que t . De acordo com esta definição da curva $F(t)$, a probabilidade que um elemento de volume, entrando no sistema no tempo $t=0$, tem de sair dentro de um período de tempo t , é justamente igual a $F(t)$. A probabilidade que este permaneça no equipamento e saia em um tempo maior que t é $[1-F(t)]$.

Para que um elemento do escoamento atravesse o sistema, será consumido um intervalo finito de tempo e conseqüentemente $F(t) = 1.0$ em $t = \infty$. A figura 11.10 indica os valores para uma curva arbitrária $F(t)$.

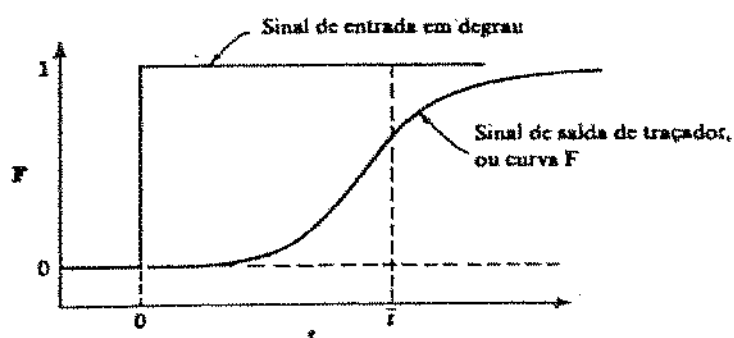


Figura 11.10 Curva F em função do tempo.

Desde que $F(t)$ representa a fração tendo um tempo de residência menor que t , a diferencial, $dF(t)$, será a fração volumétrica da corrente efluente tendo um tempo de residência entre t e $(t + dt)$. Por isso $dF(t)$ é também conhecida como a distribuição do tempo de residência. Então poderemos relacionar a curva E com F como segue:

$$dF(t) = E dt \quad (11-36)$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = E(t) \quad (11-37)$$

A função $F(t)$ pode ser obtida por integração da curva $E(t)$ ou ser medida experimentalmente através de um sinal degrau de concentração C_0 , na entrada do equipamento. Seja $C(t)$ a concentração do traçador na corrente de saída. A curva $F(t)$ será:

$$F(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad (11-38)$$

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

III.1 Matéria prima

Foi utilizado neste estudo a proteína texturizada de soja (PTS), como sólido de secagem. Usou-se a PTS do tipo R-NR 3007 e B, fornecida pela empresa Nutrimental S.A. com sede em Guaramirim (SC), convenientemente reumectadas.

A diferença de parâmetros no processo de extrusão dos dois tipos de PTS é mostrada a seguir.

Temperatura	"R-NR 3007"	<	"B"
Umidade	"R-NR 3007"	<	"B"
Tempo de retenção	"R-NR 3007"	<	"B"
Pressão	"R-NR 3007"	=	"B"

Na tabela III.1 encontram-se as características físico-químicas dos tipos de PTS usados, fornecidas pela mesma empresa.

	R-NR 3007	B
Proteína (N x 6.23) min	50.0 % b.s min	73.54 % b.s
Matéria graxa	2.0 % b.s.	0.36 % b.s.
Cinzas	6.5 % b.s.	6.30 % b.s
Umidade	7.0 - 8.0 % b.s.	7.0 - 8.0 % b.s.
Fibras	4.0 % b.s.	4.0 % b.s.
Taxas de Hidratação	2.0 - 2.5	1.2 - 1.5
Densidade aparente do leite	3 - 0.35	0.52 - 0.57
Densidade aparente do sólido	0.57	0.86
Densidade real da matriz	0.92	1.30
Porosidade do sólido	0.38	0.34

Tabela III.1 Características físico-químicas da PTS

Fonte: Nutrimental S.A.

III.1.1 Umidificação do sólido

Através de um balanço de massa podemos determinar a quantidade de água que deve ser adicionada à amostra de PTS de modo a fornecer a umidade inicial desejada.

$$\begin{aligned}
 & (X - X_{eq}) \\
 Ma = & \frac{\quad}{1 - X} Mp \quad (III.1)
 \end{aligned}$$

onde:

X - umidade desejada;

Xeq - umidade de equilíbrio;

Mp - massa de PTS;

Ma - massa de água a adicionar.

Sabe-se que o PTS deixa os extrusores com umidades na faixa de 30 e 20 % b.s.

Realizou-se a umidificação com uma garrafa contendo água, saindo na forma de "spray". Após a umidificação deixou-se o produto por 24 horas em geladeira para homogeneizar sua umidade. Em seguida, passou-se o produto umidificado por peneiras tyler visando padronizar seu tamanho.

III.1.2 Determinação de umidade das amostras

Para a determinação da umidade empregaram-se pesa-filtros de vidro pirex de 50 ml. As amostras recolhidas eram colocadas, primeiramente, em saquinhos de plástico hermeticamente fechados e depois retiradas dos mesmos e colocadas em pesa-filtros. A determinação de umidade foi realizada em estufa comum, deixando-se as amostras a 110 °C por 24 horas.

III.1.3 Determinação das isotermas de sorção de água

Optamos pelo método estático para determinação das isotermas, utilizando o processo de perda ou ganho de peso em recipientes com ambientes de umidade relativa controlada, conforme Jowit R., (1983).

O dispositivo de sorção é mostrado na figura III.1 e consiste de recipientes herméticos, do tipo para conservas, com uma válvula para gás, acoplada em suas tampas; placas de Petri com diâmetro aproximado de 50 mm, onde a amostra fica exposta à atmosfera controlada; suportes de vidro pirex para fixação da placa no recipiente; banho maria FANEM 120/4 controlado por termostatos, com precisão de $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

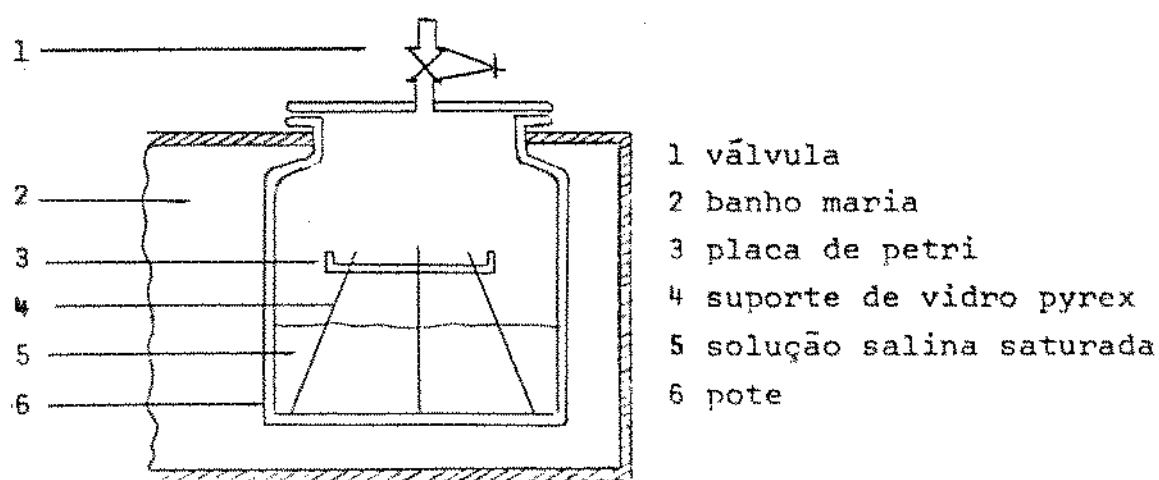


Figura III.1 Sistema de sorção

O sistema completo consiste de oito recipientes com soluções salinas específicas, que fornecem unidades relativas de equilíbrio na faixa de 2 a 97 % dentro do intervalo de temperatura de 20 a 70.±C (Young, J.F., 1967). Na tabela III.2 temos a relação dos sais usados e suas respectivas unidades relativas.

U.R.						
sal utilizado	20±C	30±C	40±C	50±C	60±C	70±C
NaOH	7.0	7.0	6.5	6.0	4.5	2.0
LiCl	11.2	11.2	11.0	11.0	11.0	11.0
MgCl ₂	33.2	32.5	31.7	31.0	30.5	29.5
NaNO ₂	65.5	63.5	61.5	60.0	59.0	59.0
NaCl	75.5	75.5	75.0	74.5	74.0	74.0
KCl	85.3	83.5	82.0	81.0	80.0	79.5
BaCl	90.7	90.0	89.3	88.5	87.5	87.0
CuSO ₄	97.3	96.8	96.2	95.0	93.5	92.5

Tabela III.2 Variação da unidade relativa de equilíbrio com a temperatura.

Para a determinação do ponto de equilíbrio usou-se o método de pesagens sucessivas, sendo que após cinco dias de exposição da amostra em atmosfera controlada, a amostra é pesada a cada 24

horas até atingir peso constante, com variação menor ou igual a 0.001 g.

Observou-se que quanto maior era a temperatura, menor era o tempo necessário de exposição para se atingir o equilíbrio. O tempo de exposição necessário variou de 7 a 15 dias na faixa de temperatura de 40 a 70 °C.

III.1.4 Diâmetro equivalente da partícula

O diâmetro equivalente da partícula foi determinado por peneiragem. As normas gerais relativas ao método podem ser encontradas em manuais como os de Perry e Chilton (1980).

No estabelecimento das condições padrão de trabalho escolheu-se uma vibração moderada entre 3 e 4, num reostato com escala de 0 a 10 para evitar rupturas dos sólidos durante a classificação. A massa de amostra encontrava-se próxima a 200 g, para minimizar os erros nas pesagens das frações. O tempo de peneiragem adotado foi de 10 minutos.

O material mostrou pequena dispersão de diâmetros, ficando retido em seis peneiras, mais o fundo. O número mínimo de peneiras recomendável é 5. As peneiras seleccionadas do tipo Tyler, encontram-se descritas na tabela III.3.

Tyler In/mesh	Abertura (mm)
0.525	13.33
0.371	11.20
0.312	7.93
0.263	6.68
0.221	5.61
0.185	4.70

Tabela III.3 Série de peneiras empregadas nas análises da distribuição de tamanho dos produtos.

As peneiras foram taradas na balança semi-analítica e colocadas no vibrador. Em seguida, foi adicionada a amostra na peneira superior. Terminada a 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 X_i retida nas respectivas peneiras. O vibrador utilizado foi de marca Pro-dutest.

O diâmetro médio da amostra é então calculado pela equação a seguir:

$$dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d_{pi}}} \quad (III-2)$$

onde: $X_i = \frac{M_i}{M_t}$ = Fração de massa das partículas com diâmetro médio igual a d_{pi}

M_i - massa retida em cada peneira;

M_t - massa total para fazer o ensaio;

d_{pi} - diâmetro.

Os resultados do dp encontram-se no apêndice B.

III.1.4 Raio equivalente da partícula.

Determinou-se também o raio de partícula equivalente à esfera do mesmo volume. O método utilizado foi o de deslocamento de fluido num picnômetro. O fluido usado foi mercúrio por ser o que melhor se adapta.

Devido ao fato de que o volume de uma partícula ser muito pouco significativo, optou-se pelo uso de 30 partículas, calculando-se o volume médio deslocado pela divisão por 30.

Usaram-se dois picnômetros de 25 ml, calibrados com água a 23.1 ±C.

Para a obtenção do raio do PTS, a mesma foi considerada como uma esfera. O raio equivalente da partícula pode calcular-se como:

$$r^3 = \frac{3V}{4\pi} \quad (III-3)$$

Onde V - volume médio da partícula

III.1.6 Calor específico da PTS

O calor específico da PTS foi calculado segundo uma correlação apresentada por RHA (1975), obtida teoricamente considerando que o calor específico de um material composto pode ser calculado somando-se os calores específicos de cada componente, dado pela equação III-4.

$$C_s = 1.0 X_a + 0.5 X_g + 0.3 X_s \quad (III-4)$$

onde:

X_a - fracção de água;

X_g - fracção de gordura;

X_s - fracção de sólido.

III.2 Equipamento

III.2.1 Descrição do equipamento em leito estático

O arranjo geral do equipamento usado para o estudo da secagem de PTS em leito estático (bandejas.) foi projetado e construído no Departamento de Engenharia de Alimentos, tendo já sido usado em vários trabalhos. O equipamento será descrito, sucintamente a seguir:

A) Cabine de secagem. Corpo vertical de madeira compensada de 2 cm de espessura, de secção quadrada de 441 cm^2 , de 2.2 m de altura, com oito compartimentos individuais para encaixe das bandejas. Cada compartimento tem uma porta de acesso às bandejas.

B) Bandejas. Confeccionadas em alumínio, bitola 18, tendo 400 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 ar atmosférico provém de um ventilador centrífugo da marca Asten, ligado a um motor trifásico assíncrono de 0.7 HP, 3400 rpm e de 60 Hz. Ele é ligado ao equipamento por meio de canos de PVC com 10 cm de DI e 2.5 m de comprimento. O perfil de velocidade do ar tende a se uniformizar à medida que o

ar percorre a tubulação. Na saída do ventilador foi instalado um controlador de vazão de gás. A vazão de gás foi determinada com um medidor de orifício calibrado (Ower e Pankhurst, 1977 e Normas DIN, 1965), instalado entre o ventilador e o sistema de aquecimento (Apêndice A). Ligado à tubulação da cabine, existe um cone invertido, para suavizar a expansão do ar.

Para a calibração da placa de orifício utilizou-se um medidor de fluxo de ar padrão, Meriam Laminar Flow (modelo 50 MC2-6). O medidor foi colocado em série com a instalação, à montante da placa de orifício, obedecendo as normas do fabricante (mínimo de 10 diâmetros de tubo antes do Meriam e entre o Meriam e a placa, para evitar perturbações no fluxo que possam alterar a leitura). Para cada vazão de ar foi feita a leitura da perda de pressão no Meriam e na placa, bem como da pressão antes dos mesmos.

E) Sistema de aquecimento. O ar ambiente succionado pelo ventilador é aquecido eletricamente por um sistema de resistências de fio Ni-Cr de resistividade $2.122 \, \Omega / m$, de 30 m de comprimento cada uma enroladas em suportes de amianto. Três foram colocadas em paralelo com conexões independentes, e uma foi ligada em série com um transformador variável tipo Variac, para efetuar o controle de temperatura do ar por um ajuste fino. Este tipo de sistema foi o mesmo usado por Finzer (1984) e Meirelles (1985).

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.

III.2.2 Descrição do equipamento em leito deslizante

Para a realização dos experimentos em leito deslizante utilizou-se o equipamento esquematizado na figura III.2.

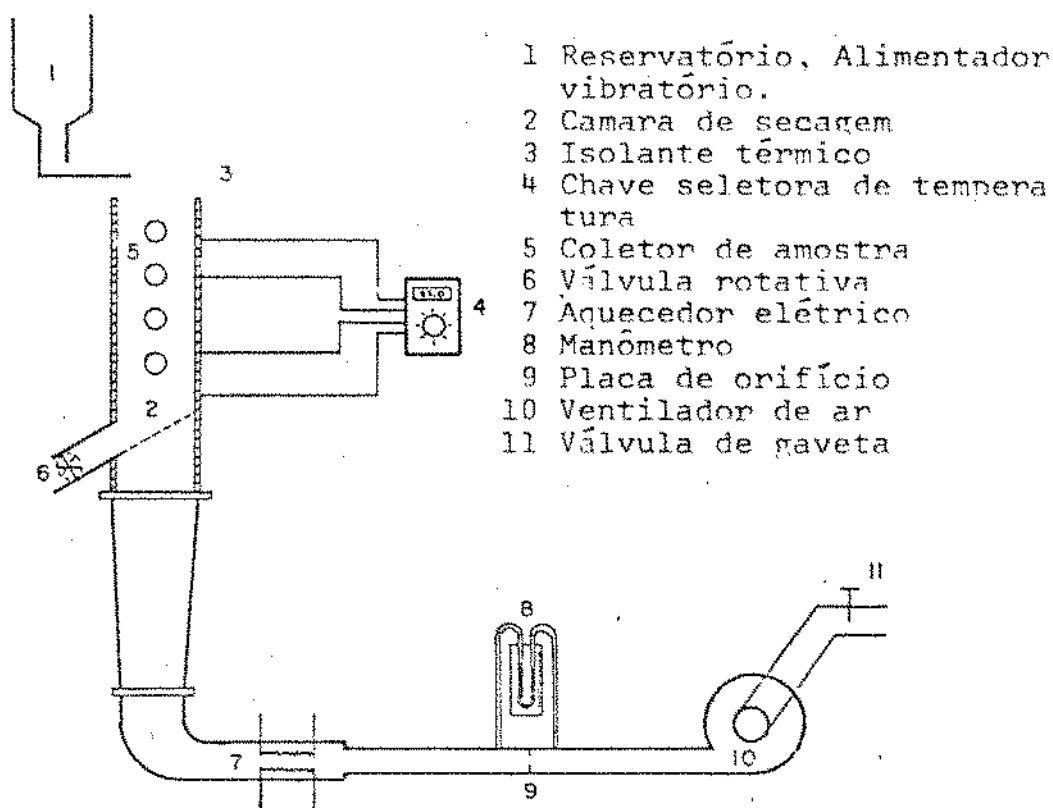


Figura III.2 Secador em leito deslizante

Antes de chegar à forma definitiva foram testados diversos sistemas de alimentação, aquecimento, controle de vazão e temperatura do gás.

O secador é constituído pelas seguintes partes:

A) Câmara de secagem. Foi construída uma câmara retangular de 60 cm de altura e 15 x 15 cm de área de secção transversal, construída com três faces de alumínio e uma face de acrílico para possibilitar a observação da dinâmica do leito deslizante. A câmara de secagem foi isolada com uma camada de poliuretano expandido de 2 cm de espessura com o objetivo de impedir ao máximo as perdas de energia calorífica. O isolamento na face acrílica é removível. Ao longo da câmara foram colocados 7 termopares tipo sonda de Cobre-Constantan ligados a um indicador de temperatura de 10 canais. Estes termopares tem em sua extremidade de medidas uma malha para assegurar que a temperatura medida seja a do gás (fig III.3). Foram também colocados 6 tomadas de amostra para ensaios de umidade do sólido. Para colher as amostras de PTS em cada experimento utilizou-se um dispositivo tipo gaveta de tubos concêntricos como é mostrado em figura III.4. A gaveta é introduzida nas tomadas com o tubo interno inserido até o fundo, impossibilitando a entrada de material nela provenientes de locais do silo não pré-seleccionados para retirada das amostras. Depois do posicionamento correto, o tubo interno é puxado permitindo a captação da amostra. A seringa é, então retirada com a amostra coletada.

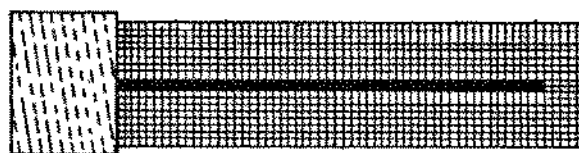


Figura III.3 Termopares com malha de cobre

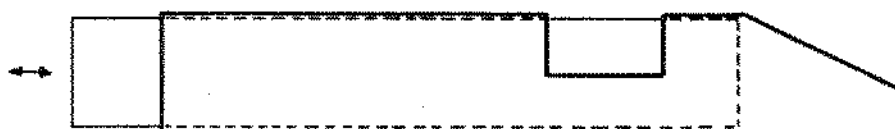


Figura. III.4 Tomador de amostra

B) Ventilador, medidor de vazão e sistema de aquecimento do ar. Foi usada a mesma instalação que no leito estático.

C) Alimentador. Usamos um alimentador tipo silo cônico vertical com calha vibratória marca Norma, modelo VE-15 com um vibrador adicional no silo.

A determinação da vazão dos sólidos foi obtida pesando numa balança METLER P3N (Precisão ± 0.1 g) uma quantidade de sólidos que deixa o alimentador num determinado tempo. Para cada experimento tirou-se a média de 8 a 12 determinações.

D) Válvula de descarga. Uma válvula rotativa para manter o nível dos sólidos e controlar o deslocamento da PTS foi projetada

e construída no DEA. A válvula consta de 4 pás de 2 X 4.5 cm de borracha formando-se ângulos de 90 ° entre uma e outra. A movimentação do eixo da válvula é feita, usando-se um motor marca Bordini de corrente contínua com variador de velocidade tipo NSH-12 RG de 1/50 HP.

III.4 Operação dos equipamentos

III.4.1 Ensaios de secagem em leito estático

A realização de cada experimento obedecia o seguinte procedimento:

A) Preparação do secador: cerca de uma hora antes do início da secagem, o secador era colocado em funcionamento nas mesmas condições, vazão e temperatura de entrada do ar, em que seria realizada a experiência. Este tempo de funcionamento inicial aquecia os componentes do secador. Assim, o tempo necessário para que o equipamento entrasse em regime, ao iniciar-se a secagem, era diminuído.

B) Alimentação: cargas de 500 a 1000 g de PTS previamente umedificadas eram adicionadas numa bandeja já tarada. Desse material eram tiradas três amostras para determinação da umidade inicial.

C) Operação do secador: iniciava-se o ensaio pesando-se a bandeja carregada na balança semi-analítica, colocava-se a mesma no secador, sempre no segundo compartimento de baixo para cima, marcava-se o tempo com um cronômetro, e acompanhava-se o ensaio observando-se a vazão do ar, as temperaturas e as umidades das amostras.

A vazão era constantemente controlada, observando-se a diferença de pressão no manômetro. Anotava-se essa medida cinco vezes ao longo do ensaio. A temperatura de secagem era controlada, observando-se a temperatura de entrada do ar. As temperaturas de entrada e saída do gás foram determinadas em intervalos de 5 minutos de secagem. As temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido foram lidas frequentemente, na entrada da linha de sucção. A temperatura do sólido foi determinada com um termopar inserido numa das partículas do leito por meio de uma agulha hipodérmica. Os fios deste termopar encontrava-se isolado eletricamente com resina e termicamente com amianto.

O acompanhamento da umidade das amostras ao longo da secagem foi feita por pesagem da bandeja, na balança semi-analítica, em intervalos de 5 minutos, de acordo com ensaios preliminares. A pesagem era completada em menos de 30 segundos, a fim de evitar que a retirada do secador alterasse as condições de evolução da temperatura e da umidade das amostras. Ao final da secagem, o produto era guardado em sacos de polietileno para análises posteriores.

III.4.2 Ensaios de secagem em leito deslizante

III.4.2.1 Distribuição de tempos de residência

Utilizou-se a técnica de estímulo e resposta (Degrau).

O seguinte roteiro foi seguido:

A) Liga-se o ventilador, a alimentação e a válvula rotativa, mantendo sempre o nível constante.

B) Após o intervalo de tempo necessário para que o secador atingisse regime permanente, era fornecido um sinal do traçador em degrau. Os sólidos foram marcados previamente, colorido-se as partículas de PTS com tinta latex.

C) Registros de concentração do traçador na corrente de saída do secador eram obtidas, em intervalos de dois minutos. As concentrações foram determinadas por contagem de número de partículas de sólido marcado, dividido pelo número de partículas totais.

III.4.2.2 Ensaios de secagem em leito deslizante.

Nestes experimentos, depois de ligado o ventilador e selecionada uma temperatura para aquecimento do gás, aguarda-se aproximadamente uma hora. Este tempo de funcionamento inicial aqueceu

os componentes do secador. Assim, o tempo necessário para que o equipamento entrasse em regime foi diminuído. Decorrido esse tempo iniciava-se a adição de sólido previamente umidificado, esperando-se atingir o estado estacionário antes de começar as medidas. Ensaíos prévios demonstraram que podiam considerar-se estabelecidos os perfís de umidade ao longo do secador, enquanto os perfís de temperatura do gás se mantivessem constantes; isto, em média, demorava 30 minutos. Uma vez que temos o regime estabelecido dá-se início às medidas experimentais em intervalos de tempo de 5 minutos.

São retiradas amostras do sólido de entrada e de saída ao longo do secador para determinar suas umidades.

As medidas de temperatura de bulbo seco ao longo da câmara de secagem fornecem os perfís de temperatura do gás diretamente.

Os perfís de temperatura do sólido foram medidos diretamente com um termopar colocado na partícula, que se deslocava através no leito.

Os resultados experimentais obtidos para temperatura do gás e umidade do sólido são os valores médios entre 5 medidas experimentais para cada nível do secador. Muitas vezes foi necessário desprezar alguns dados, devido a seu grande afastamento do valor médio.

CAPÍTULO IV

Secagem de PTS em leito estático

IV.1 Análises dos resultados.

Estudou-se a secagem de PTS em secador de bandeja, analisando-se: os efeitos de temperatura na faixa de 50 a 91 °C, efeitos do fluxo de ar no intervalo de 0.13 a 0.18 kg/m²s, efeitos da altura do leito na faixa de 2 a 10 cm, efeitos do diâmetro da partícula em dois tamanhos de 5 e 9 mm, aproximadamente e efeitos da estrutura interna das partículas em dois tipos de PTS: "R-NR 3007" e "B", com umidades aproximadas com as quais deixam os extrusores, que é na faixa de 0.19 a 0.27 em b.s.

Na figura IV.1 é mostrado um experimento típico (número 2), com todas as medidas experimentais levantadas em função do tempo (t): X, umidade do sólido, T_g, temperatura do gás, T_{sa}, temperatura de saída do gás, T_s, temperatura do sólido, R, taxa de secagem, para a PTS tipo "R-NR 3007", onde R taxa de secagem

foi calculada com a ajuda de um micro-computador Apple, modelo Micro engenho, marca Scopus, segundo roteiro do apêndice E. Todos os experimentos, juntamente com as condições sob as quais foram realizadas, encontram-se no apêndice D (tabelas de experimentos 1 a 17).

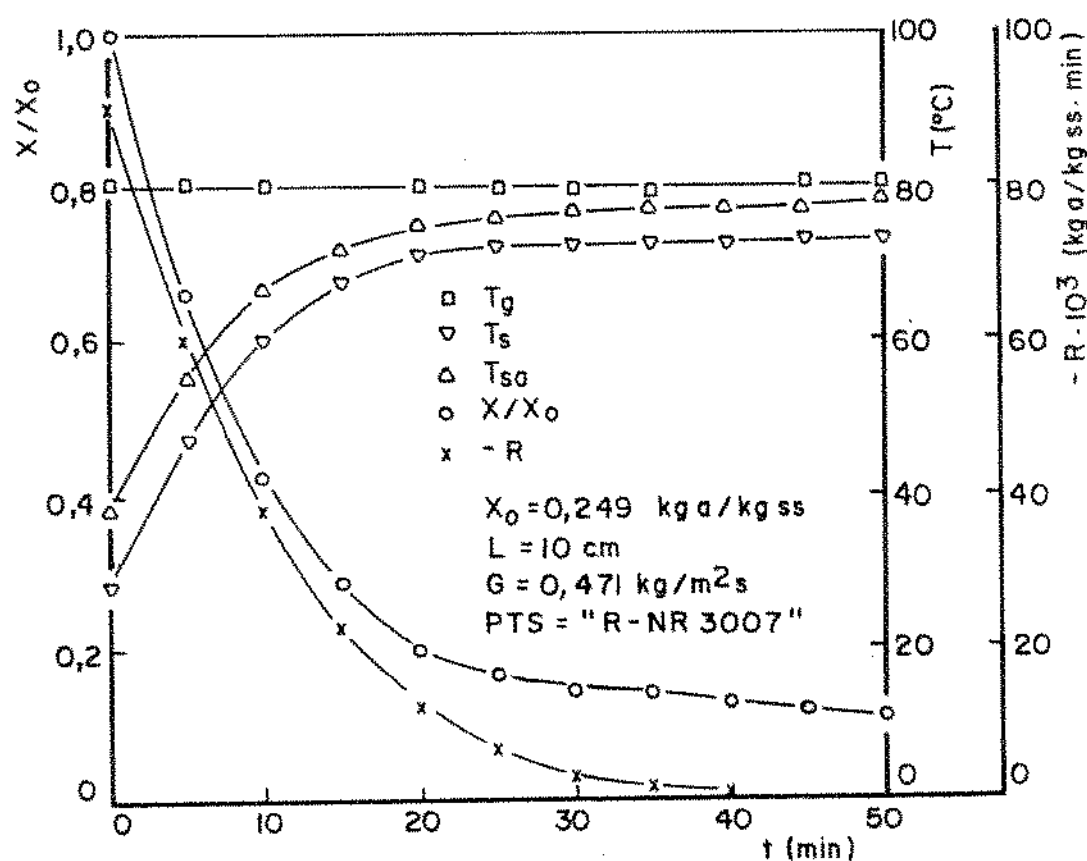


Figura IV.1 Resultado do ensaio de secagem número 2 em leite estático.

Duas diferentes condições de secagem foram feitas em duplicata para observação da repetibilidade dos resultados, como mostra a figura IV.2.

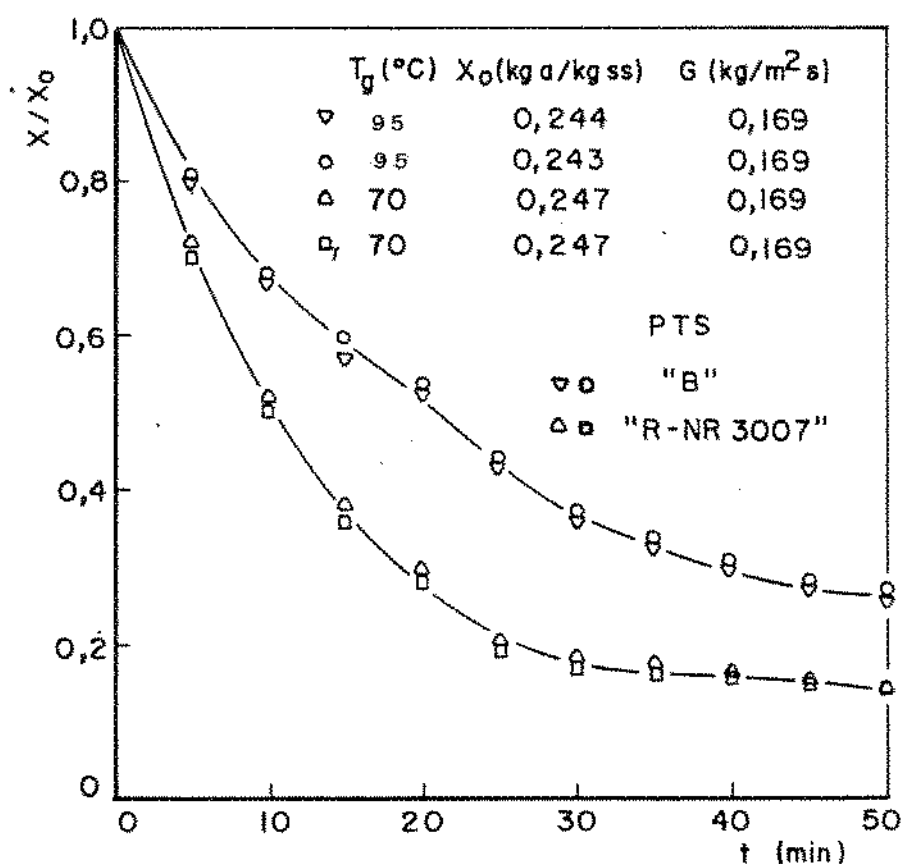


Figura IV.2 Repetitividade dos ensaios em leito estático.

Tanto a vazão como a temperatura do ar nos experimentos foram bem controlados, sendo mantidas praticamente constante ao longo dos experimentos (Figura IV.1). As alturas do leito foram cuidadosamente reproduzidas, resultando em uma repetibilidade aceitável, dentro dos erros da determinação experimental.

Na figura IV.1 pode-se observar que ao começo, quando se apresentam altas taxas de secagem, existe uma grande diferença de temperatura do gás entre a entrada (t_g) e a saída (t_{sa}). Esta

queda é de $42.6 \pm 0.5^\circ\text{C}$ no tempo inicial e se reduz para $8.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ após 15 minutos. Quando se compara a temperatura do sólido (t_s) com a temperatura de entrada do gás notamos uma grande diferença, da ordem de $52.7 \pm 0.5^\circ\text{C}$ no início da secagem, entretanto a diferença entre a temperatura de saída do gás e a temperatura do sólido é de $10.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Pode-se verificar uma importante variação da força motriz da secagem ao longo do leito, reduzindo-se esta diferença à medida que avança a secagem. Após 50 minutos observa-se que, o gradiente na entrada do leito é de $6.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$, e de $4.6 \pm 0.5^\circ\text{C}$ na saída.

A temperatura do sólido aumenta durante os primeiros 20 minutos da secagem, estabilizando-se depois em uma temperatura menor tanto à temperatura de entrada como de saída do gás.

Na figura IV.3 é mostrada a experiência equivalente realizada com a PTS tipo "B". Esta PTS, cujas características encontram-se no item III.1, possui uma densidade e conteúdo de proteína maior.

Pode-se observar que as curvas apresentam algumas diferenças. A secagem transcorre também no período de velocidade decrescente, porém a taxas muito menores. A queda da taxa de secagem com o tempo é muito mais lenta, o que poderia indicar que não temos mudança de mecanismos de transporte, sendo no caso, um controle do tipo difusivo.

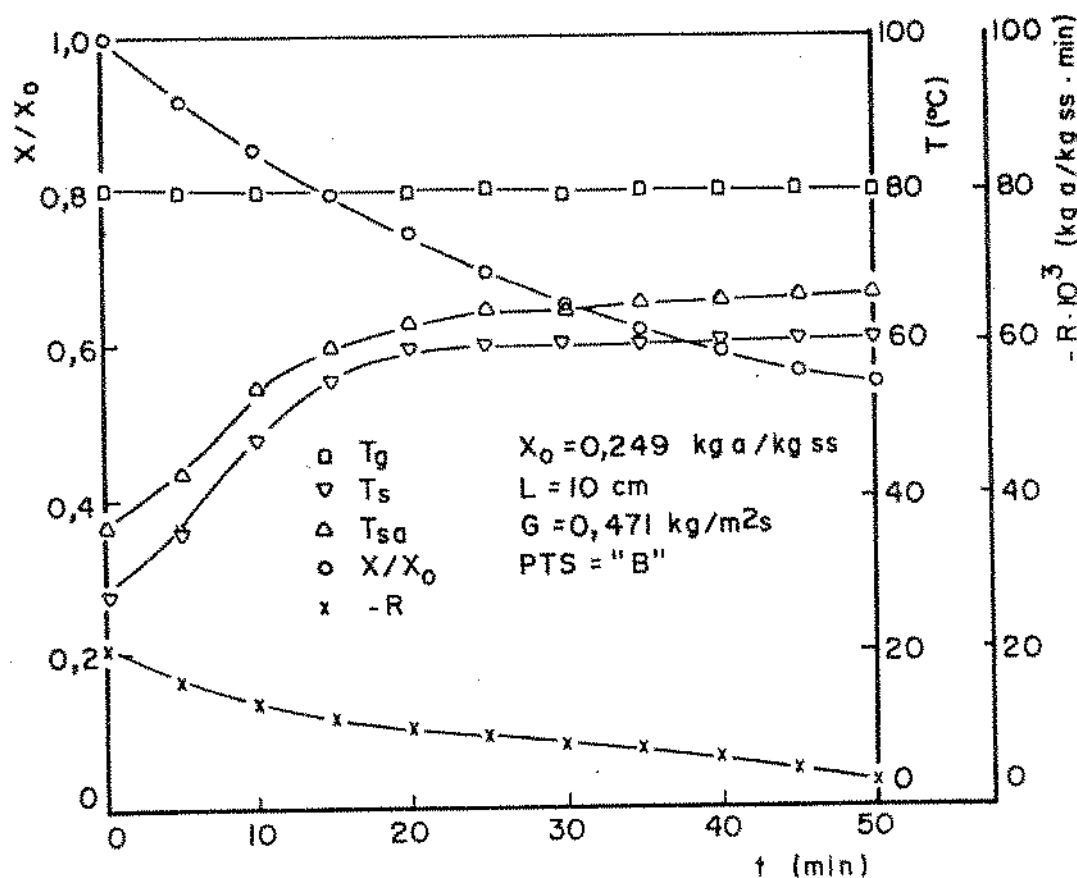


Figura IV.3 Resultado do ensaio de secagem número 11 em leito estático.

IV.1.1 Efeito da vazão de ar na secagem

Na figura IV.4 estão graficados experimentos realizados a iguais temperatura do ar, espessura do leito, diâmetro da partícula e PTS tipo "R-NR 3007", porém em diferentes fluxos mássicos. Pela representação, conclui-se que nas condições deste trabalho, a variação da vazão de ar influencia ligeiramente a secagem. Um aumento de 30% na vazão ocasiona um acréscimo da ordem de 10 a 7% nos primeiros instantes da secagem.

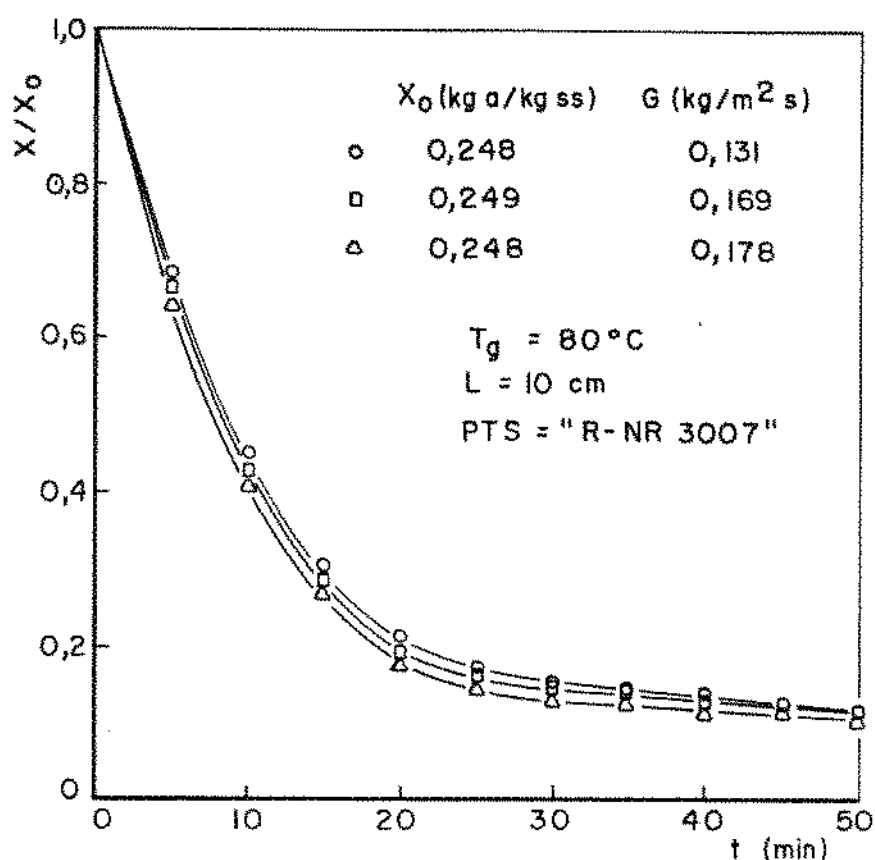


Figura IV.4 Influência da vazão de ar na secagem em leito estático.

Estes efeitos podem ser observados na figura IV.5, onde se grafica a taxa de secagem em função da umidade para as diversas vazões e para os dois tipos de PTS. Para o PTS tipo R-NR 3007 a influência da vazão decresce com a umidade. Isto coincide com o trabalho de Stanish et al (1986) que verificaram a secagem de materiais porosos (madeira) a $75 \pm 2^\circ\text{C}$. Existe uma resistência externa à transferência de calor e uma interna ao transporte de umidade no interior da partícula que simultaneamente determinam a veloci-

dade de secagem. A queda de temperatura é maior na camada limite em redor da partícula que dentro dela, ao mesmo tempo desenvolve-se uma frente de secagem no interior da partícula, onde o transporte mais lento é do vapor de água do interior até a superfície.

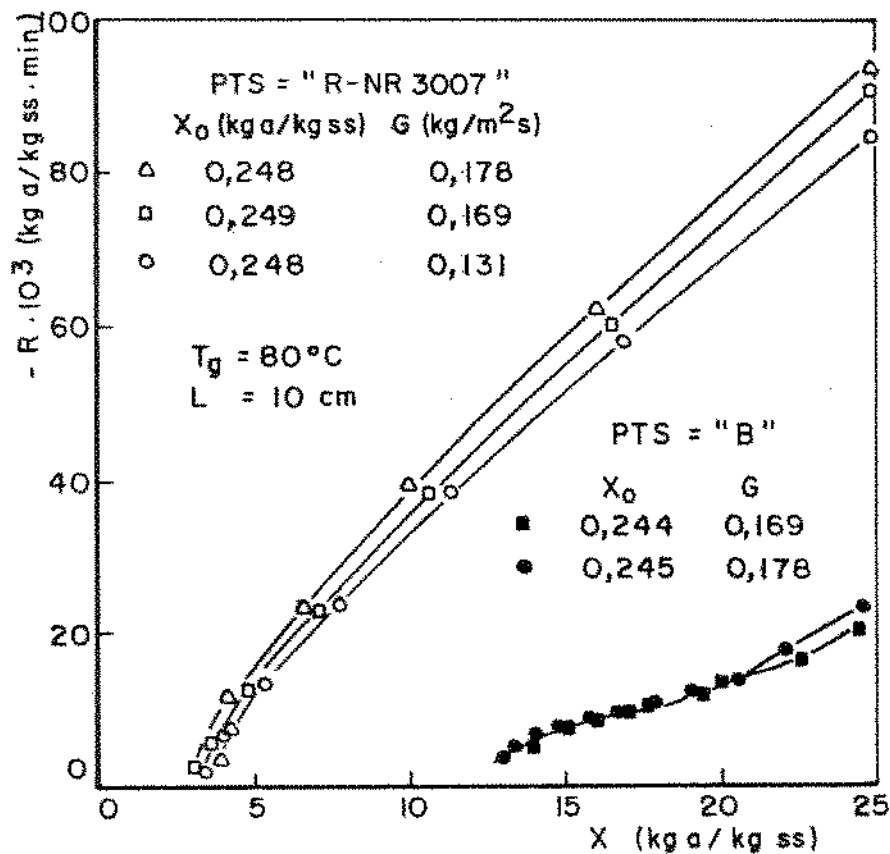


Figura IV.5 Influência da vazão de ar na taxa de secagem

No caso do PTS tipo "B", a influência da vazão é menor, o que poderia indicar que a transferência interna de massa controla o processo.

IV.1.2 Efeito da temperatura do ar na secagem.

Na figura IV.6 encontram-se graficados experimentos realizados com o mesmo fluxo de ar, espessura do leito, diâmetro da partícula e com PTS tipo "R-NR 3007", porém a diferentes temperaturas do ar. Como é esperado, a taxa de secagem aumenta com a temperatura. Este efeito é também observado para a PTS tipo "B".

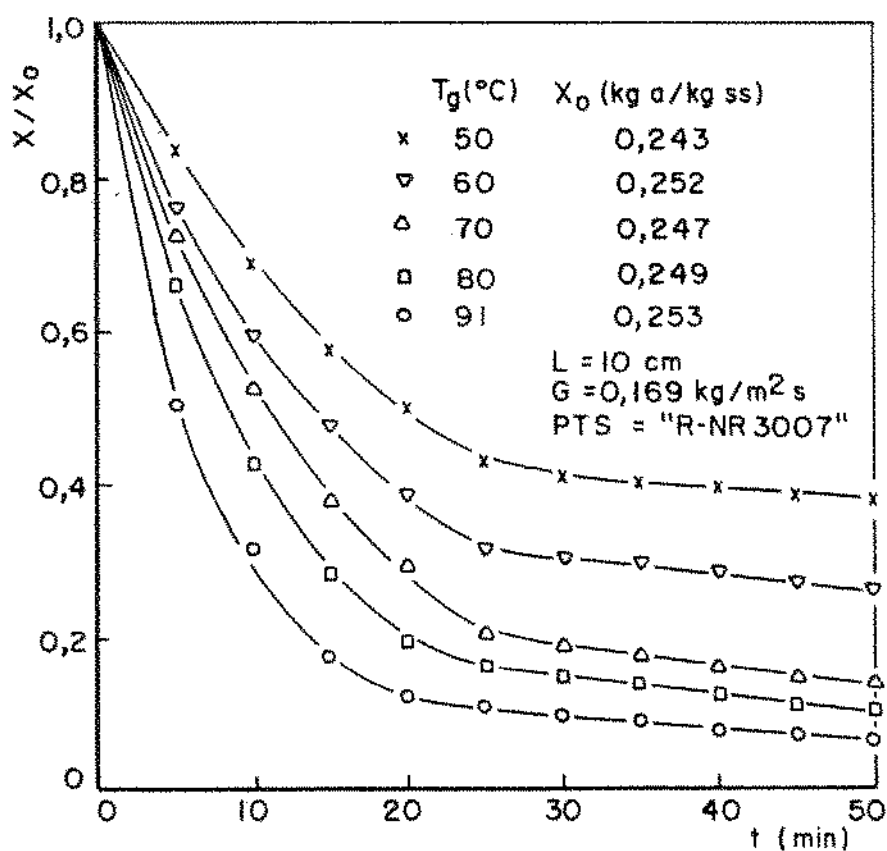


Figura IV.6 Influência da temperatura do ar na secagem.

A figura IV.7 mostra as mesmas curvas dos experimentos da figura IV.6, porém traçadas em escala semi-logarítmica, apresentando na ordenada umidade residual e na abscissa o tempo.

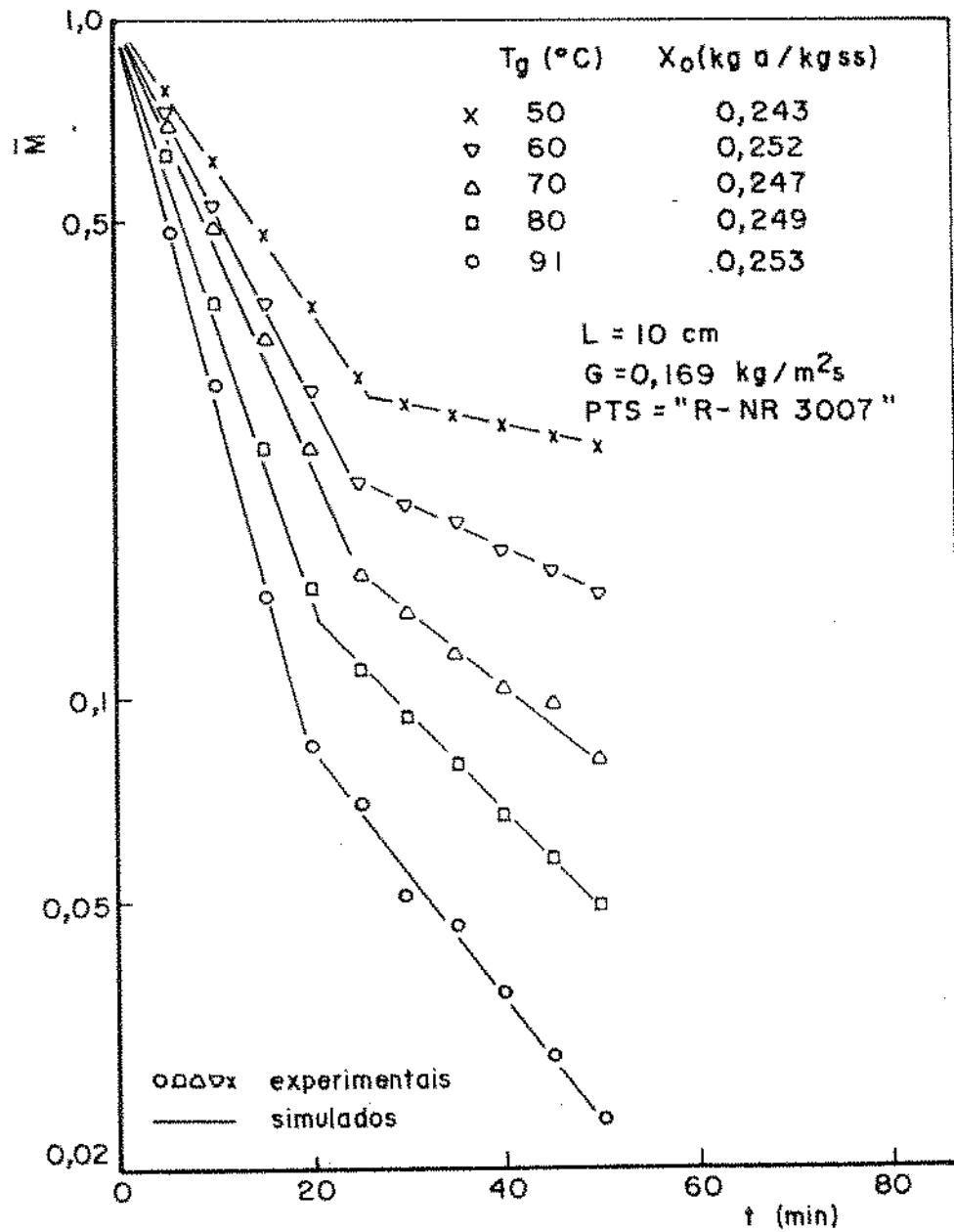


Figura IV.7 Influência da temperatura do ar na secagem de PTS "R-NR 3007" (escala semi-logaritmica).

Na figura IV.8 apresentam-se curvas equivalentes às da figura anterior para o PTS "B", as quais mostram que a alteração da

inclinação de cada curva com a mudança do período de secagem não é tão marcante como no caso anterior.

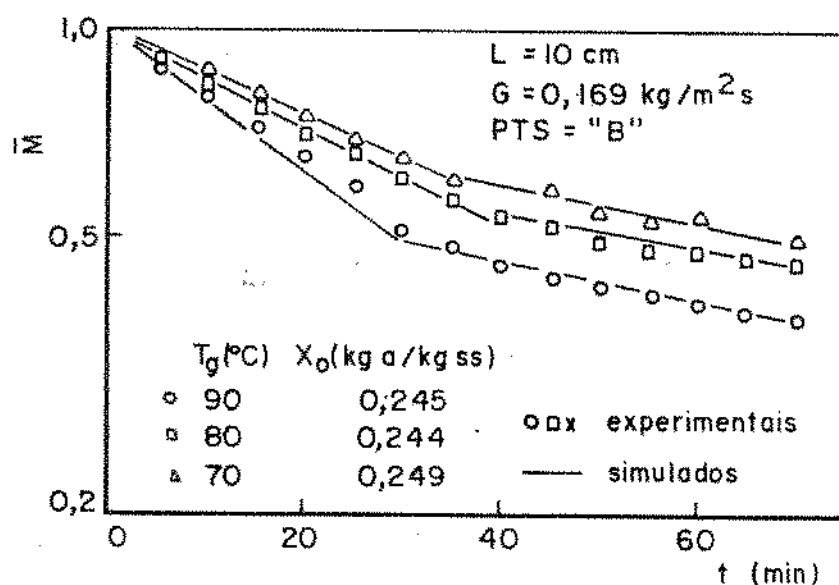


Figura IV.8 Influência da temperatura do ar na secagem de PTS "B" (escala semi-logarítmica).

IV.1.3 Efeito da espessura do leito na secagem.

As curvas da figura IV.9 mostram o efeito da espessura do leito da PTS durante a secagem. A influência da espessura do leito é maior a umidades altas. Podemos observar que as taxas médias de secagem dos leitos de 10 cm são 35% menores que as de 2 cm.

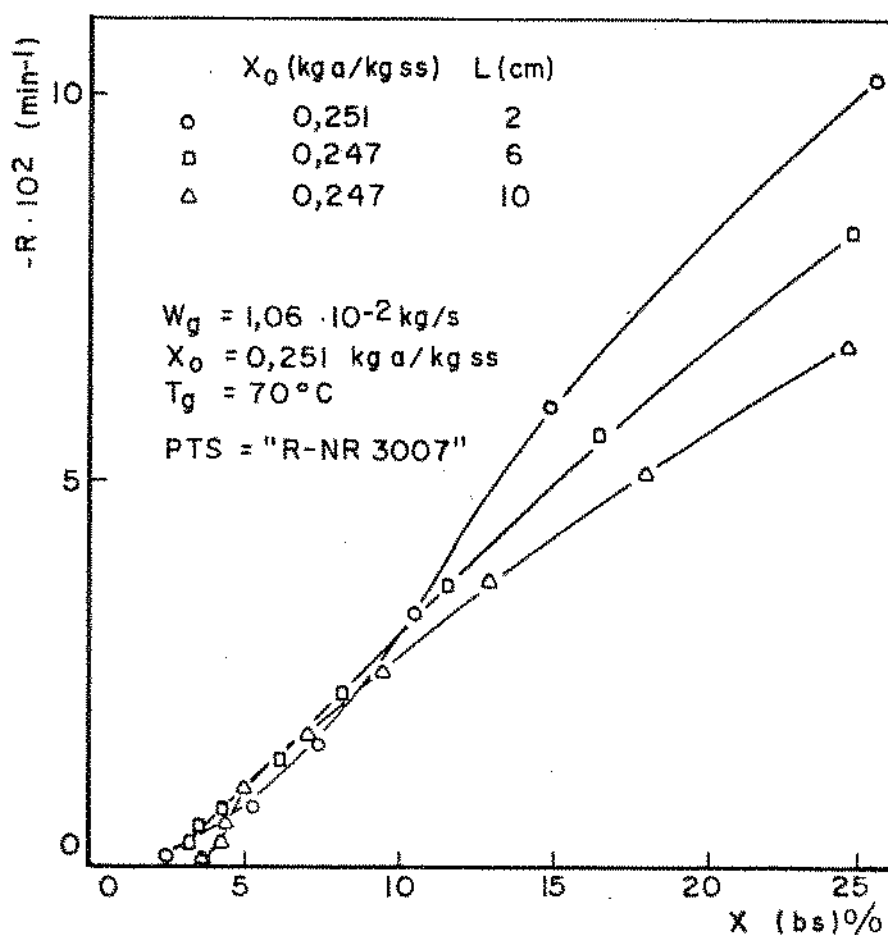


Figura IV.9 Influência da espessura do leito na taxa de secagem em leito estático.

IV.2 Cinética de secagem em leito estático

Como já foi discutido no item IV.1.2, quando graficamos o logaritmo Neperiano de $(X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$ versus o tempo de secagem. Obtém-se duas linhas retas bem definidas.

Simmonds et al (1953), Fonseca (1974), Henderson (1974) e Mazza e Le Maguer (1980), utilizaram representações matemáticas das curvas de secagem empregando uma função logarítmica da umidade do produto ($X - X_{eq}$) em relação ao tempo, sendo que estas curvas apresentaram dois trechos retilíneos. Neste trabalho adota-se a representação matemática desenvolvida por Finzer (1984) para secagem de fatias de cebola em leito vibrofluidizado, mostrada na equação IV.1. Esta equação tem o valor de suas constantes modificado, de acordo com o período de secagem decrescente a que se refere.

$$M = A \exp(-B t) \quad (IV.1)$$

Na tabela IV.1 apresenta-se os valores de A e B obtidos por regressão linear dos dados de cada experimento. Os valores de A para o primeiro período são próximos de um. Os valores de A para o segundo período e B para ambos os períodos expressam a influência da temperatura, espessura do leito e a vazão do gás. O valor de X na tabela, representa o valor limite entre os dois períodos.

Nas figuras IV.7 e IV.8 são apresentadas as curvas de secagem para várias temperaturas, podendo-se comparar os valores experimentais com aqueles simulados através da equação IV.1.

Experimento	1º Período		Limite	2º Período		Condições do experimento			
	A	B		A	B	T (°C)	L (cm)	Wg x 10 ⁻² (Kg/s)	PTS -
1	0.9569	-0.1235	0.0307	0.2117	-0.0440	91.0	10	1.06	"R-NR 3007"
2	1.0159	-0.0967	0.0492	0.2445	-0.0320	80.0	10	1.06	"R-NR 3007"
3	1.0080	-0.0726	0.0730	0.2772	-0.0240	70.0	10	1.06	"R-NR 3007"
4	0.9947	-0.0625	0.0966	0.3145	-0.0160	60.0	10	1.06	"R-NR 3007"
5	0.9879	-0.0734	0.0692	0.2448	-0.0222	70.0	10	1.06	"R-NR 3007"
6	1.0215	-0.0913	0.0530	0.2031	-0.0233	80.0	10	0.82	"R-NR 3007"
7	0.9900	-0.0990	0.0360	0.1066	-0.0139	80.0	10	1.11	"R-NR 3007"
8	1.0060	-0.0485	0.1050	0.3560	-0.0085	50.0	10	1.06	"R-NR 3007"
9	0.9960	-0.0840	0.0420	0.1680	-0.0234	70.0	6	1.06	"R-NR 3007"
10	0.9534	-0.0898	0.0290	0.8844	-0.0880	70.0	2	1.06	"R-NR 3007"
11	0.9847	-0.0159	0.1600	0.6933	-0.0061	80.0	10	1.06	"8"
12	0.9978	-0.0994	0.0360	0.1079	-0.0139	80.0	10	1.06	"R-NR 3007"
13	0.9742	-0.0159	0.1470	0.6501	-0.0054	80.0	10	1.11	"8"
14	0.9941	-0.0212	0.1380	0.5926	-0.0062	90.1	10	1.06	"8"
15	0.9948	-0.0143	0.1540	0.6376	-0.0040	70.0	10	1.06	"8"
16	0.9855	-0.0105	0.1750	0.6644	-0.0019	55.0	10	1.06	"8"
17	0.9933	-0.0157	0.1610	0.7224	-0.0067	80.0	10	1.06	"8"

Tabela IV.1 Valores das constantes A e B da equação IV.1

Nestas figuras observa-se que, no primeiro período de secagem, as curvas apresentam uma diminuição de umidade residual maior que no segundo período. Também pode-se observar que neste período, o produto está aquecendo, enquanto que, ao se atingir o limite no qual se inicia o segundo período, a temperatura do produto se mantém praticamente constante, próximo a do ar de secagem. Isto pode ser visto nas figuras IV.1 e IV.3 e é confirmado pela figura IV.10 que mostra os históricos de temperatura do PTS "R-NR 3007" a várias temperaturas do ar de secagem, onde é assinalado o início do segundo período.

Isto pode sugerir que o aparecimento de dois períodos de secagem estão relacionados com a variação da temperatura do sólido (porém a maneira como foram realizadas as medidas não permitem esclarecer qual a causa e qual a consequência).

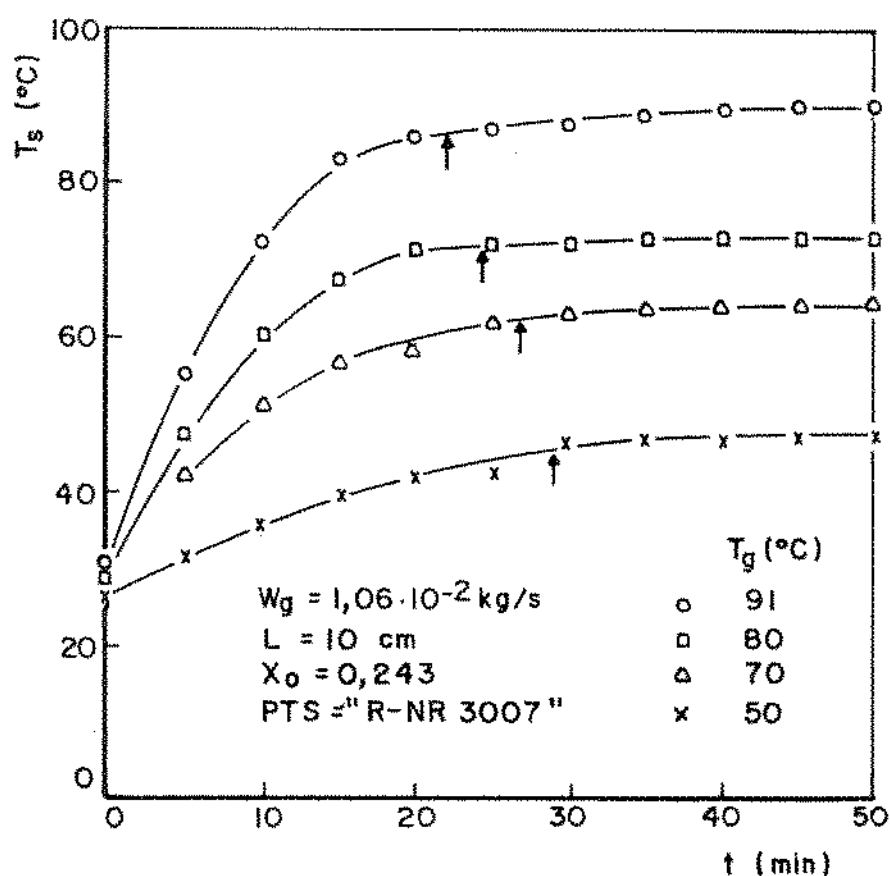


Figura IV.10 Perfís de temperatura do PTS medidos com agulha hipodérmica.

Podemos supor, em ambos períodos, que os gradientes de temperatura dentro da partícula são desprezíveis. Isto foi verificado por Vacarezza et al (1974 a) e Alzamora e Chirife (1980).

Com relação à variação da temperatura média da partícula, uma situação similar a esta foi observada por Vacarezza et al. (1974b) na secagem de fatias de beterraba, porém sem verificar o aparecimento de dois períodos. Os autores constataam que apesar de se verificar um ajuste dos dados de secagem por um modelo de tipo "fickiano", não se obtém na ordenada o intercepto igual a $8/\pi^2$ (placa plana), mas um valor unitário. Este fato se apresenta frequentemente na literatura. Entre os diversos fatores que poderiam explicá-lo encontram-se uma distribuição de concentração inicial na partícula, resistência externa a transferência de massa ou influência da variação da temperatura ao longo da secagem. Vacarezza et al (1974b) verificaram a inexistência de gradientes de temperatura dentro da partícula e uma variação da temperatura com o tempo de secagem com tendências similares à figura IV.10. Resolvendo-se a equação de Fick (eq. II.3), considerando a variação da difusividade com a temperatura, os dados experimentais, se ajustão a uma queda exponencial da umidade residual em função do tempo. É interessante notar que as umidades residuais em função do tempo de secagem, obtidas por simulação com a difusividade calculada à temperatura do gás, também resultam em uma diminuição exponencial da umidade (com diversos valores da constante) e um valor diferente da unidade, na ordenada com a origem.

Considerando a solução da equação de Fick com parâmetros constantes e geometria esférica (eq. II.10), e levando-se em conta apenas o primeiro termo da série, pode-se propor uma equação do tipo (IV.1.a) para correlacionar os dados:

$$M = A \exp \left(-\frac{\pi^2}{r^2} \text{Def } t \right) \quad (\text{IV.1.a})$$

Neste caso a Def calculada para o primeiro período, a partir da constante (eq. IV.1), será uma pseudo difusividade, já que a secagem pode não estar totalmente controlada pela transferência de massa, mas também pela de calor, sendo que, ainda a temperatura da partícula é variável no tempo. No segundo período, o leito pode comportar-se como diferencial, onde a temperatura do gás e do leito são constantes ao longo do mesmo, com isto a equação II.10 teria mais validade teórica. A Def pode ser então considerada como uma difusividade de massa.

Muito autores tem calculado os coeficientes de difusão com esta equação, entre eles Saravacos e Charm (1962), Jason (1965), Del Valle & Nickerson (1968), Holdsworth (1971), Pitkin e Corstusen (1973), Vacarezza et al (1974a), Palumbo et al (1977), Mazza e Le Maguer (1980), Finzer (1984) e muitos outros.

As difusividades efetivas de umidade no interior do PTS, foram calculados em função da temperatura, utilizando os coeficientes angulares das retas obtidas a partir dos dados da tabela IV.1, para o leito de 10 cm de altura de PTS tipo "R-NR 3007" e "B" (tabela IV.2 e IV.3). O raio da partícula de PTS foi calculado segundo item III.1.5.

T(°C)	Difusividade m ² /s	
	1ero. período	2do. período
50	0.33 E -09	0.32 E -10
60	0.42 E -09	0.59 E -10
70	0.61 E -09	0.82 E -10
80	0.82 E -09	1.08 E -10
90	1.04 E -09	1.50 E -10

Tabela IV.2 Difusividade média de unidade de PTS "R-NR 3007" de 7.1 mm de raio em diferentes temperaturas do ar.

T(°C)	Difusividade m ² /s	
	1ero. período	2do. período
55	0.56 E -10	2.59 E -11
70	0.96 E -10	3.54 E -11
80	1.42 E -10	4.08 E -11
90	1.89 E -10	4.13 E -11

Tabela IV.3 Difusividade média de unidade de PTS "S" de 7.0 mm de raio em diferentes temperaturas do ar.

A tabela IV.4 compara as Def obtidas no presente trabalho com outras referências de difusão de unidade em vários materiais alimentícios, reportados por outros autores. Vemos que as difusividades obtidas são da mesma ordem de grandeza das apresentadas, por exemplo, por Finzer para materiais mais úmidos, porém menos porosos e com presença de membranas. Ao contrário, os valores obtidos são menores aos determinados por Sobral em leite fluidizado, isto pode ser devido ao fato de que os valores deste trabalho corresponderem a valores médios no leite.

Material	T °C	Conteúdo Umidade b.s.	De ² 2 M /seg	Referência
Milho	70	0.20	5.61 E-11	A.ESCARDINO (1971)
Feijão Preto	60	0.40-0.41	5.66 E-10	ALVAREÇA & FORTES (1980)
Sorgo	52	0.21-0.06	2.90 E-11	C.SUAREZ & VIOLLAZ (1980)
Arroz	70	0.14-0.22	9.80 E-11	R. AGUERRE et al (1982)
Arroz parbolizado	70	0.50-0.70	7.46 E-11	PRABIR & CHANDRA (1984)
Cebolas 1er.período	70	7.13	11.90 E-10	FINZER (1984)*
Cebolas 2do.período	70		3.53 E-10	FINZER (1984)*
PTS-Sangue	60	0.40	1.50 E-09	SOBRAL (1987)#
PTS 1er.período	** 80	0.25-0.049	8.20 E-10	este trabalho
PTS 2do.período	80	0.049-0.02	1.08 E-10	este trabalho

Tabela IV.4 Difusividades efetivas de diversos alimentos

* Leito vibro fluidizado

** PTS "R-NR 3007"

Leito fluidizado

A dependência funcional do coeficiente de difusão em sólidos com a temperatura é comumente expressa por uma equação do tipo Arrhenius:

$$De = D_0 \exp(-E/RT) \quad (IV.3)$$

Onde D_0 é uma constante, R a constante dos gases (1.987 cal/g-mol K) e E a energia de ativação em cal/g-mol.

A validade da equação pode ser verificada, graficando o logaritmo Neperiano (De) em função do inverso da temperatura absoluta, a partir dos dados da tabela IV.2 e IV.3. Os pontos resultam em linhas retas para o primeiro e segundo períodos (figura IV.11).

Fazendo-se a regressão linear por mínimos quadrados, chegamos às seguintes equações para o primeiro e segundo períodos, com as quais podemos obter os valores das energias de ativação, como é mostrado abaixo:

PTS "R-NR 3007"

1º período

$$\text{Def} = 3.2 \text{ E-06 EXP } (-2964.8/T) \quad (\text{IV.4})$$

$$r^2 = 0.994$$

$$E_a = 5.89 \text{ Kcal/g-mol}$$

2º período

$$\text{Def} = 3.4 \text{ E-06 EXP } (-3694.4/T) \quad (\text{IV.5})$$

$$r^2 = 0.920$$

$$E_a = 7.34 \text{ Kcal/g-mol}$$

PTS "B"

1º período

$$\text{Def} = 2.6 \text{ E-06 EXP } (-3520.4/T) \quad (\text{IV.6})$$

$$r^2 = 0.997$$

$$E_a = 6.99 \text{ Kcal/g-mol}$$

2º período

$$\text{Def} = 1.8 \text{ E-09 EXP } (-1379/T) \quad (\text{IV.7})$$

$$r^2 = 0.905$$

$$E_a = 2.70 \text{ Kcal/g-mol}$$

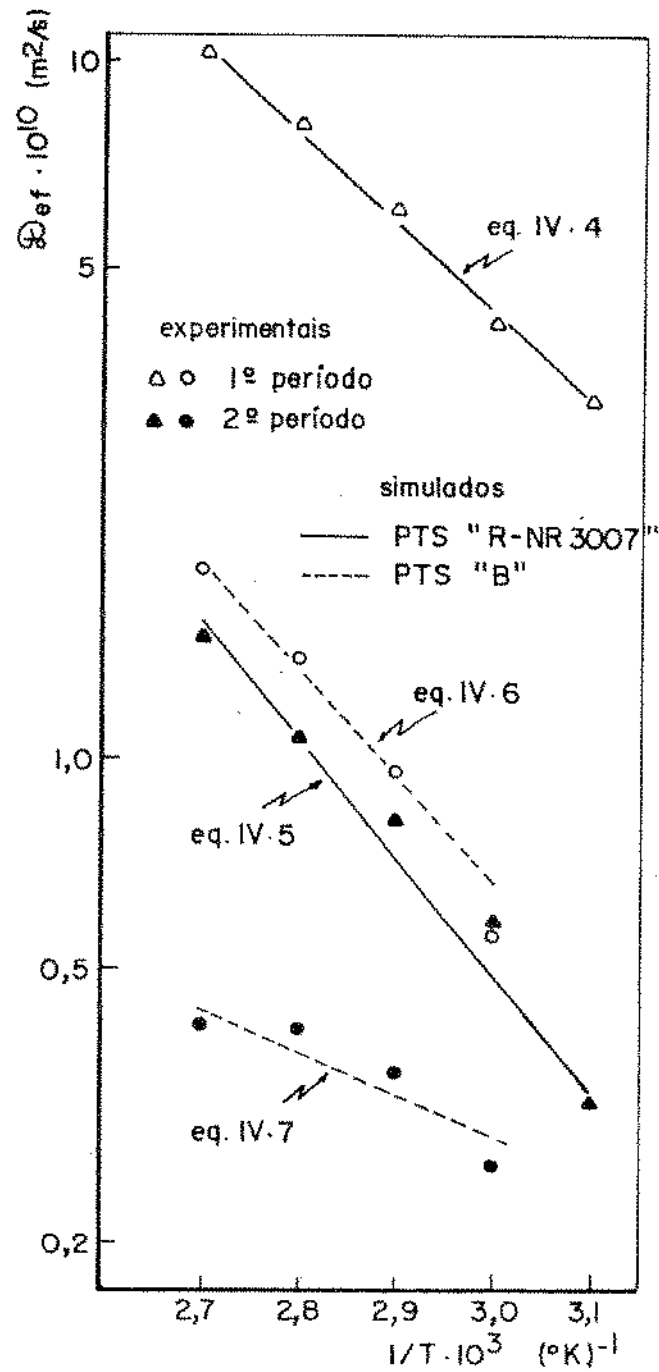


Figura IV.11 Energia de ativação de ambos PTS nos dois períodos.

J.R.Hansen (1978) constatou 2 períodos de secagem decrescente para concentrados de soja e encontrou uma energia de ativação de 10.6 para o primeiro período e 6.4 Kcal/g-mol para o se-

gundo, resultados com pequena diferença dos obtidos no presente trabalho. O mesmo Hansen demonstrou que a E_a é função do conteúdo de umidade, no caso de seu trabalho para um concentrado proteico e um isolado proteico ACP-950.

A divergência de E_a entre o trabalho de Hansen com este é devido, provavelmente, às diferentes condições de processamento dos respectivos concentrados proteicos. Na figura IV.11 podemos observar claramente que a energia de ativação para o PTS "R-NR 3007", necessária para desencadear o processo de secagem é menor que para o PTS "B".

No segundo período a energia de ativação é maior que no primeiro período para a PTS tipo R-NR 3007" e se encontra em comportamento inverso à PTS tipo B. Retificando uma mudança de mecanismos de transferência e de interação da água com um PTS de diferente composição e estrutura porosa.

CAPÍTULO V

Secagem de PTS em leito deslizante

V.1 Distribuição de tempo de residência (DTR)

A seguir mostramos experiências preliminares de DTR realizadas antes de iniciar os ensaios de secagem, que nos permitiram introduzir modificações no equipamento para conseguir uma distribuição mais próxima ao escoamento tipo pistão.

Na figura V.1 apresenta-se a curva de DTR obtida numa das experiências prévias, a qual permite supor, em analogia com os diagnósticos para escoamento em reatores (Levenspiel, 1981) que teríamos um escoamento com recirculação interna.

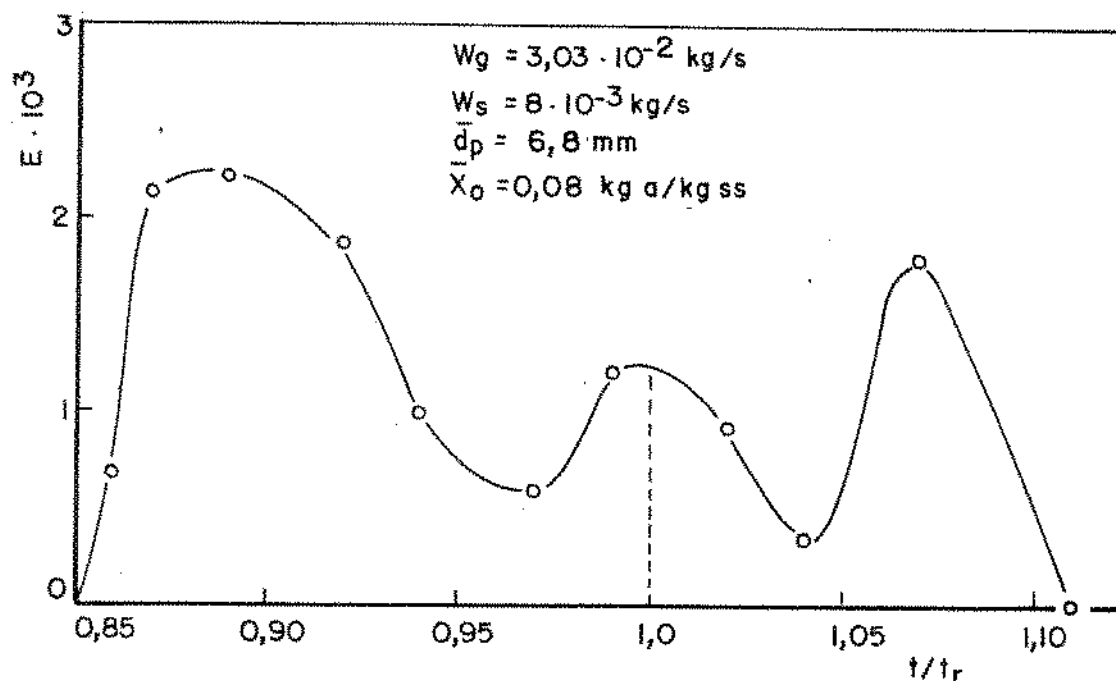


Figura V.1 Escoamento com recirculação interna.

Uma das outras situações obtidas nestas primeiras experiências apresenta-se na figura V.2 a qual mostra-nos o aparecimento prematuro do traçador (sólidos marcados). Isto pode ser explicado devido a uma canalização do escoamento, em consequência da geometria da saída da válvula rotativa.

Verificou-se que estes problemas eram produzidos por: ligeiras inclinações no secador, geometria da saída do sólido (válvula rotativa) e alimentação de sólido, a qual não se distribui uniformemente na seção superior do equipamento. Estas perturbações são explicadas a seguir:

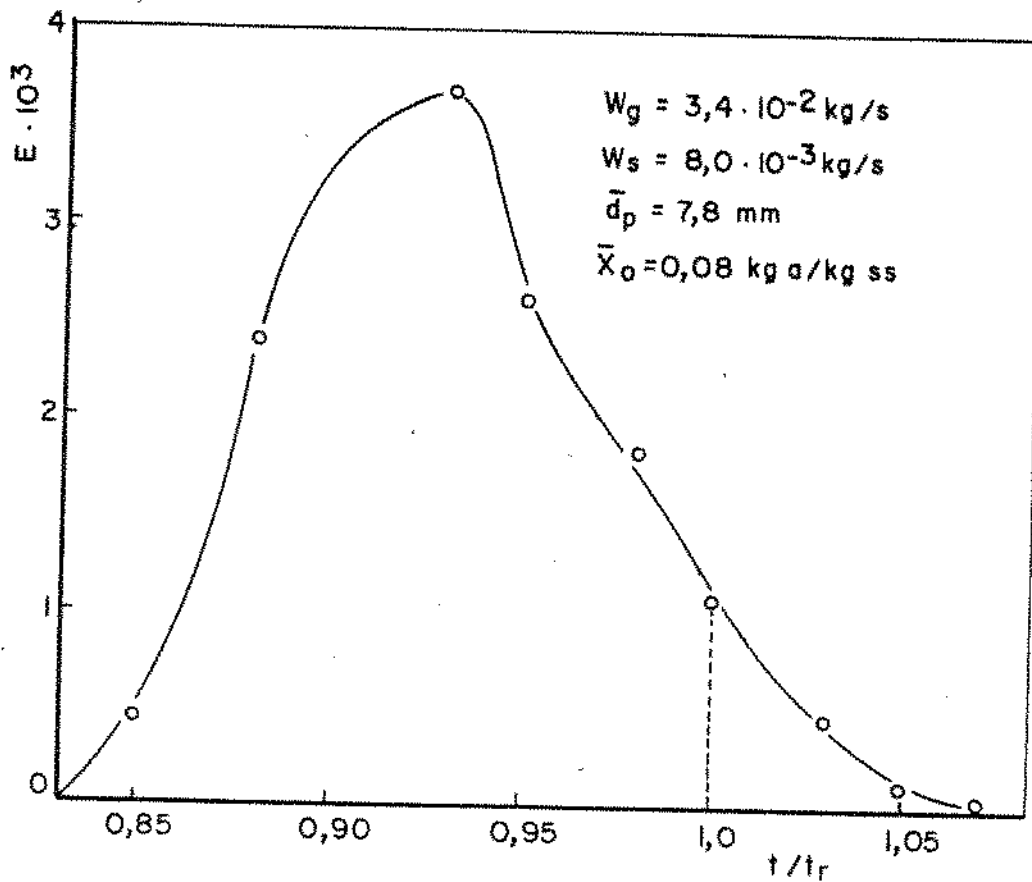


Figura V.2 Escoamento com porção antecipada.

a) Um leve afastamento da verticalidade do secador provocava caminhos preferenciais para os sólidos.

b) A saída do sólido para a válvula rotatória era uma fenda retangular. Pequenas irregularidades na geometria da fenda como falta de nivelamento e na forma retangular da mesma provocavam caminhos preferenciais para o sólido. Um ajuste imperfeito da válvula de controle da fenda, formava um ressalto que provocava uma estagnação do sólido.

c) Comprovou-se que o lugar onde o sólido era descarregado na parte superior exercia alguma influência, obtendo-se melhores resultados quando o sólido era alimentado no centro.

O equipamento foi modificado com base nestes resultados. A seguir apresentamos a curva F de uma das experiências finais, a qual mostra um escoamento empistonado com dispersão axial superposta. A parte sombreada à direita de $t=\bar{t}$ deve ser igual à parte em branco da esquerda (Hill, 1977), o que foi aproximadamente válido para esta experiência.

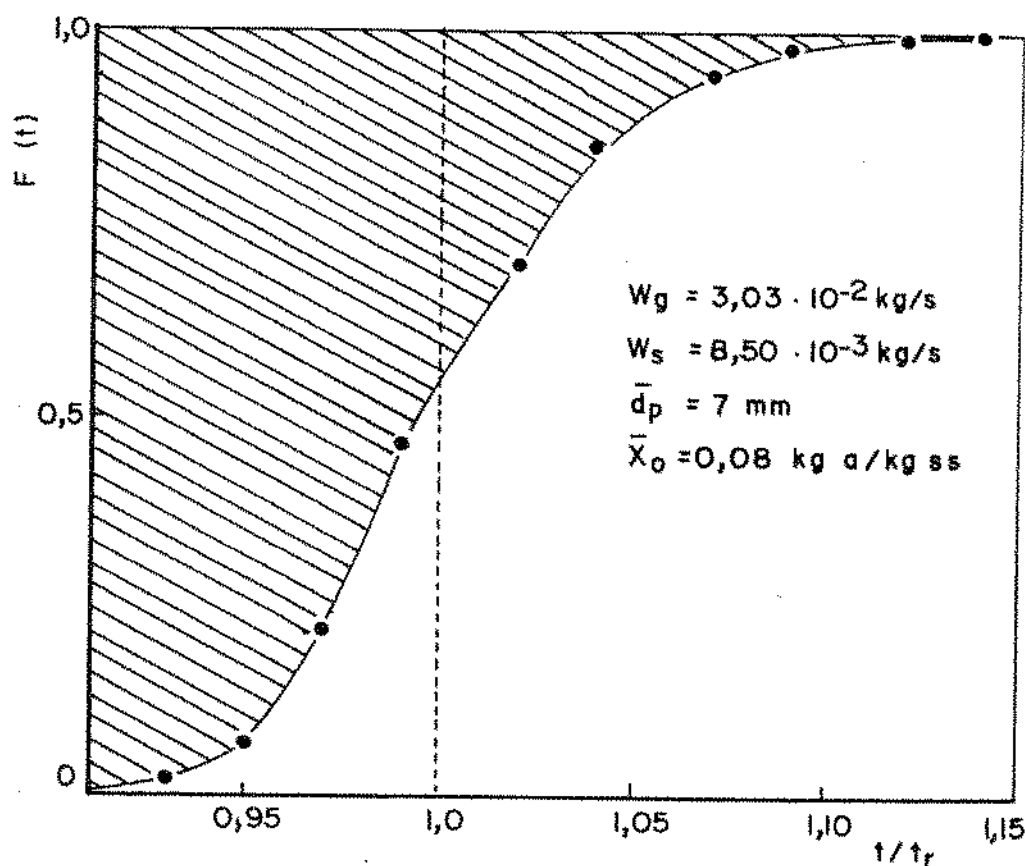


Figura V.3 Resposta do escoamento sólido ao estímulo em degrau

Derivando-se a curva F obtem-se a curva E , que fornece uma melhor compreensão da distribuição de tempos de residência no secador.

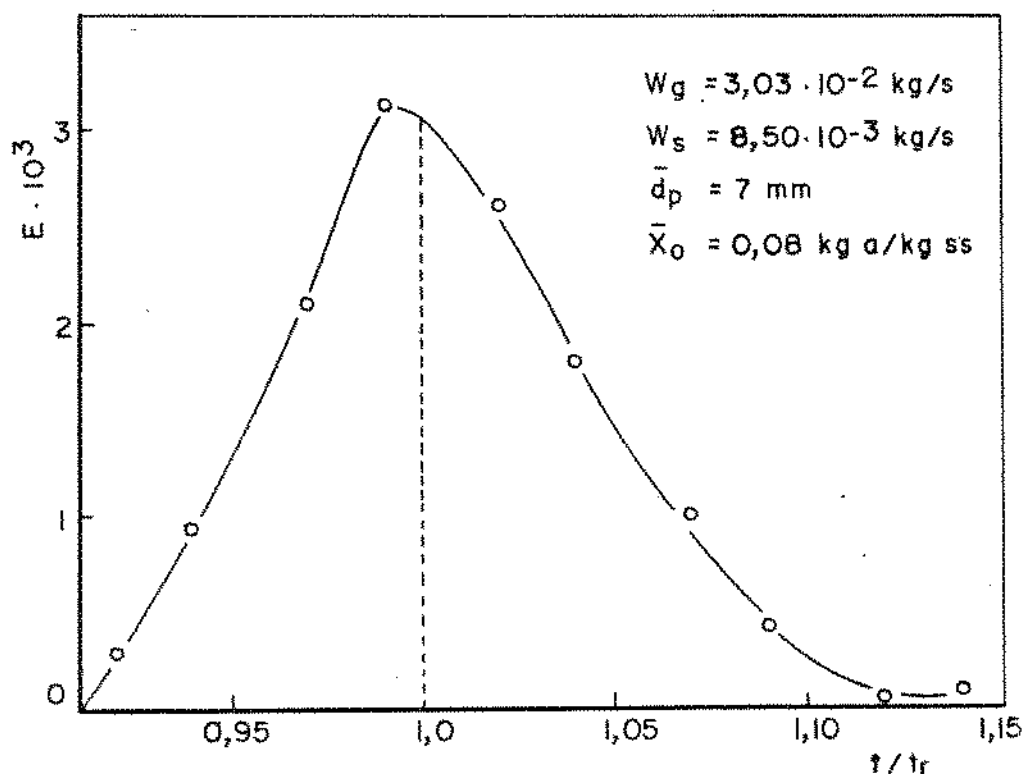


Figura V.4 Curva "E" com dispersão intermediária.

Qualquer modelo que tente simplesmente calcular a perda de umidade sem considerar a DTR, suporá, que todos os sólidos, tanto os que se movem lentamente quanto os que se movem rapidamente, gastam a mesma fração de tempo dentro do secador. Isto pode ser uma afirmação grosseira na prática.

V.2 Análise dos resultados

Foram feitos ensaios para o estudo da cinética de secagem contínua com a finalidade de avaliar a influência de alguns parâmetros, cujos resultados encontram-se no apêndice D (tabelas 18 a 38).

Observaram-se efeitos da temperatura na faixa de 55 a 90 °C, efeitos do fluxo de ar na faixa de 1.8 a 0.9 kg/s m², efeito da vazão mássica de sólido na faixa de 2.8 a 14.4 kg/hr, efeitos do diâmetro das partículas entre 4.2 e 9.9 mm e efeitos da estrutura interna das partículas em dois tipos de PTS: "R-NR 3007" e "B". As umidades iniciais utilizadas estão na faixa de 0.19 a 0.27 b.s.

Os efeitos dos parâmetros do processo da secagem são descritos a seguir. Na figura V.5 encontra-se graficado um experimento padrão (Nº 21) com todas as medidas experimentais levantadas em função da posição Z, medida no sentido do avanço do sólido: X, umidade do sólido, Tg, temperatura do gás, Tse, temperatura do sólido experimental, Tsc, temperatura do sólido calculada, Nva, taxa de secagem volumétrica, Y, umidade do gás, para a PTS "B". Todos os experimentos, juntamente com as condições sob as quais foram realizadas, encontram-se no apêndice D (tabelas 18 a 38).

Analisando a figura V.5 para PTS tipo "B", observamos que as experiências em leito deslizante apresentam as mesmas tendências mostradas pelas experiências feitas em leito estático. A secagem se processa no período de taxa decrescente. Observamos uma queda nas taxas de secagem mais atenuada que no leito estático e um lento aquecimento das partículas sólidas ao longo do secador. Nesta experiência observamos que $\Delta T_s / \Delta Z$ é próxima a uma constante. Observou-se que este comportamento não foi comum a todas as experiências.

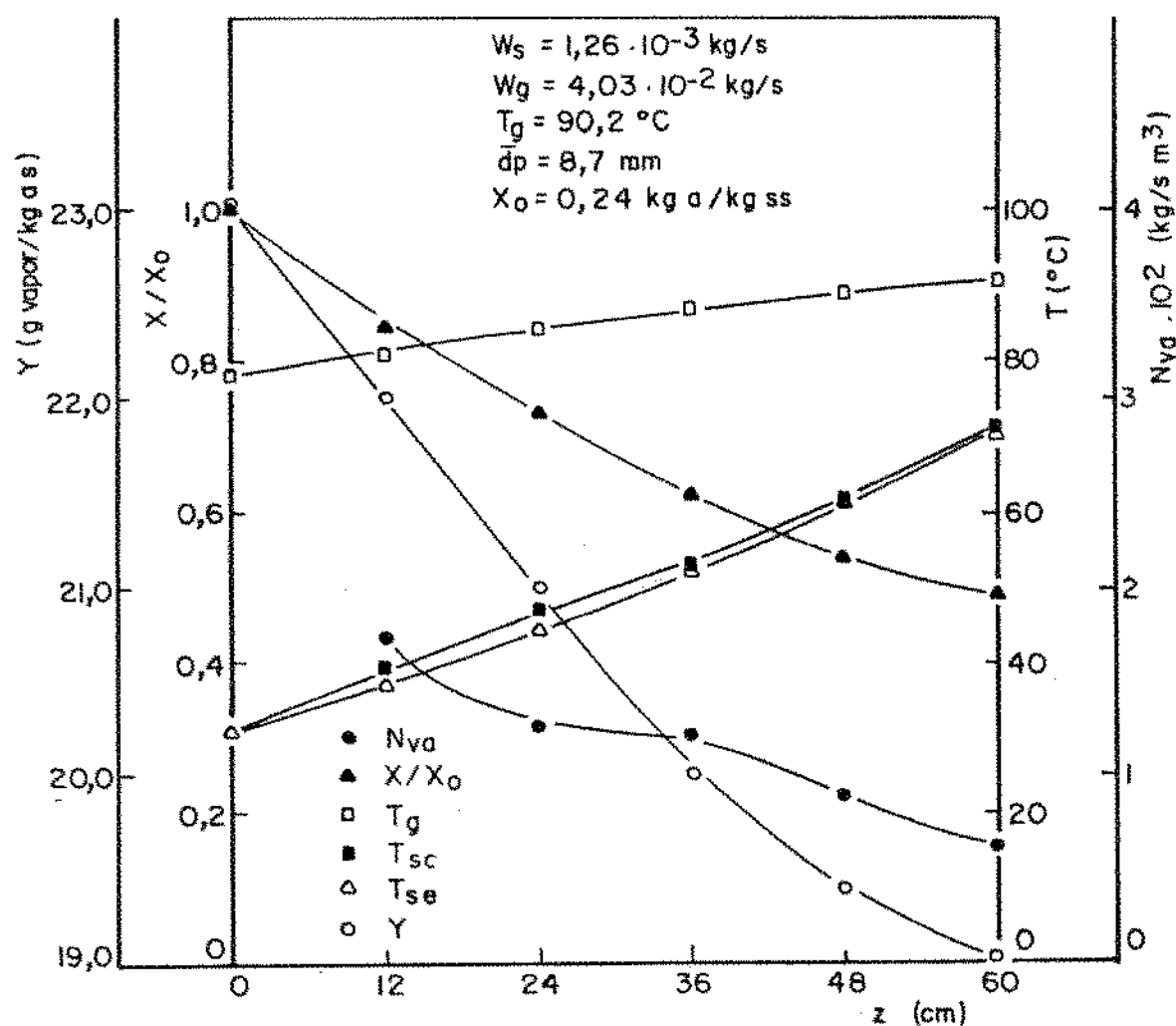


Figura V.5 Resultado do ensaio de secagem número 21.
para o secador em leito deslizante.

Da mesma maneira que para o leito estático, foram testados duas condições experimentais, em duplicata para observação da repetibilidade dos resultados (fig. V.6)

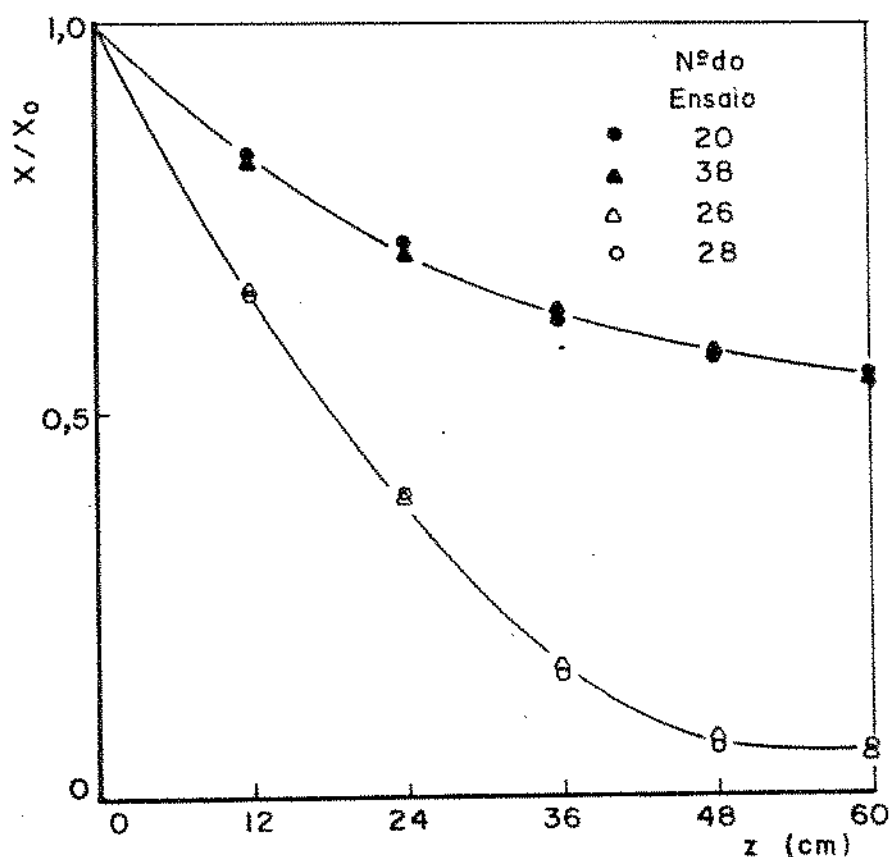


Figura V.6 Repetibilidade dos ensaios em leito deslizante

Na figura V.7 é mostrada a experiência equivalente, realizada com a PTS tipo "R-NR 3007". O comportamento observado nas curvas de secagem para o leito deslizante foi análogo ao comportamento observado na secagem em leito estático (item IV.1). Sua taxa de secagem diminui mais rapidamente que a da PTS "B", e para uma mesma unidade, a temperatura do sólido é menor, e também fica mais próxima à temperatura do gás.

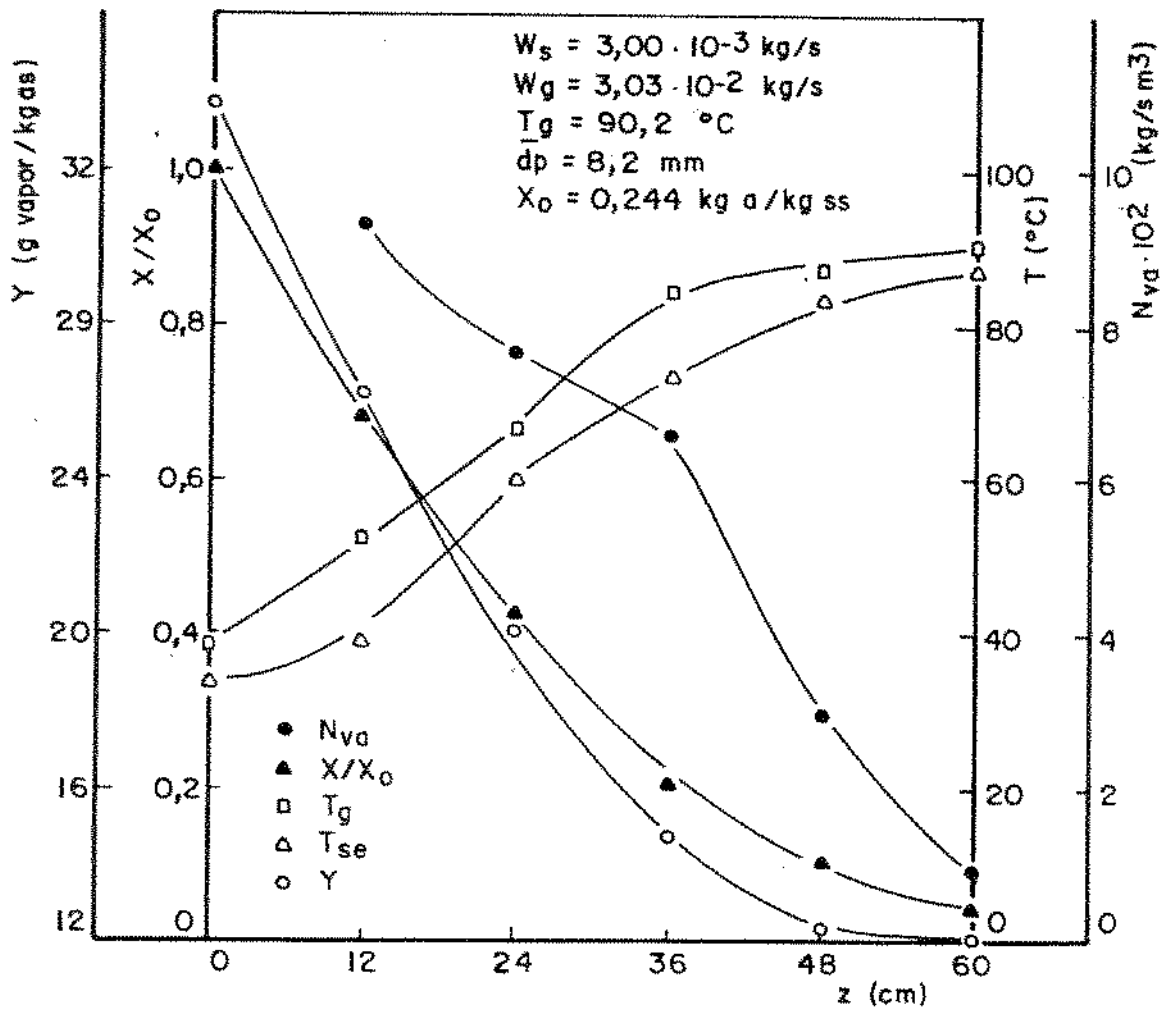


Figura V.7 Resultado do ensaio de secagem número 35 em leito deslizante.

V.2.1 Efeito da vazão de ar na secagem

Na figura seguinte estão representadas as experiências 30, 33 e 34 realizadas nas mesmas condições de temperatura do gás, vazão de sólidos, tamanho do sólido e PTS tipo R-NR 3007", porém a diferentes fluxos mássicos de gás.

A velocidade de secagem aumenta lentamente com a elevação da vazão do gás, na mesma proporção àquela obtida no leito estático.

A influência da vazão na taxa de secagem para a PTS tipo "B" é menor que para o PTS "R-NR 3007", da ordem de um 90% (ensaio 20 e 30).

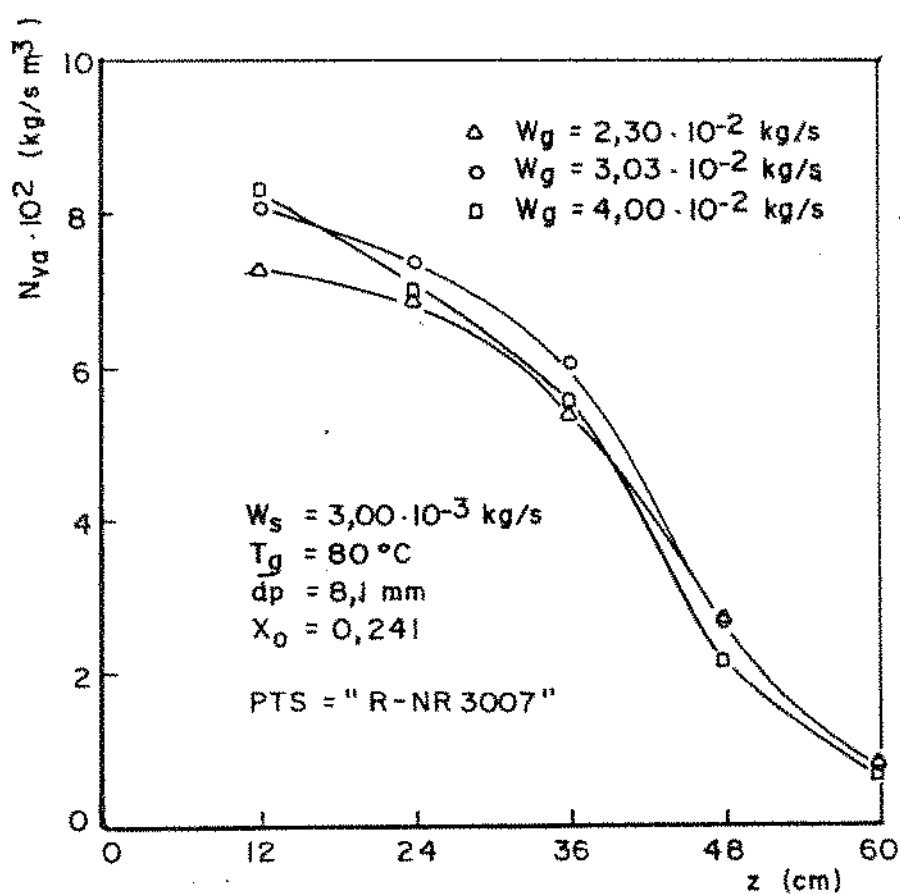


Figura V.8 Influência da vazão de ar na taxa de secagem em leito deslizante.

V.2.2 Efeito da temperatura na secagem em leito deslizante.

Na figura (V.9) apresentam-se as curvas de secagem dos experimentos realizados com os mesmos fluxos mássicos de gás e de sólido, mesmo tamanho das partículas, PTS tipo R-NR 3007, porém a temperaturas diferentes.

Vemos, claramente, que a temperatura é um dos parâmetros que mais influenciou a secagem, não só pelo maior potencial para as transferências, mas também pelo aumento do coeficiente de transferência de calor, e ser um efeito sobre a difusividade aparente.

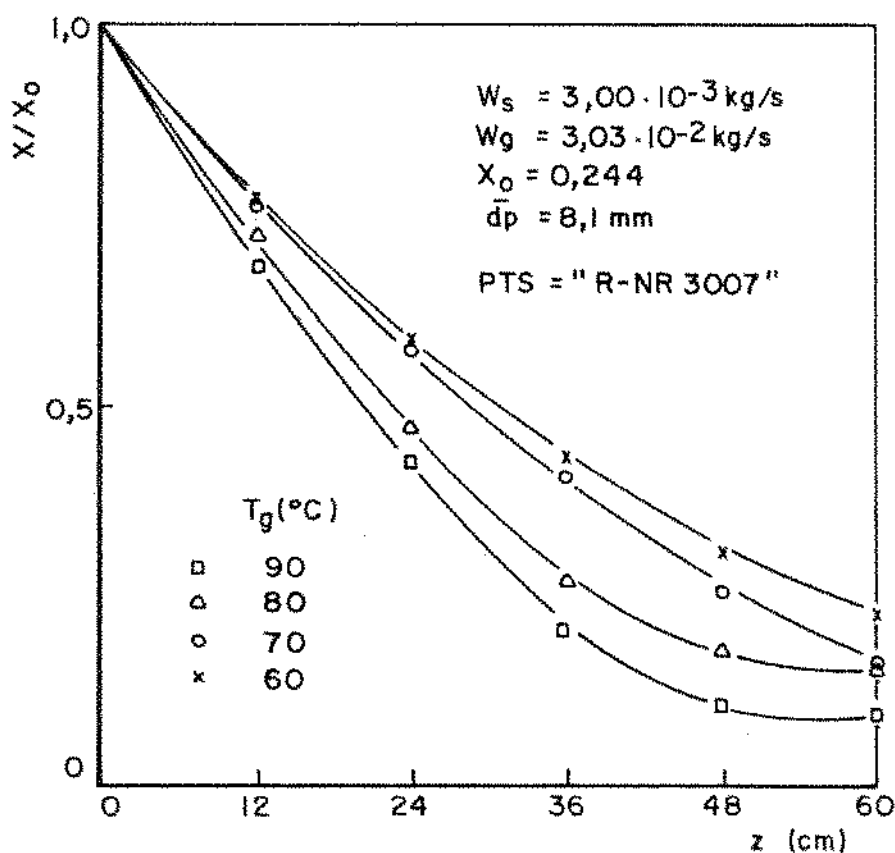


Figura V.9 Influência da temperatura na secagem ao longo do secador.

V.2.3 Efeito da vazão de sólidos na secagem.

A queda de umidade ao longo do secador pode ser representada substituindo a coordenada, espacial Z , direção do avanço do sólido, pelo tempo de residência médio (t_r), supondo escoamento tipo pistão. A coordenada t_r pode ser calculada através de Z como:

$$t_r = \frac{\rho_r (1 - \epsilon) S Z}{W_s \times 60} \quad (V.1)$$

onde: t_r - tempo de residência (min) ;

ρ_r - densidade real do sólido (kg/m^3);

S - área de seção transversal do leito (m^2);

Z - coordenada espacial na direção do avanço do sólido (m);

W_s - vazão de sólidos (kg/s).

ϵ - Porosidade do sólido

Nas figuras seguintes apresentam-se as curvas de secagem das experiências 18, 25, e 26, realizadas com o mesmo fluxo mássico de gás, mesmas temperaturas do gás, mesmo tamanho da partícula e a diferentes vazões de sólidos (tempos de residência da partícula) para a PTS tipo "B". A figura mostra o efeito esperado do decréscimo de umidade final com o aumento do tempo de residência médio. Podemos também observar que existe uma separação máxima de 8% entre as curvas de X/X_o vs. t_r , permitindo afirmar que a geometria do sistema e a distribuição de tempo de residência que

esta provoca não afeta, dentro deste erro, a estimativa da secagem da PTS tipo "B", e pode-se utilizar um gráfico do tipo da figura V.10, para calcular a umidade final em função do tempo de residência. A evolução da temperatura do sólido ao longo do secador apresenta a característica pouco esperada de, aparentemente, não depender estreitamente da umidade e do tempo de residência, mas da posição no secador (Z), consequência talvez da queda de temperatura do gás (t_g) a qual se mantém constante para as diversas experiências de 90 até 78 $^{\circ}\text{C}$, independente do tempo de residência final do sólido.

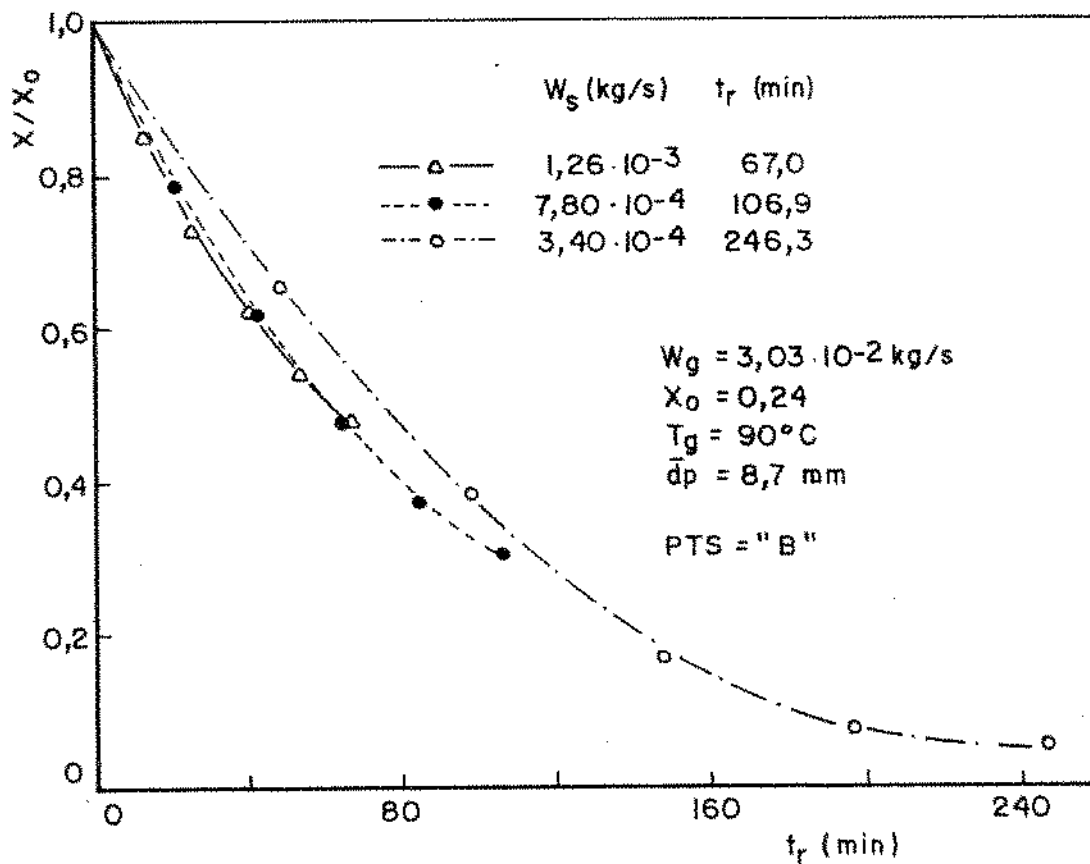


Figura V.10 Perda de umidade do sólido ao longo do secador de leito deslizante influenciado pelo tempo de residência da partícula.

V.3 Comparação do comportamento da secagem em leito estático com leito deslizante em função das mesmas variáveis.

Os ensaios realizados na unidade piloto esquematizada na figura III.2 tinham como objetivo verificar o bom funcionamento do sistema de secagem contínuo em leito deslizante em fluxos contracorrentes, bem como obter critérios para o projeto do mesmo. Uma comparação com a secagem realizada em leito estático nos permite avaliar a possibilidade do uso da cinética obtida no capítulo IV, para o projeto de leito deslizante.

Na figura V.11 mostram-se o ensaio em leito deslizante e o ensaio 14 em leito estático, para a PTS tipo "B" realizados em condições similares, porém a vazões de gás diferentes. O leito deslizante permite trabalhar numa faixa maior de vazões nas quais, no estático o leito apresenta as características do início do fenômeno de fluidização.

Podemos observar uma diferença máxima de 30 % para as umidades obtidas nos dois casos para um dado tempo. Existem diferenças qualitativas nos perfis obtidos. A queda da umidade para o leito deslizante é muito mais suave que para o estático, isto é, basicamente produzido pela natureza contracorrente do secador. A queda de temperatura do gás em cada setor do secador deslizante é muito menor que no de bandeja. Além disso, as temperaturas mais altas do gás e sólido conjuntamente com as umidades do gás (Y) mais baixas, ocorrem a umidades do sólido mais baixas. O inverso

se verifica na entrada do sólido, resultando taxas mais constantes. Outro resultado a enfatizar é que o aumento de temperatura do sólido ao longo do secador é menor, em função do t_r , que para o estático, resultando um grande gradiente de temperatura entre o sólido e o gás.

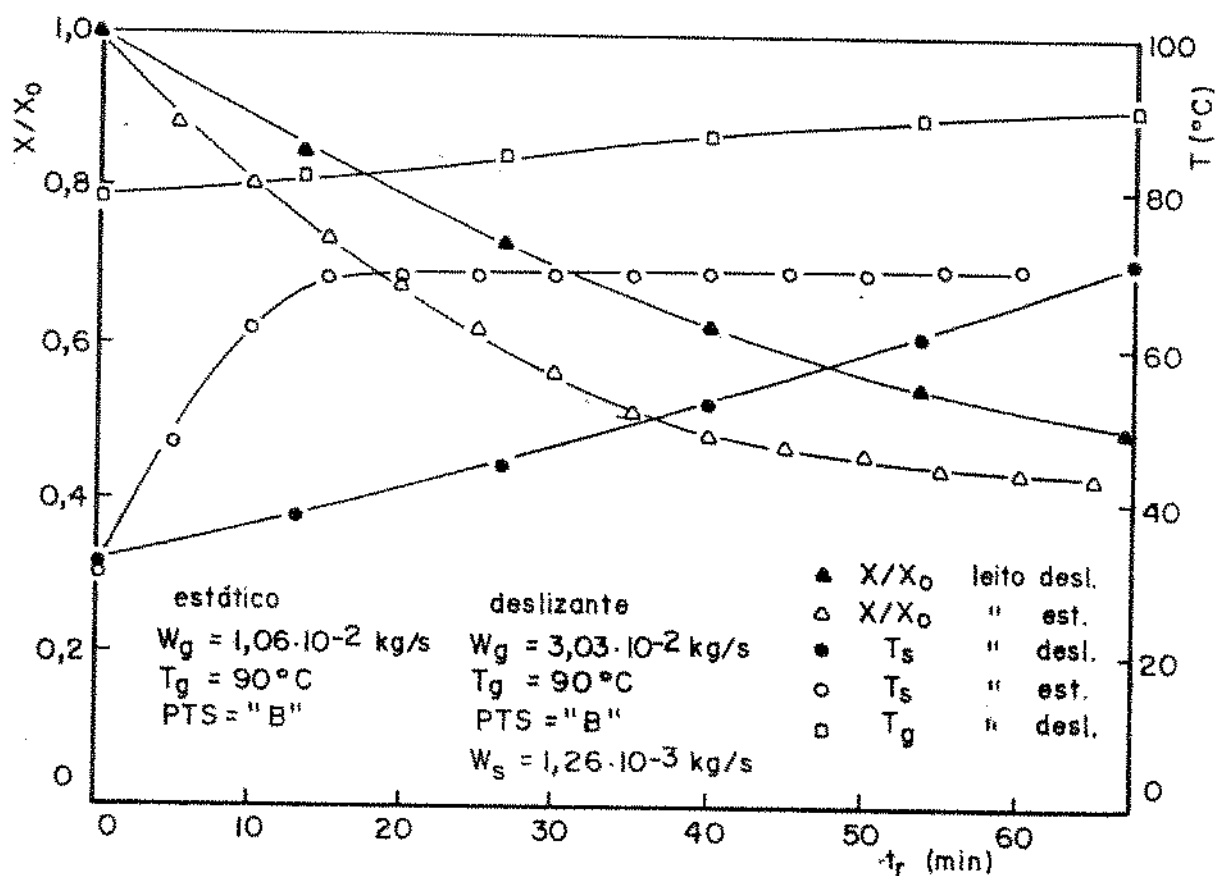


Figura V.11 Comparação de ensaio de secagem em PTS "B" para ambos os secadores deslizante e estático.

Uma comparação equivalente pode realizar-se para a PTS tipo "R-NR 3007", menos densa que a B (figura V.12), neste caso as umidades obtidas no deslizante e no de bandeja apresentam uma di-

ferença máxima de 12% nas unidades finais de interesse (6% b.s). Porém nas curvas de queda de umidade com o tempo existe um cruzamento. A umidades mais altas, o contínuo é menos eficiente que o estático, como era esperado, já que a temperatura do gás é menor e a umidade do gás é maior. Estes efeitos são compensados em parte pelo aumento de vazão de gás. A baixas umidades do sólido a taxa de secagem no contínuo é inesperadamente maior que no estático. Isto talvez possa ser explicado pelo efeito conjunto da variação da temperatura do sólido, menor no estático que no deslizante, e por uma estagnação do sólido na saída.

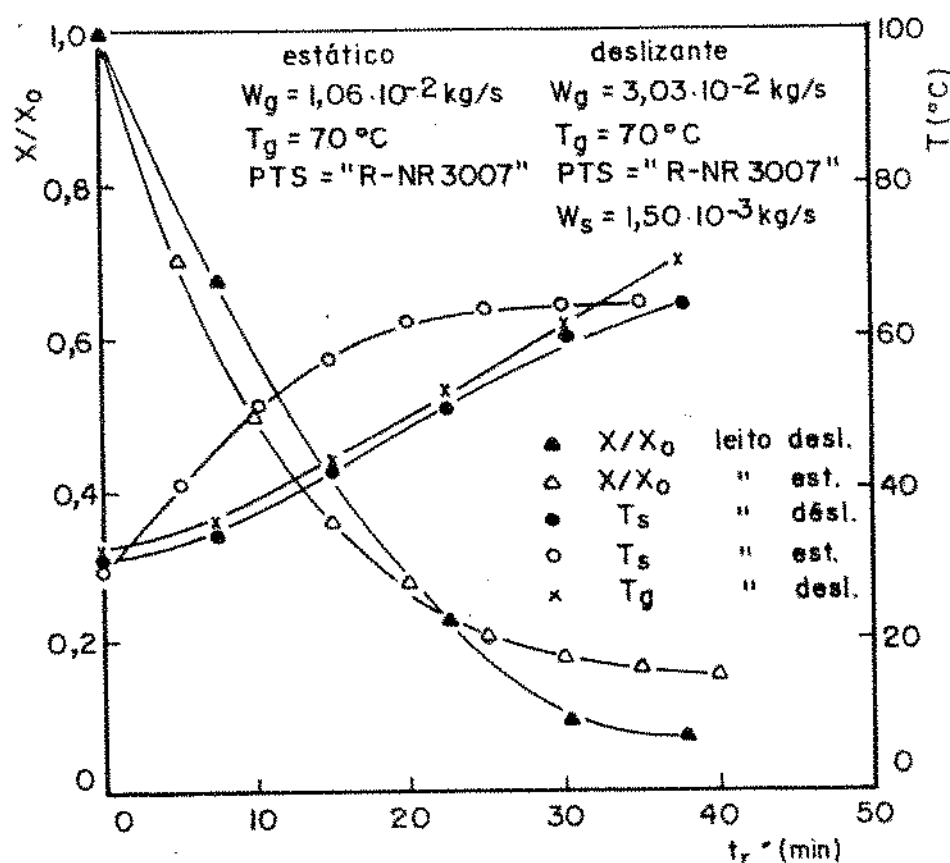


Figura V.12 Comparação de ensaio de secagem em PTS "R-NR 3007" para ambos os secadores deslizante e estático.

Os resultados obtidos podem ser resumidos na figura V.13 e V.14, onde se apresentam as curvas de X/X_0 para leito deslizante, para as diversas condições de trabalho, em função do tempo de residência (t_r). Estas podem ser utilizadas para estimar a umidade final em função da temperatura, para uma dada vazão de sólidos e comprimento do secador (t_r).

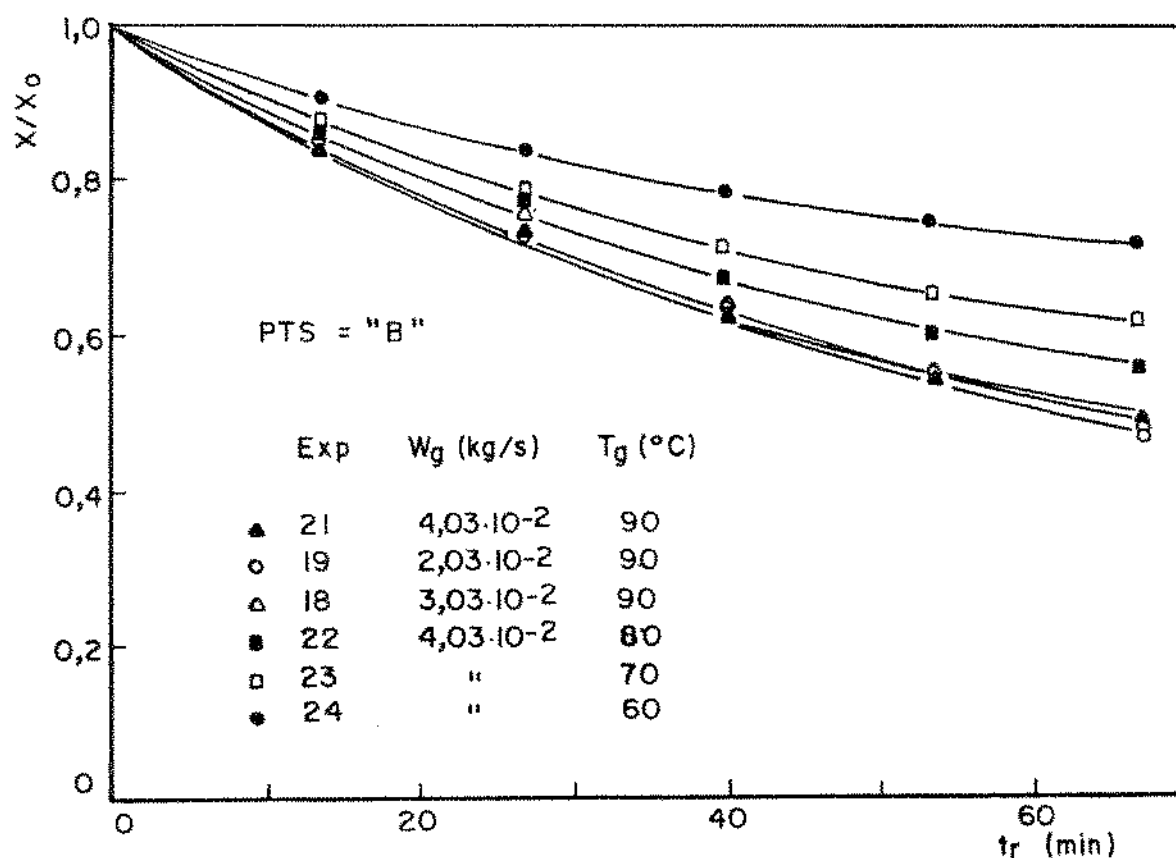


Figura V.13 Gráfico da umidade do sólido em função do tempo de residência.

Deve-se esclarecer que a medida da temperatura do sólido taanto no estático como no contínuo pode ter várias fontes de erro. No caso estático, sofre a influência da temperatura do gás e

no contínuo, a partícula que desce, pode ter seguido uma trajetória tortuosa, porém os resultados obtidos em todas as experiências são coerentes. Devido a dificuldade de tomada de amostra na base do secador, esta última porção foi coletada na saída do equipamento (válvula rotativa), considerando para o cálculo de t_r final somente o setor em contato direto com a entrada do gás. Esta consideração pode acarretar um erro em relação ao momento da tomada da amostra, pois houve uma parcela excedente do tempo na qual o sólido permaneceu na válvula sem contato com o gás, porém sofrendo algum tipo de secagem.

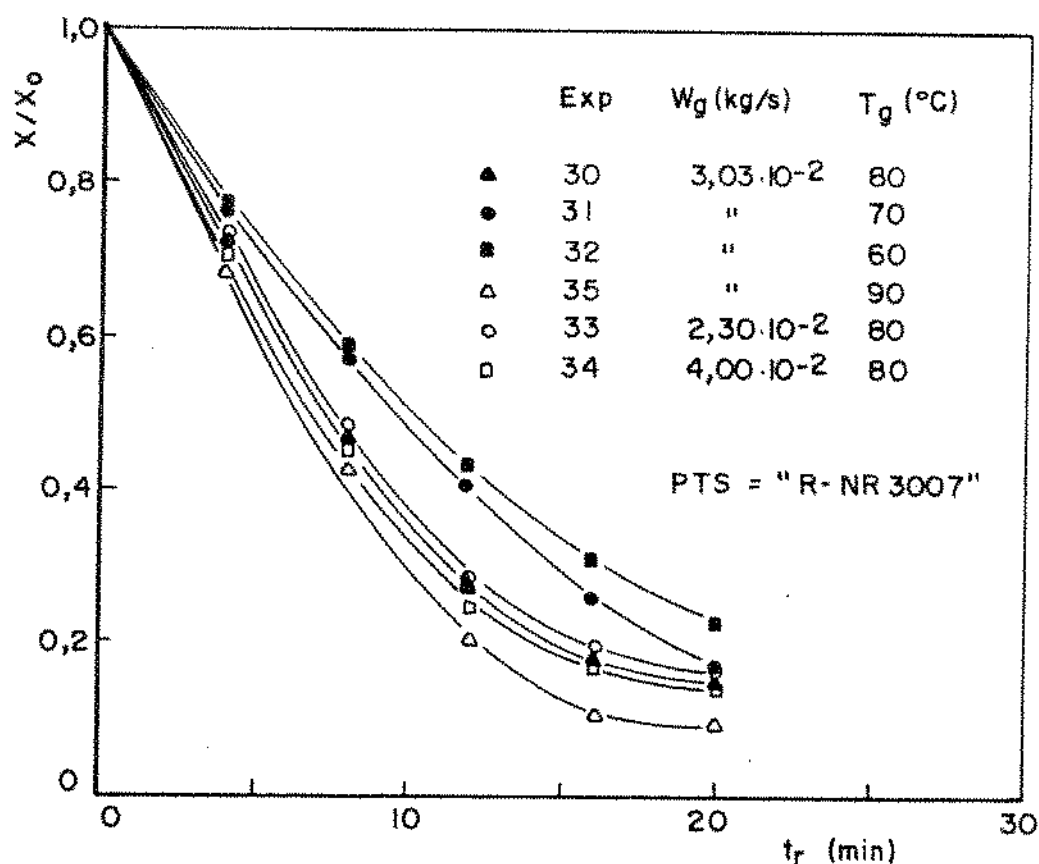


Figura V.14 Gráfico da unidade do sólido em função do tempo de residência.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Podemos resumir as condições mais importantes:

1) Das três variáveis estudadas na secagem em leito estático, a que tem maior influência sobre a secagem é a temperatura do ar.

2) As curvas de secagem obtidas em leito estático, quando expressas como $\ln (X - X_{eq} / X_0 - X_{eq})$ em função do tempo de secagem, se decompõem em dois períodos aproximadamente retilíneos que corresponderiam a dois tipos de mecanismos de transferência de calor e massa.

3) A análise matemática das correlações obtidas para o leito estático permitem realizar simulações de secagem de PTS, para temperaturas de admissão de ar entre 50 e 91 °C.

4) Pode-se concluir que na PTS "B" a resistência interna à transferência de massa é maior que na PTS "R-NR 3007".

5) As condições de processo de produção da PTS e sua composição mudam substancialmente a cinética de secagem e consequentemente o projeto do secador.

6) Na secagem em leito deslizante, observou-se certa influência da DTR nos perfis de secagem, sendo de grande importância visualizar estes erros em escala piloto, já que uma representação da secagem por um modelo supondo fluxo empistonado levaria a projetos errados.

7) Observamos que pequenas modificações no equipamento, tal como inclinação do leito, produz uma alteração significativa na DTR.

8) A secagem em leito deslizante teve um comportamento análogo ao do leito estático nas condições de processo deste trabalho, porém é interessante sublinhar que a velocidade de aquecimento do sólido no leito deslizante é menor que no leito estático, resultado de interesse para tratamento de um alimento.

9) Demostrou-se que a queda da umidade no secador deslizante era função somente, dentro de certo erro, do tempo de residência, independentemente da vazão mássica do sólido utilizada. Consequentemente podem projetar-se secadores contínuos, utilizando

do como parâmetro o tempo de residência e a temperatura do ar, com um erro máximo de 12 % devido à variação de vazão de ar, mantendo a geometria do sistema.

Como sugestão para trabalhos futuros podemos concluir que a secagem contínua merece ainda estudos mais aprofundados. Uma melhor compreensão da mesma poderá ser obtida através da simulação de secadores contínuos a partir de dados do estático. A comparação dos dados simulados com os experimentais permitiria uma compreensão melhor da influência da distribuição dos tempos de residência (DTR) na secagem, como também uma estimativa da evolução da temperatura-umidade da partícula ao longo do secador, dado de importância para avaliação da qualidade final do produto.

APENDICE A

CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO E DOS TERMOPARES

A construção da placa de orifício pode ser encontrada no trabalho de Finzer (1984).

A variação da energia cinética e perdas friccionais, provocadas pelo estrangulamento ao ser forçado o escoamento de ar pelo orifício, resulta em redução da pressão do fluido, que pode ser determinada por um manômetro.

A equação que relaciona a perda de pressão na placa de orifício com a vazão do fluido em escoamento pode ser obtida através de um balanço de massa e de quantidade de movimento.

$$V_p = C_o A_o \sqrt{\frac{2 \rho_l g \Delta h}{\rho_a (1 - \beta^4)}} \quad (A-1)$$

Onde: V_p - vazão volumétrica do fluido (m^3/seg);

C_o - coeficiente de descarga da placa de orifício;

A_o - área do orifício ($\pi d_o^2/4$) (m^2);

ρ_l - densidade do líquido manométrico (Kg/m^3);

- ρ - densidade do fluido em escoamento (Kg/m^3);
 g - constante de gravidade (m/seg^2);
 h - diferença de altura do líquido manométrico (m);
 β - razão entre o diâmetro do orifício e o da tubulação (d_o/d_t).

A calibração foi realizada a 26 °C e a pressão barométrica de 711 mmHg, utilizando um medidor padrão de vazão, Meriam Flow (modelo 50 MC2-6). A vazão volumétrica lida no Meriam sofreu duas correções, uma devido à pressão e outra devido à temperatura, obtendo-se seu valor nas condições padrão do medidor (21.1 °C e 760 mmHg). A relação entre a vazão padrão e a perda de pressão na placa de orifício é a curva característica desejada. Esta relação pode ser linearizada como é mostrado na fig. A.1

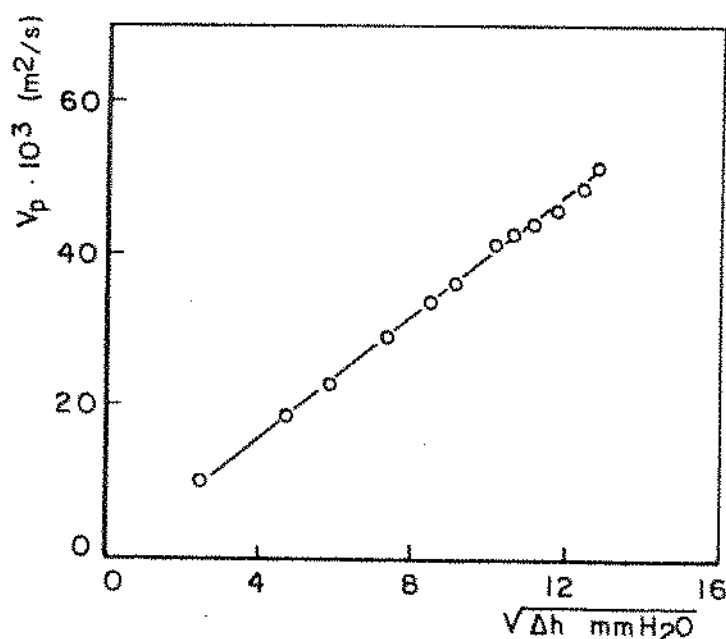


Figura A.1 Vazão em função da raiz quadrada da perda de carga.

Na tabela A.1 percebemos que os coeficientes de descarga mantêm-se essencialmente constantes na faixa empregada.

Número da medida	Δh (mmH ₂ O)	$V_p \times 10^3$ (m ³ /s)	Re	C
1	164.9	51.4	132489	0.86
2	158.3	48.2	124273	0.82
3	142.6	47.3	122122	0.85
4	126.6	44.2	114053	0.84
5	118.8	42.8	110529	0.84
6	104.4	40.5	104706	0.85
7	83.9	36.1	93198	0.85
8	72.8	34.0	88032	0.86
9	53.0	29.4	75949	0.86
10	34.0	23.1	59839	0.85
11	22.2	18.7	48332	0.85
12	6.3	9.8	25392	0.84

Tabela A.1 Resultados da calibração da placa de orifício.

A equação obtida por regressão linear dos pontos de V_p em função de h é:

$$V_p = [3.9173 \times 10^{-3} \sqrt{\Delta h \text{ (mm H}_2\text{O)}} - 0.2650 \times 10^{-3}] \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{A.2})$$

A equação A.2 dá o valor da vazão padrão. A vazão real de cada experimento é obtida por:

$$V_r = V_p \left(\frac{273 + T_a}{273 + 21.1} \right) \frac{P_b}{P_a} \quad (\text{A.3})$$

Onde: T_a - temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

P_b - pressão barométrica (mmHg);

V_r - vazão a T_a e P_b (m^3/s).

A.2 Resultados da calibração de termopares.

Foram calibrados 7 termopares Cu-Co com termômetros padrão marca MLW (Alemanha) em 10 temperaturas diferentes.

Obteve-se resultados diferentes para cada termopar como é mostrado nas equações obtidas por regressão linear.

Posição no secador

cm	
0	$T_{\text{real}} = (1.060 T_o + 2.13) ^{\circ}\text{C}$
12	$T_{\text{real}} = (1.010 T_o + 1.96) ^{\circ}\text{C}$
24	$T_{\text{real}} = (0.971 T_o + 3.87) ^{\circ}\text{C}$
36	$T_{\text{real}} = (0.981 T_o + 4.99) ^{\circ}\text{C}$
48	$T_{\text{real}} = (1.111 T_o + 1.17) ^{\circ}\text{C}$
60	$T_{\text{real}} = (1.001 T_o + 3.23) ^{\circ}\text{C}$
entrada	$T_{\text{real}} = (1.134 T_o + 2.28) ^{\circ}\text{C}$

onde: T_o - Temperatura lida ($^{\circ}\text{C}$).

Obteve-se coeficientes de correlação todos próximos da unidade.

APÊNDICE B

DIAMETRO EQUIVALENTE DA PTS

Na tabela B1 encontra-se a distribuição de tamanho (diâmetro médio) com porcentagem de fração mássica retida em cada peneira para algumas das amostras empregadas nos experimentos.

Amostra		18	19	27	30	31
FAIXA DE mm	$\bar{d}_p$ (mm)	8.3	8.6	7.2	8.1	8.0
	d_p (mm)	X	X	X	X	X
13.33 - 9.42	11.38	0.2329	0.2540	0.1098	0.2219	0.2100
9.42 - 7.93	8.67	0.3810	0.4011	0.1731	0.3711	0.3601
7.93 - 6.68	7.30	0.2716	0.1846	0.4018	0.2513	0.2412
6.68 - 5.61	6.15	0.0811	0.0910	0.1928	0.1158	0.1108
5.61 - 4.70	5.16	0.0330	0.0600	0.1200	0.0380	0.0701

Tabela B.1 Distribuição do tamanho e diâmetro médio das amostras empregadas.

Na figura B.1 encontra-se a distribuição de tamanho para uma das amostras utilizadas (amostra 18).

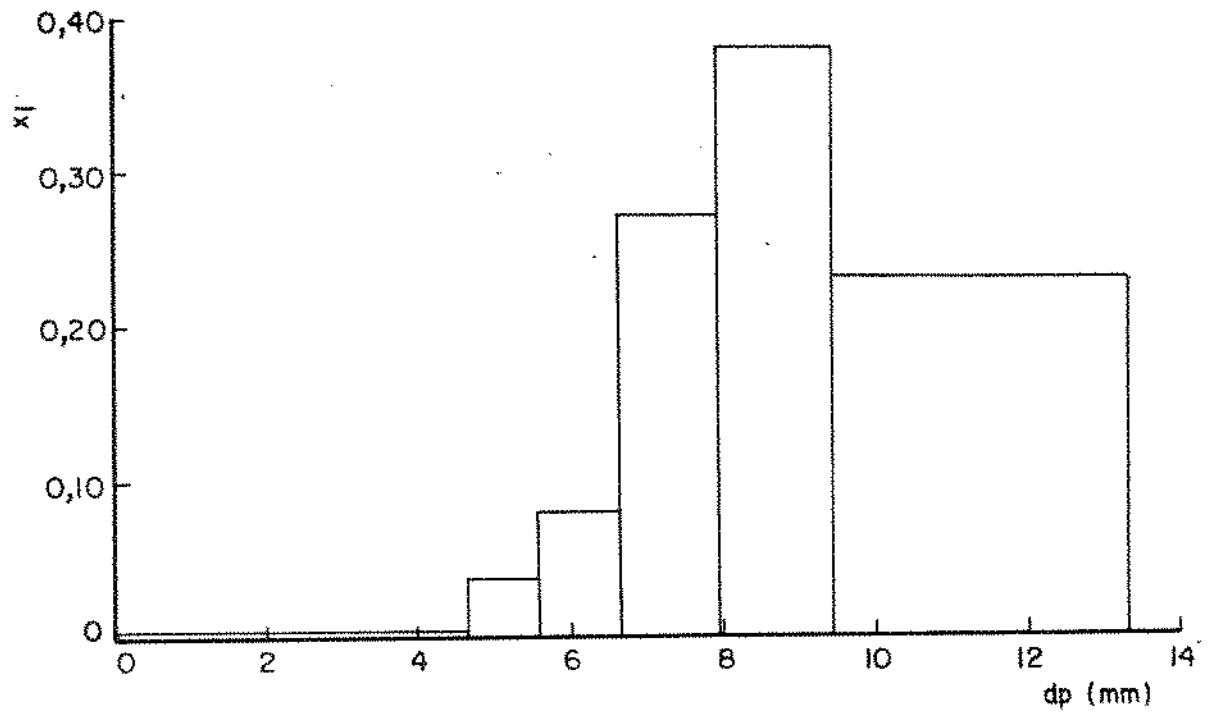


Figura B.1 Histograma da análise de peneira de amostra do experimento 18.

APÊNDICE C

ISOTERMAS DE SORÇÃO

Foram determinadas isotermas de sorção de PTS, (Iguti e Menegalli 1987), segundo o método de Spiess e Wolf (1983), de determinação de isotermas em temperaturas elevadas. Os resultados das determinações se encontram na figura C.1

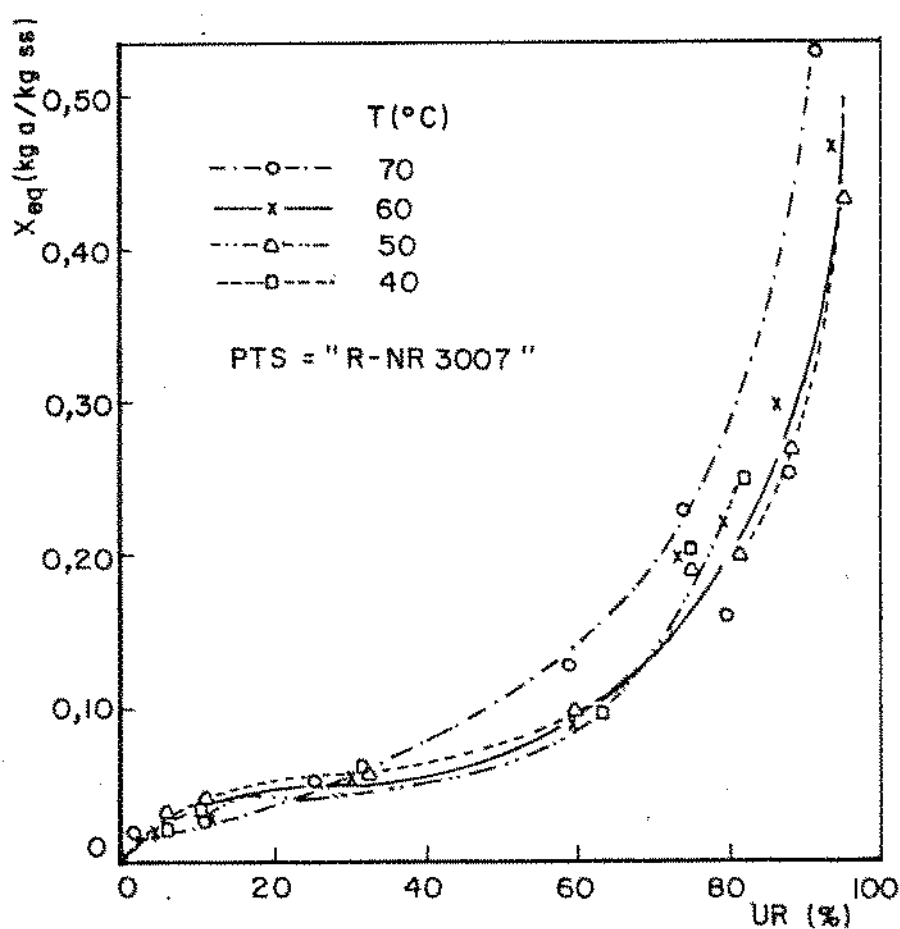


Figura C.1 Isotermas de sorção de PTS "R-NR 3007"

As isotermas de PTS tipo "B" foram determinadas com a mesma técnica e podemos perceber que foram completamente diferentes (Fig C.2).

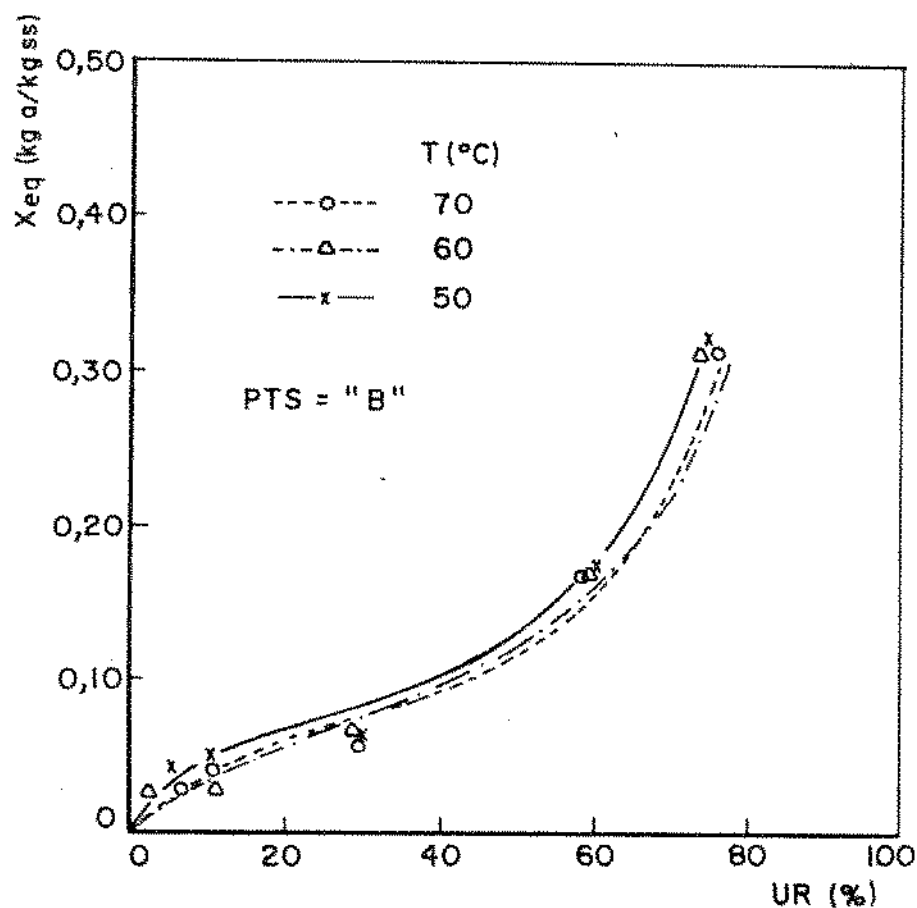


Figura C.2 Isotermas de sorção de PTS "B".

Sobral (1987) observou em PTS com sangue que as isotermas podiam ser classificadas como do tipo II, de acordo com a classificação de Brunauer, significando que existe pouca adsorção em monocamada, e nada de condensação capilar. A maior parte da água é adsorvida em multicamadas. O PTS deste trabalho se comportou de maneira similar ao deles.

Como também foram feitos ensaios de secagem nas temperaturas de 80°C e 91°C, considerou-se necessário fazer uma extrapolação dos dados experimentais, pois a utilização da umidade final ao invés da umidade de equilíbrio, no cálculo da umidade residual, altera o comportamento das curvas de secagem. Como o efeito da temperatura sobre a pressão de vapor pode ser representado pela equação de Clausius-Clapeyron, optou-se por fazer a extrapolação relacionando-se o logaritmo da umidade relativa com o negativo do inverso da temperatura absoluta, para uma dada umidade de equilíbrio. As curvas obtidas para o PTS se encontram na figura C.3.

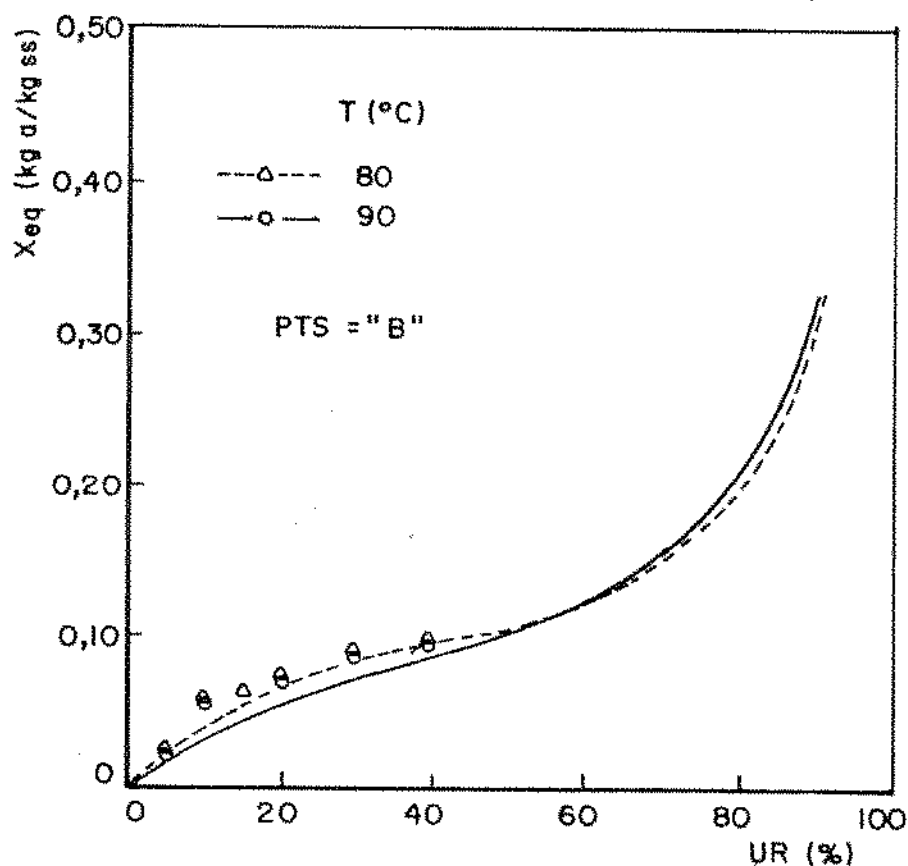


Fig.C.3 Isotermas de sorção obtidas por extrapolação

APÊNDICE D

EXPERIMENTOS NO SECADOR ESTATICO

CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO				
EXPERIMENTO	T °C	L cm	$\frac{-2}{Wg \times 10}$ (kg/seg)	PTS -
1	91.0	10	1.06	"R-NR 3007"
2	80.0	10	1.06	"R-NR 3007"
3	70.0	10	1.06	"R-NR 3007"
4	60.0	10	1.06	"R-NR 3007"
5	70.0	10	1.06	"R-NR 3007"
6	80.0	10	0.82	"R-NR 3007"
7	80.0	10	1.11	"R-NR 3007"
8	50.0	10	1.06	"R-NR 3007"
9	70.0	6	1.06	"R-NR 3007"
10	70.0	2	1.06	"R-NR 3007"
11	80.0	10	1.06	"B"
12	80.0	10	1.06	"R-NR 3007"
13	80.0	10	1.11	"B"
14	90.1	10	1.06	"B"
15	70.0	10	1.06	"B"
16	55.0	10	1.06	"B"
17	80.0	10	1.06	"B"

EXPERIMENTO 1

Tbs = 32.0 °C

Tbu = 26.0 °C

Xeq = 0.010 kg/kg b.s.

 $Wg = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 3.3 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.253 kg/kg b.s.

PTS = "R-NR 3007"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(dX/dt) ρ
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	91.1	42.5	30.0	0.253	1	1	-0.1213	-0.1729
5	90.7	59.2	50.0	0.128	0.505	0.485	-0.0694	-0.1000
10	90.8	77.5	72.5	0.081	0.318	0.290	-0.0359	-0.0571
15	90.4	82.0	83.5	0.044	0.174	0.140	-0.0161	-0.0288
20	90.8	85.0	86.0	0.031	0.121	0.085	-0.0059	-0.0221
25	91.0	86.0	87.5	0.027	0.107	0.070	-0.0019	-0.0012
30	90.9	86.4	88.5	0.024	0.094	0.057	-0.0014	-0.0012
35	90.6	87.0	89.4	0.021	0.084	0.046	-	-
40	91.2	87.5	90.1	0.019	0.075	0.037	-	-
45	89.9	87.5	90.8	0.017	0.068	0.029	-	-
50	90.1	87.5	91.0	0.016	0.062	0.024	-	-
55	90.5	87.6	91.3	0.015	0.058	0.019	-	-
60	90.8	87.8	91.7	0.014	0.054	0.015	-	-
65	91.2	87.7	92.1	0.013	0.051	0.012	-	-
70	91.4	87.8	92.1	0.012	0.049	0.010	-	-

EXPERIMENTO 2

Tbs = 31.0 °C

Tbu = 25.0 °C

Xeq = 0.015 kg/kg b.s.

 $Wg = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 3.3 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.249 kg/kg b.s.

PTS = "R-NR 3007"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	$\bar{M}$	$d\bar{M}/dt$	$(d\bar{X}/dt) \rho$
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	80.8	38.2	28.1	0.249	1	1	-0.0903	-0.1241
5	80.6	55.0	47.5	0.165	0.662	0.640	-0.0601	-0.0829
10	80.0	66.5	60.0	0.106	0.426	0.389	-0.0381	-0.0524
15	-	71.5	67.5	0.071	0.284	0.238	-0.0227	-0.0312
20	80.0	75.0	71.5	0.049	0.197	0.146	-0.0125	-0.0171
25	80.0	76.5	72.0	0.041	0.164	0.110	-0.0064	-0.0088
30	79.6	77.0	72.0	0.037	0.149	0.094	-0.0031	-0.0041
35	79.8	77.5	72.9	0.035	0.140	0.080	-0.0017	-0.0024
40	-	77.6	72.9	0.031	0.124	0.068	-0.0014	-0.0018
45	80.4	77.8	73.1	0.029	0.115	0.058	-	-
50	80.1	77.9	73.3	0.027	0.107	0.049	-	-
55	80.3	77.9	73.4	0.025	0.100	0.042	-	-
60	-	78.0	74.3	0.023	0.094	0.036	-	-
65	-	78.0	74.9	0.022	0.089	0.031	-	-
70	80.3	78.1	74.9	0.021	0.085	0.026	-	-

EXPERIMENTO 3

$$T_{bs} = 31.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.015 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 3.3 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.247 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"R-NR 3007"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{m}$	$\frac{d\bar{M}}{dt}$	$(\frac{d\bar{X}}{dt}) \rho$
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	$\frac{-1}{\text{min}}$	$\frac{3}{\text{kg/m seg}}$
0	69.1	32.5	-	0.247	1	1	-0.0670	-0.0912
5	69.3	43.2	42.2	0.179	0.725	0.707	-0.0510	-0.0694
10	69.8	52.8	50.1	0.129	0.521	0.490	-0.0370	-0.0506
15	70.1	58.0	56.8	0.094	0.379	0.339	-0.0250	-0.0341
20	70.9	62.4	57.9	0.073	0.296	0.235	-0.0160	-0.0218
25	71.8	64.1	62.2	0.050	0.203	0.151	-0.0100	-0.0135
30	70.6	64.2	63.0	0.046	0.187	0.134	-0.0050	-0.0071
35	70.1	64.6	63.8	0.044	0.179	0.118	-0.0024	-0.0035
40	70.1	64.9	63.9	0.039	0.159	0.105	-0.0012	-0.0018
45	70.3	64.9	64.0	0.037	0.148	0.093	-0.0010	-0.0012
50	70.1	65.0	64.1	0.034	0.138	0.082	-	-
55	69.9	65.0	64.3	0.032	0.129	0.073	-	-
60	69.8	65.6	64.3	0.030	0.122	0.065	-	-
65	-	65.7	64.5	0.028	0.114	0.057	-	-
70	69.8	65.8	64.8	0.027	0.109	0.051	-	-

EXPERIMENTO 4

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 23.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.035 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 3.3 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.252 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"R-NR 3007"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(dX/dt) $\frac{1}{3}$
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	$\frac{-1}{\text{min}}$	$\frac{3}{\text{kg/m seg}}$
0	59.1	27.5	28.0	0.252	1	1	-0.061	-0.0782
5	59.8	34.6	34.1	0.192	0.763	0.725	-0.047	-0.0600
10	59.9	41.1	40.8	0.150	0.596	0.531	-0.034	-0.0435
15	60.1	49.5	47.9	0.119	0.473	0.389	-0.024	-0.0306
20	60.4	53.5	51.9	0.097	0.383	0.285	-0.016	-0.0206
25	60.0	56.5	53.6	0.080	0.318	0.209	-0.010	-0.0129
30	60.3	57.0	-	0.077	0.307	0.196	-0.005	-0.0065
35	60.5	57.1	56.5	0.074	0.294	0.181	-0.003	-0.0041
40	-	57.1	56.5	0.071	0.282	0.167	-0.002	-0.0024
45	60.1	57.5	56.5	0.068	0.271	0.155	-0.001	-0.0012
50	-	57.8	57.1	0.066	0.261	0.143	-	-
55	60.2	57.9	57.2	0.063	0.252	0.132	-	-
60	60.6	58.1	57.2	0.061	0.243	0.122	-	-
65	60.0	58.2	57.3	0.059	0.235	0.113	-	-
70	60.1	58.2	57.8	0.057	0.227	0.104	-	-

EXPERIMENTO 5

Tbs = 29.1 °C

Tbu = 21.0 °C

Xeq = 0.015 kg/kg b.s.

 $Wg = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 3.3 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.247 kg/kg b.s.

PTS = "R-NR 3007"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(d $\bar{X}$ /dt) ρ
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	70.1	33.6	28.9	0.247	1	1	-0.0720	-0.0982
5	70.1	43.4	41.9	0.174	0.705	0.686	-0.0520	-0.0712
10	70.3	52.8	50.6	0.124	0.500	0.468	-0.0360	-0.0494
15	69.9	58.0	57.0	0.089	0.360	0.319	-0.0240	-0.0329
20	69.7	63.0	61.8	0.069	0.280	0.234	-0.0150	-0.0206
25	70.1	64.2	63.1	0.049	0.200	0.148	-0.0090	-0.0124
30	70.0	64.8	63.7	0.043	0.175	0.122	-0.0050	-0.0071
35	-	64.8	63.9	0.040	0.162	0.108	-0.0020	-0.0029
40	70.1	65.1	64.2	0.038	0.155	0.100	-0.0010	-0.0012
45	69.9	65.2	64.8	0.037	0.148	0.093	-0.0008	-0.0012
50	70.0	65.4	65.1	0.034	0.137	0.081	-	-
55	70.1	65.4	65.2	0.032	0.128	0.072	-	-
60	-	65.8	65.6	0.030	0.121	0.064	-	-
65	70.1	65.8	65.9	0.028	0.114	0.057	-	-
70	70.0	65.9	66.1	0.027	0.110	0.053	-	-

EXPERIMENTO 6

$$T_{bs} = 28.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 19.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.015 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 0.82 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 3.3 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.248 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"R-NR 3007"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(dX/dt) p
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	$\frac{-1}{\text{min}}$	$\frac{3}{\text{kg/m seg}}$
0	80.0	37.6	29.1	0.248	1	1	-0.0844	-0.1159
5	80.0	54.1	45.6	0.170	0.685	0.665	-0.0580	-0.0774
10	79.8	65.3	58.9	0.111	0.446	0.410	-0.0389	-0.0514
15	79.9	70.6	66.1	0.076	0.305	0.260	-0.0237	-0.0324
20	80.1	74.1	70.0	0.053	0.214	0.163	-0.0137	-0.0188
25	80.1	75.3	71.1	0.043	0.174	0.121	-0.0072	-0.0100
30	-	75.8	72.0	0.039	0.155	0.101	-0.0035	-0.0047
35	80.3	75.9	72.3	0.036	0.146	0.091	-0.0016	-0.0024
40	78.9	76.5	72.4	0.033	0.133	0.075	-0.0011	-0.0018
45	79.6	76.6	72.6	0.031	0.125	0.070	-	-
50	80.3	76.6	73.0	0.029	0.117	0.060	-	-
55	80.2	76.6	73.0	0.028	0.113	0.055	-	-
60	80.0	76.7	73.1	0.027	0.109	0.050	-	-
65	80.0	76.9	73.3	0.026	0.105	0.045	-	-
70	80.1	77.0	73.4	0.025	0.101	0.042	-	-

EXPERIMENTO 7

Tbs = 27.5 °C

Tbu = 19.0 °C

Xeq = 0.015 kg/kg b.s.

 $Wg = 1.11 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 3.3 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.248 kg/kg b.s.

PTS = "R-NR 3007"

t	Tg	Tsa	Ts	X.	X/Xo	$\bar{M}$	d $\bar{M}/dt$	(dX/dt) _p
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	-1 min	3 kg/m seg
0	80.1	38.3	28.9	0.248	1	1	-0.0940	-0.1288
5	80.0	57.2	48.0	0.160	0.646	0.623	-0.0620	-0.0847
10	79.9	68.0	60.9	0.100	0.404	0.360	-0.0390	-0.0535
15	79.9	72.6	67.9	0.066	0.267	0.220	-0.0224	-0.0306
20	80.2	76.1	72.3	0.044	0.178	0.125	-0.0118	-0.0159
25	80.1	77.0	72.8	0.036	0.145	0.090	-0.0054	-0.0076
30	80.2	77.6	73.1	0.033	0.133	0.075	-0.0020	-0.0029
35	-	78.0	73.8	0.030	0.121	0.062	-0.0006	-0.0006
40	-	78.0	74.1	0.029	0.117	0.060	-0.0002	-0.0006
45	79.9	78.3	74.6	0.028	0.115	0.058	-	-
50	80.1	78.2	75.1	0.027	0.109	0.053	-	-
55	80.4	78.4	75.4	0.027	0.108	0.050	-	-
60	80.1	78.4	76.1	0.026	0.105	0.048	-	-
65	79.8	78.4	76.9	0.025	0.101	0.043	-	-
70	79.9	78.4	77.1	0.024	0.097	0.040	-	-

EXPERIMENTO 8

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.046 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_0 = 0.243 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

$$\text{Carga} = 3.3 \text{ g/cm}^2$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X ₀	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt -1	(dX/dt) ρ 3
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	min	kg/m seg
0	50.1	27.5	26.1	0.243	1	1	-0.0436	-0.0506
5	50.2	33.0	31.1	0.204	0.838	0.800	-0.0386	-0.0447
10	50.4	37.0	35.2	0.168	0.692	0.620	-0.0319	-0.0371
15	50.1	40.0	39.1	0.141	0.578	0.480	-0.0256	-0.0300
20	50.2	43.0	42.4	0.121	0.497	0.380	-0.0210	-0.0253
25	50.3	46.0	43.1	0.105	0.433	0.301	-0.0231	-
30	50.3	47.0	46.6	0.100	0.413	0.276	-0.0319	-
35	50.2	47.2	46.9	0.098	0.404	0.265	-	-
40	50.2	47.5	47.1	0.096	0.396	0.255	-	-
45	50.2	47.5	47.1	0.094	0.386	0.243	-	-
50	50.2	47.9	47.3	0.092	0.378	0.233	-	-
55	50.3	48.0	47.5	0.090	0.370	0.223	-	-
60	50.3	48.1	47.9	0.088	0.363	0.214	-	-
65	50.0	48.3	48.0	0.086	0.356	0.205	-	-
70	50.1	48.3	48.1	0.085	0.349	0.197	-	-

EXPERIMENTO 9

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.015 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 1.9 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 6 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.247 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"R-NR 3007"}$$

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	M	d M/dt	(dX/dt) 0
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	-1 min	3 kg/m seg
0	70.2	32.7	28.6	0.247	1	1	-0.0822	-0.1124
5	70.6	42.4	39.6	0.164	0.664	0.640	-0.0558	-0.0759
10	69.9	53.8	51.7	0.115	0.466	0.430	-0.0367	-0.0500
15	69.3	58.3	57.8	0.080	0.324	0.280	-0.0234	-0.0318
20	69.8	64.0	61.7	0.062	0.268	0.203	-0.0145	-0.0200
25	70.6	64.4	63.4	0.042	0.170	0.115	-0.0088	-0.0118
30	70.1	65.6	63.9	0.036	0.146	0.090	-0.0054	-0.0071
35	70.1	65.9	64.3	0.032	0.130	0.074	-0.0034	-0.0047
40	70.0	66.1	64.8	0.030	0.122	0.065	-0.0023	-0.0029
45	70.0	66.3	65.2	0.028	0.113	0.055	-0.0016	-0.0024
50	-	66.3	65.6	0.027	0.108	0.050	-0.0011	-0.0018
55	70.2	66.8	65.9	0.025	0.103	0.045	-0.0007	-0.0012
60	70.1	66.8	66.3	0.025	0.099	0.041	-0.0002	-0.0012
65	69.9	66.7	66.4	0.024	0.096	0.038	-	-
70	69.9	66.8	66.3	0.023	0.093	0.034	-	-

EXPERIMENTO 10

Tbs = 30.0 °C

Tbu = 25.0 °C

Xeq = 0.015 kg/kg b.s.

 $W_g = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 0.6 g/cm²

L = 2 cm

Xo = 0.251 kg/kg b.s.

PTS = "R-NR 3007"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	M	d M/dt	(dX/dt) ⁰
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	70.6	31.9	29.1	0.251	1	1	-0.1020	-0.1410
5	69.8	41.9	38.9	0.149	0.576	0.570	-0.0593	-0.0824
10	69.9	53.9	51.9	0.107	0.453	0.388	-0.0329	-0.0459
15	69.9	59.1	-	0.074	0.314	0.250	-0.0153	-0.0212
20	70.3	64.2	62.1	0.053	0.225	0.160	-0.0015	-0.0024
25	70.2	64.9	63.9	0.035	0.148	0.086	-	-
30	70.1	66.1	64.6	0.029	0.123	0.060	-	-
35	70.4	66.3	64.8	0.027	0.114	0.050	-	-
40	-	66.7	65.3	0.022	0.093	0.030	-	-
45	70.4	66.8	65.9	0.019	0.081	0.015	-	-
50	70.1	66.7	66.4	0.017	0.072	0.010	-	-
55	69.7	66.9	66.5	0.017	-	-	-	-
60	69.8	66.9	66.8	-	-	-	-	-
65	69.9	67.2	66.9	-	-	-	-	-
70	69.9	67.4	66.9	-	-	-	-	-

EXPERIMENTO 11

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.0250 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 5.4 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.244 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"B"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt -1	(d $\bar{X}$ /dt) _p 3
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	min	kg/m seg
0	80.1	36.7	27.9	0.244	1	1	-0.0209	-0.0304
5	79.9	43.0	35.5	0.223	0.915	0.904	-0.0165	-0.0238
10	79.8	54.5	48.0	0.207	0.850	0.831	-0.0136	-0.0196
15	80.0	59.5	55.3	0.194	0.795	0.772	-0.0116	-0.0172
20	80.2	62.9	59.6	0.181	0.740	0.712	-0.0105	-0.0152
25	80.1	64.5	59.9	0.170	0.695	0.662	-0.0095	-0.0139
30	79.9	64.9	59.9	0.160	0.655	0.616	-0.0085	-0.0125
35	80.3	65.5	60.4	0.151	0.620	0.575	-0.0073	-0.0106
40	80.0	65.8	60.5	0.145	0.595	0.548	-0.0059	-0.0086
45	80.1	65.9	60.7	0.138	0.565	0.516	-0.0045	-0.0066
50	79.9	66.1	60.8	0.134	0.550	0.498	-0.0030	-0.0046
55	-	66.1	60.9	0.132	0.540	0.489	-0.0018	-0.0026
60	80.1	66.2	61.1	0.130	0.531	0.480	-0.0012	-0.0020
65	79.6	66.2	61.3	0.128	0.524	0.470	-	-
70	80.1	66.3	61.4	0.126	0.516	0.460	-	-

EXPERIMENTO 12

$$T_{bs} = 29.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 23.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.015 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.11 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 3.3 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.248 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"R-NR 3007"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(dX/dt) ρ
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	-	37.1	29.3	0.248	1	1	-0.0928	-0.1271
5	80.1	57.1	48.3	0.162	0.653	0.631	-0.0618	-0.0847
10	80.1	68.1	60.9	0.100	0.404	0.366	-0.0591	-0.0535
15	80.2	72.3	68.0	0.067	0.268	0.221	-0.0231	-0.0318
20	80.3	76.8	72.1	0.044	0.176	0.123	-0.0125	-0.0171
25	80.4	77.1	72.6	0.036	0.146	0.091	-0.0058	-0.0082
30	80.0	77.7	73.0	0.033	0.132	0.076	-0.0022	-0.0029
35	80.0	78.3	73.5	0.029	0.119	0.062	-0.0006	-0.0006
40	79.8	78.3	74.0	0.029	0.117	0.060	-0.0002	-0.0003
45	80.1	78.3	74.3	0.028	0.115	0.058	-	-
50	-	78.3	75.1	0.028	0.111	0.054	-	-
55	80.3	78.4	75.5	0.027	0.108	0.051	-	-
60	80.4	78.5	76.1	0.026	0.106	0.048	-	-
65	80.0	78.4	76.4	0.025	0.102	0.044	-	-
70	80.0	78.6	76.9	0.024	0.098	0.040	-	-

EXPERIMENTO 13

$$T_{bs} = 32.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 26.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.02 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.11 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 5.4 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.245$$

$$\text{PTS} = \text{'B'}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt	(dX/dt)P
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	80.0	36.1	28.9	0.245	1	1	-0.0234	-0.0350
5	79.8	47.0	36.1	0.220	0.899	0.890	-0.0174	-0.0258
10	79.9	56.7	48.7	0.205	0.837	0.822	-0.0137	-0.0205
15	80.3	61.6	55.8	0.191	0.781	0.761	-0.0116	-0.0172
20	80.2	65.3	60.3	0.178	0.726	0.702	-0.0103	-0.0152
25	80.0	65.4	60.7	0.167	0.680	0.652	-0.0094	-0.0139
30	79.9	65.8	60.9	0.157	0.639	0.607	-0.0085	-0.0125
35	80.1	65.8	61.2	0.147	0.601	0.565	-0.0075	-0.0112
40	80.3	65.9	61.3	0.141	0.575	0.537	-0.0061	-0.0092
45	80.2	65.9	61.4	0.134	0.546	0.506	-0.0046	-0.0066
50	79.8	66.1	61.7	0.130	0.530	0.488	-0.0029	-0.0046
55	79.9	66.2	62.1	0.128	0.522	0.479	-0.0016	-0.0026
60	80.1	66.3	62.4	0.126	0.514	0.471	-0.0010	-0.0013
65	80.1	66.4	62.5	0.124	0.505	0.461	-0.0018	-
70	80.0	66.4	62.7	0.121	0.495	0.450	-0.0047	-

EXPERIMENTO 14

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 20.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.011 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 5.4 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_o = 0.245 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "S"$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X _o	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt -1	(d $\bar{X}$ /dt) ρ 3
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	min	kg/m seg
0	90.8	32.4	30.0	0.245	1	1	-0.0237	-0.0370
5	90.7	47.1	47.1	0.217	0.885	0.880	-0.0194	-0.0304
10	90.7	65.2	62.0	0.198	0.809	0.800	-0.0165	-0.0258
15	90.7	69.0	68.5	0.181	0.737	0.725	-0.0144	-0.0225
20	90.4	69.1	68.6	0.165	0.675	0.660	-0.0127	-0.0198
25	90.1	69.3	68.6	0.151	0.616	0.598	-0.0112	-0.0172
30	90.0	69.4	68.9	0.138	0.563	0.512	-0.0096	-0.0145
35	90.1	69.5	69.1	0.126	0.513	0.490	-0.0079	-0.0119
40	90.3	69.6	69.1	0.119	0.484	0.460	-0.0060	-0.0092
45	90.7	69.7	69.2	0.115	0.470	0.445	-0.0041	-0.0066
50	90.8	69.8	69.3	0.112	0.456	0.430	-0.0024	-0.0040
55	-	69.9	69.5	0.106	0.442	0.416	-0.0012	-0.0020
60	90.7	-	69.9	0.106	0.434	0.407	-0.0002	-0.0013
65	90.1	69.8	70.1	0.104	0.426	0.399	-	-
70	90.1	70.1	70.4	0.103	0.418	0.391	-	-

EXPERIMENTO 15

$$T_{bs} = 31.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$X_{eq} = 0.032$$

$$W_g = 1.06 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$\text{Carga} = 5.4 \text{ g/cm}^2$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$X_0 = 0.249 \text{ kg/seg b.s.}$$

$$\text{PTS} = \text{"B"}$$

t	T _g	T _{sa}	T _s	X	X/X ₀	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt -1	(dX/dt) ρ 3
min	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kg/kg	-	-	min	kg/m seg
0	70.1	32.1	29.1	0.249	1	1	-0.0170	-0.0244
5	70.3	36.4	30.1	0.232	0.930	0.920	-0.0137	-0.0190
10	70.2	42.8	40.6	0.219	0.879	0.861	-0.0119	-0.0172
15	-	48.1	47.3	0.206	0.827	0.802	-0.0111	-0.0159
20	70.8	53.4	50.8	0.194	0.780	0.748	-0.0106	-0.0152
25	70.0	54.2	53.0	0.184	0.737	0.699	-0.0101	-0.0145
30	69.8	54.7	53.6	0.173	0.693	0.648	-0.0093	-0.0132
35	69.5	54.8	53.8	0.162	0.651	0.600	-0.0081	-0.0119
40	69.1	55.1	53.9	0.154	0.618	0.562	-0.0065	-0.0092
45	70.1	55.6	54.1	0.148	0.596	0.537	-0.0046	-0.0066
50	70.0	55.1	54.4	0.145	0.581	0.520	-0.0027	-0.0040
55	70.8	55.6	54.6	0.143	0.572	0.510	-0.0011	-0.0013
60	70.3	55.8	54.6	0.141	0.565	0.502	-0.0005	-0.0007
65	70.3	55.9	55.1	0.139	0.558	0.493	-	-
70	69.8	56.1	55.4	0.137	0.550	0.484	-	-

EXPERIMENTO 16

Tbs = 31.0 °C

Tbu = 25.0 °C

Xeq = 0.060 kg/kg b.s.

 $W_g = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 5.4 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.252 kg/kg b.s.

PTS = "B"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	M	d M/dt	(dX/dt)p
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	⁻¹ min	³ kg/m seg
0	55.0	28.0	28.1	0.252	1	1	-0.0265	-0.0337
5	55.4	33.0	30.1	0.240	0.953	0.938	-0.0145	-0.0185
10	55.0	34.6	32.1	0.229	0.909	0.881	-0.0083	-0.0106
15	55.6	37.1	34.3	0.221	0.878	0.840	-0.0061	-0.0079
20				0.213	0.847	0.799	-0.0060	-0.0079
25	55.1	40.3	38.9	0.205	0.812	0.753	-	-
30	55.1	40.6	40.6	0.198	0.784	0.716	-	-
35	55.6	40.8	40.6	0.190	0.755	0.678	-	-
40	55.0	41.0	40.7	0.183	0.726	0.640	-	-
45	54.9	41.7	40.9	0.177	0.703	0.610	-	-
50	54.8	41.7	41.1	0.175	0.695	0.600	-	-
55	54.7	41.7	41.1	0.175	0.694	0.598	-	-
60	54.6	41.7	41.0	0.173	0.688	0.590	-	-
65	54.9	41.8	41.0	0.173	0.685	0.587	-	-
70	55.0	41.9	41.2	0.171	0.680	0.580	-	-

EXPERIMENTO 17

Tbs = 28.0 °C

Tbu = 19.2 °C

Xeq = 0.0250 kg/kg b.s.

 $Wg = 1.06 \times 10^{-2}$ kg/segCarga = 5.4 g/cm²

L = 10 cm

Xo = 0.243 kg/kg b.s.

PTS = "B"

t	Tg	Tsa	Ts	X	X/Xo	$\bar{M}$	d $\bar{M}$ /dt -1	(dX/dt)P 3
min	°C	°C	°C	kg/kg	-	-	min	kg/m seg
0	80.0	36.0	29.0	0.243	1	1	-0.0168	-0.0244
5	79.9	42.3	34.6	0.223	0.918	0.908	-0.0148	-0.0211
10	80.1	53.8	48.1	0.210	0.864	0.849	-0.0134	-0.0191
15	79.8	56.5	55.0	0.199	0.819	0.798	-0.0122	-0.0178
20	81.0	60.9	59.0	0.181	0.745	0.716	-0.0111	-0.0158
25	80.1	63.1	59.9	0.171	0.704	0.670	-0.0100	-0.0145
30	79.9	64.4	60.1	0.161	0.663	0.624	-0.0087	-0.0125
35	80.3	64.9	60.4	0.153	0.630	0.587	-0.0074	-0.0106
40	80.4	65.1	60.5	0.146	0.601	0.555	-0.0059	-0.0086
45	79.8	65.6	60.5	0.139	0.572	0.523	-0.0045	-0.0060
50	80.2	65.6	60.8	0.135	0.556	0.505	-0.0031	-0.0046
55	80.1	65.7	60.8	0.132	0.543	0.491	-0.0021	-0.0033
60	79.6	65.9	60.9	0.131	0.539	0.486	-0.0016	-0.0020
65	79.7	66.1	61.4	0.127	0.523	0.468	-	-
70	80.1	66.3	61.4	0.125	0.514	0.459	-	-

EXPERIMENTOS NO SECADOR DE LEITO DESLIZANTE

CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO				
Experimento	T °C	$W_s \times 10^{-3}$ (kg/seg)	$W_g \times 10^{-2}$ (kg/seg)	PTS
18	90.2	1.261	3.030	"B"
19	90.0	1.261	2.030	"B"
20	80.1	3.000	3.030	"B"
21	90.2	1.261	4.030	"B"
22	80.2	1.261	4.030	"B"
23	69.9	1.261	4.030	"B"
24	60.0	1.261	4.030	"B"
25	90.0	0.790	3.030	"B"
26	90.3	0.343	3.030	"B"
27	80.0	1.261	4.030	"B"
28	90.0	0.343	3.030	"B"
29	80.1	3.000	3.030	"R-NR 3007"
30	79.9	3.000	3.030	"R-NR 3007"
31	70.9	3.000	3.030	"R-NR 3007"
32	60.2	3.000	3.030	"R-NR 3007"
33	80.1	3.000	2.300	"R-NR 3007"
34	79.8	3.000	4.000	"R-NR 3007"
35	90.2	3.000	3.030	"R-NR 3007"
36	69.9	1.500	3.030	"R-NR 3007"
37	70.0	4.000	3.030	"R-NR 3007"
38	85.0	3.000	3.030	"B"

EXPERIMENTO 18

$$T_{bs} = 26.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 21.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.0150 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.3 \text{ mm}$$

$$T_g = 90.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.042$$

$$X_o = 0.245 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	C _s	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.245	1.000	---	0.0169	0.548	83.1	30.4	30.4
12	0.208	0.849	1.73	0.0165	0.511	84.3	35.1	34.6
24	0.178	0.727	1.40	0.0162	0.481	85.4	41.9	40.0
36	0.152	0.626	1.21	0.0159	0.455	86.7	55.1	50.0
48	0.132	0.540	0.93	0.0157	0.435	88.0	65.0	63.0
60	0.116	0.474	0.75	0.0150	0.419	90.2	76.0	71.0

EXPERIMENTO 19

$$T_{bs} = 28.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 21.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.0138 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.6 \text{ mm}$$

$$T_g = 90.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 2.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.062$$

$$X_o = 0.243 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	C _s	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.243	1.000	---	0.0217	0.546	67.4	35.5	35.5
12	0.207	0.852	1.680	0.0195	0.510	73.9	46.7	45.4
24	0.180	0.740	1.261	0.0178	0.483	78.6	53.1	51.1
36	0.156	0.623	1.124	0.0163	0.459	83.2	63.3	60.4
48	0.134	0.542	1.030	0.0149	0.437	87.1	68.9	66.1
60	0.116	0.477	0.844	0.0138	0.419	90.0	73.1	69.5

EXPERIMENTO 20

$$\begin{aligned}
 T_{bs} &= 31.0 \text{ }^{\circ}\text{C} & W_s &= 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg} \\
 T_{bu} &= 22.0 \text{ }^{\circ}\text{C} & W_g &= 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg} \\
 Y &= 0.0140 \text{ kg/kg} & J &= 0.099 \\
 d_p &= 8.5 \text{ mm} & X_o &= 0.243 \text{ kg/kg b.s.} \\
 T_g &= 80.1 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{PTS} &= "B"
 \end{aligned}$$

Z	X	X/X _o	Nva × 10 ^{$\frac{2}{3}$}	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	---	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg °C	°C	°C	°C
0	0.243	1.000	-----	0.0251	0.546	55.5	33.9	33.9
12	0.200	0.821	4.780	0.0208	0.503	65.8	36.9	34.7
24	0.173	0.710	3.000	0.0181	0.476	72.8	43.6	37.6
36	0.154	0.635	2.110	0.0162	0.457	77.1	49.9	41.8
48	0.141	0.580	1.440	0.0149	0.444	81.8	59.9	45.0
60	0.132	0.545	1.000	0.0140	0.435	84.9	74.9	50.4

EXPERIMENTO 21

$$\begin{aligned}
 T_{bs} &= 32.0 \text{ }^{\circ}\text{C} & W_s &= 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg} \\
 T_{bu} &= 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C} & W_g &= 4.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg} \\
 Y &= 0.0190 \text{ kg/kg} & J &= 0.030 \\
 d_p &= 8.7 \text{ mm} & X_o &= 0.240 \text{ kg/kg b.s.} \\
 T_g &= 90.2 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{PTS} &= "B"
 \end{aligned}$$

Z	X	X/X _o	Nva × 10 ^{$\frac{2}{3}$}	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	Kg/Kg	---	Kg/seg m	Kg/Kg	Kcal/Kg °C	°C	°C	°C
0	0.240	1.000	---	0.0230	0.543	78.2	31.2	31.2
12	0.203	0.845	1.73	0.0220	0.506	81.1	37.1	39.3
24	0.176	0.732	1.26	0.0210	0.479	84.0	44.5	47.5
36	0.150	0.625	1.21	0.0200	0.453	86.7	52.3	52.9
48	0.131	0.545	0.89	0.0194	0.434	88.6	61.1	61.9
60	0.118	0.490	0.61	0.0190	0.421	90.2	70.5	70.8

EXPERIMENTO 22

$T_{bs} = 32.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$
 $T_{bu} = 24.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $W_g = 4.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$
 $Y = 0.0170 \text{ kg/kg}$ $J = 0.030$
 $dp = 8.7 \text{ mm}$ $X_o = 0.241 \text{ kg/kg b.s.}$
 $T_g = 80.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $PTS = "B"$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.241	1.000	-----	0.0206	0.544	70.0	31.0	31.0
12	0.207	0.860	1.59	0.0195	0.448	72.9	35.1	34.9
24	0.183	0.760	1.12	0.0187	0.431	75.1	39.3	39.5
36	0.162	0.673	0.98	0.0180	0.416	77.0	43.6	43.3
48	0.145	0.600	0.79	0.0174	0.404	78.7	49.1	47.9
60	0.133	0.550	0.56	0.0170	0.396	80.0	55.0	54.3

EXPERIMENTO 23

$T_{bs} = 31.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$
 $T_{bu} = 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $W_g = 4.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$
 $Y = 0.0184 \text{ kg/kg}$ $J = 0.030$
 $dp = 4.7 \text{ mm}$ $X_o = 0.240 \text{ kg/kg b.s.}$
 $T_g = 69.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $PTS = "B"$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.240	1.000	-----	0.0215	0.543	61.6	31.0	31.0
12	0.210	0.875	1.40	0.0205	0.513	64.1	33.1	32.7
24	0.187	0.780	1.10	0.0197	0.434	66.2	36.1	35.7
36	0.170	0.710	0.79	0.0192	0.422	67.6	40.1	39.3
48	0.156	0.650	0.65	0.0187	0.412	69.1	44.2	44.6
60	0.148	0.615	0.37	0.0184	0.407	69.9	48.6	46.1

EXPERIMENTO 24

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$T_{bu} = 23.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 4.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$Y = 0.0160 \text{ kg/kg}$$

$$J = 0.030$$

$$dp = 8.7 \text{ mm}$$

$$X_o = 0.242 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$T_g = 60.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	---	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.242	1.000	---	0.0183	0.545	53.1	29.7	29.7
12	0.218	0.901	1.12	0.0173	0.521	55.5	30.4	29.5
24	0.203	0.839	0.70	0.0169	0.506	57.2	32.1	41.2
36	0.190	0.785	0.61	0.0165	0.493	58.4	35.6	45.3
48	0.180	0.744	0.47	0.0162	0.483	59.3	38.3	48.7
60	0.173	0.715	0.33	0.0160	0.476	60.0	42.2	52.6

EXPERIMENTO 25

$$T_{bs} = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 7.9 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$$

$$T_{bu} = 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 3.03 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$Y = 0.0180 \text{ kg/kg}$$

$$J = 0.026$$

$$dp = 8.7 \text{ mm}$$

$$X_o = 0.242 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$T_g = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	---	k/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.242	1.000	---	0.0224	0.545	78.0	33.0	33.0
12	0.190	0.785	1.52	0.0210	0.493	81.5	36.3	35.5
24	0.149	0.616	1.20	0.0200	0.452	84.3	43.2	44.1
36	0.115	0.475	1.00	0.0192	0.418	86.5	51.3	51.3
48	0.090	0.372	0.73	0.0185	0.393	88.7	60.0	64.4
60	0.070	0.300	0.59	0.0180	0.373	90.0	69.3	68.3

EXPERIMENTO 26

$$T_{bs} = 33.0 \pm 0.1$$

$$T_{bu} = 26.0 \pm 0.1$$

$$Y = 0.0198 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.7 \text{ mm}$$

$$T_g = 90.3 \pm 0.1$$

$$W_s = 3.43 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.03 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.011$$

$$X_0 = 0.240 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X ₀	Nva × 10 ² ₃	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg °C	°C	°C	°C
0	0.242	1.000	---	0.0237	0.545	79.7	29.4	29.4
12	0.159	0.657	1.54	0.0223	0.462	83.2	34.0	32.6
24	0.094	0.388	1.21	0.0212	0.397	86.1	42.1	43.6
36	0.041	0.169	1.00	0.0203	0.344	88.4	51.3	50.5
48	0.018	0.074	0.42	0.0199	0.321	89.5	62.1	59.3
60	0.012	0.050	0.11	0.0198	0.315	90.3	74.3	88.0

EXPERIMENTO 27

$$T_{bs} = 32.0 \pm 0.1$$

$$T_{bu} = 24.5 \pm 0.1$$

$$Y = 0.0175 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 7.2 \text{ mm}$$

$$T_g = 80.0 \pm 0.1$$

$$W_s = 1.261 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 4.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.030$$

$$X_0 = 0.241 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X ₀	Nva × 10 ² ₃	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg °C	°C	°C	°C
0	0.241	1.000	---	0.0209	0.544	70.5	30.9	30.9
12	0.205	0.850	1.68	0.0198	0.508	73.4	34.2	35.0
24	0.161	0.750	1.12	0.0191	0.484	75.3	38.4	38.8
36	0.161	0.668	0.93	0.0185	0.464	77.0	43.2	43.4
48	0.142	0.589	0.89	0.0179	0.445	78.7	49.0	48.4
60	0.130	0.539	0.56	0.0175	0.433	80.0	55.2	54.8

EXPERIMENTO 28

$T_{bs} = 31.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{bu} = 22.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $Y = 0.0141 \text{ kg/kg}$
 $dp = 8.3 \text{ mm}$
 $T_g = 90.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$W_s = 3.430 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$
 $W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$
 $J = 0.011$
 $X_o = 0.242 \text{ kg/kg b.s.}$
 $PTS = "B"$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.242	1.000	----	0.0171	0.545	82.2	44.3	44.3
12	0.159	0.656	1.05	0.0162	0.462	84.4	48.6	47.1
24	0.094	0.387	0.83	0.0155	0.397	86.2	55.7	54.8
36	0.040	0.167	0.69	0.0144	0.343	89.0	66.1	61.0
48	0.018	0.074	0.28	0.0142	0.321	89.6	74.1	70.8
60	0.012	0.051	0.08	0.0141	0.315	90.1	88.9	88.8

EXPERIMENTO 29

$T_{bs} = 27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{bu} = 19.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $Y = 0.0116 \text{ kg/kg}$
 $dp = 9.9 \text{ mm}$
 $T_g = 80.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$W_s = 3.00 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$
 $W_g = 3.03 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$
 $J = 0.099$
 $X_o = 0.245 \text{ kg/kg b.s.}$
 $PTS = "R-NR 3007"$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.245	1.000	---	0.0323	0.548	34.3	32.1
12	0.179	0.730	7.34	0.0258	0.482	45.8	38.1
24	0.135	0.550	4.90	0.0214	0.438	56.6	54.2
36	0.094	0.385	4.50	0.0174	0.398	70.7	63.6
48	0.060	0.245	3.81	0.0140	0.363	77.1	68.7
60	0.036	0.145	2.72	0.0116	0.339	80.1	73.3

EXPERIMENTO 30

$$T_{bs} = 28.0 \pm 0.1$$

$$T_{bu} = 19.2 \pm 0.1$$

$$Y = 0.0115 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.1 \text{ mm}$$

$$T_g = 79.9 \pm 0.1$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.099$$

$$X_o = 0.242 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva × 10 ² ₃	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg °C	°C	°C
0	0.242	1.000	---	0.0326	0.545	35.1	31.8
12	0.176	0.726	8.04	0.0260	0.479	47.0	36.8
24	0.115	0.475	7.36	0.0197	0.418	56.9	53.1
36	0.065	0.270	6.02	0.0148	0.369	70.8	62.1
48	0.044	0.180	2.63	0.0123	0.347	76.0	67.1
60	0.038	0.156	0.70	0.0115	0.341	79.9	72.1

EXPERIMENTO 31

$$T_{bs} = 30.0 \pm 0.1$$

$$T_{bu} = 21.0 \pm 0.1$$

$$Y = 0.0130 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.0 \text{ mm}$$

$$T_g = 70.9 \pm 0.1$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.099$$

$$X_o = 0.248 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva × 10 ² ₃	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg °C	°C	°C
0	0.248	1.000	-----	0.0338	0.551	34.3	33.0
12	0.190	0.765	7.070	0.0260	0.493	38.6	36.2
24	0.141	0.570	5.860	0.0232	0.445	46.8	41.8
36	0.100	0.403	4.600	0.0191	0.397	55.0	48.1
48	0.064	0.254	4.110	0.0154	0.365	63.4	56.5
60	0.039	0.157	2.680	0.0130	0.345	70.9	62.8

EXPERIMENTO 32

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 20.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.012 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.0 \text{ mm}$$

$$T_g = 60.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.099$$

$$X_o = 0.248 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva x 10 ² ₃	Y	Cs	Tg	Tse
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg	°C	°C
0	0.248	1.000	-----	0.0309	0.551	33.1	32.0
12	0.190	0.766	7.030	0.0252	0.493	35.6	34.7
24	0.146	0.589	5.330	0.0208	0.449	38.9	37.2
36	0.108	0.436	4.580	0.0171	0.411	43.6	41.1
48	0.076	0.308	3.850	0.0140	0.380	52.1	50.1
60	0.055	0.225	2.480	0.0120	0.359	60.2	57.1

EXPERIMENTO 33

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.0158 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.1 \text{ mm}$$

$$T_g = 80.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 2.300 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.130$$

$$X_o = 0.24 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva x 10 ² ₃	Y	Cs	Tg	Tse
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg	°C	°C
0	0.246	1.000	---	0.0428	0.549	34.1	32.0
12	0.181	0.736	7.21	0.0343	0.484	46.1	41.6
24	0.119	0.484	6.89	0.0262	0.422	55.3	50.1
36	0.071	0.288	5.37	0.0199	0.374	69.1	58.9
48	0.047	0.189	2.70	0.0167	0.350	75.8	73.1
60	0.040	0.161	0.77	0.0158	0.343	80.1	75.1

EXPERIMENTO 34

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$T_{bu} = 21.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 4.000 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$Y = 0.0140 \text{ kg/kg}$$

$$J = 0.075$$

$$dp = 8.0 \text{ mm}$$

$$X_o = 0.241 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$T_g = 79.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$PTS = \text{'R-NR 3007'}$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.251	1.000	-----	0.0301	0.554	36.1	32.8
12	0.176	0.700	8.37	0.0245	0.479	47.9	46.8
24	0.113	0.450	6.97	0.0198	0.416	57.1	53.2
36	0.062	0.248	5.64	0.0160	0.365	72.0	59.9
48	0.043	0.170	2.17	0.0145	0.346	76.9	75.9
60	0.036	0.145	0.70	0.0140	0.340	79.8	76.1

EXPERIMENTO 35

$$T_{bs} = 30.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$T_{bu} = 20.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$Y = 0.0120 \text{ kg/kg}$$

$$J = 0.099$$

$$dp = 8.2 \text{ mm}$$

$$X_o = 0.244 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$T_g = 90.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$PTS = \text{'R-NR 3007'}$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.244	1.000	-----	0.0339	0.547	38.9	33.1
12	0.167	0.685	9.31	0.0263	0.470	52.3	39.1
24	0.104	0.427	7.64	0.0201	0.407	66.1	60.2
36	0.050	0.205	6.57	0.0147	0.353	84.1	73.3
48	0.026	0.105	2.96	0.0123	0.329	87.2	83.1
60	0.023	0.094	0.32	0.0120	0.326	90.2	87.3

EXPERIMENTO 36

$$T_{bs} = 28.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 19.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.0118 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.1 \text{ mm}$$

$$T_g = 69.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 1.500 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.050$$

$$X_o = 0.254 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	---	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.254	1.000	---	0.0311	0.557	31.1	32.2
12	0.171	0.674	7.68	0.0243	0.474	34.0	34.0
24	0.107	0.420	5.97	0.0190	0.410	44.0	42.3
36	0.054	0.213	4.87	0.0147	0.347	53.1	51.0
48	0.024	0.095	2.77	0.0122	0.327	61.8	60.0
60	0.020	0.078	0.41	0.0118	0.323	69.9	64.6

EXPERIMENTO 37

$$T_{bs} = 29.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.015 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.1 \text{ mm}$$

$$T_g = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 4.0 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.03 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.132$$

$$X_o = 0.246 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = \text{"R-NR 3007"}$$

Z	X	X/X _o	Nva $\times 10^{\frac{2}{3}}$	Y	Cs	T _g	T _{se}
cm	kg/kg	--	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0	0.246	1.000	---	0.0364	0.549	37.0	32.7
12	0.194	0.790	6.70	0.0296	0.498	40.0	34.8
24	0.151	0.614	5.60	0.0239	0.454	48.0	40.1
36	0.122	0.495	3.80	0.0200	0.425	56.1	47.1
48	0.099	0.404	2.90	0.0170	0.403	63.8	54.4
60	0.084	0.342	2.00	0.0150	0.387	70.0	61.0

EXPERIMENTO 38

$$T_{bs} = 31.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{bu} = 22.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Y = 0.0141 \text{ kg/kg}$$

$$dp = 8.5 \text{ mm}$$

$$T_g = 85.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_s = 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

$$W_g = 3.030 \times 10^{-2} \text{ kg/seg}$$

$$J = 0.099$$

$$X_0 = 0.243 \text{ kg/kg b.s.}$$

$$PTS = "B"$$

Z	X	X/X ₀	Nva × 10 ² 3	Y	C _s	T _g	T _{se}	T _{sc}
cm	kg/kg	-	kg/seg m	kg/kg	kcal/kg	°C	°C	°C
0	0.243	1.000	-	0.0254	0.546	55.6	33.8	33.8
12	0.201	0.827	4.670	0.0212	0.504	65.7	36.8	34.8
24	0.174	0.716	3.000	0.0185	0.477	72.5	43.5	36.7
36	0.150	0.617	2.670	0.0161	0.453	78.8	49.8	39.7
48	0.138	0.568	1.330	0.0149	0.441	82.0	59.8	41.5
60	0.130	0.535	0.890	0.0141	0.433	85.0	74.8	46.2

APÊNDICE E

Com a ajuda de um micro-computador Apple, modelo Micro engenho, marca Scopus, todas as curvas de umidade residual versus tempo foram ajustadas por mínimos quadrados com polinômios de quinto grau (eq. E.1), obtendo coeficientes de correlação próximos de um.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = C_0 + C_1.t + C_2.t^2 + C_3.t^3 + C_4.t^4 + C_5.t^5 \quad (E.1)$$

Este tipo de equação não é muito útil para o projeto ou compreensão da secagem, mas resulta de grande utilidade no cálculo da taxa de secagem, a partir do cálculo da derivada com um programa simples executado em um micro-computador modelo 1-7000 junior, marca Itautec.

Na tabela E.1 são mostrados alguns dos coeficientes das equações, assim como os coeficientes de correlação de algumas experiências.

	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	² r
Exp. 1	0.9882	-0.1213	6.3E-03	-1.6E-04	1.9E-06	-8.8E-09	0.998
Exp. 2	0.9989	-0.0878	3.3E-03	-6.2E-05	5.6E-07	-2.0E-09	0.999
Exp. 3	0.9980	-0.0690	1.99-03	-2.6E-05	1.3E-07	-4.2E-11	0.999
Exp. 4	0.9960	-0.0520	1.2E-03	-1.8E-05	1.7E-07	-8.7E-10	0.999
Exp. 8	0.9920	-0.1070	5.0E-03	-1.1E-04	1.3E-06	-5.5E-09	0.998
Exp. 9	0.9800	-0.1100	5.5E-03	-1.4E-04	1.7E-06	-7.8E-09	0.989
Exp.15	0.9987	-0.0170	4.3E-04	-1.6E-05	2.8E-07	-1.7E-09	0.999

Tabela E.1 Valores das constantes dos polinômios de 5º grau das curvas de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUERRE, R.J., SUAREZ, C. e VIOLLAS, P.E. (1982), "Drying Kinetics of Rough Rice Grain", *Journal of Food Technology*, 17:679-686.
- 2 AGUERRE, R.J., SUAREZ, C. e VIOLLAS, P.E. (1984), "Analysis of the Interface Conditions During Drying of the Rice", *Journal of Food Technology*, 19:315-323.
- 3 AGUERRE, R.J., GABITTO, J.F. e 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.
17:679-686.
- 4 AGUILERA, J.M., KOSIKOWSKI, F.V. e HOOD, L.F. (1976), "Ultrastructural Changes Occurring During Thermoplastic Extrusion of Soybean Grits", *Journal of Food Science*, 41:1209-1213.
- 5 ALVAREÇA, L.C., FORTES, M., BORGES, J. e HARA, T. (1980), "Transporte de Umidade no Interior de Grãos de Feijão Preto Sob Condições de Secagem", *Rev. Brasileira de Armazenamento, Viçosa*, 5(1): 5-18, (1980).
- 6 ALZAMORA, S.M. e CHIRIFE, J. (1980), "Some Factors Controlling the Kinetics of Moisture Movement During Avocado Dehydration". *Journal of Food Science*, 45, 1649-1651.
- 7 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.
- 8 BARRE, H.J., BAUGHMAN, G.R. e HANDY, M.Y. (1971), "Application of the Logarithmic Model to Cross-flow Deep-bed Grain Drying. Transactions of the ASAE.
 - 9 BECKER, H.A. (1958), "An Interpretation of the Moisture desorption Isotherm of Wheat. Canadian Journal of Chemistry, 36, 1416-1423.
 - 10 BECKER, H.A. e SALLANS, H.R. (1955), "A Study of Internal Moisture Movement in the Drying of the Wheat Kernel. Cereal Chemistry, 32, 212-226.
 - 11 BRIAN, R. (1976), "Textured Protein Products", Journal Am. Oil Chemists' Soc., 53:325-326.
 - 12 BUENO Z.A.C. (1982), Tecnologia Industrial, Produtos de Soja, Leite, Farinha e outros.
 - 13 CAMPOS, G.R. e MENEGALLI, F.C. (1987), "Secado de Proteína de Soja em Leito Fluidizado. I. Estudo de la Fluidodinámica del Lecho", apresentado para publicação na Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos.
 - 14 CHU, S.T. e HUSTRULID, A. (1968), "Numerical Solution of Diffusion Equation. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 11:705-08.
 - 15 COUTINHO, P.L., MEDEIROS, J.L. e MASSARANI, G. (1982), Secagem de Grãos em Fluxos Cruzados. Anais do X ENEMP, S. Carlos, Outubro.
 - 16 COUTINHO, P.L., MEDEIROS, J.L. e MASSARANI, G. (1983), Res-

friador de Grãos em Leito Deslizante e Fluxos Contra-correntes. Anais do IV Encontro Nacional de Secagem. Viçosa, -Março.

- 17 CUMMING,D.B., STANLEY,D.W. e De MAN, J.M. (1972), "Texture-structure Relationships in Texturized Soy Protein. II. Textural Properties and Ultrastructured of un Extruded Soybean Product". Can. Inst. Food Sci. Technol. Journal, 5(3): 124-128.
cional de Secagem. Viçosa M.G., p.3 Julho.
- 18 DALSPAQUALE,V.A. e BAKKER-ARQUEMA F.W. (1981), "Secagem de Soja em Secadores Contínuos". Anais do III Encontro Nacional de Secagem. Viçosa M.G., p.3 Julho.
- 19 DASCULESCU,A. (1969), Le Séchage et ses Applications Industrielles, traduit par A. PANAITESCO, DUNOD, Paris, France.
- 20 DEL VALLE,F. e NICKERSON, J.T.R. (1968). Salting and Drying Fish. 3 Diffusion of Water, Journal of Food Science, 33: 499-503.
- 21 DIN. (1965), Normas para Medidores de Vazão Tipo Orifício (tradução Viera, R.C.C.) USP-SC.
- 22 ESCARDINO,A., RUIZ,F. e MIRA,F.(1971), "Mecanismo y Cinética del Secado del Maiz en Grano con Aire Caliente" A.T.A. Vol 11. num. 4, Diciembre.
- 23 FARINATI, L.E. e SUAREZ, C. (1984), "Technical Note: A Note on the Drying Behavior of Cotton Seed", Journal of Food Technology, 19: 739-744.

- 24 FINZER, J.R.D. (1984), Secagem de Fatias de Cebola em Leito Vibro-Fluidizado. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, 134 p. Tese (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas.
- 25 FONSECA O.V. (1979) Estudo de Secagem de Sementes de Sorgo em Leito Fixo. São Paulo, Escola Politécnica. Tese (Mestrado)- Universidade de São Paulo.
- 26 FORTES, M. e OKOS, M.R. (1981a), "Heat and Mass transfer in hygroscopic capillary extruded products", *AIChE Journal*, 27(2): 255-262.
- 27 FORTES, M. e OKOS, M.R. (1981b), "A Non-equilibrium Thermodynamics Approach to Transport Phenomena in Capillary Porous Media", *Transactions of the ASAE*, 24(3): 756-760.
- 28 FOUST, A.S., WENSEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L. e ANDERSEN, B. (1982), *Princípios das Operações Unitárias*, Segunda edição, traduzido por H. MACEDO, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ.
- 29 GABITTO, J.F. e AGUERRE R.J. (1985), "Solucion Numerica del Proceso de Secado com Cambio de Volumen". *Revista Latinoamericana de Transferencia de Calor y Materia*. 9: 231-240.
- 30 HANSEN, J.R. (1978a), "Dehydration and Hydration Kinetics of Soybean Proteins". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 26, 2, p.297-301.
- 31 HANSEN, J.R. (1978b), "Hydration of Soybean Protein 2. Effect of Isolation Method and Various Other Parameters on Hydration". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 26,2, p.301-304.

- 32 HARPER, J.M. (1986), "Extrusion Texturization of Foods".
Food Technology, 40(3): 70-76.
- 33 HENDERSON, S.M. (1974), "Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 17
1167-8; 1172.
- 34 HILL, C.G. (1977), An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design. Copyright. by John Wiley & Sons, Inc.
- 35 HOLDSWORTH, S.D. (1971), "Dehydration of Food Products". A Review. Journal of Food Technology 6, 331-370.
- 36 HUSAIN, A., CHEN, C.S., CLAYTON, J.T. e WHITNEY, L.F.
(1972), "Mathematical Simulation of Mass and Heat Transfer in High Moisture Foods. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 15: 732-6.
- 37 IGUTI, F. e MENEGALLI, F.C. (1987), Determinação de Isotermas de Sorção de Produtos Alimentícios, Relatório para a FAPESP, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, SP.
- 38 JASON, A.C. (1965), "Effects of Fat Content on Diffusion of Water in Fish Muscle". Journal of the Science of Food and Agricultural, 16: 281-288.
- 39 JOWIT, R. (1983), Physical Properties of Food, Applied Science Pub London and New York.
- 40 KEEY, R.B. (1975), Drying: Principles and Practice, First Edition Reprinted, Pergamon Press, Exiter, G.B.
- 41 KEEY, R.B. (1980), Introduction to Industrial Drying Operations. Pergamon Press. New York.

- 42 LABUZA, T.P. (1968), Sorption Phenomena in Foods. Food Technology, 22 (3), 263-273.
- 43 LEMANIK, J.F. e ZIEMBA, J.V. (1962), "Versatil Soy Flours". Food Engg, Radnor, 7:90-1.
- 44 LEVENSPIELD, O. (1972), Chemical Reactions Engineering. John Wiley and Sons Inc. p. 2207-259.
- 45 LEWIS, W.K. (1921), "The Rate of Drying of Solids Materials" Journal Ind. Eng. Chem, 13:427-38.
- 46 LUIKOV, A.V. (1966), Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. London, Pergamon Press, 523 p.
- 47 LUIKOV, A.V. (1968), Analitical Heat Diffusion Theory, 2nd Edition. Academic Press, New York.
- 48 MAZZA, G. e LE MAGUER, M. (1980), "Dehydration of Onion": Some Theorical and Practical Considerations. Journal of Food Technology. 15: 181-194.
- 49 MASSARANI, G. e VALENÇA, G.C. (1984), Secagem de Bagaço de Cana. Anais do 3º Encontro Brasileiro Sobre Secagem, Viçosa, julho.
- 50 MASSARANI, G. e VALENÇA, G.C., (1982), Secagem de Bagaço de Cana II. Trabalho Apresentado no 1º Congresso Latino-Americano de Transfêrencia de Calor e Massa, La Plata, Novembro.
- 51 Mc CREADY, D.W. e Mc CABE, W.L., (1933), "The Adiabatic Air Drying of Higroscopic Solids. Amer. Inst. Chem. Eng., 29: 131-4.
- 52 MEDEIROS, J.L. e MASSARANI, G. (1982), Secagem de Bagaço de Cana III. Anais do X ENEMP, S. Carlos, Outubro.

- 53 MEDEIROS, J.L., MASSARANI, G. DE ASUMPÇÃO G.B. (1983), Secagem de Grãos em Secador de Fluxos Cruzados II. Anais do XI ENEMP. Rio de Janeiro, Outubro.
- 54 MEDEIROS, J.L., MASSARANI G., (1983), Secagem de Bagaço de Cana IV. Anais do IV Encontro Nacional de Secagem. Março.
- 55 MEIRELLES, A.J.A. (1984), Secagem de Bagaço de Cana em leito fluidizado. Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas.
- 56 MUJUMDAR, A.S., (1981), Drying of Solids in the Chemical industries. Lecture Notes September.
- 57 MUJUMDAR, A.S., (1983), Notas de Aula, Curso de Secagem. DEQ-EPUSP, São Paulo.
- 58 MUSTAKAS, G.C., GRIFFIN, E.L., ALLEN, L.F. e SMITH, O.B. (1964), "Production and Nutritional Evaluation of Extrusion-Cooked Full-Fat Soybean Flour" Journal American Oil Chemical Chemical Soc., Champaign, 41: 607-14.
- 59 MUSTAKAS, G.C., ALBRECHT, W.J. BOOKWALTER, G.N., Mc GHEE, J.E., KWOLEK, W.F. e GRIFFIN, E.L. (1970), "Extruder-Processing to Improve Nutrition, Flavor and Keeping Quality of Full-Fat Soy Flour". Food Technology., Chicago, 24(11) : 102-8.
- 60 NONHEBEL, G. e MOSS, A.A.H. (1971), Drying of Solids in The Chemical Industry-Butterworth & Co. Ltd., G.B.
- 61 OWER, E. e PANKHURST, R.C. (1977), "The Measurement of Air Flow. 5ed. London, Pergamon Press.
- 62 PALUMBO, S.A., KOMANOSKY, M., METZGER, V. e SMITH, J.L. (1977). "Kinetics of Pepperoni Drying. Journal of Food Science, 42, 1030-1033.

- 63 PÉCORA, A.A.B. (1985), Estudo Experimental do Escoamento Gás-Sólido em Fase Diluída com Transferência de Calor e Massa. Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas.
- 64 PERRY, R.H.e CHILTON, C.H. (1980), Manual de Engenharia Química, 5ta. Edição, traduzido por H. MACEDO, Guanabara dois, Rio de Janeiro. R.J.
- 65 PITKIN, C. e CORSTUSEN, J.T. (1973), "Moisture Content of Granulations". Journal of Pharmaceutical Sciences, 62, 1215-1215.
- 66 PRABIR, K. CHANDRA e PAUL SINGH. (1984), "Thin Drying of Parboiled Rice at Elevated Temperatures" Journal of Food Science 49: 905-909.
- 67 RAKOSKY, J. (1970), "Soy Products for the Meat Industry", Journal of Agricultural Food Chemistry, 18(6):1005-1009.
- 68 RHA, C. (1975), Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Material. Series in Food Material Science-Vol, 1. D. Reidel Publishing Company, USA.
- 69 SALWIN, H. e SLAWSON, V. (1959), "Moisture Transfer in Combinations of Dehydrated Foods. Food Technology 13, 715-718.
- 70 SARAVACOS, G.D. e CHARM, S.E. (1962), "A Study of the Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration". Food Technology 17: 78-81.
- 71 SCOTT, W.J. (1957), "Water Relations of Food Spoilage Microorganisms". Advances in Food Research, 7, 83-127.
- 72 SHERWOOD, T.K. (1929), "The Drying of Solids". The Journal

- Industrial and Engeneering Chemistry., 21: 12-16.
- 73 SIMMONDS, W.H.C., WARD, G.T. e Mc EWEN, E. (1953), The Drying of Wheat Grain . Part II: "Trough-drying of Deep beds". Trans. Inst. Chem. Eng., 31: 279-88.
 - 74 SMITH, A.K. e CIRCLE, S.J. (1972), Soybeans: Chemistry and Technology Proteins. West Port, Connecticut, AVI Publishing Co., V.I.
 - 75 SOBRAL, P.J. (1987), Secagem de Sangue Bovino Incorporado a Proteína Texturizada de Soja em Leito Fluidizado e em Leito Fixo. Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas.
 - 76 SPIESS, W.E.L. e 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.
 - 77 STANISH, M.A., SCHAJER, G.S. e KAYRHAN, F. (1986), "A Mathematical Model of Drying for Hygroscopic Porous Media", AIChE Journal, 32(8):1301-1311.
 - 78 STANLEY, D.W. (1986), "Chemical and Structured Determinants of Texture of Fabricated Foods", Food Technology, 40(3): 65-68, 76.
 - 79 STEFFE, J.F. e SINGH, R.P. (1980), "Liquid Diffusivity of Rough Rice Components, Transations of ASAE , 23(3). 767.
 - 80 SUAREZ, C., CHIRIFE J. e VIOLLAZ P.E. (1980), "Difussional Analysis of Air Drying of Grain Sorghum", Journal of Food Technology, 15: 523-531.
 - 81 TREYBAL, R.E. (1981), Mass Transfer Operations, Third Edi -

- tion, Mc Graw-Hill International Book Company, Tokio Japan.
- 82 TSAO, G.T. e WHEELLOCK, T.D. (1967), "Drying Theory and Calculations". Chemical Engeniering, 74, 201-214.
 - 83 TUCHY, T. (1980), "Physical Properties of Textured Whey Protein II. Bulk Density, Water Binding Capacity and Protein Solubility". Journal of Food Science Technology., 4(2): 111-123.
 - 84 VACAREZZA, L.M., LOMBARDI, J.L. e CHIRIFE, J. (1974a), "Kinetics of Moisture Movement During Air Drying of Sugar Beet Root". Journal of Food Technology, 9, 317-327.
 - 85 VACAREZZA, L.M., LOMBARDI, J.L. e CHIRIFE, J. (1974b), "Heat Transfer Effects on Drying Rate of Food Dehydration". The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 52, October.
 - 86 VAN ARSDEL, W.B. (1947), "Approximate Difusion Calculations for the Falling-Rate Phase of Drying". Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 43: 13-24.
 - 87 VANECEK, V., MARKVART, M. e DRBOHLAV, R. (1966), "Fluidized Bed Drying". English Translation by J. LANDAU, Leonard Hill, London GB.
 - 88 WOLF, W.J. (1970), "Soy Beans Proteins Their Functional Chemical and Physical Properties". J. Agr. food Chem., 5.1., 18(6). 967-76.
 - 89 WOOD, P.S. e FRANKLIN, J.F. (1974). "Texturized Soya Proteins", Food Processing Industries, : 32-34.
 - 90 YOUNG, J.F. (1967), "Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solutions- A Review". J. Appl. Chem, 17, 241-245.