



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Área de Concentração em Engenharia de Processos**

**ESTUDO DE UM SECADOR ATMOSFÉRICO
POR CONTATO INDIRETO COM AGITAÇÃO MECÂNICA**

Autora: Kiki Pinheiro de Melo
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

Dissertação submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Campinas – SP
Julho - 2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	DC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	M491e
V	EX
TOMBO BCI	52534
PROC.	6-129/03
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	13/03/02
Nº CPD	

CM001B0707-0

BIB ID 283924

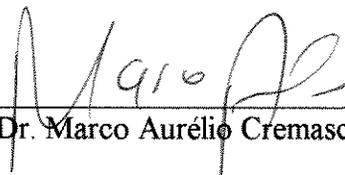
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M491e Melo, Kiki Pinheiro
 Estudo de um secador atmosférico por contato
 indireto com agitação mecânica / Kiki Pinheiro Melo.--
 Campinas, SP: [s.n.], 2002.

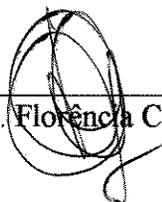
 Orientador: Marco Aurélio Cremasco.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

 1. Pressão atmosférica. 2. Café - Pesquisa. 3.
 Secagem. 4. Aparelho de secar. I. Cremasco, Marco
 Aurélio. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Dissertação de Mestrado defendida por **Kiki Pinheiro Melo** e aprovada em 30 de julho de 2002 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

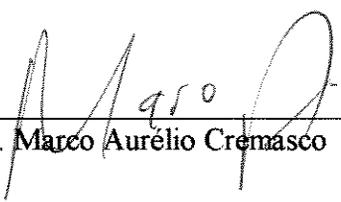


Profa. Dra. Flôrcia Cecilia Menegalli



Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, defendida por Kiki Pinheiro Melo e aprovada pela comissão julgadora em 30/12/2002.



Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

A DEUS, por tudo que representa na minha vida.

A minha mãe, por sempre me ensinar a olhar pra frente e nunca deixar de desistir dos meus sonhos.

Ao meu pai pelo apoio e preocupação de me dar uma boa educação.

Ao meu irmão, pelo apoio, amor e incentivo.

Ao Nazareno de Pina Braga pela dedicação, ajuda, incentivo e amor dado em todo o trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco por acreditar e confiar em mim, pela sua ajuda e orientação.

A minha família e a Igreja Batista Nova Esperança pelas orações e palavras de incentivo.

Aos professores Lênio José Guerreiro de Faria, Cristiane Maria Leal Costa e Samira Leão pelos estímulos fundamentais para que eu conseguisse chegar até aqui.

A todos os colegas da FEQ e principalmente aos meus amigos Édler, Fábio, Francisléo, Genita, Gessie, Giselle, Layse, Lecsi, Rosalinda e Stephen que sem dúvida me ajudaram a ultrapassar as barreiras e por contar em todas as circunstâncias.

Aos técnicos Alexandre e Levi que por meio dos seus conhecimentos foram os responsáveis pelo funcionamento do equipamento e ao Celso pela ajuda na realização das análises físicas e térmicas da matéria-prima.

Ao Restaurante do Instituto de Artes e a Lanchonete Tropicaliente por conceder o pó de café.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado.

A todos que direta e indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho é estudado um secador atmosférico por contato com agitação mecânica, por intermédio da obtenção de curvas de cinética e de fluxo de secagem sob diversas condições operacionais de carga úmida de material, temperatura de aquecimento da superfície metálica, intensidade de agitação mecânica do material úmido e diâmetro da partícula. Os materiais de teste foram o pó de café (após a primeira extração) e esferas de vidro. Os resultados da cinética de secagem apresentaram um período constante de remoção de umidade e justificaram que o secador pode ser utilizado na secagem de materiais com características similares a esfera de vidro e ao pó de café. Já as curvas de fluxo de secagem experimentais foram comparadas com um modelo encontrado na literatura, que é baseado na teoria da penetração. Tais curvas ajustaram-se razoavelmente somente para as esferas de vidro enquanto que para o pó de café este modelo não se ajustou. Por meio de um planejamento experimental 2^3 somente para o pó de café, verificou-se que, para a variável de resposta umidade final do material, as variáveis independentes temperatura da placa de aquecimento e carga de material apresentaram significância estatística. Já para a variável temperatura final do material somente a temperatura da placa apresenta significância.

Palavras-chave: secador por contato, secagem, pó de café, esferas de vidro.

ABSTRACT

In the present work an atmospheric contact dryer agitated mechanically by scrapers was studied through its drying kinetics and drying flux curves under several operating parameters (material load, plate temperature, rotation speed and particle diameter). Coffee grounds after extraction and glass spheres were used as test materials. The results of the drying kinetics presented a constant period of moisture removal, justifying the fact that the dryer can be used for drying of particulate materials with similar properties. The drying experimental fluxes were also compared with a model found in the literature, which is based on the penetration theory. Such fits were adjusted reasonably only for the spheres of glasses while for coffee grounds the model didn't adjust. Using a 2^3 experimental planning only for the coffee grounds, was observed that the plate temperature and material load affected the final moisture content of the particle and while the plate temperature affected the final temperature of the particles.

Keywords: contact dryer, drying, coffee grounds, glass spheres.

SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
Sumário	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Nomenclatura	xv
Capítulo 1- Introdução	1
Capítulo 2 - Revisão bibliográfica	3
2.1 Secagem	3
2.1.1 Curvas de secagem	3
2.1.1.1 Período de velocidade constante	5
2.1.1.2 Período de velocidade decrescente	5
2.1.1.3 Segundo período de velocidade decrescente	6
2.2 Secadores por contato	6
2.3. Mecanismo da secagem em equipamentos de contato indireto	8
Capítulo 3: Materiais e métodos	19
3.1 Materiais	19
3.2 Equipamentos	21
3.2.1 . Secador por contato com agitação mecânica	21
3.2.2 Acessórios	25
3.3 Procedimento experimental	26
3.4 Medidas experimentais e resultados esperados	27
3.5 Planejamento Fatorial	28
Capítulo 4 – Resultados e Conclusão	32
4.1 Perfil de temperatura da placa de aquecimento	32
4.2 Testes preliminares	34
4.3 Comparação entre o desempenho do secador com as esferas e com o pó de café	36
4.4 Análise das curvas de secagem	40
4.4.1 Resultados das esferas de vidro	41
4.4.2 Resultados para o pó de café	46
4.5. Comparação entre as curvas de fluxo de secagem experimentais e as do modelo	50

Sumário	x
4.6 – Planejamento experimental	54
Capítulo 5 – Conclusões e sugestões	58
5.1 – Conclusões	58
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros	59
Referências Bibliográficas	60
Apêndice A	63
Anexo	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva da cinética de secagem.	4
Figura 2.2	Curva de taxa de secagem.	4
Figura 2.3	Mecanismo de secagem com base no modelo de Schlünder e Mollekopf.	9
Figura 2.4	Ilustração para o cálculo da taxa de secagem dentro de um período de contato.	10
Figura 3.1	Esquema do equipamento de secagem.	21
Figura 3.2	Secador por contato.	22
Figura 3.3	Detalhe da Câmara de secagem.	22
Figura 3.4	Primeiro conjunto de pás utilizado.	22
Figura 3.5	Divisão da câmara de secagem para determinação do perfil de temperatura	23
Figura 3.6	Pás raspadeiras utilizadas nos testes.	24
Figura 3.7	Conjunto de pás utilizado para a secagem do pó de café.	24
Figura 3.8	Resultados esperados dos ensaios de secagem.	26
Figura 4.1	Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 60°C.	31
Figura 4.2	Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 70°C.	32
Figura 4.3	Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 95°C.	32
Figura 4.4	Curva da cinética de secagem de pó do café com 200 ml de água usando o conjunto de pás da Figura 3.5A	33
Figura 4.5	Curva da cinética de secagem do pó de café com 200 ml de água usando o conjunto de pás da Figura 3.5E	34
Figura 4.6	Curva da cinética de secagem do pó de café com 200 ml de água usando o conjunto de pás da Figura 3.5C	34
Figura 4.7	Comportamento da secagem de pó de café.	36

Lista de figuras	xii
Figura 4.8 Curva da cinética de secagem do pó de café.	37
Figura 4.9 Curva da cinética de secagem de esferas de vidro.	37
Figura 4.10 Comportamento da secagem da esfera de vidro.	38
Figura 4.11 Influência da temperatura da placa de aquecimento - esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 1 e 2.	41
Figura 4.12 Influência da carga (em base seca) de material – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 3 e 4.	42
Figura 4.13 Influência da agitação do material – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 2 e 4.	43
Figura 4.14 Influência do diâmetro da partícula – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 3 e 5.	44
Figura 4.15 Influência da temperatura da placa de aquecimento – pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 1 e 2.	46
Figura 4.16 Influência da carga (em base seca) de material – pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 1 e 2.	47
Figura 4.17 Influência da agitação do material - pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 2 e 4.	48
Figura 4.18 Influência da temperatura da placa de aquecimento - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.	50
Figura 4.19 Influência da carga de material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.	50
Figura 4.20 Influência da agitação do material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.	51
Figura 4.21 Influência do diâmetro da partícula - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.	51

Lista de figuras		xiii
Figura 4.22	Influência da temperatura da placa de aquecimento - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.	52
Figura 4.23	Influência da carga de material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.	52
Figura 4.24	Influência da agitação do material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tipos de secadores por contato.	7
Tabela 3.1	Propriedades físicas do pó de café.	18
Tabela 3.2	Constantes para a estimativa de C_p (faixa de aplicação: 20 a 100°C).	19
Tabela 3.3	Constantes para a estimativa de λ_p (faixa de aplicação: 20 a 100°C).	19
Tabela 3.4	Propriedades físicas e térmicas da esfera de vidro.	19
Tabela 3.5	Propriedades físicas da câmara de secagem.	19
Tabela 3.6	Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fatorial de experimentos.	29
Tabela 3.7	Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fatorial de experimentos.	30
Tabela 4.1	Condições experimentais para a esfera de vidro.	40
Tabela 4.2	Condições experimentais na secagem de pó de café.	45
Tabela 4.3	Matriz de experimentos e resultados do planejamento fatorial de experimentos.	54
Tabela 4.4	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta X_{final} .	54
Tabela 4.5	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta $T_{p,\text{final}}$.	55
Tabela 4.6	Análise da variância (ANOVA) para a variável de resposta X_{final} .	55
Tabela 4.7	Análise da variância (ANOVA) para a variável de resposta $T_{p,\text{final}}$.	56
Tabela 4.8	Coefficientes de regressão para X_{final} .	56
Tabela 4.9	Coefficientes de regressão para $T_{p,\text{final}}$.	56

NOMENCLATURA

Letras Latinas

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ - parâmetros ajustados pelo modelo empírico, adimensional;

A - área da superfície da placa de aquecimento, L^2 ;

C_s - coeficiente de irradiação do corpo negro, $F.L^{-1}.T^{-1}.t^{-4}$;

C_{Form} - fator de forma da partícula, adimensional;

c - capacidade calorífica, $F.L. M^{-1}.T^{-1}$;

c e m - valores dependentes da característica do agitador, adimensional;

d_p - diâmetro da partícula, L;

D - diâmetro da câmara de secagem, L;

$f(\zeta_r)$ - função distribuição do tamanho das partículas;

g - constante gravitacional, LT^{-2} ;

k - difusividade térmica, $L^2.T^{-1}$;

M - massa molecular, mol;

\bar{M} - massa de material, M;

\dot{m} - fluxo de evaporação, $M.L^{-2}.T^{-1}$;

N_{mis} - número de mistura, T^{-1} ;

P - pressão, $F.L^{-2}$;

Ph - número de mudança de fase, $L^{-1}.T.t^{-1}$;

\dot{q} - fluxo de calor, $M.L^{-2}.T^{-1}$;

R - raio da partícula, L;

\tilde{R} - constante dos gases, $F.L.mols^{-1}.t^{-1}$

t - tempo de secagem, T;

t_R - tempo de contato fictício, T;

t_{mis} - tempo de mistura, T;

T - temperatura, t;

X - teor de umidade do material, $M. M^{-1}$;

W - resposta do modelo para o projeto fatorial de experimentos, $M.M^{-1}$ ou t;

w_0 - carga de material, M;

Y_1, Y_2 e Y_3 - variáveis codificadas, adimensional;

z_T - localização da frente de secagem a partir da superfície de aquecimento, L.

Letras gregas

α - coeficiente de transferência de calor, $F.L^{-2}.T^{-1}.t^{-1}$;

δ - rugosidade da superfície da partícula, L;

ϵ_p - porosidade do “pó de café”, adimensional;

ϵ_H - emissão da superfície aquecida, adimensional;

ϵ_p - emissão da superfície da partícula, adimensional;

ζ - posição reduzida da frente de secagem, adimensional;

λ - condutividade térmica efetiva, $F.L^{-1}.T^{-1}.t^{-1}$;

ϕ_A - fator de alcance da superfície da placa, adimensional;

ϕ_K - área de contato superfície partícula relativamente achatada, adimensional;

ρ - massa específica aparente, $M.L^{-3}$;

Ω - velocidade de rotação, T^{-1}

γ - coeficiente de acomodação, adimensional;

ψ - fração de vazios, adimensional;

σ - caminho livre modificado das moléculas de gás, L;

ΔX - decréscimo do conteúdo de umidade no leito, $M.M^{-1}$;

ΔT - variação na temperatura do leito de secagem, t;

Δh_{ev} - entalpia de vaporização, $F.M^{-1}$.

Subscritos

D – fluxo molecular

G- vapor d’água

leito - leito

lat- latente

m - média

mis - mistura

0 - primeira camada da partícula

Nomenclatura

xvii

p - partícula

ps - partícula seca

rad- radiação

R – período de contato fictício

s - saturação

seco - seco

T- frente de secagem

w- parede

ws - parede do leito de secagem

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A secagem pode ser definida como uma operação unitária por meio da qual a água ou qualquer outro líquido é removido na forma de vapor de um material (OKADA et al., 1987). A remoção de umidade dá-se através do mecanismo de vaporização térmica, com temperaturas inferiores à de ebulição do líquido. Este processo fundamenta-se nos fenômenos de transferência de calor e de massa, em que o fornecimento de calor pode ocorrer por convecção, condução, radiação ou combinação entre tais fenômenos, que ocorrem sempre da superfície externa do material para seu o interior; exceto a secagem por radiação eletromagnética, em que um campo elétrico de alta frequência gera calor internamente no material, produzindo uma elevada temperatura dentro e na superfície deste.

Os secadores em que o fornecimento de calor ocorre por condução são chamados de secadores condutivos ou por contato. De acordo com GEVAUDAN e ANDRIEU (1991) e LOWE (1995), estes tipos de secadores, em geral, são utilizados para secar materiais granulados como produtos farmacêuticos, pós minerais, produtos agrícolas, gêneros alimentícios e pastas bem como no tratamento de despejos domésticos. A fonte condutiva de calor para o material a ser seco neste tipo de secador é uma superfície aquecida, ao contrário dos secadores convectivos que necessitam de uma corrente gasosa. Esta diferença de fornecimento de calor confere ao secador por contato um baixo fluxo de vapor e conseqüentemente uma alta eficiência energética em virtude da perda de energia para a corrente de gás de exaustão ser bastante reduzida. Além de uma alta eficiência energética os secadores por contato minimizam os riscos de explosão devido ao baixo teor de oxigênio produzido. Os secadores por contato são indicados na secagem de materiais sensíveis ao calor como produtos alimentícios e asseguram produtos higiênicos e de alta qualidade.

Visto que o Laboratório de Processos em Meios Porosos dispunha de um secador por contato similar a um dos encontrado no trabalho de SCHLÜNDER e

MOLLEKOPF (1984), ao mesmo tempo que, não havia nenhum conhecimento sobre o desempenho deste secador, foi então definido o objetivo desta dissertação.

A presente dissertação, em particular, objetiva avaliar um secador por contato indireto aberto à atmosfera com agitação mecânica no intuito de utilizá-lo, futuramente, na secagem de materiais nobres. Os materiais escolhidos para a realização dos testes foram o pó de café (após sua primeira extração) e esferas de vidro. O desempenho do equipamento foi avaliado mediante análise das curvas de secagem e de taxa de secagem, bem como o teor final de umidade e temperatura do material granulado seco em função da variação de diversos parâmetros operacionais, tais como: temperatura de aquecimento da superfície metálica, intensidade da agitação mecânica do material úmido e carga úmida da borra de café. Os resultados experimentais possibilitaram o estudo de planejamento fatorial o qual quantificará os efeitos dos parâmetros operacionais nas variáveis, umidade final e temperatura final do pó de café, já em forma de particulado sólido.

Além do estudo experimental, foi avaliado o modelo de SCHLÜNDER e MOLLEKOPF (1984), o qual descreve a secagem em equipamentos de contato indireto com a presença de agitação. Os resultados advindos do modelo, na forma de curvas de taxa de secagem, serão comparados com aqueles obtidos experimentalmente.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem

A secagem é uma operação relacionada, fenomenologicamente, à transferência simultânea de calor e de massa, em que a remoção de umidade ocorre devido ao fornecimento de energia ao material úmido, com a conseqüente umidificação do meio que o cerca. A intensidade da secagem é influenciada por diversos parâmetros operacionais, destacando-se a temperatura do agente aquecedor, carga e umidade do material a ser seco, umidade relativa do ar, e condições de velocidade do ar caso se tratar de um processo convectivo (STRUMILLO E KUDRA, 1986).

O fornecimento de calor ao material úmido e a conseqüente remoção de umidade pode ser feita de três modos. O calor pode ser adicionado por contato direto com um ar aquecido à pressão atmosférica e o vapor formado ser removido pelo ar. Indiretamente por contato com uma parede de metal, na qual a evaporação da água ocorre mais rapidamente quando comparada ao mesmo processo se conduzido à pressão atmosférica, e ou por radiação; bem como pela sublimação da água pelo material resfriado (GEANKOPLIS, 1993).

2.1.1 Curvas de Secagem

Os dados para a determinação de uma curva de secagem, são usualmente obtidos em condições de laboratório por meio da medida da mudança da massa de uma amostra de material com o tempo. Com os valores destas medidas, durante o processo de secagem, o teor de umidade e a taxa de secagem em base seca, podem ser estimados pelas equações 2.1 e 2.2, respectivamente:

$$X_{bs} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \quad (2.1)$$

$$R = -\frac{m_{SS}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2.2)$$

Mediante o gráfico dos dados de conteúdo de umidade do material durante o processo de secagem, em função do tempo, obtém-se, para a maioria dos materiais, a curva como a da Figura 2.1, onde se distinguem quatro regiões. A partir deste gráfico e por diferenciação (tomada em cada instante, a tangente do ponto), constrói-se um gráfico da velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade do material, em cada instante, obtendo-se uma curva como a da Figura 2.2, que é mais elucidativa que a primeira. As diferentes formas encontradas para estas curvas, de acordo com os diversos tipos de materiais, resultam das diferenças encontradas no mecanismo de secagem.

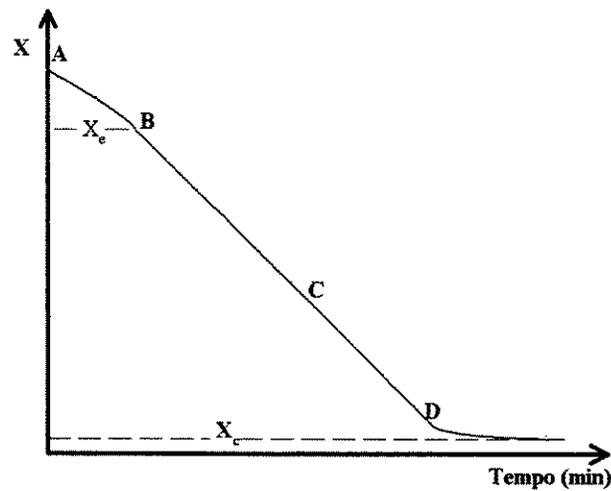


Figura 2.1 – Curva da cinética de secagem.

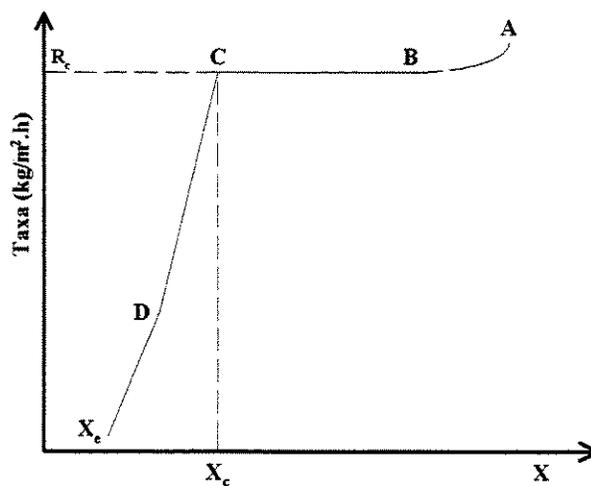


Figura 2.2 – Curva de taxa de secagem.

O período de tempo correspondente ao segmento AB corresponde ao período inicial da secagem. Apesar de a Figura 2.1 mostrar que a velocidade de secagem aumenta durante este período, pode-se encontrar processos de secagem em que a velocidade de secagem diminui. Neste caso, a curva típica seria o segmento A'B. O trecho BC corresponde ao período de velocidade constante. O ponto C corresponde ao fim do período de velocidade constante, tendo como coordenadas a velocidade constante de secagem (R_c) e a umidade crítica (X_c). O trecho de curva CD corresponde ao primeiro período de velocidade decrescente em que, na maioria dos casos, a velocidade de secagem decresce linearmente. Do ponto D em diante, tem-se o que se chama de segundo período de velocidade decrescente, em que a umidade do material diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições usadas. A partir deste momento, a velocidade de secagem é nula e não se tem mais secagem.

2.1.1.1 Período de velocidade constante

Este período é caracterizado pelo fato da velocidade de secagem ser independente da umidade total do material em cada instante. Durante este período, a superfície exposta do material está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o material.

Se o material não é poroso, a água removida neste período é principalmente a água superficial. Se, por outro lado, o sólido é poroso, o período de velocidade constante continua durante um tempo maior, com a água que é removida sendo substituída pela água do interior do sólido.

O período de velocidade constante pode não existir se o sólido a ser secado contiver um teor de umidade inferior à umidade crítica.

2.1.1.2 Período de velocidade decrescente

O primeiro período de velocidade decrescente (trecho CD das Figuras 2.1 e 2.2) começa no instante em que o material atinge o ponto de umidade crítica. Este ponto, indica o instante em que o movimento do líquido do interior do sólido para a superfície é insuficiente para manter um filme contínuo sobre a superfície do sólido. Desta forma, a superfície do material torna-se cada vez mais seca. No ponto D, onde termina o primeiro período de velocidade decrescente, praticamente não há nenhuma parte da superfície saturada de líquido.

2.1.1.3 Segundo período de velocidade decrescente

O conteúdo de umidade do material do ponto D em diante é tal que toda a evaporação ocorre no interior do material. Neste ponto começa o segundo período de velocidade decrescente, em que todo o vapor é retirado do sólido deve difundir-se por entre o sólido até a superfície e, em seguida por meio da corrente gasosa.

Quando se atinge a umidade de equilíbrio, não se tem mais secagem e a velocidade de secagem cai a zero. A umidade de equilíbrio é alcançada quando a pressão de vapor na superfície do sólido for igual à pressão do vapor na fase gasosa.

2.2 Secadores por contato

De modo geral e no que se refere aos equipamentos destinados à secagem, estes podem ser classificados, segundo STRUMILLO E KUDRA (1986), de acordo com o método de aquecimento (direto ou indireto); de operação (contínuo ou descontínuo); pressão empregada (atmosférica ou à vácuo); forma de alimentação; condições fluidodinâmicas (com material estacionário, material em movimento ou disperso); sistema utilizado para o fornecimento de calor (condução, convecção, radiação ou dielétrico).

Os secadores por contato indireto, em geral, são utilizados para secar materiais granulares como produtos farmacêuticos, pós minerais, produtos agrícolas, gêneros alimentícios e pastas (GEVAUDAN E ANDRIEU, 1991).

Na Tabela 2.1, estão apresentados os principais tipos de secadores por contato, destacando-se o tipo de operação (em batelada ou contínua), o tipo de câmara de secagem (a vácuo ou aberta à atmosfera), a produtividade e a aplicação típica (material úmido a ser seco). O mecanismo de transferência de calor neste tipo de secador, cujo um de seus exemplares pretende-se utilizar na presente dissertação, baseiam-se no fornecimento de calor via condução de uma superfície metálica para o material a ser seco.

Com a finalidade de promover uma secagem mais uniforme, o material pode ser mecanicamente agitado, quer seja por tambores rotativos ou por colocação de pás raspadeiras ou rotativas na câmara de secagem. A agitação possibilita altas taxas de secagem por unidade de área aquecida, tendo em vista o material ser continuamente mantido em contato com a superfície de aquecimento. Além disso, a agitação melhora a

mistura e uniformidade do produto. Todavia, problemas são freqüentemente encontrados quando se tenta secar materiais pegajosos em secadores agitados devido à aglomeração (OAKLEY, 1997).

Tabela 2.1 - Tipos de secadores por contato (OAKLEY, 1997).

Tipo de secador	Batelada ou contínuo	Vácuo ou atmosférico	Velocidade de produção	Aplicação típica
Bandeja à vácuo	Batelada	Vácuo	Baixa	Extratos de carne, extratos de vegetais
Bandeja à vácuo	Contínuo	Vácuo	Baixa, média	Farelo de chocolate, extratos de carne
Prato à vácuo	Contínuo	Vácuo ou atmosférico	Baixa-média	Chá, café
Camada fina	Contínuo	Vácuo ou atmosférico	Baixa-média	Tomate concentrado e gelatina
Tambor	Contínuo	Vácuo ou atmosférico	Baixa-média	calda de trigo, papas para criança
Batelada com rotação	Batelada	Vácuo	Baixa-média	Sacarina, pectina
Agitado horizontal	Batelada ou contínuo	Vácuo ou atmosférico	Baixa-alta	Farinha de trigo
Rotação indireta	Contínuo	Atmosférico	Média-muito alta	Grão de cerveja, amido
Agitado vertical	Batelada	Vácuo ou atmosférico	Baixa-média	Extrato de glucose e amido

Segundo OAKLEY (1997), além da influência da agitação, a escolha correta do secador por contato depende de vários fatores; os mais importantes são descritos a seguir:

- (a) da sensibilidade do material ao calor ou de sua facilidade para oxidação e deve-se também levar em consideração os custos operacionais.
- (b) da taxa de produção de material seco. Em geral, os secadores em batelada, particularmente o secador de bandeja, não são convenientes para altas taxas de produção;

(c) da consistência do material. O tambor rotativo, por exemplo, é aconselhado no caso de o material contiver um alto teor de umidade, como é o caso de “lamas”.

2.3 Mecanismos da secagem em equipamentos de contato indireto

De acordo com SZTABERT (1989), o mecanismo de secagem em secadores por contato indireto, depende da temperatura da superfície aquecedora, temperatura e propriedade do material “in natura”, da operação mecânica do secador e da pressão de operação (vácuo ou atmosférico).

Há diversos autores que procuraram simular a secagem em equipamentos por contato indireto seja à vácuo ou atmosférico, podendo ser citados os trabalhos de SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984), TSOTSAS E SCHLÜNDER (1986, 1987), STZABERT (1989), GEVAUDAN E ANDRIEU (1991), FARGES ET AL. (1995), DITTLER ET AL. (1997). Contudo, o trabalho de SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984) é a referência básica para todos aqueles aqui citados. Sendo assim, na presente revisão tomar-se-á como base o modelo de SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984) para procurar a compreensão do fenômeno em questão.

SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984) propuseram um modelo para o mecanismo de secagem baseado na teoria da penetração. Essa teoria considera que a secagem ocorre no momento em que o material úmido contido no leito de secagem entra em contato com a superfície aquecida durante um certo período de tempo t_R . Entre cada período, no transcorrer da secagem, assume-se que o material úmido é perfeitamente e instantaneamente misturado, isto é, o teor de umidade e a temperatura do material estão uniformes no começo de cada período de contato. Tal mecanismo pode ser ilustrado segundo a Figura 2.3.

O tempo do período de contato fictício t_R depende do tempo necessário para uma revolução completa do eixo do agitador, t_{mis} .

$$t_R = t_{mis} N_{mis} \quad (2.3)$$

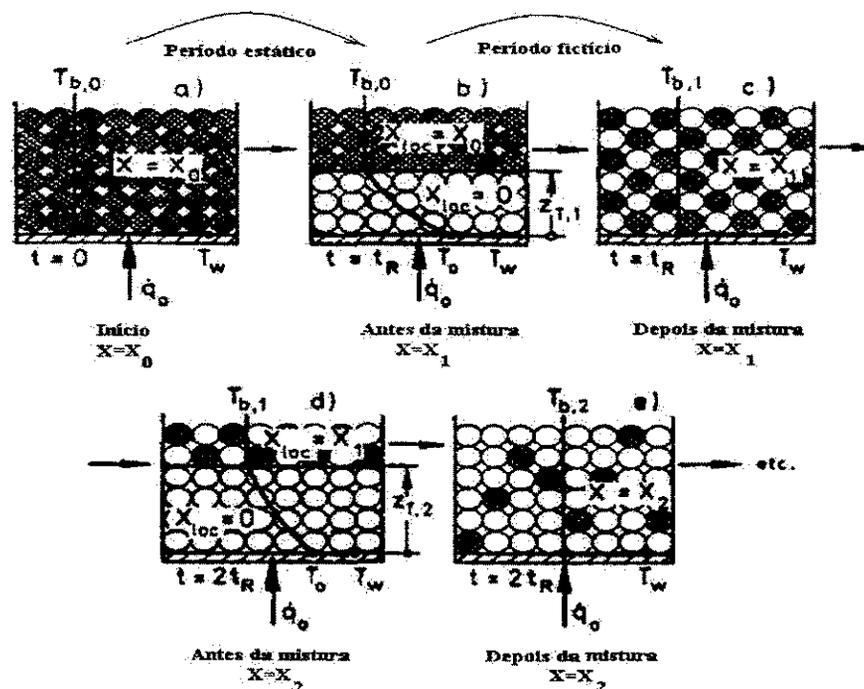


Figura 2.3 - Mecanismo de secagem com base no modelo de SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984).

Para se conhecer com que frequência o agitador deve operar até conseguir a homogeneização do material (macromistura perfeita), calcula-se o parâmetro N_{mis} , que corresponde ao número de mistura. Esse número é o único parâmetro de ajuste do modelo e depende do tipo de secador, do tipo e da frequência de revolução do agitador, bem como das propriedades mecânicas do material a ser submetido à secagem. O N_{mis} pode ser estimado de acordo com autores citados, segundo:

$$N_{mis} = c \left[\frac{2(n\pi)^2 D}{g} \right]^m \quad (2.4)$$

em que n , é o número de rotações por minuto; D o diâmetro da câmara de secagem; g , constante gravitacional, e as constantes c e m são valores dependentes da característica do agitador. No trabalho de SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984), os valores sugeridos para as constantes características, foram que $c = 25$ e $m = 0,2$.

A transferência de calor para os leitos empacotados e agitados da superfície aquecida causa um perfil de temperatura como mostrado na Figura 2.4. Ocorre um

abaixamento da temperatura penetrante entre a superfície aquecida, a qual está em T_w , e a superfície do leito adjacente, qual está em T_0 .

Para este modelo considera-se que as resistências de penetração de calor $1/\alpha_{leito}$ e a resistência da superfície aquecida para o leito de secagem $1/\alpha_{ws}$ são as etapas controladoras do processo de secagem. O leito de secagem é considerado quase contínuo e aplicou-se a lei de condução de calor de Fourier (equação 2.5) para prever os coeficientes de transferência de calor α_{leito} e α_{ws} .

$$q = -\lambda_{leito} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.5)$$

A determinação da condutividade térmica global do leito empacotado da equação 2.5 encontra-se no Anexo A.

Para o cálculo da curva do fluxo de evaporação considera-se que o fluxo de calor penetre no leito em um certo tempo t dentro do primeiro período de contato, $0 < t < t_R$. Dentro deste período há a formação de uma frente de secagem localizada a uma distância z_T da superfície de aquecimento (Figura 2.4). Acima deste ponto considera-se que o teor de umidade e a temperatura do leito são constantes e na região $0 < z < z_T$ assume-se que a condutividade térmica efetiva $\lambda_{leito,seco}$, a massa específica aparente do leito $\rho_{leito,seco}$ e a capacidade calorífica do leito $c_{leito,seco}$ mantenham-se praticamente constantes levando em consideração que o material esteja completamente seco na altura considerada.

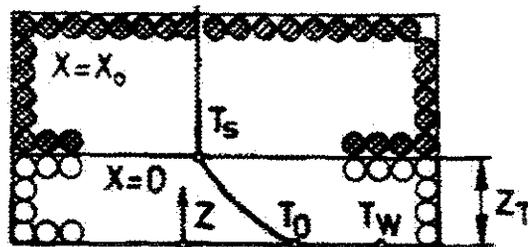


Figura 2.4 - Ilustração para o cálculo da taxa de secagem dentro de um período de contato.

As distribuições de temperatura ao longo do leito, considerando-se regime transiente e a hipótese da teoria da penetração, podem ser escrita de acordo com a seguinte equação e respectivas condições inicial e de contorno:

$$\lambda_{sb,sec o} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = (\rho c)_{sb,sec o} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$z = 0; T = T_0 \quad (2.7a)$$

$$z = z_T; T = T_s \quad (2.7b)$$

$$-\lambda_{sb,sec o} \frac{\partial T}{\partial z} = \rho_{sb,sec o} X \Delta h_{ev} \frac{\partial z_T}{\partial t} \quad (2.7c)$$

Por meio da equação 2.6, SCHLÜNDLER E MOLLEKOPF (1984), obtiveram a seguinte distribuição de temperatura:

$$T - T_s = (T_0 - T_s) \left\{ \frac{\text{erf} \left[z / 2 \sqrt{k_{leito,sec o} t} \right]}{\text{erf} \zeta} \right\} \quad (2.8)$$

em que $k_{leito,sec o}$ é a difusividade térmica total do leito seco, e ζ , a posição reduzida da frente de secagem; os quais são calculados, respectivamente, por:

$$k_{leito,sec o} = \frac{\lambda_{leito}}{(\rho c_p)_{leito}} \quad (2.9)$$

$$\zeta = \frac{z_T}{2 \sqrt{k_{leito,sec o} t}} \quad (2.10)$$

sendo que o parâmetro ζ é dado a partir da solução de Neumann da equação de Fourier para a temperatura de superfície constante T_0 :

$$\sqrt{\pi \zeta} \exp \zeta^2 \left[\left(\frac{\alpha_{ws}}{\alpha_{sec o}} - 1 \right) \text{erf} \zeta + 1 \right] = \frac{1}{\xi} \left(\frac{\alpha_{ws}}{\alpha_{sec o}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

O conteúdo de umidade médio reduzido do leito é definido como:

$$\xi = \frac{X \Delta h_{ev}}{c_{sb,sec} (T_w - T_s)} \quad (2.12)$$

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor α_{leito} e α_{ws} foram utilizadas as seguintes equações:

$$\alpha_{ws} = \frac{\dot{q}}{T_w - T_0} \quad (2.13)$$

$$\alpha_{leito} = \frac{\dot{q}}{T_0 - T_b} \quad (2.14)$$

A equação (2.13) define o coeficiente de transferência de calor por contato, e a equação (2.14) define o coeficiente de penetração de calor do leito α_{leito} .

Eliminando T_0 das equações (2.13) e (2.14) pela combinação de duas resistências individuais α_{leito} e α_{ws} nós obtemos o coeficiente de transferência de calor global:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{ws}} + \frac{1}{\alpha_{leito}} \quad (2.15)$$

Eventualmente, nós temos para distinguir entre o coeficiente de transferência de calor instantâneo e no tempo médio, α_t e α respectivamente:

$$\alpha = \frac{1}{t} \int_{t_0}^t \alpha_t dt' \quad (2.16)$$

Pode-se utilizar o resultado advindo da solução da Eq.(2.16) para determinar o coeficiente de transferência de calor $\alpha_{leito,úmido}$ por:

$$\alpha_{leito,\acute{u}mido} = \frac{1}{t_R} \int_0^{t_R} \frac{\lambda_{sb,sec o} (\partial T / \partial z)_{z=0}}{T_0 - T_s} dt \quad (2.17)$$

Substituindo o valor de $(\partial T / \partial z)_{z=0}$ na equação (2.17) obtemos o coeficiente global de transferência de calor, para o leito úmido:

$$\alpha_{leito,\acute{u}mido} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{(\rho\lambda c)_{sb}}}{\sqrt{t_R}} \frac{1}{erf\zeta} \quad (2.18)$$

com

$$\sqrt{\pi}\zeta \exp(\zeta^2) erf\zeta = \frac{c_{p,leito}(T_0 - T_b)}{X\Delta h_{ev}} \quad (2.19)$$

quando x tende para zero, ζ tende para o infinito e $erf\zeta$ para a unidade. Neste caso, a equação 2.19 fornece α_{leito} para o leito empacotado inteiramente seco, determinado a partir da proposta de MOLLEKOPF E MARTIN (1982):

$$\alpha_{leito,sec o} = \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{(\lambda\rho c_p)_{leito}}}{\sqrt{t_R}} \quad (2.20)$$

O coeficiente de transferência de calor por contato α_{ws} é determinado segundo a proposta de MOLLEKOPF E MARTIN (1982):

$$\alpha_{ws} = \phi_A \alpha_{wp} + (1 - \phi_A) \frac{\lambda_G}{\sqrt{2R + \sigma + \delta}} + \alpha_{rad} \quad (2.21)$$

Já o coeficiente de transferência de calor para uma única partícula, α_{wp} , foi também determinado de acordo com a proposta de MOLLEKOPF E MARTIN (1982):

$$\alpha_{wp} = \frac{4\lambda_G}{d_p} \left[\left(1 + \frac{2\sigma + 2\delta}{d_p} \right) \ln \left(1 + \frac{d_p}{2\sigma + 2\delta} \right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

em que λ_G é a condutividade térmica do vapor de água; ϕ_A é uma fator de alcance da superfície da placa e é da ordem de 0,8; d_p é o diâmetro da partícula; δ , a rugosidade da superfície da partícula; σ é o caminho livre médio modificado das moléculas do gás sendo obtido a partir de:

$$\sigma = 2 \left(\frac{2-\gamma}{\gamma} \right) \frac{\lambda_G}{P(2c_G - \tilde{R}/M)} \sqrt{\frac{2\pi\tilde{R}T}{M}} \quad (2.23)$$

sendo γ o coeficiente de acomodação, cujo valor situa-se entre 0,8 e 0,9 para gases e em temperaturas moderadas. Já o coeficiente de transferência de calor por radiação é calculado por:

$$\alpha_{rad} = \frac{4C_s T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_H} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} \quad (2.24)$$

Conhecendo $\alpha_{úmido}$ nós conhecemos o fluxo de calor na superfície aquecida ($z=0$):

$$\dot{q}_0 = \alpha_{úmido} (T_w - T_s) \quad (2.25)$$

e o fluxo na frente de secagem ($z=z_T$):

$$\dot{q}_{z_T} = \dot{q}_0 \exp(-\zeta^2) \quad (2.26)$$

A taxa de secagem pela área de aquecimento (fluxo) foi obtida segundo:

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}_{z_T}}{\Delta h_{ev}} \quad (2.27)$$

em que \dot{q}_{zT} é o fluxo de calor na frente de secagem e Δh_{ev} é a entalpia de evaporação.

A redução da umidade do material durante o período de contato de acordo com:

$$\Delta X = \frac{m t_R A}{\bar{M}_{sec 0}} \quad (2.28)$$

sendo A área da superfície da placa de aquecimento e $\bar{M}_{sec 0}$ a massa de material seco.

A Eq. (2.28) propiciou condições para a estimativa do conteúdo de umidade a partir do segundo período de contato, isto é, no primeiro período o leito de secagem possui uma determinada umidade e temperatura que posteriormente variam a cada início de outro período. A variação da umidade bem como da temperatura são determinadas pela diferença entre a nova temperatura e umidade adquirida pelo leito no início do segundo período e aqueles valores iniciais até a secagem completa do material. Desta forma, a curva da taxa de secagem total calculada por SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984), é determinada a partir da umidade inicial do material (base seca) X_0 com incrementos negativos em ΔX até $X/X_0=0,05$.

Na literatura são encontradas publicações sobre o estudo da secagem por contato indireto, e um resumo contendo alguns desses trabalhos com seus principais resultados serão mostrados a seguir:

TSOTSAS E SCHLÜNDER (1986) avaliaram a aplicabilidade do modelo de penetração na determinação das curvas de taxa de secagem teóricas, de partículas porosas de silicato de alumínio, em dois secadores de 100 mm e 240 mm de diâmetro. Em ambos os secadores o modelo apresentou um bom ajuste com os valores experimentais para diferentes temperaturas da placa de aquecimento e velocidades de agitação. Estes autores também observaram que o valor do número de mistura N_{mix} , calculado a partir da equação desenvolvida por SCHLÜNDER E MOLLEKOPF (1984), não precisou de nenhum ajuste. Desta forma, concluíram que para produtos finos ($d_p=0.525$) a taxa de secagem é uma função razoavelmente sensível à intensidade de mistura, considerando portanto que, o N_{mix} é uma propriedade puramente mecânica.

TSOTSAS E SCHLÜNDER (1987) realizaram um estudo sobre a influência do comportamento higroscópico na taxa de secagem, em secadores de disco a vácuo. Os parâmetros utilizados para analisar esta influência foram: temperatura da placa de aquecimento, velocidade de agitação e diâmetro da partícula. Nos resultados apresentados notou-se a formação de duas regiões nas curvas de taxa de secagem. A primeira região faz referência a altos valores de umidade e a segunda para baixos teores de umidade do material. O modelo de penetração utilizado para prever as curvas de secagem teóricas, apresentou duas limitações: predição do N_{mis} para materiais mais pegajosos tais como pastas, suspensões densas ou materiais e em relação as resistências intrapartículas. Observou-se também que a taxa independe da temperatura da placa de aquecimento. A influência do diâmetro da partícula e da velocidade de agitação é análoga ao observado com materiais não higroscópicos.

DAUD E ARMSTRONG (1988) investigaram a influência da razão entre a espessura da placa e a do filme, e das condições iniciais sobre as características da secagem condutiva de filmes espessos de amidos gelatinizados. Concluíram que os resultados apresentados, favorecem a teoria de que o transporte de umidade é limitado pelo gradiente de umidade no filme de amido e que a influência da espessura da placa e do filme podem ser desprezadas.

FORBERT E HEIMANN (1989) estudaram um secador de disco a vácuo de materiais higroscópicos, grossos e mecanicamente agitados, especificamente duas zeólitas: Baylith T144TM e WE894TM. O modelo de penetração foi avaliado mediante a variação da velocidade de secagem, pressão, temperatura da placa de aquecimento e diâmetro das partículas sobre o processo de secagem, em que se observou um bom ajuste com os dados experimentais. O aumento na velocidade de agitação prolongou o período de taxa de secagem constante e provocou uma diminuição no teor de umidade final. Com o aumento da pressão do sistema, houve um aumento na temperatura de evaporação da água resultando na redução do gradiente de temperatura entre a placa e o leito e na obtenção de um produto com alto teor de umidade final.

O aumento no diâmetro da partícula produz um decréscimo na taxa de secagem e a utilização de diferentes tipos de materiais higroscópicos não mostraram nenhuma influência sobre a taxa de secagem.

SZTABERT (1989) estudou a influência do tamanho do secador a vácuo por contato indireto, reportando um trabalho de YAMAHATA ET AL. (1984), no qual são apresentados o desempenho de dois tipos de secadores com diferentes áreas de aquecimento. Esses autores verificaram que fluxo de evaporação de água depende do tamanho do secador e do tipo de material.

GEVAUDAN E ANDRIEU (1991) estudaram a secagem em um secador de disco em pressão atmosférica, de um material poroso (alumina ativada, tipo A-25), com o objetivo de encontrar uma melhor compreensão do fenômeno de transferência de calor e de massa durante o processo de secagem. Para isso foram ajustadas as curvas de cinética e de perfil de temperatura experimentais com as curvas do modelo de penetração adaptado para materiais higroscópicos, em função os parâmetros umidade inicial, temperatura da placa e velocidade de agitação. Verificou-se que, a taxa de secagem aumenta fortemente com a temperatura da placa de aquecimento; a velocidade de agitação não influencia significativamente e que o modelo se ajusta bem aos valores experimentais.

O trabalho de secagem por contato mais recente foi realizado por FERRASSE ET AL. (2001). O estudo desses autores teve por objetivo estudar os processos de secagem para materiais pastosos, neste caso, despejos de esgotos municipais. Suas conclusões foram que, existe uma velocidade crítica do agitador e uma limitação na resistência térmica devido a resistência de contato entre a placa de aquecimento e o leito de secagem. Enquanto que na secagem de materiais granulares a transferência de calor entre o leito e a superfície aquecida é controlada pela resistência de contato na superfície seguida pela resistência a penetração de calor no leito. Verificaram também a existência de três períodos de secagem Inicialmente uma fase fluída, em seguida uma fase sólida e posteriormente uma fase granular. Altas taxas de secagem foram observadas na fase fluída.

A presente revisão bibliográfica, do modo como apresentada, intenciona fundamentar os objetivos desta dissertação, sendo que a principal, como já mencionado, diz respeito a estudar o desempenho de um secador atmosférico por contato indireto com agitação mecânica. Neste sentido, procurar-se-á obter curvas análogas às apresentadas nas Figuras (2.1) e (2.2), considerando a influência da temperatura da superfície de aquecimento, carga de material úmido e número de rotações. Por outro lado, procurar-se-á avaliar a aplicabilidade do modelo proposto por SCHLÜNDLER E MOLLEKOPF (1984). De forma a propiciar as condições para tais objetivos, será apresentados a metodologia

experimental, equipamentos, bem como os resultados esperados e o modo de avaliá-los no capítulo que se segue.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) do Departamento de Termofluidodinâmica (DTF), da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Trata-se da proposta da primeira dissertação de mestrado, sobre o tema, no LPMP/DTF/FEQ/UNICAMP e objetiva, fundamentalmente, estudar um secador atmosférico por contato indireto com agitação mecânica.

3.1. Material Utilizado

Para dar efeito ao propósito da presente dissertação, escolheu-se como materiais de teste pó de café (após sua primeira extração) e esferas de vidro. Na escolha preferiu-se os materiais encontrados no próprio laboratório como as esferas de vidro e os de fácil aquisição no campus da UNICAMP como o pó de café. Este pó foi adquirido junto ao restaurante do Instituto de Artes bem como da Lanchonete Tropicaliente. As características físicas do “pó de café seco”, já advindo da secagem do pó pré selecionado encontra-se na Tabela 3.1 (BETIOLI, 2001). A massa específica do pó de café foi determinada por intermédio de um picnômetro a gás *AccuPyc 1330* e a sua porosidade, por um porosímetro *Autopore III 9400*, ambos produzido pela Micromeritics Instrument Corp. Já o diâmetro da partícula foi considerada como sendo aquele encontrado no trabalho de MAIALLE E MENEGALLI (1996).

Tabela 3.1 - Propriedades físicas do pó de café seco (BETIOLI, 2001).

ρ_s (kg/m ³)	ϵ_p	d_p (m)
1,3271	0,121	0,0007

As propriedades térmicas do pó de café seco: capacidade calorífica e condutividade térmica, encontram-se no trabalho de BETIOLI (2001). Tais características foram obtidas no equipamento DSC-50 da Shimadzu. Essas propriedades podem, respectivamente, serem expressas por meio das seguintes correlações:

Capacidade calorífica: $C_p = \sum_{j=0}^n a_j T^j$ em J/kg.°C, sendo a temperatura T em °C.

Condutividade térmica: $\lambda_p = \sum_{j=0}^n a_j T^j$ em W/m.°C, sendo a temperatura T em °C.

As constantes estão apresentadas na Tabela 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 - Constantes para a estimativa de C_p (faixa de aplicação: 20 a 100°C).

	$a_0 \times 10^{-2}$	$a_1 \times 10^{-2}$	a_2	$a_3 \times 10^2$	$a_4 \times 10^4$	$a_5 \times 10^8$
C_p	7,60150	0,60075	-3,18383	9,46800	11,2000	452,586

Tabela 3.3 - Constantes para a estimativa de λ_p (faixa de aplicação: 20 a 100°C).

	a_0	$a_1 \times 10^2$	$a_2 \times 10^4$	$a_3 \times 10^6$	$a_4 \times 10^8$	$a_5 \times 10^{12}$
λ_p	0,17037	-1,22200	4,05724	-5,87993	3,96464	-103,226

As características físicas e térmicas das esferas de vidro encontram-se na Tabela 3.4 e as propriedades físicas da câmara de secagem na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Propriedades físicas e térmicas da esfera de vidro.

ρ_p (kg/m ³)	d_p (m)	C_p (J/kg.°C)	λ_p (W/m.°C)
2640	0,00118	750	1,4

Tabela 3.5 – Propriedades físicas da câmara de secagem.

$\rho_{sb,seco}$ (kg/m ³)	ϵ
1300	0,5

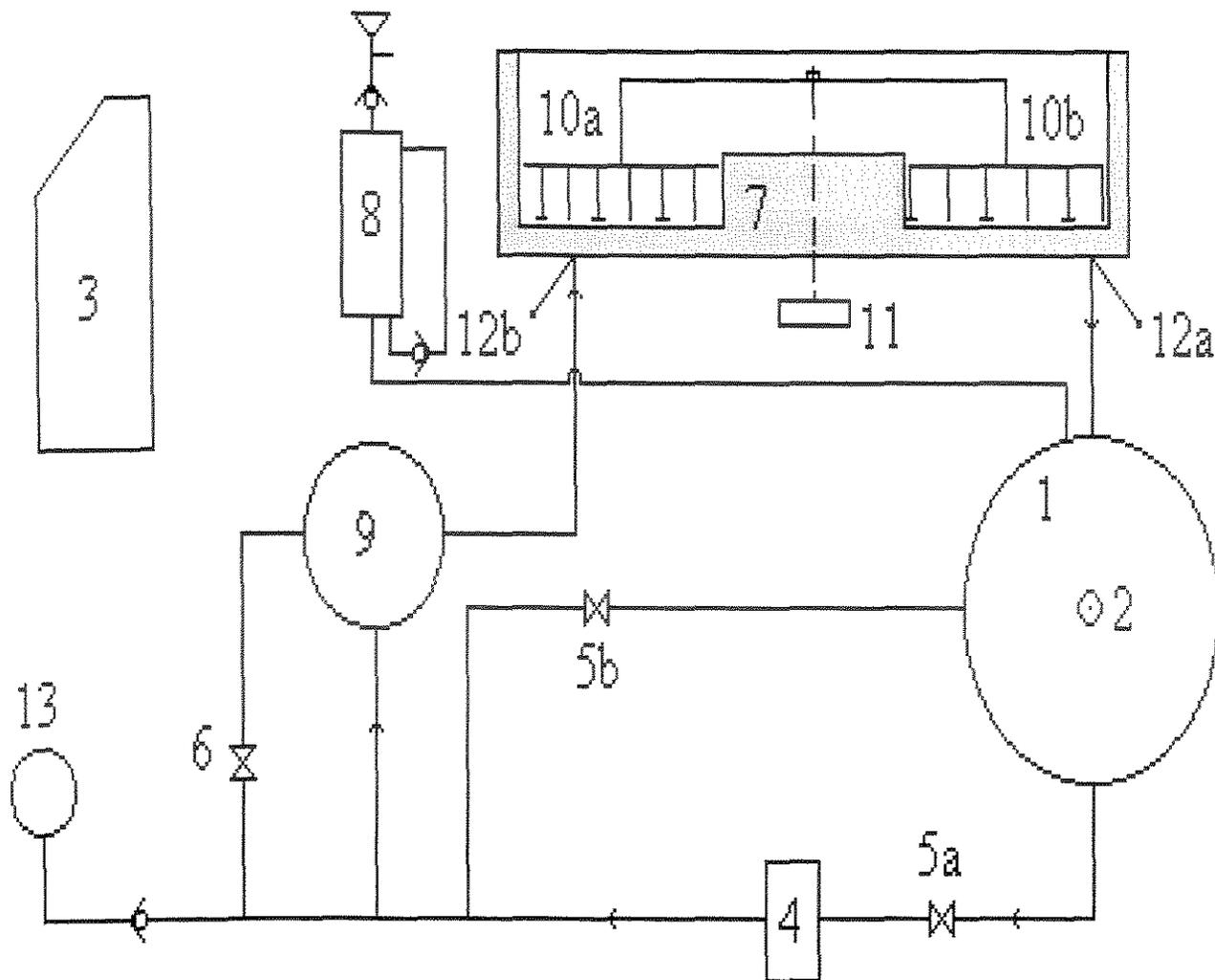
O diâmetro da partícula foi obtido por um paquímetro. O valor da massa específica das esferas de vidro foi medido em um picnômetro à gás e a massa específica do leito seco, foi determinada depois de conhecer o volume da câmara de secagem ocupada por uma massa conhecida de sólido seco. Já para a estimativa da porosidade do leito, assumiu-se como aproximação, que esta pode ser obtida da divisão da massa específica do leito pela da partícula. Os valores de C_p e λ_p da esfera de vidro, encontram-se na obra de INCROPERA E DEWITT (1998).

3.2 Equipamentos

3.2.1. Secador por contato com agitação mecânica

O secador utilizado é do tipo atmosférico, construído em aço-inox, gentilmente fornecido pela Rhodia-Paulínia. Esse equipamento apresenta uma câmara de secagem de forma cilíndrica com 0,24m de diâmetro, espessura de 1,5 cm e área de secagem de 0,11 m², com manta interna de aquecimento, através da qual circula óleo de silicone como o fluido aquecedor. O equipamento é isolado com lã de rocha. A câmara de secagem está interligada a um reservatório (1) contendo óleo de silicone com viscosidade de 350 cP. Nesse reservatório, estão acoplados duas resistências de 750W cada (2), destinadas ao aquecimento do óleo, as quais são controladas a partir do painel de controle (3). Uma bomba de engrenagem (4) possibilita a circulação do óleo. O controle da pressão dessa bomba dá-se por duas válvulas globo (5a, 5b), sendo que uma delas (5b) opera semi-aberta e fica logo após o *by-pass*. Este *by-pass* (6) tem por função controlar a direção do fluxo do óleo para o reservatório ou para a manta de aquecimento (7). Existe um reservatório de reposição do óleo (8) munido de visor, permitindo ao operador verificar o nível de óleo no reservatório. Há um segundo reservatório que é destinado à distribuição do óleo para o sistema (9).

O sistema de agitação (10a, 10b) é constituído por um motor de corrente contínua (11), uma haste de conexão situada entre o motor e um conjunto de pás. Um variador de voltagem, controla o sistema de agitação. O sistema de secagem, por sua vez, contém ainda na entrada e saída do reservatório de óleo, termopares tipo J (12a, 12b), os quais estão ligados a um indicador de temperatura. As tomadas de pressão são monitoradas por um manômetro (13) acoplado a linha. O esquema do secador descrito está ilustrado na Figura 3.1. A fotografia do secador e o detalhe da câmara de secagem são encontrados nas Figuras 3.1 e 3.2. O primeiro conjunto de pás na Figura 3.3.



- 1 – Reservatório de aquecimento de óleo.
- 2 – Resistências para aquecimento de óleo.
- 3 – Painel de controle.
- 4 – Bomba de impulsionamento do óleo para a camisa de aquecimento do leito de secagem.
- 5 a e b– Controle da pressão da bomba e do retorno do óleo.
- 6 – By-pass.
- 7 – Manta de aquecimento.

- 8 – Reservatório de reposição de óleo.
- 9 – Sub-reservatório para distribuição do óleo no sistema.
- 10a e b – Sistema de agitação.
- 11 – Motor de corrente contínua.
- 12a e b – Termopares tipo T.
- 13 – Manômetro.
- ⊗— Válvula globo
- ⊙— Válvula de esfera
- Direção do óleo na linha

Figura 3.1 - Esquema do equipamento de secagem.



Figura 3.2 - Secador por contato.



Figura 3.3 - Detalhe da câmara de secagem.



Figura 3.4 - Primeiro conjunto de pás utilizado.

A câmara de secagem foi dividida em oito zonas tendo três pontos cada, com o objetivo de determinar como ocorria a distribuição de temperatura na superfície calefatora após duas horas, visto que havia um desconhecimento sobre o funcionamento do secador. A Figura 3.5 mostra a divisão realizada na câmara de secagem.

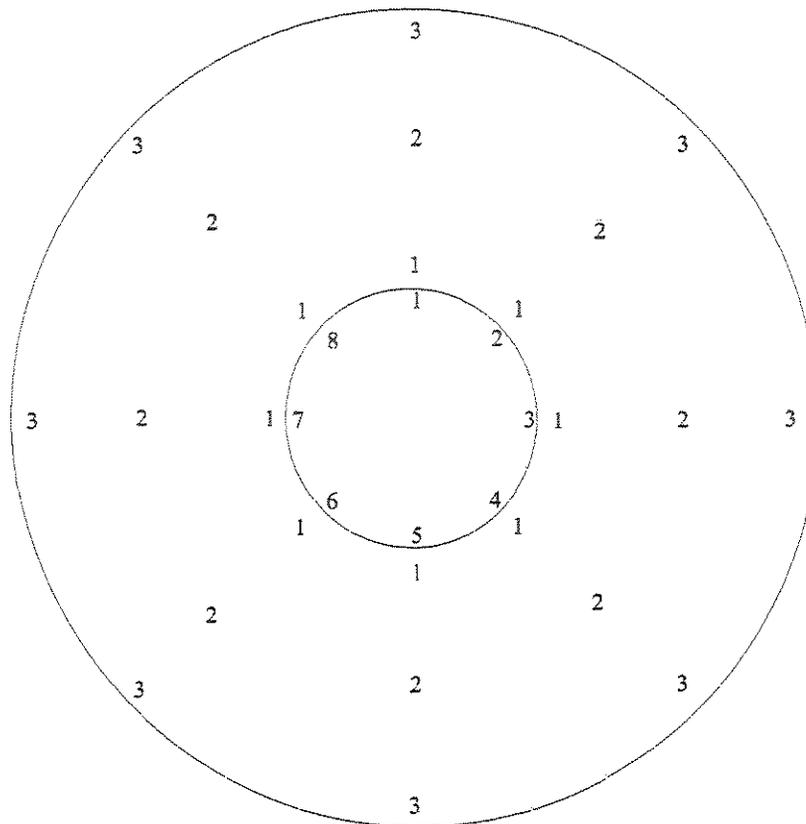


Figura 3.5 – Divisão da câmara de secagem para determinação do perfil de temperatura.

O primeiro conjunto de pás utilizado neste equipamento foi utilizado na secagem das esferas de vidro e do pó de café. Entretanto, este conjunto de pás não apresentou resultados satisfatórios para o pó de café devido à aglomeração do material ocorrida no início do processo de secagem. Desta forma, foram realizados testes com outros formatos de pás, as quais podem ser visualizadas nas Figuras 3.6A, 3.6B, 3.6C, 3.6D, 3.6E e 3.6F, com a finalidade de encontrar o conjunto de pás que melhor se adequava ao material em estudo.

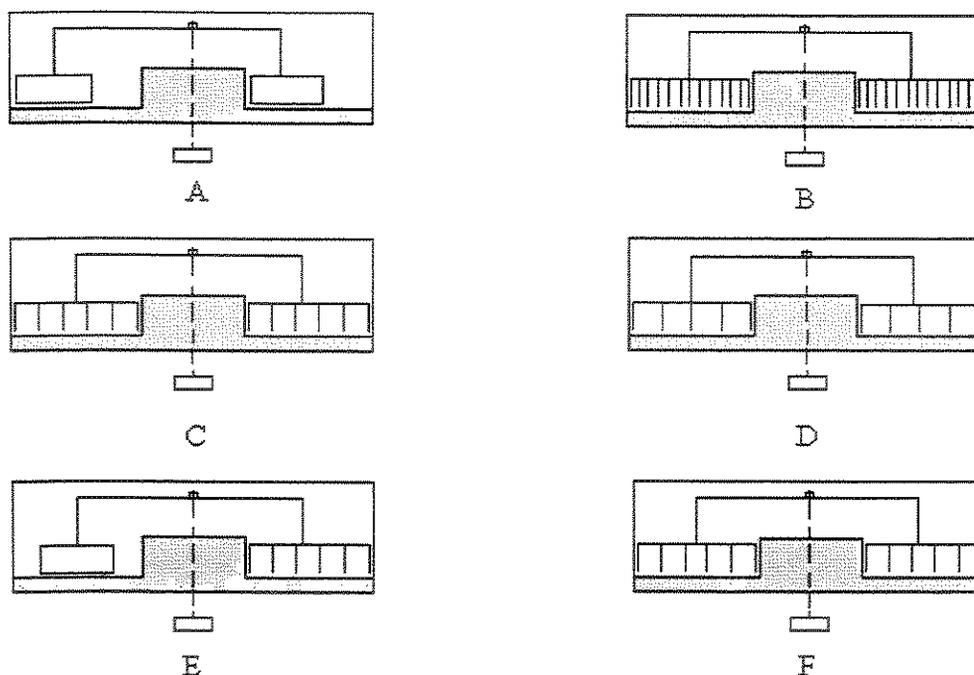


Figura 3.6 – Pás raspadeiras utilizadas nos testes.

A configuração que melhor se adequou às necessidades foi a forma de seis pentes com raspadeiras intercaladas (Figura 3.6F). As pás possuíam esta forma para que atuassem como um raspador, evitando que o material ficasse aderido às paredes da câmara de secagem. A fotografia contendo o conjunto de pás utilizado para a secagem do pó de café está ilustrada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Conjunto de pás utilizado para a secagem do pó de café.

3.2.2. Acessórios

De modo a viabilizar a análise do desempenho do secador, torna-se necessária a definição dos critérios de desempenho. Nesse caso, será utilizada a análise das curvas da cinética de secagem bem como a de taxa de secagem (fluxo de evaporação da água). Em ambos os casos, a grandeza fundamental é a umidade do material. Por outro lado, para que

se possa determiná-la é preciso que se determine a massa do material, bem como o teor de umidade nela contido. A massa de pó de café utilizada no secador foi pesada em uma balança semi-analítica, marca C&F, com resolução de 0,1 g. Já a massa de material utilizada para a determinação da umidade foi medida em uma balança analítica, marca BG400 Gehaka, com resolução de 0,001 g. A estimativa do conteúdo de umidade foi determinada pelo método da estufa, o qual consiste em acondicionar amostras de material úmido em uma estufa por um período de 24 horas a temperatura de 104 °C. A estufa utilizada é da marca FANEM, modelo 315 SE. Além do teor de umidade, outro efeito extremamente importante no estudo da secagem é o da temperatura, tanto do material quanto do secador. Para tanto, as temperaturas das amostras de material foram medidas por um termopar tipo K (Cromel-Alumel) da marca IOPE Therm 46 com indicador de temperatura em graus Celsius (-70 °C-1200 °C). Esse termopar foi inserido em um calorímetro, que é constituído de um recipiente de vidro isolado por lã de rocha e alumínio corrugado.

3.3 Procedimento experimental

Inicialmente ajusta-se a temperatura desejada à superfície de aquecimento por meio das resistências monitoradas pela leitura da temperatura no painel de controle. Espera-se atingir o regime permanente na câmara de secagem por um tempo de duas horas. O regime é aqui considerado permanente depois de não se detectar variação significativa na temperatura da superfície de aquecimento de cada zona (cerca de 2°C). Atingido o regime estacionário, adiciona-se à câmara de secagem a carga de material úmido previamente estabelecida, assim como aciona-se o sistema de agitação mecânica, cuja revolução também fora anteriormente fixada. Estabelece-se um tempo de 2h de secagem para o pó de café e de 1 h para as esferas. A cada 5 min, colhe-se alíquota do material contido na câmara de secagem em um cadinho, previamente pesado. Após a leitura da temperatura do material coletado em um calorímetro, pesa-se a sua massa e a leva a uma estufa a 104°C. Depois de 24 horas retira-se a amostra e a pesa novamente e, por diferença de massa, obtém a umidade removida, que será determinada segundo:

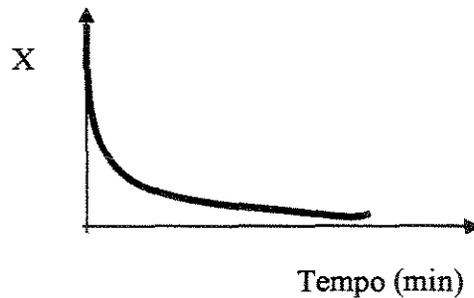
$$X = \frac{massa_{antes} - massa_{depois}}{massa_{depois}} \quad (3.1)$$

em que “antes” e “depois” referem-se à estufa: antes de levar o cadinho à estufa e após a retirada do cadinho da estufa, levando a:

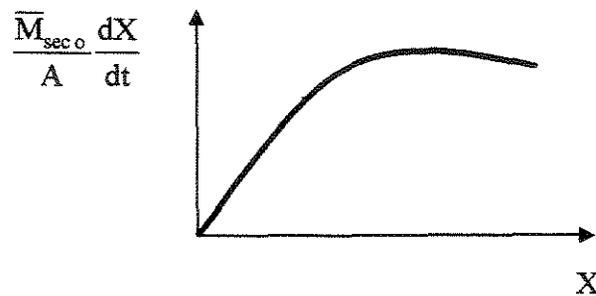
$$X = \frac{\text{massa}_{\text{úmida}} - \text{massa}_{\text{seca}}}{\text{massa}_{\text{seca}}} \quad (3.2)$$

3.4. Medidas experimentais e resultados esperados

O resultado da Eq. (3.1) ou (3.2) denomina-se “umidade do material em base seca”, convencionalmente expressa em kg de líquido/kg de material seco. Conhecida essa propriedade ao longo do tempo, torna-se possível a construção das curvas de secagem, a qual pode ser ilustrada na Figura (3.8a). Já as curvas do fluxo de secagem, que fornecem o fluxo de evaporação da água, serão obtidas a partir da cinética de secagem, por meio da sua diferenciação em função da umidade do material, conforme mostra a Figura (3.8b).



(a)



(b)

Figura 3.8 - Resultados esperados dos ensaios de secagem.

(a) cinética de secagem; (b) curvas do fluxo mássico.

A curva indicada na Figura (3.8b) foi obtida pela correlação dos dados da cinética de secagem, Figura (3.8a), por meio de um modelo exponencial decrescente:

$$X = a + b \exp\left(-\frac{t}{c}\right) \quad (3.3)$$

Pode-se verificar a taxa de secagem mediante a derivação da Eq. (3.3) em relação ao tempo, cujo resultado é:

$$\frac{dX}{dt} = -b * \left(-\frac{1}{c}\right) \exp\left(-\frac{t}{c}\right) \quad (3.4)$$

A curva indicada na Figura (3.8b) poderá ser facilmente construída a partir da derivada no tempo (3.4) da equação exposta em (3.3).

De posse de tais resultados, foi possível construir as curvas de fluxo de secagem (ou de taxa), considerando os efeitos da temperatura da superfície de aquecimento, carga de material úmido, assim como o teor de agitação do material. Para as esferas foi considerado também o diâmetro da partícula.

Como mencionado no capítulo anterior, foram comparados os resultados obtidos da curva (3.8b) com aqueles previstos pelo modelo de Schlünder e Mollekopf (1984). Para tanto, foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran, visando verificar a aplicabilidade do modelo citado para o caso da secagem de pó de café e esferas de vidro.

3.5 Planejamento Fatorial

O planejamento experimental, em particular, o projeto fatorial completo ou fracionário, é uma ferramenta de auxílio na pesquisa, que visa a obtenção de resultados a partir de um número reduzido de experimentos com conseqüente redução de custos, onde a redução da variabilidade e convergência dos resultados para a resposta desejada acontece mais rapidamente, aumentando, portanto, sensivelmente o grau de certeza das informações obtidas (Box et al., 1978).

Para realizar um planejamento fatorial precisa-se em primeiro lugar especificar os níveis em cada fator será estudado, isto é, os valores dos fatores (ou versões, nos casos qualitativos) que são empregados nos experimentos. Um planejamento fatorial requer a

execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Em geral, se houver n_1 níveis do fator 1, n_2 do fator 2, ..., e n_k do fator k o planejamento será um fatorial $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$. Isto não significa obrigatoriamente que serão realizados apenas $n_1 \times \dots \times n_k$ experimentos. Este é o número mínimo, para se ter um planejamento fatorial completo.

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Isso obviamente implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas é portanto mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo pesquisador, o planejamento de dois níveis irá requerer $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo por isso chamado de planejamento fatorial 2^k .

O uso de técnicas de planejamento de experimentos permite, segundo Carpinetti (2000), verificar:

- quais as variáveis, ou fatores, do processo são mais influentes no(s) parâmetros de resposta de interesse, o qual constitui na variável dependente ou de controle;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta seja mínimo;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

Nesta dissertação além da construção das curvas experimentais, bem como a avaliação da aplicabilidade do modelo de Schlünder e Mollekopf (1984), utilizou-se a técnica de planejamento fatorial ($2^3=8$), de acordo com Bruns, Scarmínio e Barros (1995), com o objetivo de verificar até que ponto as três variáveis independentes carga de material, temperatura da placa de aquecimento e velocidade de agitação estariam influenciando o processo de secagem.

As três variáveis independentes utilizadas neste planejamento fatorial foram codificadas da seguinte forma:

Var cod = +1 para o nível superior da variável

Var cod = - 1 para o nível inferior da variável

As variáveis de entrada selecionadas para o experimento e seus respectivos níveis estão listados na Tabela 3.6. A análise completa com as três variáveis de entrada gera oito experimentos.

Tabela 3.6 - Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fatorial de experimentos.

Variáveis Originais (notação)	Variáveis Codificadas	Níveis	
		Baixo(-)	Alto(+)
Temperatura da placa de aquecimento(T_w)	Y_1	75°C	95°C
Carga de material (w_0)	Y_2	0,5 kg	1,0kg
Número de rotações (Ω)	Y_3	20 rpm	40 rpm

Os níveis de cada fator foram escolhidos de acordo com as limitações práticas. A velocidade de agitação e carga de material foram fixadas de maneira que, o material não fosse jogado para fora do leito de secagem. A temperatura da placa de aquecimento variou de acordo com a temperatura próxima do ponto de ebulição da água (máxima) e a temperatura utilizada para secar produtos naturais sem que haja perda de suas características organolépticas (mínima).

A matriz original dos experimentos mostrada na Tabela 3.7, fornece os níveis que cada fator assumiu em cada um dos oitos ensaios. A resposta do modelo foi estimada pôr uma equação do tipo:

$$W = a_0 + a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + a_3 Y_3 + a_4 Y_1 Y_2 + a_5 Y_2 Y_3 + a_6 Y_1 Y_3 + a_7 Y_1 Y_2 Y_3 \quad (3.4)$$

em que W pode ser X_{final} ou $T_{p,final}$; a_0 a a_7 são os parâmetros ajustados pelo modelo empírico e os termos $Y_1 Y_2$, $Y_1 Y_3$, $Y_2 Y_3$ e $Y_1 Y_2 Y_3$ estão relacionados com a interação entre as variáveis.

Tabela 3.7 - Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fatorial de experimentos.

Ensaio	1	2	3	Respostas
01	-	-	-	R ₁
02	+	-	-	R ₂
03	-	+	-	R ₃
04	+	+	-	R ₄
05	-	-	+	R ₅
06	+	-	+	R ₆
07	-	+	+	R ₇
08	+	+	+	R ₈

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo apresentaremos os perfis de temperatura da placa de aquecimento a 60°C, 70°C e 95 °C, uma comparação da secagem das esferas e do pó de café por meio de fotos, as análises das influências das variáveis: temperatura do agente aquecedor (T_w), carga do material (W_0), velocidade de agitação (Ω) e diâmetro da partícula (d_p) sobre a cinética de secagem e fluxo de secagem bem como uma comparação dos resultados das curvas de taxa de secagem obtidos experimentalmente com aqueles advindos do modelo de Schlünder e Mollekopf (1984).

4.1 Perfil de temperatura da placa de aquecimento

A partir da metodologia apresentada na seção 3.2.1, será apresentado os perfis de temperatura da superfície calefatora nas temperaturas de 60, 70 e 95 °C após duas horas de funcionamento do secador. Os resultados destes perfis estão representados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

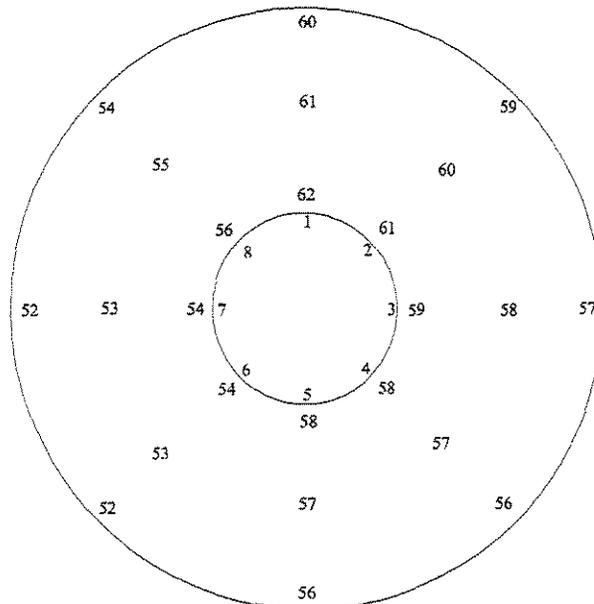


Figura 4.1 – Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 60°C.

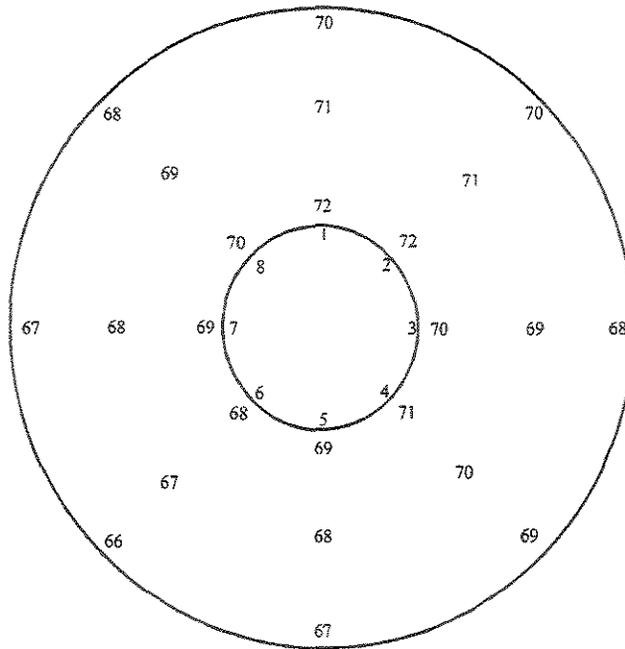


Figura 4.2 - Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 70°C.

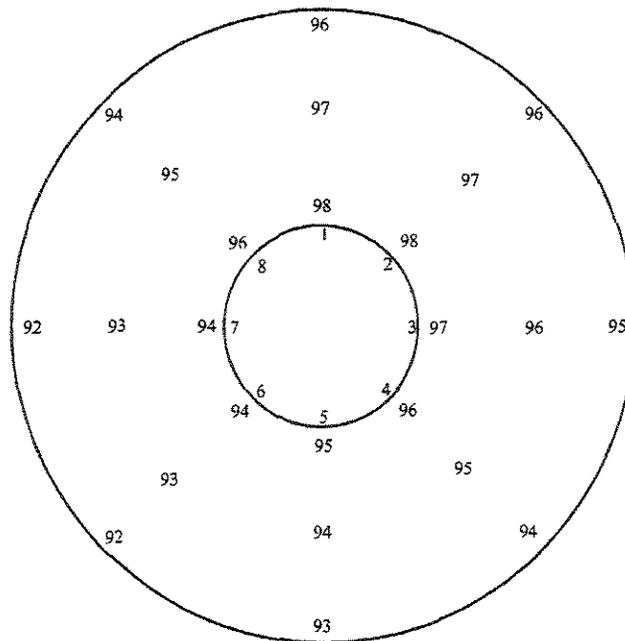


Figura 4.3 – Perfil de temperatura da placa de aquecimento à 95°C.

Analisando as Figuras 4.1, 4.2, 4.3 , observa-se uma distribuição não uniforme na superfície calefatora da câmara de secagem. Isto ocorre em virtude de um leve declive apresentado pela câmara de secagem que dificultou a passagem do óleo de silicone na mesma proporção por toda a manta aquecedora. Esta evidência pode ser observada nas zonas 1, 6 e 7. Na zona 1, os valores das temperaturas são elevados em relação aos demais por que nesta zona ocorre à entrada de óleo de silicone aquecido bem como há uma maior concentração deste óleo devido ao declive. Já nas zonas 6 e 7, as temperaturas são mais baixas devido à dificuldade de circulação do óleo.

4.2 Testes preliminares

Foram realizados testes com outros tipos de palhetas como mencionado na seção 3.2.1. Alguns destes resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6.

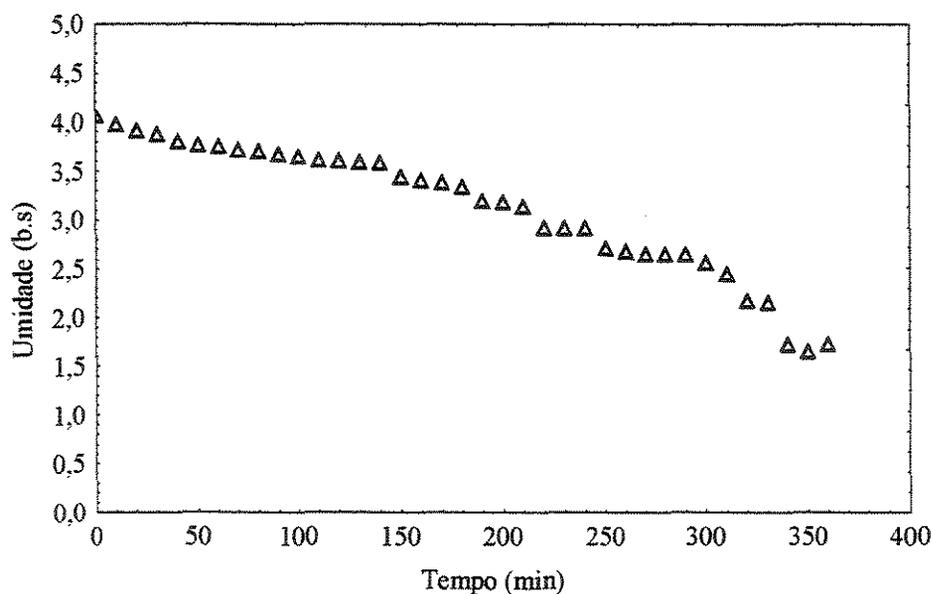


Figura 4.4 – Curva da cinética de secagem de pó do café com 200 ml de água usando o conjunto de pás da Figura 3.6 A

$T=60^{\circ}\text{C}$, rotação=20 rpm e carga= 1,0 kg

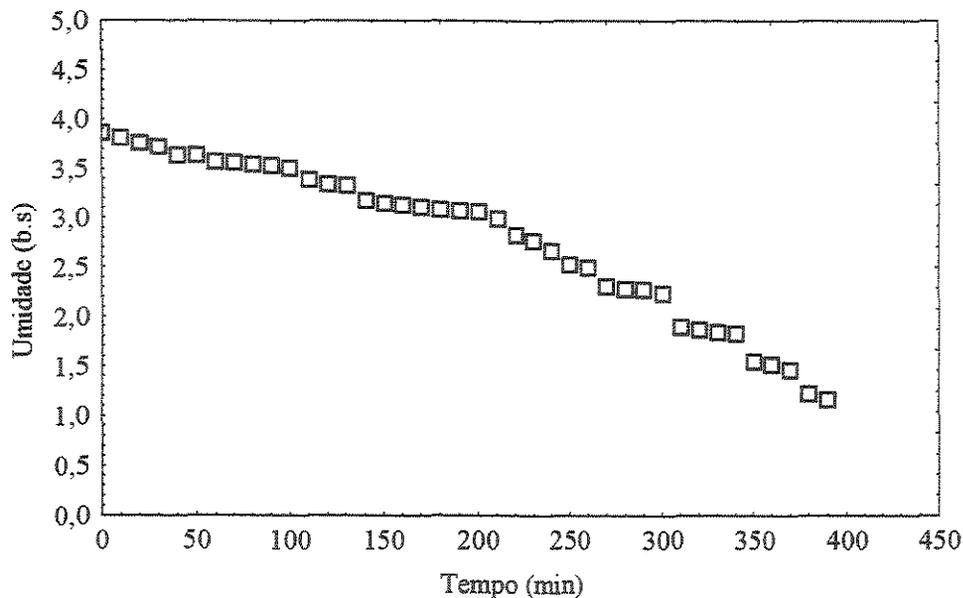


Figura 4.5 – Curva da cinética de secagem do pó de café com 200 ml de água usando o conjunto de pás da Figura 3.6E
 T=60°C , rotação=40 rpm e carga= 1,0 kg

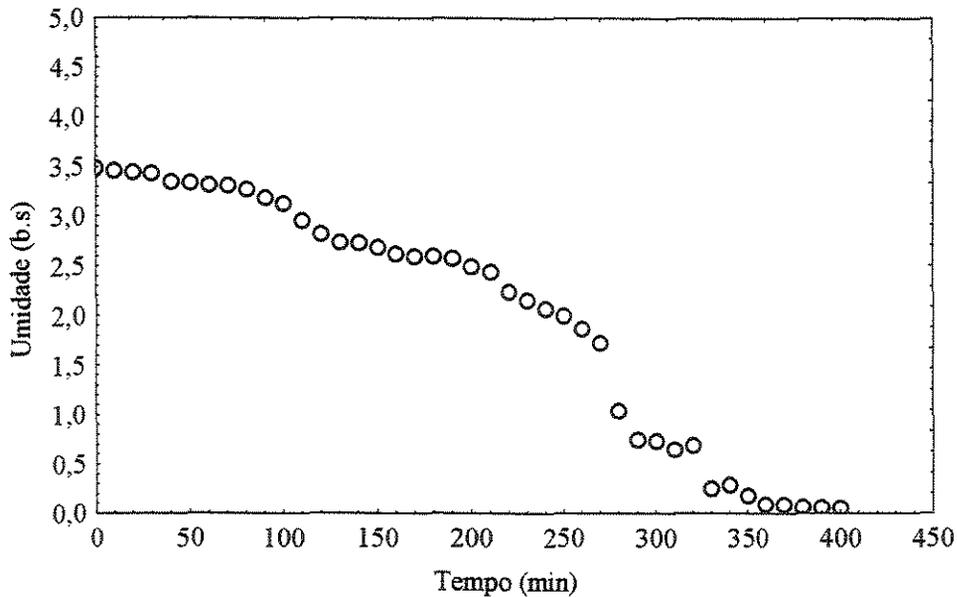


Figura 4.6 – Curva da cinética de secagem do pó de café com 200 ml de água usando o primeiro conjunto de pás da Figura 3.6C
 T=60°C , rotação=40 rpm e carga= 0,5 kg

Como pode ser verificado nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, que representam as curvas referentes à secagem do pó de café, a remoção de umidade ocorre basicamente na porção da curva que pode ser aproximada por uma reta, caracterizando em quase toda a secagem o período de remoção de umidade intrapartícula do material. Na Figura 4.4, este período ocorre até o tempo de secagem de 300 min. Deste ponto em diante há uma remoção de umidade mais significativa, pois, acredita-se que os aglomerados formados inicialmente, em virtude da elevada umidade inicial, estejam desfeitos. Já para a Figura 4.5, nota-se que o período de remoção de umidade superficial prolonga-se até o tempo de secagem de 400 min verificando portanto que este conjunto de pás mostra-se menos adequado que a configuração 3.6A. Para a Figura 4.6 observa-se que este período constante apresenta-se até os 280 min de secagem caracterizando a remoção da umidade intrapartícula e posteriormente a remoção da água superficial do material. Nestas curvas entretanto observa-se que as palhetas mencionadas não conseguiram desfazer eficientemente os aglomerados formados inicialmente em virtude de uma elevada umidade inicial do material e conseqüentemente necessitaram de um maior tempo de secagem. Desta forma, definiu-se que a borra fosse espremida para que sua umidade inicial fosse menor e que as temperaturas da câmara de secagem ficariam em 70 e 95°C.

4.3. Comparação entre do desempenho do secador com as esferas e com o café

Para uma melhor compreensão do processo de secagem tanto para a esfera de vidro quanto para o pó de café, foram fotografados os experimentos realizados a temperatura de 70°C, carga de 1,0 kg e rotação de 20 rpm. A escolha deste experimento foi realizada após verificar que se tratava do ensaio em que a secagem ocorria mais lentamente.

As fotografias foram retiradas a cada 10 min para um tempo total de 2 horas de secagem para o pó e 1 h para a esfera de vidro. Nas Figuras 4.7 e 4.8 encontram-se o comportamento da secagem por meio de fotografias e a curva da cinética de secagem para o pó de café, respectivamente. A Figuras 4.9 demonstra a curva da cinética de secagem das esferas de vidro e a Figura 4.10 o respectivo comportamento desta secagem.

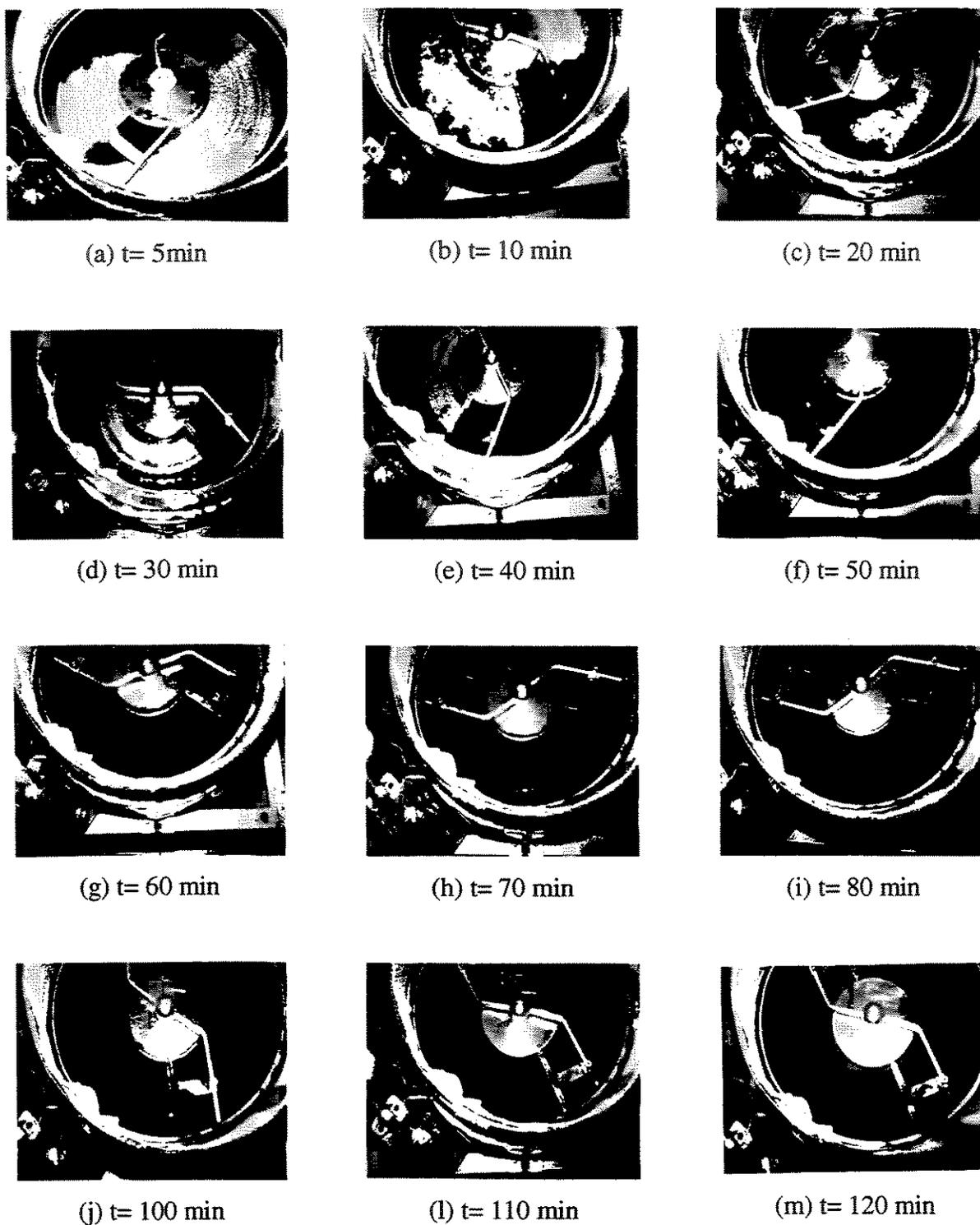


Figura 4.7 – Comportamento da secagem de pó de café.

($T = 70^\circ\text{C}$, carga = 1,0 kg, rotação = 20 rpm)

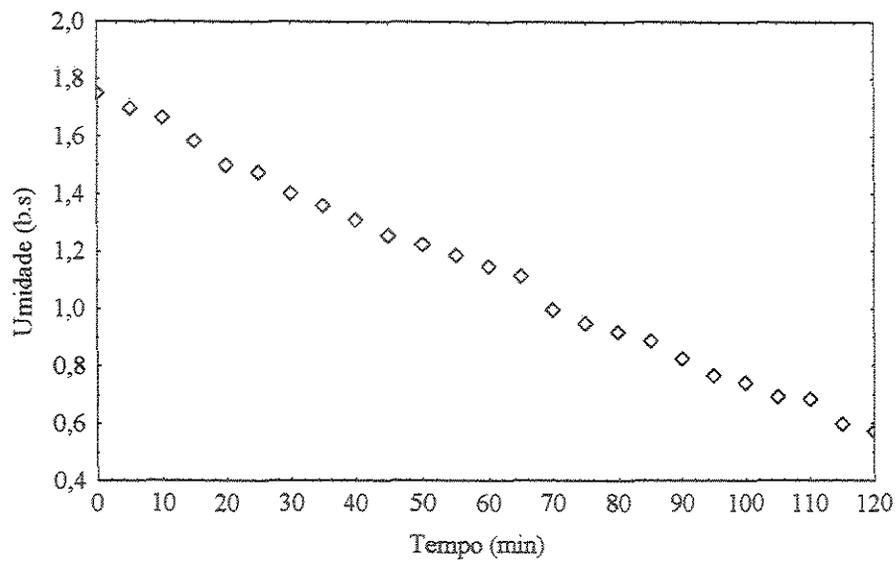


Figura 4.8 – Curva da cinética de secagem do pó de café.

T= 70°C, carga= 1,0 kg, rotação= 20 rpm.

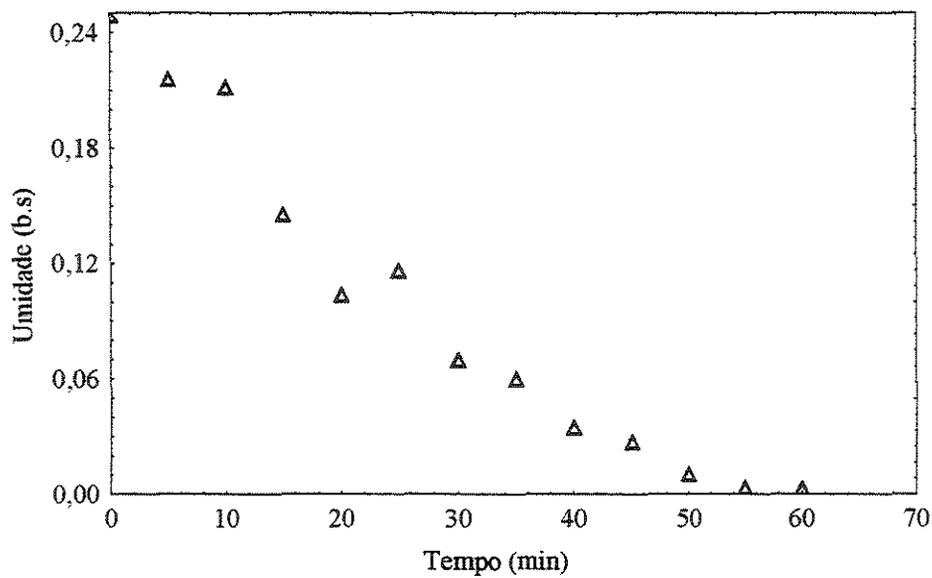


Figura 4.9 – Curva da cinética de secagem de esferas de vidro.

T= 70°C, carga= 1,0 kg, rotação= 20 rpm.

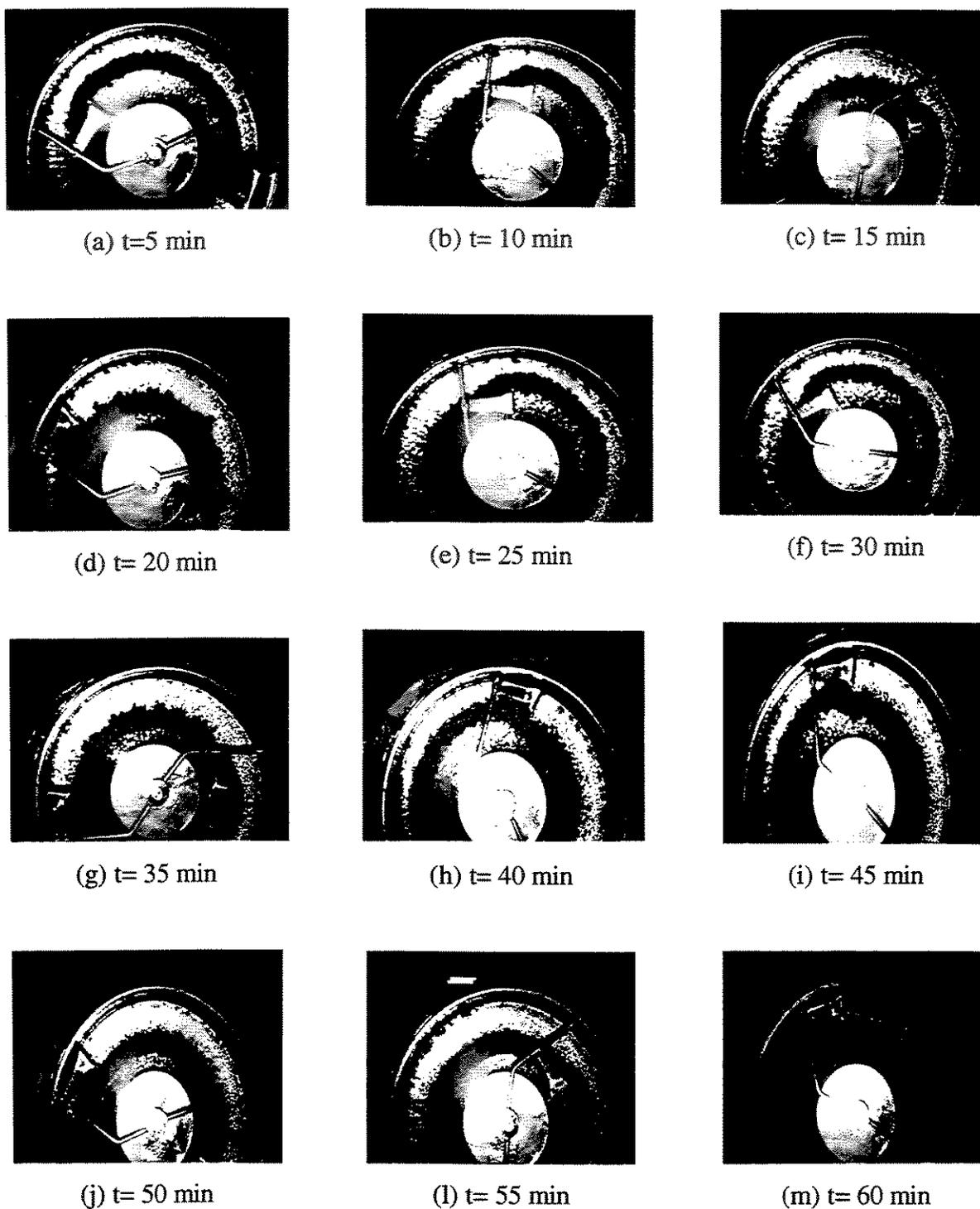


Figura 4.10 – Comportamento da secagem da esfera de vidro.

($T=70^{\circ}\text{C}$, carga= 1,0 kg, rotação= 20 rpm)

As curvas de cinética de secagem apresentam três períodos de secagem para o pó de café e dois períodos para as esferas de vidro. Inicialmente ambos os materiais apresentavam uma aglomeração provocada pelo excesso de umidade. Esta aglomeração prolongou-se por mais tempo no pó de café do que na esfera devido a estrutura apresentada pelos materiais. O pó por ser composto de partículas muito pequenas em torno de 0,0007 m de diâmetro formou aglomerados no início da secagem que a princípio chamamos de torrões, os quais dificultam o processo de remoção de umidade tornando-o mais lento (Figuras 4.7a – 4.7c). A partir de 25 min (início do segundo período) estes torrões foram se desfazendo quando o pó já apresentava 1,5 b.s de umidade. Neste momento o material ainda possuía uma característica coesiva, a diferença é que o material estava mais espaçado que anteriormente. Mesmo assim esta característica coesiva só terminou a partir de 70 min de secagem (Figura 4.7h). Na esfera esta aglomeração começou a ser desfeita a partir de 20 min (início do segundo período), por que houve apenas um encharcamento das esferas diferente dos torrões do pó. Além dos problemas na remoção de umidade relacionados com o tipo de material pode se dizer que haja aqueles relativos a distribuição não uniforme da temperatura da superfície calefatora como mencionado na seção 4.1, a qual permite que em determinadas zonas haja uma maior remoção de umidade do que em outras.

4.4 Análise das curvas de secagem

Utilizando a metodologia proposta na seção 3.4, apresentaremos os resultados relativos ao estudo da cinética e do fluxo de secagem em um secador por contato com agitação mecânica, utilizando partículas esféricas e pó de café após sua primeira extração. As curvas da cinética de secagem estão representadas na forma de “umidade do material em base seca”, expressa em kg de H₂O/kg de material seco, pelo tempo. Já as curvas da taxa por meio do fluxo de remoção da umidade pela umidade. Tais curvas resultam dos dados de cinética de secagem, a partir da regressão exponencial do tipo $y = a + b \cdot \exp(-t/c)$ de seus valores de umidade em função do tempo.

4.4.1 Resultados para a secagem das esferas de vidro

As Figuras de 4.11 a 4.14 representam as curvas de alguns ensaios experimentais destinados à secagem de esferas de vidro. Nota-se, em todas as curvas, que ocorre basicamente a remoção de umidade não ligada do material, ou seja, a umidade intrapartícula e superficial do material. Salienta-se que as Figuras com a notação (a) referem-se as curvas de secagem, enquanto que as com (b) referem-se as curvas de fluxo de secagem.

Os ensaios experimentais com suas respectivas condições de secagem são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Condições experimentais para a esfera de vidro.

Ensaio	$d_p(\text{mm})$	$T_{p,0}(\text{°C})$	$T_w(\text{°C})$	$W_s(\text{kg})$	$\Omega (\text{rpm})$
01	1,18	21,7	70	0,5	20
02	1,18	20,7	95	0,5	20
03	1,18	21,7	95	1,0	40
04	1,18	21,7	95	0,5	40
05	3,75	23,3	95	1,0	40

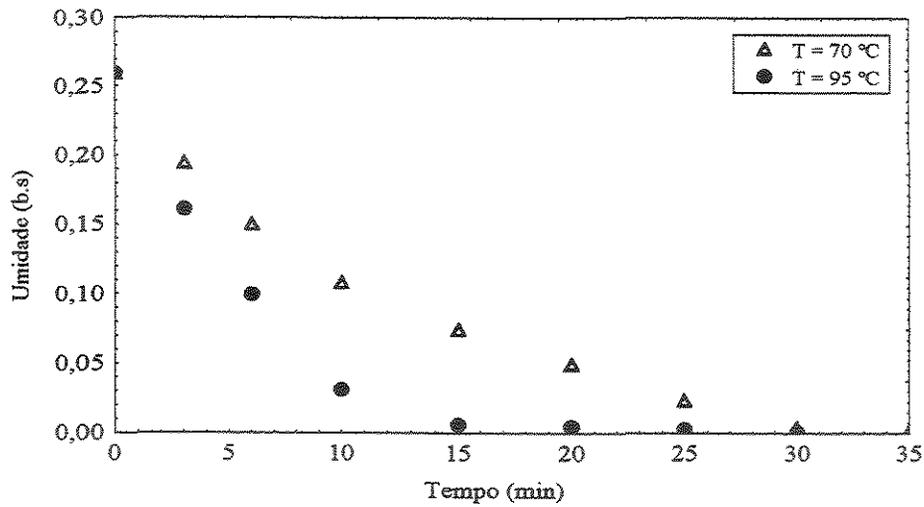
sendo:

$T_{p,0}$ – temperatura inicial da esfera de vidro.

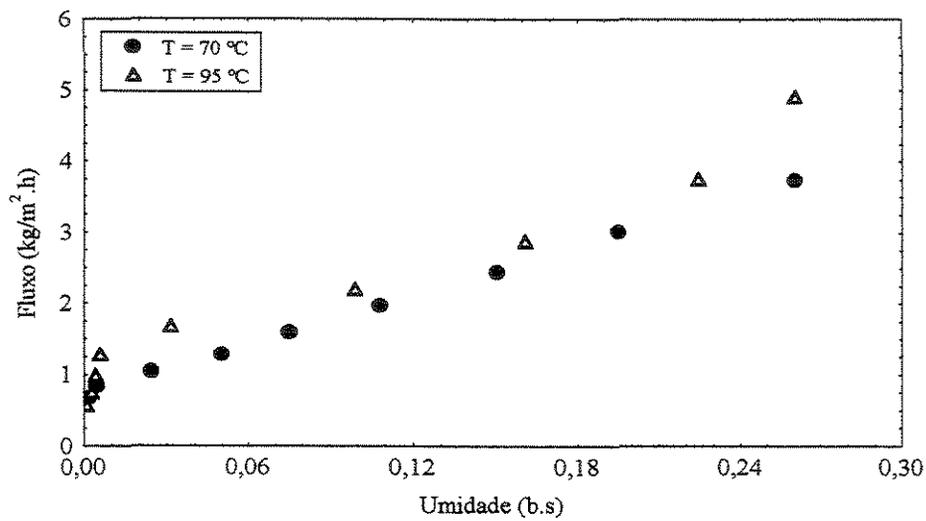
T_w – temperatura da superfície calefatora.

Verifica-se, na Figura 4.11 (a), claramente o efeito da temperatura da superfície de aquecimento. O aumento da temperatura faz com que se propicie a elevação da força motriz necessária à remoção de umidade e, conseqüentemente, o aumento da inclinação da curva da cinética de secagem. Fenômeno análogo ocorre com a diminuição da carga de material (Figura 4.12 (a)), tendo em vista a menor quantidade de material a ser processada. Observando a Figura 4.13 (a), podemos notar que o efeito da agitação é pouco significativo sobre a cinética. A Figura 4.14 (a) representa a influência do diâmetro da partícula. A curva referente ao efeito de se utilizar partículas de maior diâmetro apresenta uma inclinação um pouco mais acentuada que a de menor diâmetro. Esta inclinação, deve-se a aglomeração intraparticular causada pelo excesso de umidade principalmente no início da secagem. Os comportamentos observados nas curvas de cinética de secagem não são encontrados nas curvas de taxa de secagem em virtude de o ajuste numérico ser realizado por um modelo

exponencial, o qual representa os pontos referentes ao ajuste exponencial e não os pontos determinados na cinética de secagem.



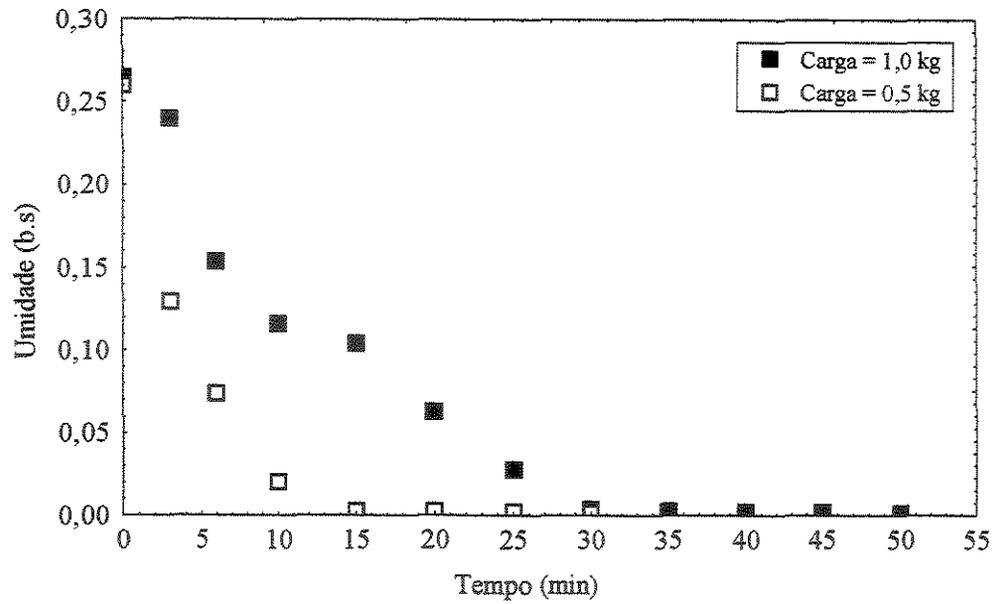
(a)



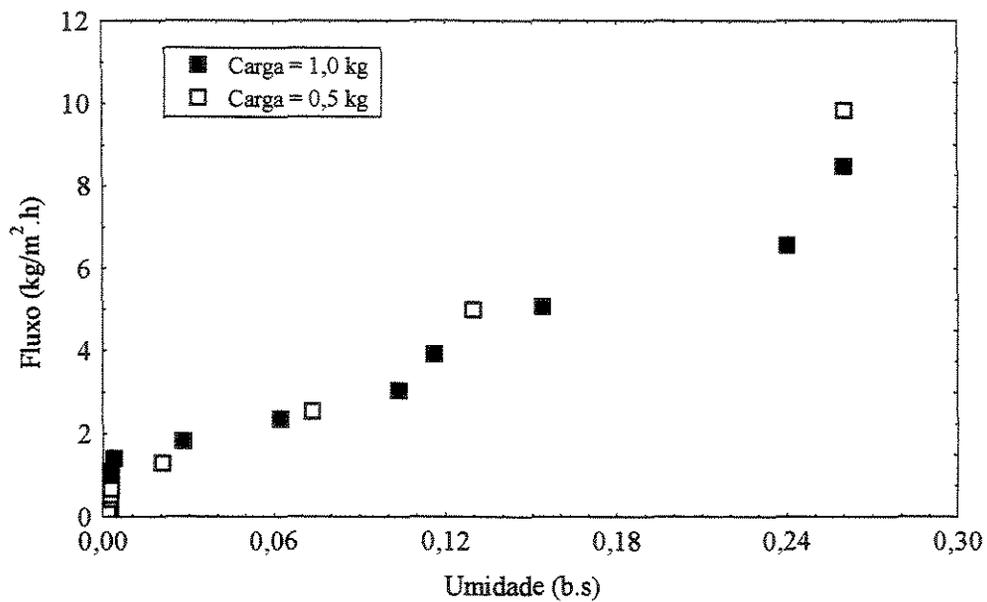
(b)

Figura 4.11 – Influência da temperatura da placa de aquecimento - esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 1 e 2.

Carga = 0,5 kg , rotação= 20 rpm e $d_p = 1,18$ mm

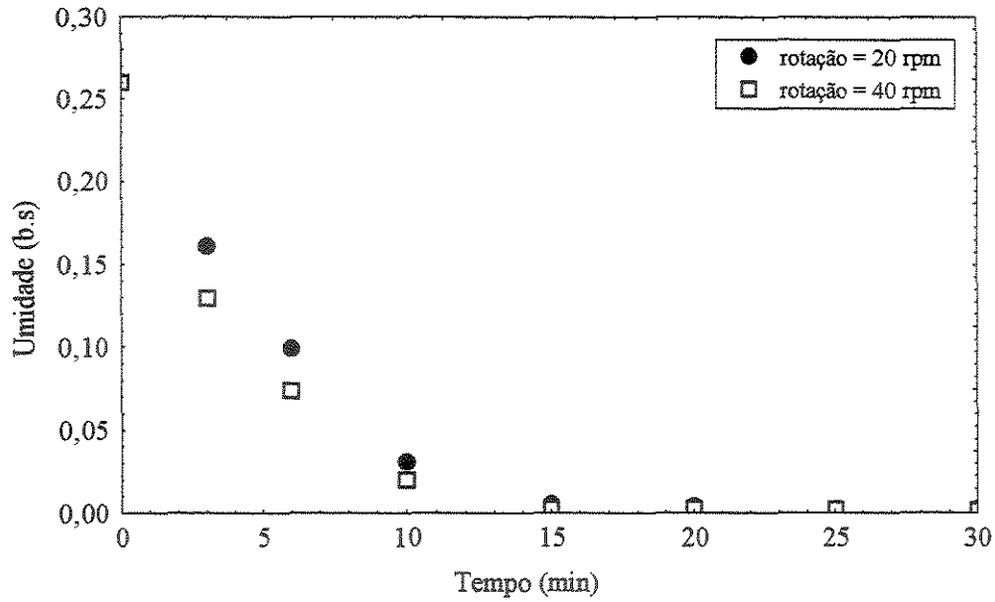


(a)

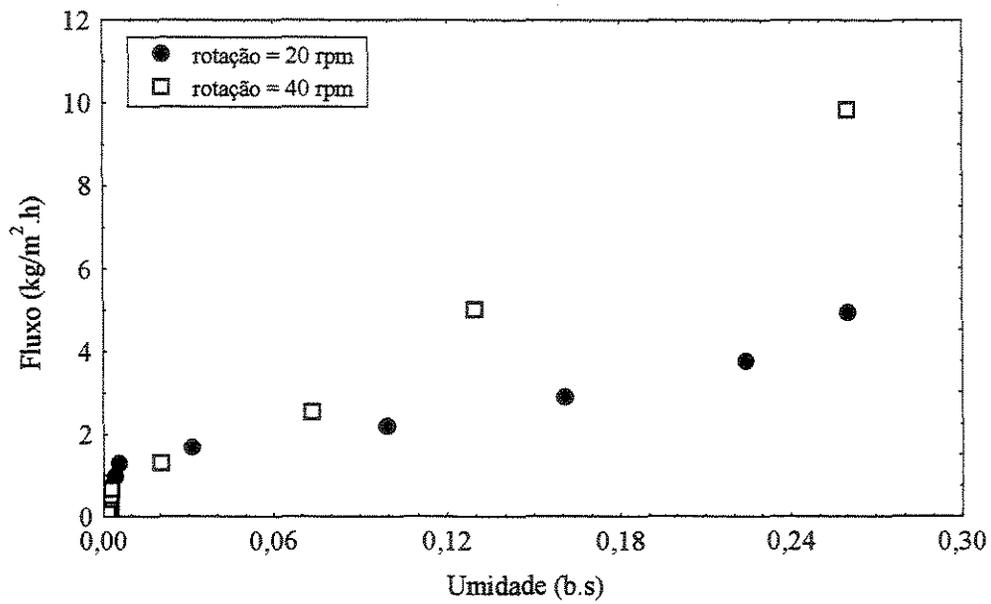


(b)

Figura 4.12 - Influência da carga (em base seca) de material – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 3 e 4.
 $T = 95^{\circ}\text{C}$, rotação = 40 rpm e $d_p = 1,18\text{ mm}$

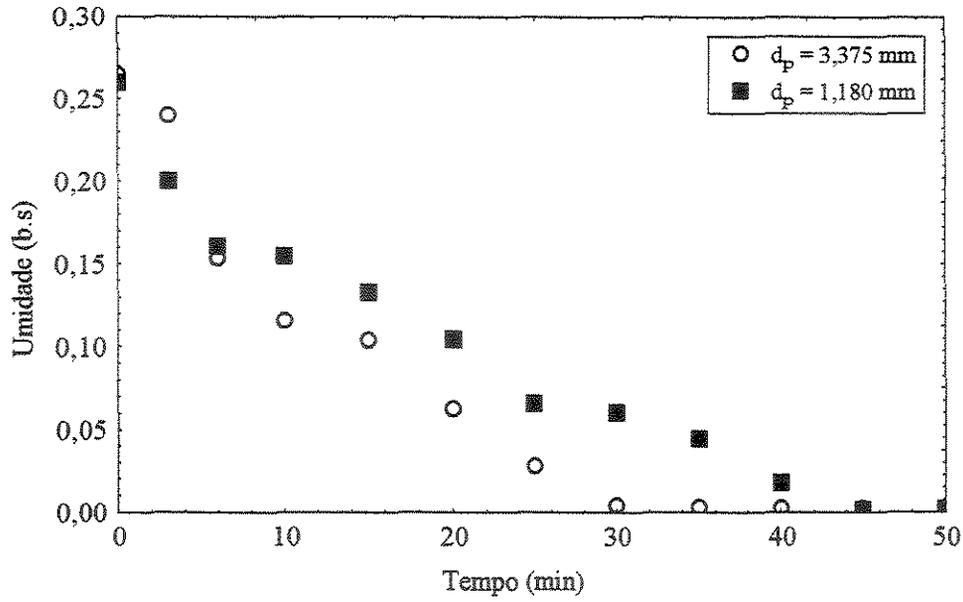


(a)

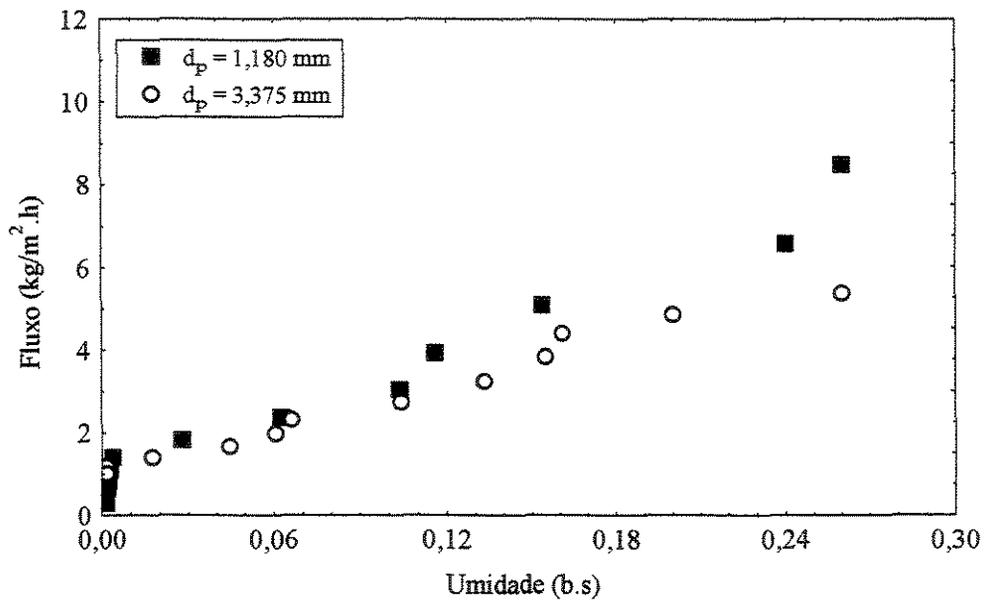


(b)

Figura 4.13 - Influência da agitação do material – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 2 e 4.
 $T = 95^{\circ}\text{C}$, carga = 0,5 kg, $d_p = 1,18$ mm



(a)



(b)

Figura 4.14 - Influência do diâmetro da partícula – esfera de vidro, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 3 e 5.
 $T = 95$ °C, carga = 1,0 kg, rotação = 40 rpm

4.4.2 Resultados para a secagem do pó de café

As Figuras de 4.15 a 4.17 (a) e (b) ilustram o comportamento das curvas da cinética bem como do fluxo de secagem para o pó de café. A Tabela 4.2 mostra as condições experimentais utilizadas em cada ensaio de secagem de pó de café.

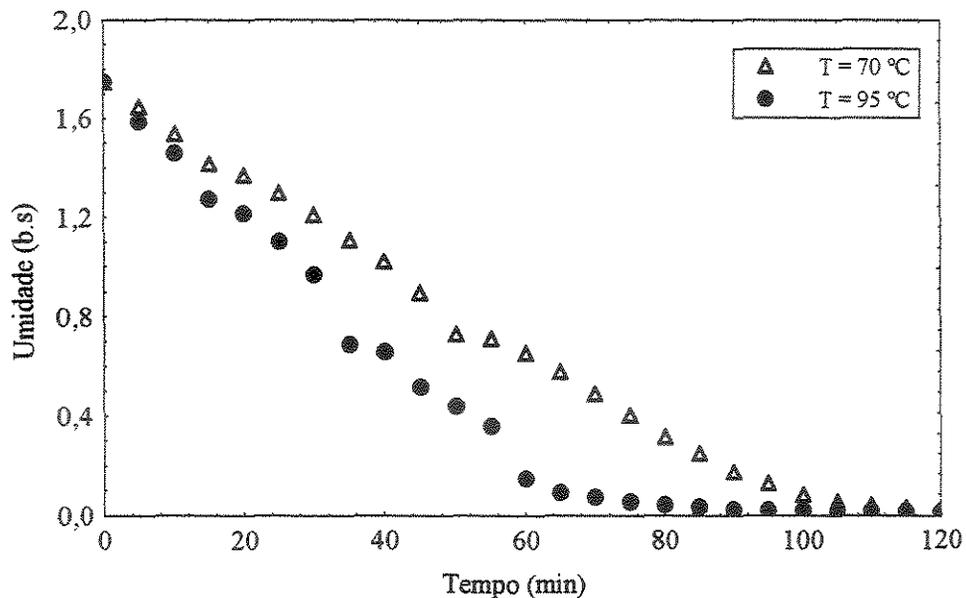
Tabela 4.2 – Condições experimentais na secagem de pó de café

Ensaio	X_0 (b.s)	$T_{p,0}$ (°C)	T_w (°C)	W_s (kg)	Ω (rpm)
01	1,75	25,6	70	1,0	20
02	1,75	25,2	95	1,0	20
03	1,75	25,1	95	0,5	20
04	1,75	24,5	95	1,0	40

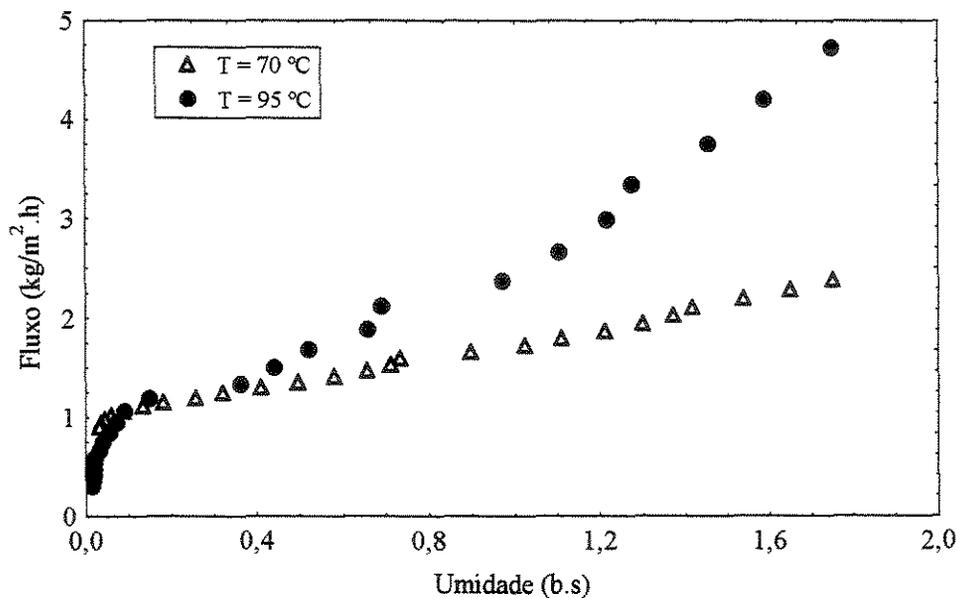
$T_{p,0}$ - temperatura inicial do pó de café. T_w - temperatura da superfície calefatora.

As Figuras de 4.15 a 4.17 (a) e (b) mostram o comportamento das curvas da cinética de secagem e de fluxo de secagem, respectivamente. Nas Figuras relativas a cinética de secagem, observa-se a um comportamento similar ao encontrado no trecho BC da Figura 2.1, caracterizado pelo período de velocidade constante ou remoção de umidade. Já nas curvas de fluxo de secagem devido a um ajuste numérico pelo modelo exponencial ocorre uma descaracterização do período de velocidade constante apresentado nas curvas de cinética de secagem. Nota-se, também, que o material inicialmente possui característica altamente coesiva (até o quarto ponto das curvas). A partir do quarto ponto observa-se uma pequena diferença entre as curvas de secagem, mas o material ainda assim possui uma característica coesiva. Este comportamento foi ilustrado na seção 4.3. Percebe-se na Figura 4.15 (a) que esta modificação ocorre mais rapidamente quanto maior for a diferença de temperatura entre o agente de secagem e o material a ser seco (quando a temperatura da placa está a 95°C), devido promover uma maior retirada de umidade. Considerando o efeito da carga de material em 1h de secagem (Figura 4.16a), observa-se que há uma maior remoção de umidade quando trabalha-se com uma menor carga chegando a atingir em torno de 0,14 b.s enquanto para a maior carga chega em torno de 0,7 b.s. A diferença entre esses valores é devido a menor quantidade de material processado. Quando aumenta a intensidade de agitação neste tipo de material, constata-se que não há tendência da secagem

ocorrer mais rapidamente, tendo em vista que o tempo de contato do material com a superfície aquecida é praticamente o mesmo para as diferentes velocidades de agitação (Figura 4.17a).

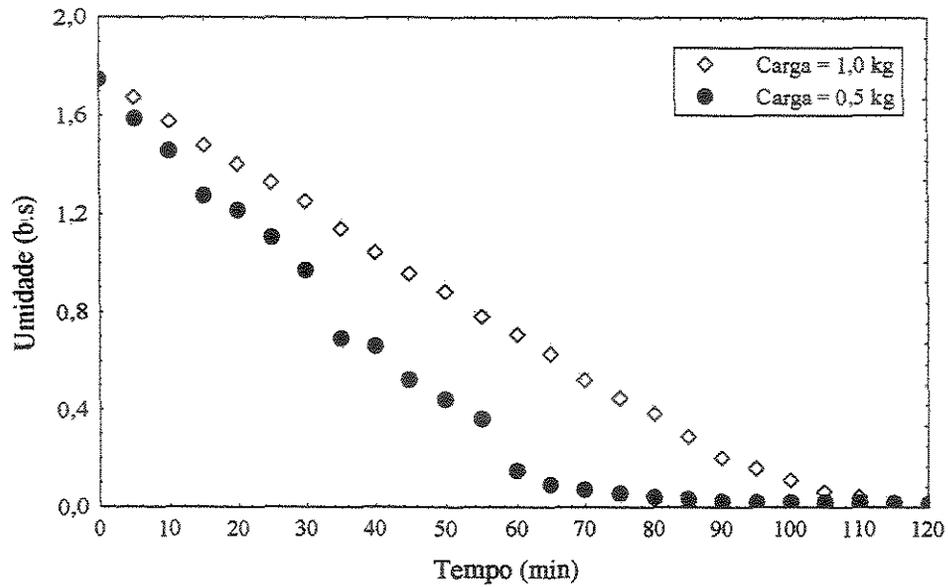


(a)

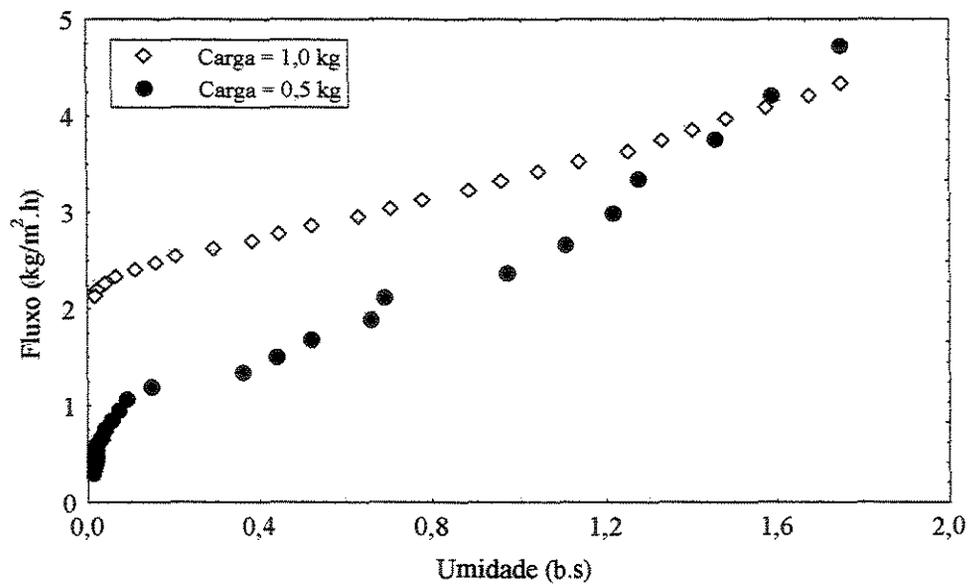


(b)

Figura 4.15 - Influência da temperatura da placa de aquecimento – pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 1 e 2. carga= 1,0 kg , rotação= 20 rpm



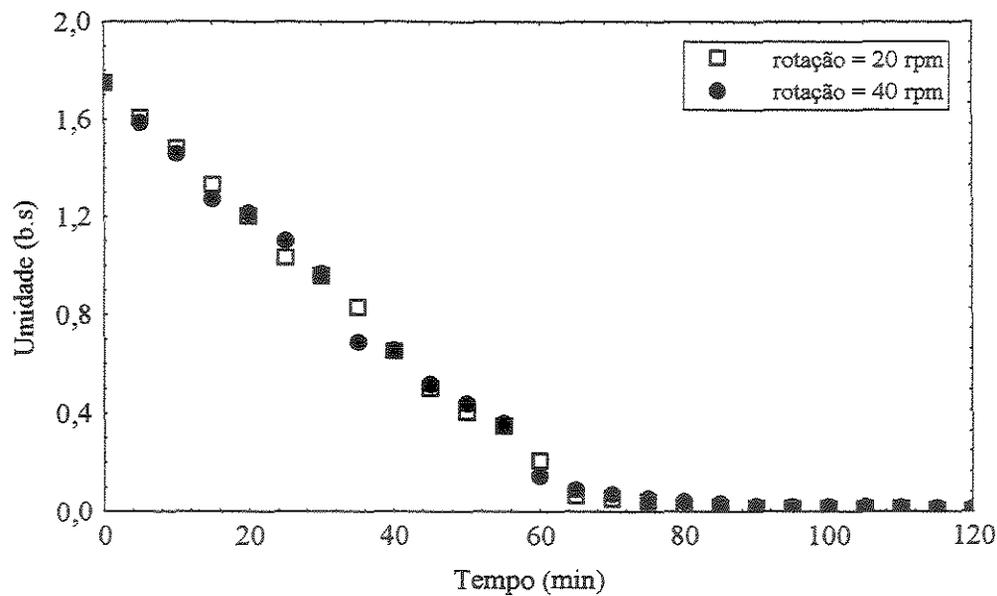
(a)



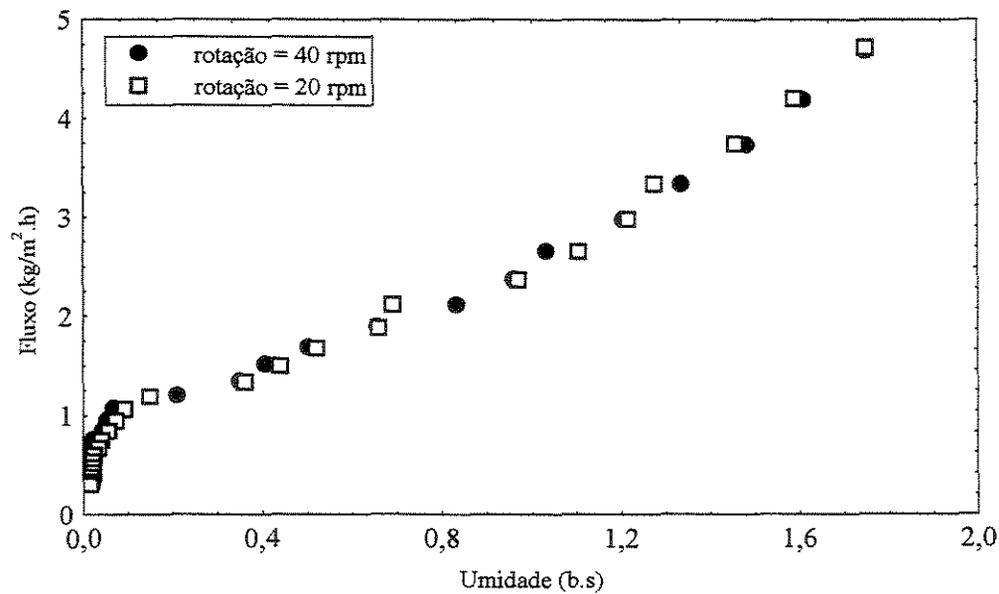
(b)

Figura 4.16 – Influência da carga de material – pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 2 e 3.

T= 95°C, rotação= 20 rpm



(a)



(b)

Figura 4.17 – Influência da agitação do material - pó de café, (a) curva característica da secagem e (b) curva da taxa de secagem, ensaio 2 e 4.
 T= 95°C, carga= 1,0 kg.

4.5. Comparação entre as curvas de fluxo de secagem experimentais e as do modelo

No intuito de avaliar o modelo de Schlünder e Mollekopf (1984), foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran apresentado no Apêndice A. As curvas do fluxo de secagem experimentais de esferas de vidro e pó de café foram comparadas com as obtidas pela aplicação do modelo citado. Como mencionado na seção 2.3, o único parâmetro de ajuste do modelo foi o número de mistura, N_{mis} e os valores sugeridos por esses autores para as constantes c e m da equação 2.2, foram que $c = 25$ e $m = 0,2$.

Nas Figuras (4.18) a (4.24) são apresentados os resultados das curvas de fluxo de secagem, relativos à comparação entre os valores experimentais e aqueles advindos do modelo de Schlünder e Mollekopf (1984). Em virtude da aglomeração descrita na seção 4.3 para o pó de café, optou-se por fazer um ajuste das curvas de secagem após o término da característica coesiva somente para o pó de café visto que o modelo não prevê o efeito da aglomeração, ou seja, a umidade inicial considerada para a construção das curvas de fluxo de secagem foi de 0,6 b.s para todos os experimentos. Nesta dissertação, o valor sugerido por Schlünder e Mollekopf para a constante c da equação (2.1); foi multiplicado por 18 para o pó de café e passou a ser 42 para a esfera de vidro. Desta forma, o modelo descreve razoavelmente o modelo retrocitado somente para a esfera de vidro e não se aplica para o pó de café.

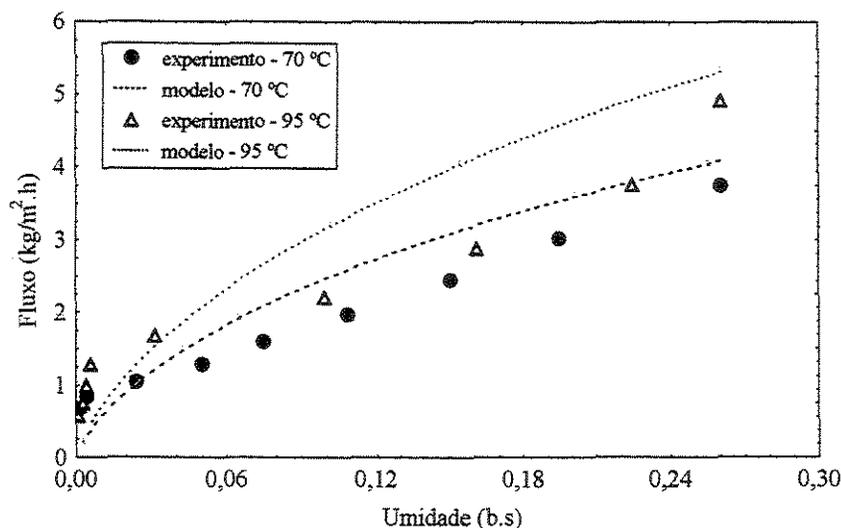


Figura 4.18 – Influência da temperatura da placa de aquecimento - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.

Carga = 0,5 kg , rotação= 20 rpm e $d_p = 1,18$ mm

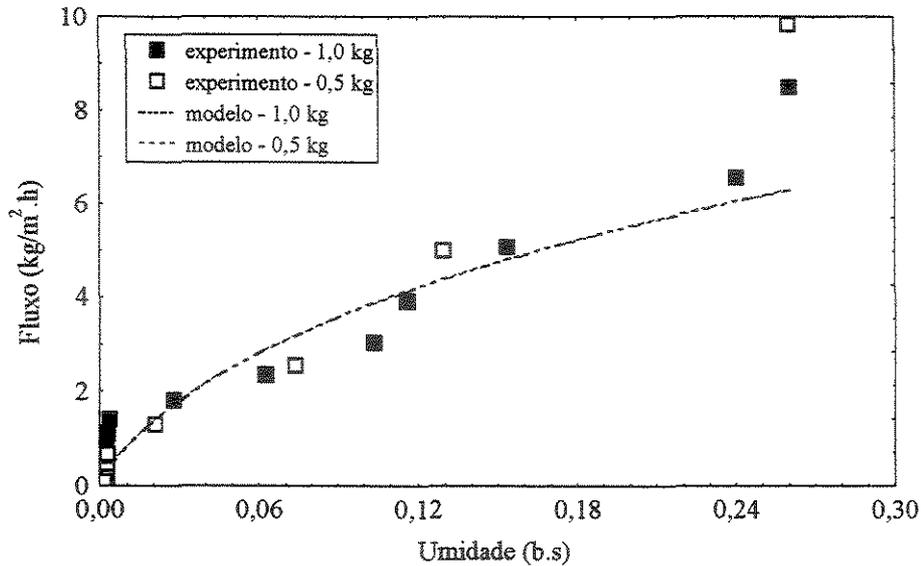


Figura 4.19 – Influência da carga de material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.
 $T = 95^{\circ}\text{C}$, rotação = 40 rpm e $d_p = 1,18$ mm

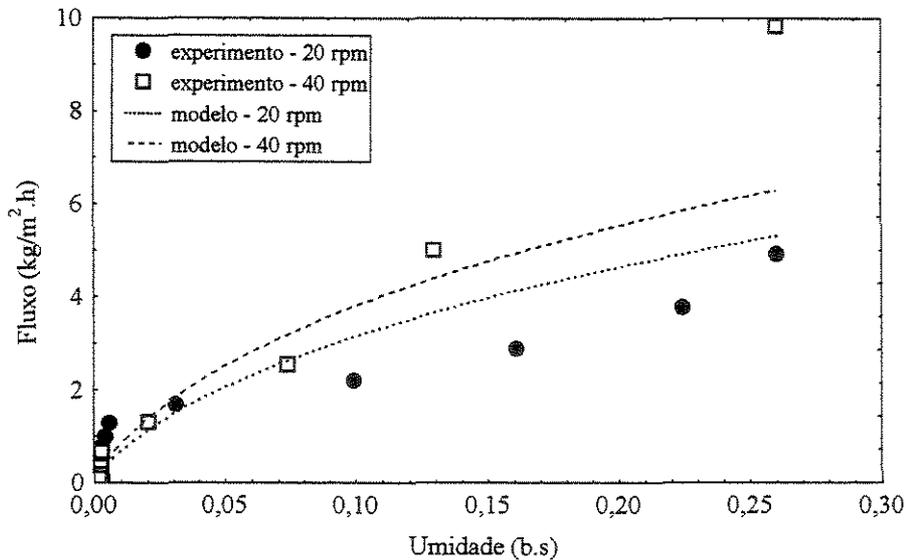


Figura 4.20 – Influência da agitação do material - comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.
 $T = 95^{\circ}\text{C}$, carga = 0,5 kg, $d_p = 1,18$ mm

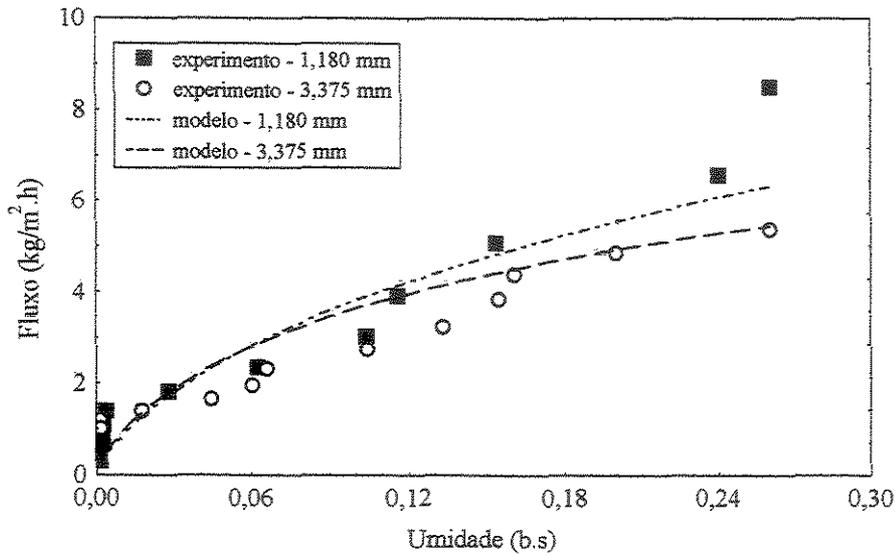


Figura 4.21 - Influência do diâmetro da partícula- comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para as esferas de vidro.
 T= 95 °C, carga= 1,0 kg, rotação= 40 rpm

Nas Figuras de (4.22) a (4.24) são apresentados os resultados das curvas de fluxo de secagem para pó de café com umidades de 0.6 b.s, relativos à comparação entre os valores experimentais e do modelo citado.

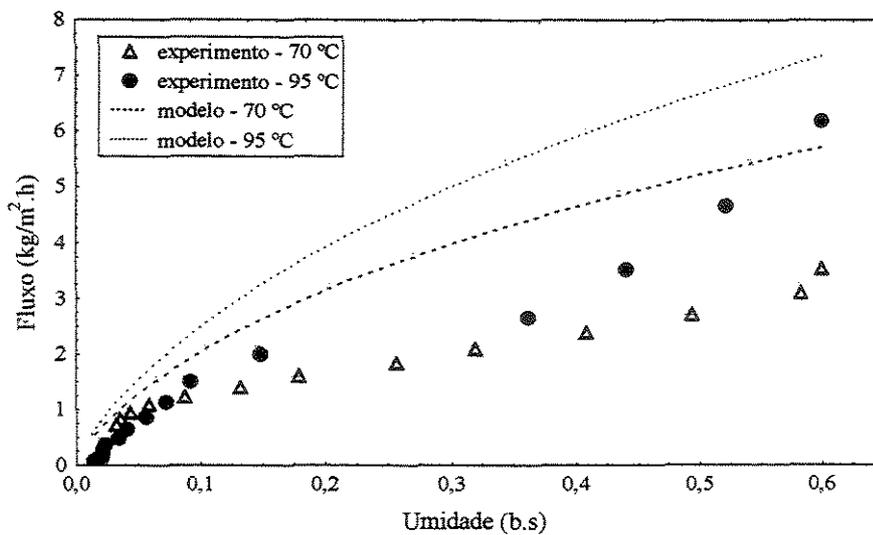


Figura 4.22 – Influência da temperatura da placa de aquecimento- comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.
 carga= 1,0 kg , rotação= 20 rpm

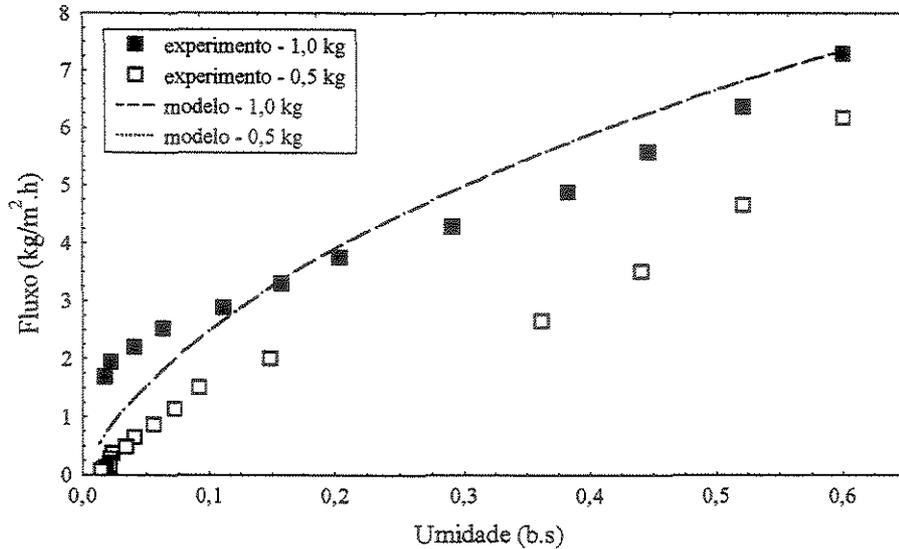


Figura 4.23 – Influência da carga de material– comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.
T= 95°C, rotação= 20 rpm

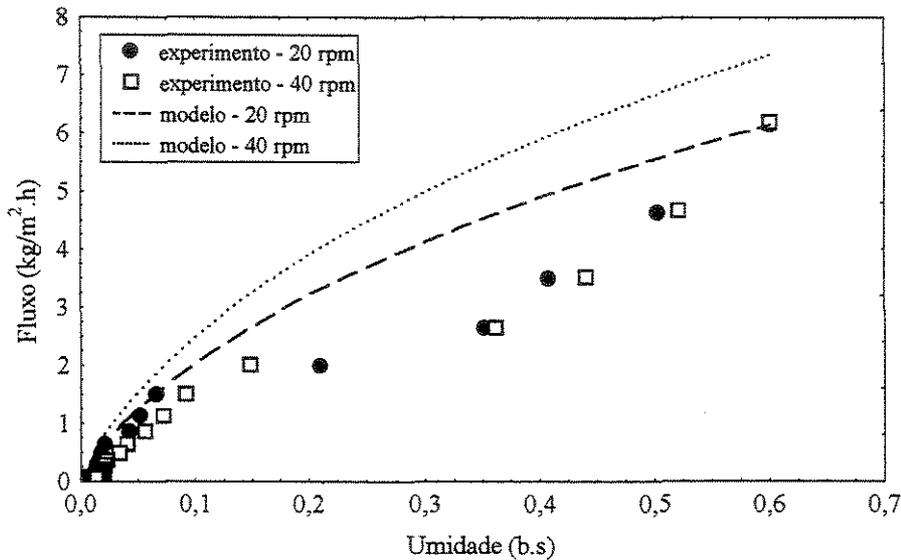


Figura 4.24 – Influência da agitação do material– comparação entre os fluxos experimentais e os referentes aos modelos para o pó de café.
T= 95°C, carga= 1,0 kg

Nas Figuras relativas a comparação entre o modelo e os dados experimentais verifica-se que o modelo de Schlünder e Mollekopf não se aplica para o pó de café e descreve razoavelmente o comportamento experimental para a esfera de vidro. Isto é evidenciado nos valores de c os quais tiveram o valor de 42 para a esfera e teve de ser multiplicados por 18 para o pó de café. Este ajuste nos valores de c e conseqüentemente no

valor de N_{mis} , permite supor que este número de rotação não seja uma característica puramente mecânicas do agitador deve-se também levar em consideração os efeitos da umidade inicial do material. Talvez procurando encontrar um valor de N_{mis} que tenha esta característica este modelo possa ser aplicado para outros tipos de experimentos. Vale ressaltar no entanto, que os pontos experimentais podem estar comprometido visto que o ajuste da curva da cinética de secagem foi realizado por meio de uma equação exponencial, o que conseqüentemente refletiu no comportamento das curvas de fluxo de secagem.

4.6. Planejamento experimental

Como mencionado anteriormente foi adotado para este trabalho um planejamento fatorial 2^3 para o pó de café, gerando um total de oito experimentos. Este planejamento não foi realizado com as esferas de vidro por considerar que se tratava de um material difícil de ser analisado estatisticamente em virtude de sua secagem ocorrer rapidamente. A finalidade deste planejamento nesta dissertação é avaliar por meio estatísticos quais das variáveis originais T_w , w_0 e Ω são mais influentes para as respostas X_{final} (umidade final do material) e $T_{p,final}$ (temperatura final da partícula) no processo de secagem. De acordo com este planejamento, encontra-se na Tabela 4.3, as variáveis originais T_w , w_0 e Ω , codificadas em seus respectivos níveis para cada ensaio, bem como os valores obtidos experimentalmente para as respostas X_{final} (umidade final do material) e $T_{p,final}$ (temperatura final da partícula) no processo de secagem.

Tabela 4.3 - Matriz de experimentos e resultados do planejamento fatorial de experimentos.

Ensaio	Variáveis codificadas			Respostas	
	T_w	w_0	Ω	X_{final}	$T_{p,final}$
01	-	-	-	0,5239	52,0
02	+	-	-	0,1332	62,7
03	-	+	-	0,9553	50,9
04	+	+	-	0,6054	68,1
05	-	-	+	0,4475	56,6
06	+	-	+	0,0187	65,7
07	-	+	+	0,9521	52,0
08	+	+	+	0,4307	66,3

A partir dos resultados experimentais obtidos, realizou-se uma análise estatística com o auxílio do aplicativo Statistica 5.0®. com a finalidade de avaliar quais variáveis, independentes ou combinadas, influenciam a X_{final} e $T_{p,\text{final}}$ em um período de 1 h de secagem. Como resultado dessa análise obteve-se os valores dos efeitos estimados para cada variável e suas iterações com seus respectivos desvios padrão, conforme indicado nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Estimativa dos efeitos para a variável de resposta X_{final} .

Efeitos	Valores estimados +/-erro
T_w	-0,42 +/- 0,033
w_0	0,46 +/- 0,033
Ω	-0,09 +/- 0,033
$T_w w_0$	-0,013 +/- 0,033
$T_w \Omega$	-0,05 +/- 0,033
$w_0 \Omega$	0,003 +/- 0,033
Média	0,51 +/- 0,017

Tabela 4.5 - Estimativa dos efeitos para a variável de resposta $T_{p,\text{final}}$.

Efeitos	Valores estimados +/-erro
T_w	12,82 +/- 0,325
w_0	0,075 +/- 0,325
Ω	1,73 +/- 0,325
$T_w w_0$	2,93 +/- 0,325
$T_w \Omega$	-1,13 +/- 0,325
$w_0 \Omega$	-2,08 +/- 0,325
Média	59,29 +/- 0,1625

Analisando os valores estimados dos efeitos com seus respectivos erros padrão nas Tabelas 4.4 e 4.5, verifica-se que para a variável de resposta X_{final} , as variáveis independentes (T_w e w_0) apresentaram significância estatística, ou seja, possuem valores numericamente maiores que os desvios. Já para a variável $T_{p,\text{final}}$ somente a temperatura da placa apresenta significância. Estes resultados devem, contudo, serem confirmados em níveis de confiança de 95%. Desta forma, utiliza-se o parâmetro estatístico Pr (probabilidade), disponibilizado através da análise de variância, conforme as tabelas 4.6 e 4.7, que deve ser menor que 5% para ser significativa.

Tabela 4.6 - Análise da variância (ANOVA) para a variável de resposta X_{final} .

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
T_w	0,357300	1	0,357300	161,0902	0,050055
W_0	0,414183	1	0,414183	186,362	0,046504
Ω	0,017012	1	0,017012	7,6698	0,220598
$T_w w_0$	0,000335	1	0,000335	0,1513	0,763866
$T_w \Omega$	0,005492	1	0,005492	2,4764	0,360401
$W_0 \Omega$	0,000021	1	0,000021	0,0096	0,937816
Erro puro	0,002218	1	0,002218	-	-
Total (Correlação)	0,796562	7	-	-	-

$$R^2 = 0,99722$$

Tabela 4.7 - Análise da variância (ANOVA) para a variável de resposta $T_{p,final}$.

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
T_w	328,9612	1	328,9612	1557,213	0,016129
W_0	0,0112	1	0,0112	0,053	0,855615
Ω	5,9513	1	5,9513	28,172	0,118553
$T_w w_0$	17,1112	1	17,1112	81,000	0,070447
$T_w \Omega$	2,5313	1	2,5313	11,982	0,179038
$w_0 \Omega$	8,6112	1	8,6112	40,763	0,098908
Erro puro	0,2113	1	0,2113	-	-
Total (Correlação)	363,3888	7	-	-	-

$$R^2 = 0,99942$$

Com base no parâmetro estatístico Pr (probabilidade), confirma-se a influência das variáveis, T_w e w_0 na X_{final} e T_w na $T_{p,final}$, e considera-se os efeitos não significativos apenas como erros aleatórios de experimentação.

A partir dos resultados advindos das Tabelas 4.6 e 4.7, propõem-se um modelo estatístico linear para as respostas X_{final} e $T_{p,final}$. Os coeficientes destes modelos estão representados nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 - Coeficientes de regressão para X_{final} .

Parâmetros	Coefficientes
Constante	0,73
T_w	-0,009
w_0	1,06
Ω	0,012
$T_w w_0$	-0,002
$T_w \Omega$	-0,0002
$w_0 \Omega$	0,0007

Tabela 4.9 - Coeficientes de regressão para $T_{p,final}$.

Parâmetros	Coefficientes
Constante	22,75
T_w	0,29
w_0	-26,01
Ω	0,77
$T_w w_0$	0,47
$T_w \Omega$	-0,005
$w_0 \Omega$	-0,42

Esses modelos são descritos pelas equações (4.1) e (4.2), em função das variáveis que apresentaram influência nas respostas X_{final} e $T_{p,final}$, segundo os coeficientes de regressão apresentadas nas Tabelas 4.8 e 4.9. Os coeficientes de correlação de 0,9972 para a X_{final} e 0,9942 para a $T_{p,final}$, sugerem que estes modelos lineares representam satisfatoriamente os dados experimentais apenas para os valores estipulados para o processo de secagem do pó de café.

$$X_{final} = 0,73 - 0,009T_w + 1,06w_0 \tag{4.1}$$

$$T_{p,final} = 22,75 + 0,297T_w \tag{4.2}$$

De acordo com a equação 4.1 pode-se observar que os valores estipulados de temperatura da placa de aquecimento e de carga de material para o processo de secagem influenciam a umidade final do material confirmando o comportamento apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

Por meio dos perfis de temperatura, das curvas de cinética e das fotografias que descrevem o comportamento da secagem, constatou-se que o secador por contato com agitação mecânica mostrou-se satisfatório na secagem da esfera de vidro e pó de café. Desta forma, conclui-se que este secador pode ser utilizado na secagem de outros tipos de materiais.

A partir da análise dos resultados das curvas de cinética de secagem e de fluxo de secagem experimentais e simuladas conclui-se:

1. A secagem ocorre preferencialmente na etapa do período constante de remoção de umidade para o pó de café. Já para as esferas de vidro ocorre apenas a remoção da umidade não ligada ao material. Estes comportamentos só podem ser identificados com maior precisão na cinética de secagem o que não acontece para os resultados de fluxo de secagem devido ajuste ser realizado por um modelo exponencial.
2. As curvas do fluxo de secagem experimentais apresentam resultados razoáveis quando comparados àquelas previstas pelo modelo de Schlünder e Mollekopf (1984), apenas para a esfera de vidro e não tem um bom ajuste para o pó de café com $X \leq 0,6$.
3. Constata-se o efeito de aglomeração entre as partículas, devido ao excesso de umidade, no início da secagem. Este comportamento não é previsto no modelo utilizado no presente trabalho.

As conclusões referentes a influência dos parâmetros operacionais (carga do material, temperatura da placa de aquecimento e rotação) no processo de secagem, a partir da análise estatística e dos resultados das curvas de cinética de secagem experimentais são:

1. De acordo com as análises das curvas de cinética de secagem tanto do pó de café quanto das esferas de vidro, observa-se que o aumento da temperatura da placa bem como o decréscimo da carga, propiciam uma remoção de umidade mais efetiva.
2. Por meio da análise estatística identifica-se que, a carga do material e a temperatura da placa de aquecimento influenciam na umidade final do material; assim como a temperatura da placa na temperatura final do sólido respectivamente.
3. Constata-se que os modelos lineares provenientes do planejamento fatorial descrevem satisfatoriamente o processo de secagem de pó de café dentro das condições estabelecidas de secagem.

5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar os estudos efetuados sobre a utilização de um secador por contato aberto à atmosfera com agitação mecânica, são sugeridos os seguintes tópicos:

1. Realizar o mesmo estudo só que para um secador por contato à vácuo.
2. Secar outros tipos de materiais como alimentícios e produtos naturais, bem como fazer uma análise na qualidade do produto final.
3. Verificar um valor do número de mistura N_{mis} , que esteja em função da umidade do material.
4. Ajustar melhor o modelo empírico, em virtude de acreditar-se que a equação escolhida para o ajuste da cinética de secagem está comprometendo o estabelecimento das curvas de fluxo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUER, R. Effektive radiale Wärmeleitfähigkeit gasdurchströmter Schüttungen aus Partikeln unterschiedlicher Form und Grössenverteilung, **VDI-Forschungsh**, p.582, 1977.
- BETIOLI, M.L.P. Desenvolvimento de metodologia e procedimentos experimentais para caracterização física e análise térmica de materiais particulados. **Relatório Final de Iniciação Científica. UNICAMP/PIBIC/CNPq**, 2001.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experiments**. 1ª ed. NY. John Willey & Sons, 1978.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**, Campinas: Editora da Unicamp, 1995.
- CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento e Análise de Experimentos**. Serviço Gráfico da UFScar, Janeiro, 2000.
- DAUD, W. R.; BIN W.; ARMSTRONG, W. D. Conductive drying characteristics of gelatinized rice starch. **Drying Technology**. 6 (4), 655-674, 1988.
- DITTLER, A.; BAMBERGER, T.; GEHRMANN, D.; SCHLÜNDER, E. U. Measurement and simulation of the vacuum contact drying of pastes in a LIST-type kneader drier. **Chemical Eng. Process**. v. 36, p. 301-308, 1997.
- FARGES, D.; HEMATL, M.; LAGUERIE, C.; VACHET, F.; ROUSSEAU, P. A New approach contact drying modeling. **Drying Technology**. 13: 1317-1329, 1995.
- FERRASSE, J. H.; ARLABOSSE, P.; PUAUX, J. P.; LECOMTE, D. Study of indirect contact drying of agitated sewage sludge. **12th International Drying Symposium**. Nº 25, Netherlands, 2000.

- FORBERT, R.; HEIMANN, F. Vacuum contact drying of mechanically agitated coarse, hygroscopic bulk material. **Chemical Engineering Process**. 26, 225-235, 1989.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**, 3th. ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- GEVAUDAN, A.; ANDRIEU, J. Contact drying modelling of agitated porous alumina beads. **Chem. Eng. Process**. v. 30, p. 31-37, 1991.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 4^o Ed, Rio de Janeiro, Editora LTC, 1998.
- LOWE, P. Developments in the thermal drying of sewage sludge. **J. CIWEM**. v. 9, p. 306-315.
- MAIALLE, K.G.; MENEGALLI, F.C. Secagem de borra de café em leito de jorro fluidizado bidimensional: estudo preliminar. **Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. UFSCar, São Carlos, p. 301-306, 1996.
- MOLLEKOPF, N.; MARTIN, H. Zur Theorie des Wärmeübergangs an bewegte Kugelschüttungen bei kurzfristigem Kontakt. **Chem. Ing. Technology**. v. 16, p.701-706, 1982.
- OAKLEY, D. Contact Drying, p. 115-117. In: **Industrial Drying of Foods**. Christopher G.J. Baker. London, Ed. Chapman & Hall, 1997.
- OKADA, M. et al. Fundamentos sobre a secagem de sólidos. In: Tavaglini, D. A. (Coord.) **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. Campinas: ITAL, 1987. p. 1-38.
- SCHLÜNDER, E.U.; MOLLEKOPF, N. Vacuum contact drying of free flowing mechanically agitated particulate material. **Chem. Eng. Process**. v. 18, p. 93-111, 1984.

- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- STZABERT, Z. T. Size selection of vacuum contact dryer with mechanically mixed particulate material. **Drying Technology**. 7: 71-85, 1989.
- TSOTSAS, E. e SCHLÜNDER, E.U. Contact drying of mechanically agitated particulate material in the presence of inert gas. **Chem. Eng. Process**. v. 20, p. 277-285, 1986.
- TSOTSAS, E.; SCHLÜNDER, E.U. Vacuum contact drying of mechanically agitated beds: The influence of hygroscopic behavior on the drying rate curve. **Chem. Eng. Process**. v. 21, p. 199-208, 1987.
- Yamahata, Y., IZAWA, H., HASAMA, K. 1984. Experimental study on application of paddle dryers for sludge cake drying. **Proceedings of 4th International Drying Symposium**, J9. Kyoto.
- ZEHNER, P. Experimentelle und theoretische Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchströmter Kugelschüttungen bei mässigen und hohen Temperaturen, **VDI- Forschungsh**, p.558, 1973.

APÊNDICE A

APÊNDICE A

Programa utilizado para a obtenção das taxa de secagem, umidade e temperatura do pó de café e esfera de vidro.

C SECAGEM ATMOSFERICA POR CONTATO COM AGITACAO MECANICA

C NOMENCLATURA

DIMENSION TITULO(80),TB(2000),U(2000),TAXA(2000)

OPEN(UNIT=10, FILE='SECA11.DAT', STATUS='OLD')

OPEN(UNIT=7, FILE='SECA.res', STATUS='NEW')

READ(10,15)(TITULO(L),L=1,15)

15 FORMAT(15A4)

READ(10,*)Area,Alt,Carga

READ(10,*)Tw,Tp,P

READ(10,*)dp,rop,el

READ(10,*)U(1),Tr,dx,n

TB(1)=TP

do 10 i=1,N

if(u(i).lt.1E-8)goto 30

T1=0.5*(TB(i)+TW)

CALL ALFAP(T1,P,DP,AP)

CALL ALFAW(T1,P,DP,AP,WS)

CALL CDRY(T1,P,DP,EL,GS)

CPD=CPP(t1)

BD=1.12838*SQRT(ROP*CPD*GS/TR)

Z1=WS/BD

Z2=U(I)*VAP(TB(I))/(CPD*(TW-TB(I)))

Z3=Z1/Z2

CALL QUIZ(Z1,Z3,EN)

BW=BD/ERRO(EN)

AWET=WS/(1+ERRO(EN)*Z1)

Q0=AWET*EXP(-EN*EN)

QLAT=Q0*(TW-TB(I))

TAXA(I)=QLAT/VAP(Tb(i))

IF(TAXA(I).LT.1E-8)GOTO 10

CPW=CPP(t1)+4.1786e3*U(I)

AC7=1.-EXP(-EN*EN)

AC8=AC7/EXP(-EN*EN)

DELTAU=TAXA(I)*TR*Area/Carga

U(I+1)=U(I)-DELTAU

AC9=AC8*VAP(Tb(i))

DELTAT=AC9*DELTAU/CPW

U(I+1)=U(i)-DELTAU

TB(I+1)=TB(I)+DELTAT

if(u(i)/u(1).lt.0)goto 30

10 write(*,*)i,U(I),3600*TAXA(i),TB(I)

30 DO 200 j=1,i-2

```

WRITE(7,203)j,u(j),3600*TAXA(j),TB(j)
203 FORMAT(2X,I4,1X,E9.3,1X,E15.4,2X,F7.2)
200 CONTINUE
100 stop
end
C ..... CONDUTIVIDADE TERMICA DO VAPOR DE AGUA
FUNCTION COG(A)
COG=(1.71533e-2+1.95685e-4*A-3.3839e-6*A*A
++3.312023e-8*A*A*A-1.15393e-10*A*A*A*A
++1.61044E-13*A*A*A*A*A)
RETURN
END
C .... CAPACIDADE CALORIFICA DO VAPOR DE AGUA
FUNCTION CPG(A)
CPG=(1.8584+9.4e-5*A+3.73e-7*A*A)*1000.
RETURN
END
C.....CALOR LATENTE DE VAPORIZACAO DA AGUA
FUNCTION VAP(AJ)
VAP=352.58e3*(374.14-AJ)**(.33052)
RETURN
END
C ....COEFICIENTE DE ACOMODACAO: GAMA
FUNCTION GAMA(AM)
GAMA=(1+10**(0.6-(1+1000/(AM+273.15))/2.8))**(-1)
RETURN
END
C.....CAMINHO LIVRE MEDIO
FUNCTION CML(A,P)
CML=1.07E-3*(2./GAMA(A)-1)*COG(A)*SQRT(A+273.15)/
=((2*CPG(A)-461.89)*P)
RETURN
END
C-----CALCULO DO COEF. DE TROCA DE CALOR NA PAREDE
SUBROUTINE ALFAP(A,P,DP,D)
A1=1+2*(1.5e-5+CML(A,P))/DP
A2=1+0.5*DP/(1.5e-5+CML(A,P))
A3=ALOG(A2)
A4=A1*A3-1
A5=4*COG(A)/DP
D=A4*A5
RETURN
END
C.....CALCULO DO COEF. DE TROCA DE CALOR NA PRIMEIRA CAMADA
SUBROUTINE ALFAW(A,P,DP,D,H)
A2=2*COG(A)/DP
A3=SQRT(2.)+2*(1.5e-5+CML(A,P))/DP
A4=0.2*A2/A3
A1=0.8*D

```

```

H=A1+A4+ALFAR(A)
RETURN
END
C... CALCULO DO COE. DE TROCA RADIACAO
FUNCTION ALFAR(A)
ALFAR=1.918E-7*(A+273.15)**3.
RETURN
END
C.... CALCULO DO QUIZ
SUBROUTINE QUIZ(W1,W2,D4)
K=0
X=0.1
20 IF(X.GE.3)GOTO 10
C2=1.772*EXP(X*X)
C3=C2*(1.+W1*ERRO(X))
C4=W2/C3
C5=abs(X-C4)
if(C5.le.1E-6)goto 10
X=0.5*(C4+X)
k=k+1
if(k.eq.500)goto 300
goto 20
10 D4=C4
K=0
300 RETURN
END
C... CALCULO DA COND. TERMICA DO LEITO SECO
SUBROUTINE CDRY(A,P,DP,AL,G)
A1=COP(Y)/COG(A)
A11=1./A1
A3=1+CML(A,P)/DP
A33=1./A3
A2=DP*(1.677E-7*(A+273.15)**3.)/COG(A)
bk1=(1-A1)/A1
BK2=BK1**(10./9.)
BK=1.25*bk2
A51=A3*(A11*(A2-BK*A33)+1.)
A52=BK*(A3-1)*(1.+A2*A11)
AK=A51-A52
DL1=BK*(A1+A2-1)*A3*A11/(AK*AK)
DLN1=(A1+A2)*A3
DLN2=BK*(1.+(A3-1.)*(A1+A2))
PLN=DL1*ALOG(DLN1/DLN2)
SLN1=(BK+1)/(2*BK)
SLN2=A2*A3
A53=1+(A3-1.)*A2
SLN3=BK*A53
SLN=SLN1*(SLN2-SLN3)
TLN=(BK-1)*A3/AK

```

```

CB1=2*(PLN+SLN-TLN)/AK
A6=1.-SQRT(1.-AL)
A7=AL/(AL-1.+A3)
A8=A6*(A7+AL*A2)
A9=SQRT(1.-AL)
A10=A9*(0.0077*A1+0.9923*CB1)
G=COG(A)*(A8+A10)
RETURN
END
C.....FUNCAO ERRO
FUNCTION ERRO(A)
ERRO=1-(1+0.2784*A+0.2314*A*A+0.0781*A**4.)**(-4.)
RETURN
END
c.....CONDUTIVIDADE TERMICA DA PARTICULA
FUNCTION COP(Y)
COP=0.17037-0.0122*Y+4.05724E-4*Y*Y-5.87993E-6*Y*Y*Y
*+3.96464E-8*Y*Y*Y*Y-1.03226E-10*Y*Y*Y*Y*Y
RETURN
END
C....CAPACIDADE CALORIFICA DA PARTICULA
FUNCTION CPP(V)
CPP=760.15043+60.0751*V-3.18383*V*V+0.09468*V*V*V
*-0.00112*V*V*V*V+4.52586E-6*V*V*V*V*V
RETURN
END

```

ANEXO A

ANEXO A

A descrição apresentada a seguir foi utilizada no cálculo da condutividade do leito utilizada no modelo de Schlünder e Mollekopf (1984).

Segundo Zehner (1973) e Bauer (1978), λ_{leito} , depende dos seguintes parâmetros:

$$\lambda_{leito} = f(\lambda_s, \lambda_G, \lambda_R, \lambda_D, d_p, \psi, \phi, k, C_{form}, f(\xi_r))$$

em que:

λ_s – condutividade térmica das partículas.

λ_G – condutividade térmica do gás.

λ_R – condutividade térmica equivalente devido à radiação.

λ_D – condutividade térmica equivalente devido ao fluxo molecular.

d – diâmetro da partícula.

Ψ - fração de vazios.

ϕ_K – área de contato da superfície da partícula relativamente achatada

C_{Form} - fator de forma da partícula.

$f(\xi_r)$ – função distribuição do tamanho das partículas.

Estes parâmetros podem ser calculados a partir das seguintes correlações:

$$\frac{\lambda_{leito}}{\lambda_G} = \left(1 - \sqrt{1 - \psi}\right) \left(\frac{\psi}{\psi - 1 + \lambda_G/\lambda_D} + \psi \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) + \sqrt{1 - \psi} \left[\phi_K \frac{\lambda_s}{\lambda_G} + (1 - \phi_K) \frac{\lambda'_{bed}}{\lambda_G} \right] \quad (A.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\lambda'_{leito}}{\lambda_G} = & \frac{2}{K} \left(\frac{B(\lambda_s/\lambda_G + \lambda_R/\lambda_G - 1)(\lambda_G/\lambda_D)(\lambda_G/\lambda_s)}{K^2} \right) \times \ln \frac{(\lambda_s/\lambda_G + \lambda_R/\lambda_G)\lambda_G/\lambda_D}{B[1 + (\lambda_G/\lambda_D - 1)(\lambda_s/\lambda_G + \lambda_R/\lambda_G)]} + \\ & + \frac{B+1}{2B} \left\{ \frac{\lambda_R \lambda_G}{\lambda_G \lambda_D} - B \left[1 + \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right] \right\} - \frac{B-1}{K} \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \end{aligned} \quad (A.2)$$

em que

$$K = \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \left[1 + \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_G} - B \frac{\lambda_D}{\lambda_G} \right) \frac{\lambda_G}{\lambda_S} \right] - B \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \left(1 + \frac{\lambda_R \lambda_G}{\lambda_G \lambda_S} \right) \quad (\text{A.3})$$

e

$$B = C_{Form} \left(\frac{1 - \psi}{\psi} \right)^{10/9} f(\zeta_r) \quad (\text{A.4})$$

desta forma

$$\frac{\lambda_R}{\lambda_G} = \frac{4\sigma}{2/\varepsilon_p - 1} T^3 \frac{x_R}{\lambda_G} \quad (\text{A.5})$$

$\varepsilon_p = 0.85$ sendo a emissividade da superfície da partícula,

$$\frac{\lambda_G}{\lambda_D} = 1 + \frac{l}{x_D} \quad (\text{A.6})$$

$$x_R = R_{Form} d_p \quad (\text{A.7})$$

e

$$x_D = D_{Form} d_p \quad (\text{A.8})$$

d_p é equivalente ao diâmetro da partícula.

$$d_p = \sqrt[3]{6V/\pi} \quad (\text{A.9})$$

V é o volume da partícula, R_{Form} e D_{Form} são os fatores de forma para o transporte de energia intersticial pela radiação e pelo fluxo molecular, respectivamente.

Se o leito empacotado consiste de frações mássicas Δ_{zi} com diâmetros de partículas variados d_i , x_R e x_D deve-se calcular:

$$\frac{l}{x_R} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_{zi}}{R_{Form,i} \cdot d_i} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{l}{x_D} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_{zi}}{D_{Form,i} d_i} \quad (\text{A.11})$$

a função distribuição $f(\zeta_r)$ foi encontrada por:

$$f(\zeta_r) = 1 + 3\zeta_r \quad (\text{A.12})$$

em que o parâmetro de distribuição ζ_l é dado por

$$\zeta_l = \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_{zi}}{d_i^2}}{\left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_{zi}}{d_i} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (\text{A.13})$$

as equações de A.1 a A.13 contém três fatores de forma, tais como C_{Form} , R_{Form} e D_{Form} , bem como a partícula relativa a área de superfície de contato partícula ϕ_K , pode ser avaliada de experimentos.