

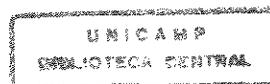
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**SECAGEM EM BATELADA DE ARROZ EM CASCA EM UM
LEITO DE JORRO CÔNICO COM TUBO INTERNO UTILIZANDO
CICLOS DE RESFRIAMENTO: ANÁLISE DO RENDIMENTO DE
GRÃOS INTEIROS**

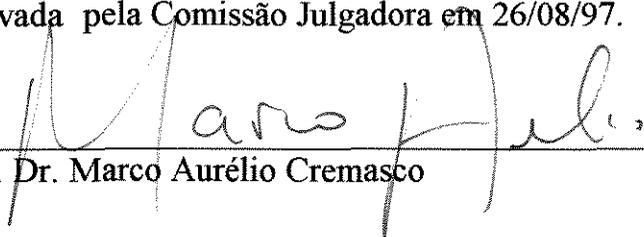
Autor: William James Nogueira Lima
Orientador: Dr. Marco Aurélio Cremasco

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas - SP
1997



Esta versão corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida pelo Eng. William James Nogueira Lima e aprovada pela Comissão Julgadora em 26/08/97.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Marco Aurélio", is written over a horizontal line. The signature is cursive and somewhat stylized.

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

Dissertação defendida e aprovada em 26 de Agosto de 1997, pela banca
examinadora constituída pelos professores doutores



Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco



Prof. Dra. Marlene Rita de Queiroz



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch

**Dedico esta dissertação a meus pais,
Geraldino e Maria Helena, e meus
irmãos, Denis, Jane, Glênio e Shara.
E a todos os meus amigos que sempre
me acompanharam em minha vida.**

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são destinados à todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, de modo especial:

Ao professor Dr. Marco Aurélio Cremasco, orientador deste trabalho, o meu agradecimento, em especial, pela amizade, pela sinceridade e pela orientação.

Aos amigos Clamer Dimas Fernandes Faria e Alexandre de Paula Peres, pela paciência, pelas dicas, pela ajuda e, principalmente, pela convivência. Obrigado.

Às meninas do “doze”: Cristiane Toshie Uyeda, Mara Heloísa Neves Olsen, Miriam Carla Bonicontró Ambrosio e Noeli Sellin pela ajuda e amizade.

À Angela Mitsuyo Hayashi pela colaboração, ajuda e amizade.

Ao amigos Alessandro Marra Ribas, Fábio “Diou” Conselheiro e Vandoel Pedro Barbosa, pela ajuda no decorrer do trabalho.

Ao “seu” Levi, ao Celso e ao Fábio pela ajuda na elaboração do equipamento e pelos momentos de alegria e fofocas.

Aos colegas de laboratório Everaldo Silvino dos Santos, Danúzia Pinto da Silva e Helenice Leite Garcia pelo companheirismo.

Ao aluno Ruy Peixoto Jr., pela ajuda na coleta dos dados experimentais.

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro e pela bolsa concedida.

Ao DTF./FEQ/UNICAMP pela oportunidade.

Sumário

Sumário.....	i
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
1 - Introdução	1
2 - Revisão Bibliográfica	5
2.1 - Leito de Jorro Cônico	5
2.1.1 - Fluidodinâmica	5
2.1.2 - Leito de Jorro Cônico com Tubo Interno.....	9
2.1.3 - Secagem em Leito de Jorro com Tubo Interno..	12
2.2 - Rendimento dos Grãos Inteiros de Arroz.....	16
2.2.1 - O Grão de Arroz	16
2.2.2 - Fenômeno da Fissura e da Quebra do Grão de Arroz.....	18
2.2.3 - Efeito do Gradiente Interno de Temperatura no Grão.....	19
2.2.4 - Influência do Gradiente Interno de Umidade do Grão.....	20

2.2.5 - Influência da Secagem no Rendimento de Grãos Inteiros.....	21
3 - Materiais e Métodos	25
3.1 - Material utilizado	25
3.2 - Equipamentos	26
3.2.1 - O Secador Leito de Jorro Cônico.....	26
3.2.2 - Beneficiadora	30
3.3 - Procedimento Experimental	31
3.4 - Medidas	35
4 - Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais.....	37
4.1 - Análise da Influência da Cinética de Secagem Convencional no Rendimento de Grãos Inteiros.....	38
4.1.1 - Análise da Secagem	38
4.1.2 - Análise do Rendimento de Grãos Inteiros de Arroz submetido à secagem	52
4.2 - Análise do Efeito dos Ciclos de Resfriamento na Cinética de Secagem e no Rendimento de Grãos Inteiros de Arroz em Casca.....	54
4.2.1 - Análise do Rendimento de Grãos Inteiros de Arroz submetido à Secagem com Ciclos de Resfriamento.....	64
4.3 - Estimativa do Rendimento de Grãos Inteiros por intermédio das condições de operação utilizadas em um leito de jorro cônico com tubo interno.....	69

5 - Conclusões e Sugestões.....	71
5.1 - Conclusões.....	71
5.2 - Sugestões.....	74
Referências Bibliográficas.....	75
Apêndice.....	80

RESUMO

A utilização do tubo interno em leito de jorro é aconselhável quando se intenta controlar melhor a fluidodinâmica no processo de contato sólido/fluido, pois com o uso do tubo interno diminui-se a queda de pressão necessária para a utilização do equipamento, permitindo um controle maior da circulação dos grãos no interior do leito. Entretanto o uso do tubo interno reduz a cinética de secagem, comprometendo a eficiência do secador. Uma técnica alternativa para a remoção adequada de umidade dos grãos de arroz, neste caso, é a adoção dos ciclos de resfriamento. Esta técnica consiste em diminuir a temperatura do ar de secagem com o equipamento em operação de modo a manter a temperatura dos grãos abaixo da temperatura limite de degradação do grão de arroz (60 °C). Por outro lado, se constatou que o número de ciclos de bem como o tempo de resfriamento influenciam significativamente o percentual de grãos inteiros. O objetivo deste trabalho é correlacionar as condições operacionais de um secador tipo leito de jorro cônico, por intermédio da sua cinética de secagem considerando os ciclos de resfriamento no rendimento de grãos inteiros. Para tanto foram realizados experimentos a 90 °C, 100 °C e 110 °C com e sem a utilização de ciclos de resfriamento. Observou-se que para os experimentos realizados utilizando ciclos de resfriamento o percentual de quebra aumenta na medida em que o tempo de duração do ciclo aumenta, ou utilizando-se um número maior de ciclos. Para os experimentos sem a utilização dos ciclos de resfriamento não foi observada quebra significativa dos grãos, porém a retirada de umidade foi menor que a necessária para estocagem.

ABSTRACT

The utilization of draft tube in a conical spouted bed is advisable when intend to control the fluid dynamics with this kind of solid/fluid contact. However, the use of draft tube reduce drying kinetic, affecting the performance of the dryer. An alternative technique to remove the moisture of the rice grains, in this case, is the adoption of the cooling cycles. This technique consist of reduce the drying gas temperature with the equipment in operation to keep the grains temperature below of the limit temperature of degradation of rice grains (60 °C). On the other hands, the number of cooling cycles and the time of cooling influence the percentile on entire grains. The objective of this work is correlate the operation conditions of a conical spouted bed with draft tube dryer, by means of its drying kinetics considering the cooling cycles on the yield of whole grains.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comportamento das Partículas no Interior de um Secador Leito de Jorro Cônico.....	6
Figura 2.2 - Curva Fluidodinâmica Característica de um Leito de Jorro Cônico com e sem Tubo Interno.....	7
Figura 2.3 - Leito de jorro Cônico com Tubo Interno.....	9
Figura 2.4 - O Grão de Arroz (Juliano, 1972).....	17
Figura 3.1 - Montagem Experimental do Sistema de Secagem	27
Figura 3.2 - Dimensões do Leito de jorro Cônico com Tubo Interno.	28
Figura 3.3 - Psicrômetro de Dupla Mecha.....	29
Figura 3.4 - Sistema de Beneficiamento.....	30
Figura 4.1 - Ensaio Experimental nº 01.....	39
Figura 4.2 - Ensaio Experimental nº 02.....	40
Figura 4.3 - Ensaio Experimental nº 03.....	41
Figura 4.4 - Ensaio Experimental nº 04.....	42
Figura 4.5 - Ensaio Experimental nº 05.....	43
Figura 4.6 – $-\ln (U/U_0)$ versus tempo t	45
Figura 4.7 – $-\ln ((T-T_s)/(T-T_{so}))$ versus tempo t	47
Figura 4.8 - Efeito de D_t na constante de cinética de secagem.....	49
Figura 4.9 - Efeito de L_b na constante de cinética de secagem.....	49
Figura 4.10 - Efeito de D_t na constante de evolução da temperatura dos grãos.....	50
Figura 4.11 - Efeito de L_b na constante de evolução da temperatura dos grãos.....	50

Figura 4.12 - Ensaio Experimental n° 06.....	56
Figura 4.13 - Ensaio Experimental n° 07.....	57
Figura 4.14 - Ensaio Experimental n° 08.....	58
Figura 4.15 - Ensaio Experimental n° 09.....	59
Figura 4.16 - Ensaio Experimental n° 10.....	60
Figura 4.17 - Ensaio Experimental n° 11.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção de Arroz - Safra 1996 (Faria, 1997).....	1
Tabela 1.2 - Porcentagem dos Componentes do Grão de Arroz (Faria, 1997).....	2
Tabela 2.1 - Secagem em Leito de Jorro Cônico com Tubo Interno (Cremasco, 1986).....	13
Tabela 2.2 - Secagem em Leito de Jorro Cônico (Faria, 1997).....	15
Tabela 3.1 - Características Físicas do Arroz.....	25
Tabela 4.1 - Intervalos de Operação.....	38
Tabela 4.2 – Intervalos de operação de secagem para a carga de arroz úmido.....	55

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

a - Ângulo da coluna cônica, Figura 3.1;

C_{ps} - Capacidade calorífica do cereal, Tabela 3.1, ($FLT^{-1}M^{-1}$);

D_c - Diâmetro da parte cilíndrica da coluna, Figura 3.1, (L);

D_i - Diâmetro do orifício de alimentação do fluido de trabalho, Figura 3.1, (L);

$d_H = \phi d_p \frac{\epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_{mf}}$ - diâmetro hidráulico de Beek, (L);

d_p - Diâmetro característico da partícula, Tabela 3.1, (L);

D_t - Diâmetro do tubo interno, Equação 2.9, (L);

H_c - Altura do cone, Figura 3.1, (L);

L - Altura da parte cilíndrica do leito, Figura 3.1, (L);

L_b - Distância da base do tubo interior à tela de alimentação do ar, Equação 2.9,(L);

M_o - Umidade inicial do grão em base seca, (adimensional);

n - Número de ciclos de resfriamento, Equação 4.4, (adimensional);

R - Percentagem de grãos inteiros, Equação (2.13), (%)

Q - Vazão volumétrica do fluido na alimentação, ($L^3\theta^{-1}$);

Q_{jm} - Vazão volumétrica do fluido em condições de jorro estável, ($L^3\theta^{-1}$);

t - Tempo, Equação 2.5, (θ);

t_c - Tempo de resfriamento entre os passos de secagem, Equação 4.6, (θ);

t_{s0} - Tempo do primeiro aquecimento dos grãos, Equação 4.6, (θ);

T - Temperatura do ar de secagem, Equação 2.6, (T);

T_s - Temperatura do grão, Equação 2.6, (T);

T_{s0} - Temperatura inicial do grão, Equação 2.6, (T);

W_0 - Carga úmida inicial do grão, Equação 2.6, (M);

U - Umidade do grão no instante t em base úmida (b.u), Equação 2.5, (adimensional);

U_0 - Umidade inicial do grão, b.u., Equação 2.5, (adimensional).

LETRAS GREGAS

ω - Rendimento de grãos inteiros, Equação 1.1, (adimensional);

ω_0 - Rendimento de grãos inteiros no início da secagem, (adimensional);

ω_f - Rendimento de grãos inteiros no final do período de armazenamento, (adimensional);

α - Constante da cinética de secagem global da operação, Equação 4.10, (θ^{-1});

α_0 - Constante da cinética para o período do primeiro aquecimento dos grãos, Equação 4.1, (θ^{-1});

α_c - Constante da cinética de secagem a partir do período do primeiro resfriamento dos grãos, Equação 4.9, (θ^{-1});

β - Constante da cinética de aquecimento do grão, Equação 2.7, (θ^{-1});

ΔP - Queda de Pressão no Leito, Figura 2.2, ($ML^{-1}\theta^{-2}$);

ε_{mf} - porosidade na mínima fluidização, (adimensional);

λ_{vap} - Calor latente de vaporização, (FLM^{-1});

ρ_s - Massa específica da partícula, ($M.L^3$), Tabela 3.1;

ρ - Massa específica do gás, Equação 2.2;

ϕ - Esfericidade, adimensional, Tabela 3.1;

φ - Umidade adimensional do grão, Figura 4.1, (adimensional);

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

$$K_o = \frac{\lambda_{\text{vap}} m_o}{C_{p_s} (T_s - T_{so})}, \text{ número de Kossovich modificado, Equação 2.9;}$$

$$M_s = \frac{d_H^3 \rho_s}{W_o}, \text{ relação entre as características físicas da partícula com a carga úmida de sólidos, Equação 2.9.}$$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Estudos que visam melhorar a conservação e o rendimento industrial da produção de arroz são fundamentais devido à importância sócio-econômica que este cereal tem no contexto regional, nacional e mundial. Neste sentido, o Laboratório de Processos em Meios Porosos do Departamento de Termofluidodinâmica na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (LPMP/DTF/FEQ/UNICAMP) realiza sua segunda dissertação de mestrado sobre os efeitos das condições de secagem no rendimento de grãos inteiros de arroz.

O arroz é um dos cereais mais consumidos no mundo, sendo que em nível nacional destaca-se como sendo a base da alimentação da população juntamente com o feijão. A produção nacional representa cerca de 2% da produção mundial, contudo esta produção é voltada para o consumo interno. No estado de São Paulo, a região do Vale do Paraíba apresenta produção pequena se comparada ao restante do país, conforme mostra a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Produção de Arroz - Safra 1996 (Faria, 1997).

Região	Produção (ton.)
Vale do Paraíba	59.222
Estado de São Paulo	219.900
Brasil	10.000.000
Mundial	500.000.000

Fonte: Secretaria da Agricultura - Pindamonhangaba - SP e IBGE/DEAGRO.

A porcentagem de grãos inteiros, quebrados, farelos e quirelas encontrados na região do Vale do Paraíba, após beneficiamento são apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Porcentagem dos componentes do grão de arroz (Faria, 1997).

Componentes	% média
Grãos inteiros	54
Grãos quebrados	15
Farelos	7
Quirela	1
Casca	23
Total	100

Fonte: Produtores Vale do Paraíba

De acordo com Lopes (1989), todo o processo de produção, envolvendo desde a colheita, secagem, armazenamento até o beneficiamento é importante para o rendimento de grãos inteiros e segundo Fiorese (1978) e Nogueira (1991) a secagem é um dos estágios mais importantes no processo de produção do arroz. Sabendo que o aumento da produtividade em termos de rendimento de grãos inteiros no processamento do arroz, passa pela diminuição da taxa de quebra dos grãos no processo de secagem e armazenamento, torna-se importante o estudo do controle do processo de secagem no intuito de diminuir o prejuízo para o produtor, resultante da quebra dos grãos na secagem e nos processos subsequentes de beneficiamento e armazenamento.

O parâmetro utilizado para a determinação do rendimento de grãos inteiros foi a Equação 1.1.

$$\omega = \frac{\text{massa de grãos inteiros após o beneficiamento}}{\text{massa total de grãos após o beneficiamento}} \quad (1.1)$$

A secagem, porém, depende das condições de operação e do tipo de secador utilizado. Em nosso estudo, utilizamos o secador do tipo leito de jorro cônico com tubo interno. Devendo-se esclarecer que esta escolha foi feita pela simplicidade da construção do equipamento, pela facilidade no uso de altas temperaturas para o ar de secagem e na manutenção da temperatura do grãos abaixo da temperatura de degradação que é estipulada 60°C. Além de ser fácil o seu manejo, como já foi salientado e estudado por vários pesquisadores, entre eles, Barrozo (1985), Cremasco, Rocha e Massarani (1991) e Faria (1997), o uso do tubo interno faz com que o movimento dos sólidos seja melhor controlado, independente da vazão de ar utilizada, além disso, a vazão de ar requerida para o funcionamento do secador é menor se comparada a um leito de jorro cônico convencional e ocorre uma melhor mistura e contato entre o gás e o sólido

Pelo apresentado, o objetivo deste trabalho consiste em:

- 1) estudar, experimentalmente, a secagem de arroz em leito de jorro cônico com tubo interno;
- 2) avaliar a influência das variáveis temperatura do ar de secagem, diâmetro do tubo interno, distância da base cônica (entrada do ar de secagem) e vazão de operação na qualidade final do grão de arroz em termos de rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento;
- 3) observar a influência dos ciclos de resfriamento na secagem de arroz e a qualidade do grão de arroz em termos do rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento. Os ciclos de resfriamento consistem, basicamente, na redução, por tempo determinado, da temperatura do ar de secagem de modo a manter a temperatura dos grãos de arroz com casca abaixo de 60 °C, temperatura limite

para a degradação dos grãos de arroz. Ao término deste período, o ar de secagem é novamente aquecido à temperatura estipulada no início da operação.

Esta técnica de secagem foi proposta devido à pequena redução de umidade dos grãos de arroz com casca nos ensaios experimentais realizados sem a adoção dos ciclos de resfriamento, pois a umidade final dos grãos, nesses ensaios, permanecia superior à necessária para a estocagem dos grãos de arroz.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica será apresentada neste capítulo em duas partes. A primeira tratará do equipamento de leito de jorro com tubo interno utilizado e seus princípios fundamentais, enquanto a segunda parte versará sobre a influência da secagem na quebra dos grãos de arroz utilizando este tipo de equipamento.

2.1 - LEITO DE JORRO CÔNICO

2.1.1 - FLUIDODINÂMICA

O leito de jorro é formado por um vaso cilíndrico de base tronco-cônica ou outro tipo de configuração, em cuja extremidade localiza-se o orifício de entrada do fluido. O jorro, propriamente dito, acontece quando da penetração de um jato de fluido através das partículas contidas no leito. Usualmente o fluido é um gás, sendo que na prática se utiliza, com mais frequência, o ar.

O funcionamento do leito de jorro consiste da introdução do jato de ar pelo orifício de entrada do fluido, numa vazão suficiente para que ocorra o movimento pneumático ascendente das partículas através do jorro (zona diluída axial). Existe, também, um fluxo descendente de sólidos pela região entre o jorro e a parede do leito (fase densa), denominada região axial, conforme mostrado na Figura 2.1. No caso desse equipamento apresentar-se no formato cônico, Dutra

(1984) verificou que um aumento do ângulo do cone com relação ao eixo central acarreta uma redução na queda de pressão e vazão do ar. Por outro lado, a diminuição do mesmo pode causar a suspensão do leito dos sólidos pelo fluido. O aumento do diâmetro do orifício de entrada incrementa o valor da queda de pressão e a vazão de jorro mínimo.

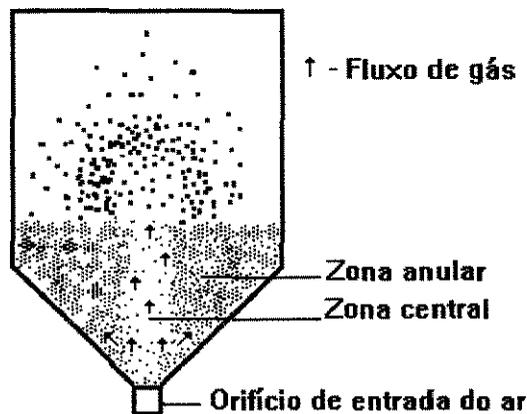


Figura 2.1 - Comportamento das partículas no interior de um secador leito de jorro cônico.

Sendo assim, podemos dizer que o leito de jorro consiste de duas fases distintas:

- zona central ou zona diluída axial: região de alta porosidade, onde o fluxo de ar proporciona a movimentação das partículas para cima. As partículas presentes na base do leito aceleram-se a uma velocidade máxima e desaceleram-se até atingir o ponto em que a velocidade das partículas torna-se zero no topo da fonte, que é a região na qual o jorro aflora do leito. Esta região tem características semelhantes ao transporte pneumático;

- zona anular densa: região de porosidade menor, na qual há percolação do fluido em contracorrente ao movimento descendente das partículas, semelhante a um leito fixo.

Na interface entre as duas regiões, axial e anular, algumas partículas saem da região densa e voltam a região axial, retornando ao jorro, mas a grande maioria das partículas inverte o sentido do seu movimento apenas quando se desloca até o orifício de entrada do fluido, retomando o escoamento ascendente, na zona de jorro central. Na região axial ocorre um acréscimo da concentração das partículas na medida em que se aumenta a distância do orifício de entrada do fluido, devido ao decréscimo da velocidade das partículas e também ao fluxo de sólidos proveniente da região anular. A velocidade dos sólidos na região de jorro é de uma a duas ordens de grandeza maior que a velocidade dos mesmos na região densa.

Na Figura 2.2 encontra-se a curva característica da queda de pressão em função da vazão de gás para o leito cônico, a qual representa uma boa reprodução da curva clássica do leito de jorro convencional. Tem-se dois comportamentos distintos apresentados nesta Figura. O desenvolvimento do jorro com o aumento da vazão de gás, indicado por intermédio da linha ABCD e o processo que representa a redução do fluxo do gás, linha DEFA.

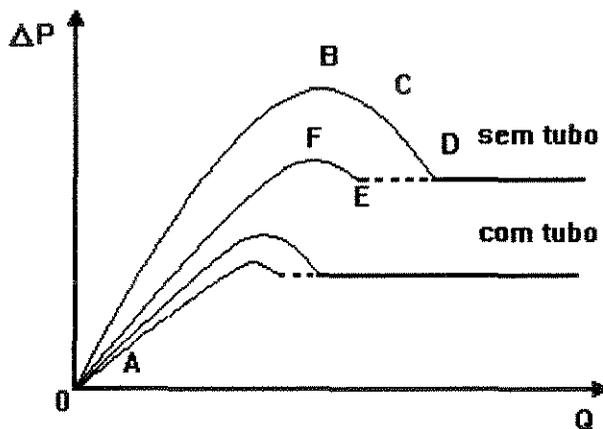


Figura 2.2 - Curva fluidodinâmica característica de um leito de jorro cônico com e sem tubo interno.

Para vazões baixas, o gás apenas percola entre as partículas levando o sistema a se comportar como um leito fixo. Aumentando-se a vazão, surge nas proximidades da entrada de ar no leito uma cavidade devido à ação do jato que desloca algumas partículas. Na medida em que se aumenta a vazão, esta cavidade aumenta, formando o chamado jorro interno, sendo que nesta fase há um aumento da queda de pressão até se alcançar o ponto B, no qual obtém-se a queda de pressão máxima, ΔP_{\max} . A altura do jorro interno, neste ponto, é maior que a altura de sólidos compactados na parte superior do leito, ou seja, neste estágio qualquer incremento de vazão acarreta num decréscimo da queda de pressão. Em seguida, a queda de pressão diminui até o ponto C, ponto de jorro incipiente. O jorro está próximo à superfície do leito de partículas, no entanto é instável devido à formação de bolhas na região adjacente mais densa. Com o afloramento da fonte de sólidos, a queda de pressão sofre um decréscimo e ao se aumentar a vazão do gás ocorre a elevação da fonte do jorro e uma pequena diminuição na queda de pressão.

Reduzindo-se o fluxo de gás obtém-se o processo inverso. O jorro mantém-se até o ponto de jorro mínimo que terá a menor vazão com a qual se obtém o jorro estável, chamada de vazão de jorro mínimo, Q_{jm} . A queda de pressão neste ponto é denominada queda de pressão de jorro mínimo, ΔP_{jm} . Prosseguindo com a redução da vazão chega-se rapidamente ao máximo de queda de pressão. A partir deste ponto a queda de pressão decresce acompanhando a redução da vazão de ar.

Este comportamento é observado para qualquer geometria do leito, seja ela convencional, cônica ou retangular. Existem diversas correlações para ΔP_{\max} , ΔP_{jm} e Q_{jm} para o leito de jorro cônico, podendo ser encontradas no livro de Mathur e Epstein (1972) ou, ainda, no trabalho de Cremasco (1986).

2.1.2 - LEITO DE JORRO CÔNICO COM TUBO INTERNO

O leito de jorro com tubo interno é comentado por Mujumdar (1984) como uma variante do leito de jorro com a inserção de um tubo central por onde é direcionado o jorro, Figura 2.3.

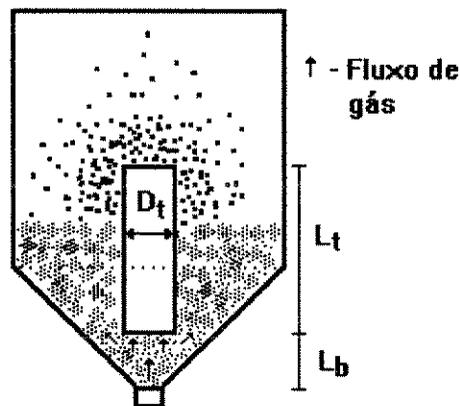


Figura 2.3 - Movimento dos sólidos no interior do secador leito de jorro cônico com tubo interno.

A fluidodinâmica do leito de jorro com tubo interno está associada ao direcionamento do fluxo de ar para o interior do tubo. Com pequenas vazões de ar, o fluido apenas percola as partículas. Com o aumento do fluxo do ar inicia-se a formação da cavidade abaixo do tubo interno devido à ação do jato de ar. Esta cavidade vai se alongando, dando origem ao jorro interno, até o ponto em que se atinge a parte inferior do tubo interno. O ponto de queda de pressão máxima é atingido quando o jato de ar localiza-se nas proximidades da base do tubo interno. A partir deste ponto o ar passa a empurrar os grãos que estão no interior do tubo e o jorro aflora no topo do tubo. Incrementos de vazão apenas provocam a elevação da fonte e uma pequena diminuição da queda de pressão.

A região do escoamento das partículas no interior do tubo é chamada de zona central ou zona diluída axial, enquanto que a região na qual acontece o movimento descendente das partículas é chamada de zona anular densa. A fase densa move-se uniformemente até a base da coluna de partículas onde os sólidos novamente entram no tubo interno pela distância de separação do tubo à base cônica e retomam o escoamento.

A utilização do tubo interno reduz a queda de pressão de jorro mínimo se comparado ao leito de jorro convencional já que a camada de partículas a ser rompida de jato de ar é bem menor, conforme pode ser visto na Figura 2.2.

Dutra (1984) estudou a influência do tubo interno e concluiu que com a utilização do tubo interno ocorrem:

- redução da queda de pressão e na vazão em todas as etapas do leito;
- redução na taxa de circulação dos sólidos.

Barrozo (1985), estudando a secagem de soja e de arroz em leito de jorro com tubo interno observou que com a utilização do tubo interno há uma melhor circulação de grãos, podendo-se variar essa circulação independentemente do diâmetro da coluna, altura do leito e tamanho da partícula, além de se ter um controle maior do tempo de residência da partícula nas regiões de jorro e anular. A recirculação inicia-se a menores quedas de pressão e menores vazões de ar são requeridas para uma dada recirculação de sólidos.

Ferro da Cunha e Massarani (1985), estudando a dinâmica e a secagem de arroz com casca em leito de jorro cônico, verificaram que a vazão do fluido no

jorro mínimo independe da altura do leito, ou seja, da carga de grãos utilizada na operação de secagem.

No caso do leito cônico, a queda de pressão e o escoamento do ar através do leito variam de acordo com mudanças no ângulo do leito, no diâmetro do orifício de entrada do ar, no diâmetro do tubo interno e na distância entre o tubo interno e a base cônica. Aumentando-se o diâmetro do tubo interno ocorre uma redução na perda de carga, além de um aumento na taxa de recirculação de sólidos nas condições de jorro mínimo. Contudo, aumentando-se o distância do tubo interno à entrada do fluido no leito observa-se, também, um aumento na recirculação dos sólidos apesar da perda de carga aumentar um pouco, (Dutra, 1984).

A utilização do tubo interno praticamente eliminou a restrição referente à altura máxima de jorro estável.

No entanto existem, algumas desvantagens quanto ao uso da técnica do tubo interno:

- a mistura entre as partículas é reduzida,
- o projeto do leito de jorro cônico torna-se mais complexo,
- pode acontecer entupimento do tubo interno pelas partículas ao iniciar a operação.

2.1.3 - SECAGEM EM LEITO DE JORRO COM TUBO INTERNO

A secagem de grãos em leito de jorro foi proposta inicialmente por Mathur e Gishler (1955). Estes autores observaram que com o uso deste aparato era possível utilizar temperaturas do gás de secagem superior às dos secadores convencionais sem danificar o grão.

Secadores tipo leito de jorro com tubo interno foram estudados por Khoe e Brakel (1983) para a secagem de arroz em casca e chegaram nas seguintes conclusões:

- a troca térmica ocorre principalmente junto a entrada do ar no leito e no interior do tubo,
- uma considerável fração da transferência de massa ocorre na região anular, onde acontece a migração da umidade do centro para a superfície do grão, da qual há evaporação, causando um acréscimo na temperatura e mantendo o ar saturado por um longo tempo.

Barrozo (1985) propôs para secadores contínuos tipo leito de jorro cônico e cônico-cilíndrico com tubo interno, correlações para temperatura dos grãos na descarga do secador e para a vazão mássica de água evaporada no secador, utilizando soja e arroz. Além disso, este autor observou que a utilização do tubo interno faz com que ocorra uma redução de 40 % na transferência de calor se comparado ao leito de jorro tradicional, apesar de o produto ser mais homogêneo.

Viswanathan, Lyall e Raychaudhuri (1986) estudaram a secagem de arroz em casca, trigo, milho e soja, em leito de jorro cônico com e sem tubo interno,

tanto em sistemas contínuos quanto em batelada. Esses autores concluíram que a retirada de umidade nos grãos foi menor para as secagens feitas com tubo interno apesar do movimento mais ordenado dos grãos. A taxa de secagem foi correlacionada com a umidade inicial dos grãos e com a temperatura do ar de secagem. Esta última não ultrapassou 110 ° C.

CreMASCO (1986) secou arroz em casca, em batelada, em uma unidade cônica e analisou a fluidodinâmica e a secagem nos leitos com e sem tubo interno. Os resultados obtidos na coluna com tubo interior, estão resumidos nas correlações contidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Secagem em Leito de Jorro Cônico com Tubo Interno (CreMASCO, 1986).

Parâmetros	Correlações
Secagem: Redução da Umidade	$\frac{U}{U_0} = e^{-\alpha t} \quad (2.1)$ $\alpha = (a + bW_0 + cT + dW_0T) \left(e + f \frac{Q}{Q_{jm}} \right) (g + hD_t)(i + jL_b) 10^{-2} \quad (2.2)$ <p>$a = -2,57$; $b = 0,068$; $c = 0,049$; $d = -0,00115$; $e = 0,234$; $f = 0,31$; $g = 1,06$; $h = -0,016$.</p>
Evolução da temperatura do grão	$\frac{T - T_s}{T - T_{s0}} = e^{-\beta t} \quad (2.3)$ $\beta = (a + bT)(c + dW_0) \left(e + f \frac{Q}{Q_{jm}} \right) (g + hD_t)(i + jL_b) 10^{-3} \quad (2.4)$ <p>$a = -0,26$; $b = 0,016$; $c = 28,62$; $d = -0,36$; $e = 0,077$; $f = 0,38$; $g = 1,92$; $h = -0,094$; $i = 0,023$; $j = -0,043$.</p>

Cremasco, Rocha e Massarani (1991) estudando a secagem em batelada, de arroz em casca e de milho, utilizando um leito de jorro cônico com tubo interno, verificaram que as constantes α e β presentes nas Equações 2.1 e 2.2 assumem as seguintes dependências funcionais:

$$\alpha = \alpha\left(\frac{Q}{Q_{jm}}, \frac{L_b}{D_t}, K_0, M_s\right) \quad (2.5)$$

$$\beta = \beta\left(\frac{Q}{Q_{jm}}, \frac{L_b}{D_t}, K_0, M_s\right) \quad (2.6)$$

sendo $K_0 = \frac{\lambda_{vap} M_o}{Cp_s (T_s - T_{so})}$, número de Kossovich modificado, e $M_s = \frac{d_{HP}^3 \rho_s}{W_o}$, uma relação entre as características físicas da partícula com a carga úmida de sólidos.

Por intermédio dos dados experimentais ajustados para as funções 2.5 e 2.6, Cremasco, Rocha e Massarani (1991) obtiveram as seguintes correlações:

$$\alpha = 0,2109 \left(\frac{Q}{Q_{jm}}\right)^{0,6176} \left(\frac{L_b}{D_t}\right)^{0,7620} (K_0)^{-0,4580} (M_s)^{0,4726} \quad (2.7)$$

$$\beta = 0,6755 \left(\frac{Q}{Q_{jm}}\right)^{0,4910} \left(\frac{L_b}{D_t}\right)^{0,1560} (K_0)^{-0,2685} (M_s)^{0,5702} \quad (2.8)$$

Faria (1997) estudou a secagem de arroz em casca em batelada em leito de jorro cônico sem tubo interno e chegou nas correlações mostradas na Tabela 2.2 para a constante de cinética de secagem e para a evolução da temperatura dos grãos. Foi feita a secagem em batelada com arroz reumidificado e com arroz proveniente do campo e concluiu que a secagem com arroz reumidificado não apresenta a mesma cinética de secagem em relação à operação feita com arroz proveniente do campo. No caso dos grãos reumidificados, a umidade se concentra, basicamente, na casca do grão e é retirada com facilidade. No caso de grãos provenientes do campo a umidade é intrínseca ao grão e a sua retirada torna-se mais lenta.

Tabela 2.2 - Secagem em Leito de Jorro Cônico (Faria, 1997).

Parâmetros	Correlações
Redução da umidade para arroz proveniente do campo	$\alpha = 14,486 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,356} (K_o)^{-0,539} (M_s)^{0,934} \quad (2.9)$
Evolução da temperatura dos grãos provenientes do campo	$\beta = 5,425 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,293} (K_o)^{-0,463} (M_s)^{0,761} \quad (2.10)$
Redução da umidade para arroz reumidificado	$\alpha_R = 1,487 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,092} (K_o)^{-0,225} (M_s)^{0,669} \quad (2.11)$
Evolução da temperatura dos grãos reumidificados	$\beta_R = 0,406 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,027} (K_o)^{-0,493} (M_s)^{0,290} \quad (2.12)$

2.2 - RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS DE ARROZ

Neste trabalho enfocaremos a quebra do grão durante a operação de secagem e durante o armazenamento dos grãos, pois o mercado prefere que estes sejam apresentados na forma de grãos inteiros, chegando inclusive a ter um preço 50% a 100% mais caros que os grãos de arroz quebrados, apesar de apresentarem as mesmas características nutricionais.

Segundo o Ministério da Agricultura, nos termos da portaria nº 269 de 17 de novembro de 1988, é atribuída uma renda base, em nível nacional ao arroz em casca, de 60 % (sessenta por cento), constituída de 40% (quarenta por cento) de grãos inteiros e 28% de quebrados e quirera, apurados depois de o produto descascado e polido. Sendo grãos inteiros aqueles que apresentam comprimento igual ou superior a três quartas partes do comprimento mínimo à classe que pertence e grãos quebrados aqueles que apresentam comprimento menor a três quartas do comprimento mínimo à classe que pertence e que fica retido em peneiras de furos circulares de 1,6 mm de diâmetro. Portanto, além de uma produção de grãos elevada é importante obter uma quantidade máxima de grãos inteiros seja na colheita ou no beneficiamento.

2.2.1 - O GRÃO DE ARROZ

O grão de arroz é constituído de casca, germe, pericarpo, tegumento, aleurona e endosperma, conforme ilustra a Figura 2.4.

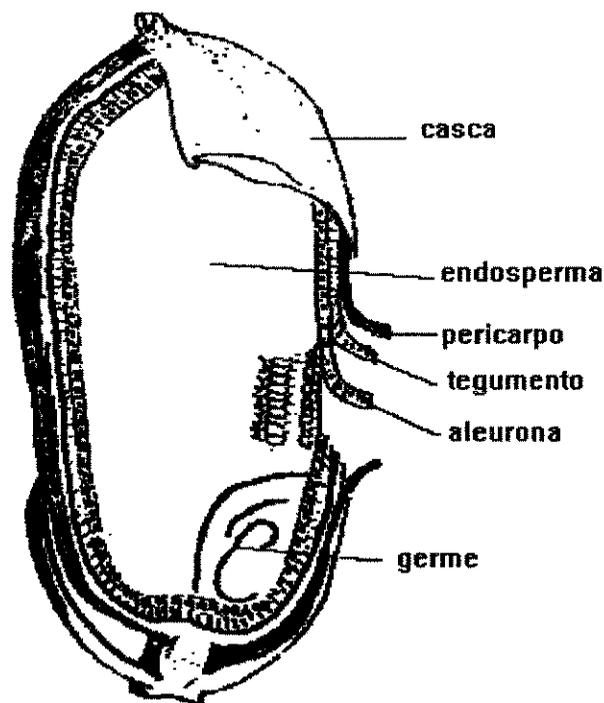


Figura 2.4 - O Grão de arroz (Juliano, 1972)

A casca tem a função de proteger a semente e constitui-se, basicamente, de celulose, lignina e cinzas, e praticamente nenhum amido, além de uma pequena porcentagem de proteína, matéria graxa e cutina responsável pela repulsa a água. O germe ou embrião tem alto conteúdo de matéria graxa e proteína. O pericarpo, a aleurona e o tegumento são formados, basicamente, de proteína, hemicelulose e celulose. São estes três segmentos que constituem o chamado farelo, a parcela retirada, quando se deseja obter o arroz brunido (branco). O endosperma, camada mais interna do grão, é constituído, quase na totalidade, de amido (Juliano, 1972).

2.2.2 - FENÔMENO DA FISSURA E DA QUEBRA DO GRÃO DE ARROZ

Quebra é o efeito decorrente da aplicação de uma força mecânica externa ao grão que ocasiona sua divisão em pequenos pedaços, sendo perceptível no momento da retirada da casca do grão de arroz. A resistência à quebra está relacionada com as propriedades físico-químicas do grão de arroz (Brashyam, 1984).

As fissuras, por sua vez, são pequenas trincas decorrentes de uma ação mecânica interna ao grão, originária de condições externas não-mecânicas e que não ocasionam a separação do grão. As fissuras apresentam-se nos grãos de arroz de diversas formas (longitudinais, radiais, superficiais, profundas). O estudo da fissura é relevante porque, normalmente, os grãos fissurados quebram durante o processo de beneficiamento, dependendo da forma e quantidades das fissuras.

Os fenômenos da fissura e de quebra do grão de arroz dependem das condições ambientais e do processo para o qual o cereal é submetido. Segundo Lopes (1989), a quebra pode ser produzida por dois motivos:

- diminuição da resistência mecânica do grão, proporcionada por alterações físico-químicas ou pela existência de tensões internas que favoreçam a separação das partes;
- a existência de fissuras no interior do grão ocasionadas por condições ambientais.

Este último motivo tem maior relevância na quebra dos grãos de arroz e, por isso, a quase totalidade das pesquisas realizadas até o momento atentam para este fenômeno.

Dentre os fenômenos que podem acarretar a fissura no material, podendo levar a sua quebra, enumera-se os gradientes de temperatura e de umidade assim como o efeito próprio da secagem.

2.2.3 - EFEITO DO GRADIENTE INTERNO DE TEMPERATURA NO GRÃO

A fissura do grão pode aparecer em função do gradiente de temperatura interno dentro de certos limites observados por alguns pesquisadores. O gradiente de temperatura ocorre quando a temperatura do grão está a uma temperatura distinta do meio externo. Esta diferença é responsável pela dilatação ou contração térmica do grão causando as tensões internas e, conseqüentemente, fissuras.

Lopes (1989) analisou os trabalhos de Henderson (1958), Kunze e Hall (1967), Arora et al (1973) e Chen e Kunze (1979), concluiu que o gradiente interno de temperatura tem relevância na formação de fissuras em grãos de arroz quando ocasionado por altas diferenças entre as temperaturas do ar de secagem e do cereal.

2.2.4 - INFLUÊNCIA DO GRADIENTE INTERNO DE UMIDADE NO GRÃO.

O gradiente interno de umidade está associado à diferença entre a pressão de vapor de água presente no interior do grão e a pressão de vapor do ambiente. A primeira está relacionada com o conteúdo de umidade na partícula e a segunda com as propriedades termodinâmicas do ar úmido. Por outro lado, este gradiente é influenciado pela perda ou pelo ganho de água, ou seja pela taxa de sorção ou adsorção de umidade. Com o passar do tempo, esse gradiente tende a diminuir na medida em que todos os pontos no interior do sólido atinjam a condição de equilíbrio.

O aparecimento de trincas ou fissuras acontece na presença desse gradiente e se acentua quanto maior ele for, pois maiores serão as tensões internas ao grão (Brooker et al, 1974).

Kunze (1977) avaliou o processo da secagem de arroz em casca, utilizando secadores tipo bandeja, e observou que as fissuras podem ser causadas pela sorção de umidade durante o processo de secagem, mas que a adsorção de umidade tem um efeito mais significativo e deve ser minimizado no processamento do arroz. A adsorção de umidade pode aparecer nas camadas superiores dos secadores industriais, que recebem ar mais úmido proveniente da parte inferior do secador, ou ainda, da sorção da umidade do ambiente quando os grãos são postos em estocagem.

2.2.5 - INFLUÊNCIA DA SECAGEM NO RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS

Objetiva-se na secagem diminuir as tensões para minimizar, no futuro, a quantidade de grãos quebrados. Porém as camadas externas do grão de arroz secam mais rapidamente do que as camadas internas e tensões internas podem ocorrer devido a esse fenômeno. Quando essas tensões são suficientemente grandes, elas tendem a provocar o aparecimento de fissuras.

Henderson (1958), secando pequenas amostras de arroz em casca em nível laboratorial, concluiu com seu trabalho que:

- quanto maior a temperatura de secagem, maior a porcentagem de grãos quebrados;
- durante a secagem de arroz em casca, as fissuras provocadas não irão, necessariamente, causar a quebra do grão;
- o aumento da umidade relativa do ambiente, mantendo a mesma temperatura de secagem, eleva a porcentagem de grãos quebrados;
- o maior rendimento de grãos inteiros é obtido com secagem feita com ar não aquecido ou aumentando o número de passos de secagem.

Sabbah et al. (1972) estudaram o efeito do período de repouso sobre o resfriamento de milho debulhado e concluíram que o principal efeito é a redistribuição de umidade no interior do grão, sendo que as mudanças de umidade e de temperatura não têm efeito significativo.

Benny e Ngin (1978), utilizando secadores tipo cascata, estudaram o período de repouso para secagem a altas temperaturas e concluíram que para repouso até cinco horas aumenta significativamente o rendimento de inteiros no beneficiamento.

Kunze (1979) analisou a secagem de arroz em casca e evidenciou:

- nem todos os grãos fissuram na secagem;
- as fissuras continuam aparecendo durante 48 h após o término da secagem;
- os grãos podem não fissurar imediatamente após a secagem, existindo um período de tempo para que surja a primeira fissura.

Calderwood e Webb (1971) contradizem Benny e Ngin (1978), quanto ao efeito do período de repouso, pois constataram que o repouso menor que 12 h para secagem a alta temperatura não causou mudanças significativas na quantidade de umidade e que a duração do período de repouso não tem efeito significativo no rendimento de grãos inteiros de arroz durante o beneficiamento.

Steffe e Singh (1980) desenvolveram um modelo teórico para simular a secagem e o período de repouso do arroz com casca. Estudaram, inclusive, o efeito do período de repouso sobre o rendimento do arroz após o beneficiamento, chegando à conclusão que a teoria da difusão pode ser utilizada para simular a secagem com períodos de repouso. A temperatura do ar e o tempo de secagem são importantes para definir o período de repouso e o teor de umidade e a umidade relativa do ar têm efeitos mínimos, comparando-os com as demais variáveis, temperatura do ar e tempo de secagem.

Faroni (1989), utilizando secador tipo bandeja, obteve expressões para o rendimento de grãos inteiros e o número de quebrados após o beneficiamento dos

grãos, sendo esta função da temperatura do ar e do período de repouso entre os passos de secagem. Também confirmou as observações de Henderson (1958) no que se refere à influência da temperatura do ar de secagem na porcentagem de grãos quebrados. Foi constatada, a ocorrência de grãos quebrados após o beneficiamento, até trinta minutos depois de cessada a secagem.

A autora trabalhou com temperaturas de secagem de 50 °C, 60 °C e 70°C; e com quatro períodos de repouso (30, 60, 120 e 180 min).

A expressão para o rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento proposta pela autora segue abaixo:

$$R = 10,151 + 1,308T - 0,013T^2 + 0,085P \quad (2.13)$$

Sendo que:

R - porcentagem de grãos inteiros (%);

T - temperatura do ar de secagem (°C);

P - período de repouso entre passos de secagem (min).

Faria (1997) estudando a secagem de arroz em casca em leito de jorro cônico constatou que o rendimento de grãos inteiros mantém-se constante durante a operação de secagem e no período de armazenamento dos grãos. Este autor não verificou quebra significativa dos grãos de arroz durante o período de secagem. Porém, observou que o período em que ocorre a taxa de quebra dos grãos de arroz situa-se entre 100 e 1000 minutos após a etapa de secagem, a partir deste tempo o rendimento de inteiros praticamente se mantém constante. Foi proposta uma correlação para o rendimento final de grãos inteiros (ω_f).

$$\omega_f = \frac{0,536}{\alpha^{0,076}} \quad (2.14)$$

em que α é dado pela Equação 2.9, mostrando que o rendimento final de grãos inteiros é governado pelas condições operacionais do secador.

O rendimento de grãos inteiros é influenciado pelas condições de secagem, ou seja, pela sua cinética e esta depende do tipo de secador utilizado. Neste trabalho, como dito anteriormente, utilizar-se-á o secador leito de jorro cônico com tubo interno, o qual será descrito no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAL UTILIZADO

Para a realização desta dissertação, foi utilizado arroz em casca, tipo 2, irrigado, proveniente da fazenda Santana do Rio Abaixo, localizada na região agrícola do município de Jacareí e da fazenda do Instituto Agrônômico de Campinas, campus avançado de Pindamonhangaba.

As características físicas do arroz são apresentadas na Tabela 3.1. A massa específica foi obtida por intermédio da técnica picnométrica e a esfericidade dos grãos foi mensurada de acordo com o método do diâmetro relativo baseado no diâmetro de uma esfera de igual volume. A capacidade calorífica do arroz foi obtida com o auxílio do trabalho de Passos, Mujumdar e Raghavan (1989).

Tabela 3.1 - Características físicas do arroz.

Propriedades	$\rho_s(\text{kg/ m}^3)$	d_p (m)	ϕ	Cps (kcal/kg.°C)
Valores	$1,3 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	0,72	0,43

Os experimentos foram realizados nos períodos de março a junho de 1996 e janeiro a março de 1997, porque procurou-se secar o arroz nas condições utilizadas pelos produtores rurais, principalmente com relação à umidade inicial do grão. Neste sentido, era preciso concentrar os experimentos nos períodos de

colheita. A umidade do arroz adquirido com o produtor e o IAC encontrava-se na faixa de 23 a 25 % (b.u.).

3.2 EQUIPAMENTOS

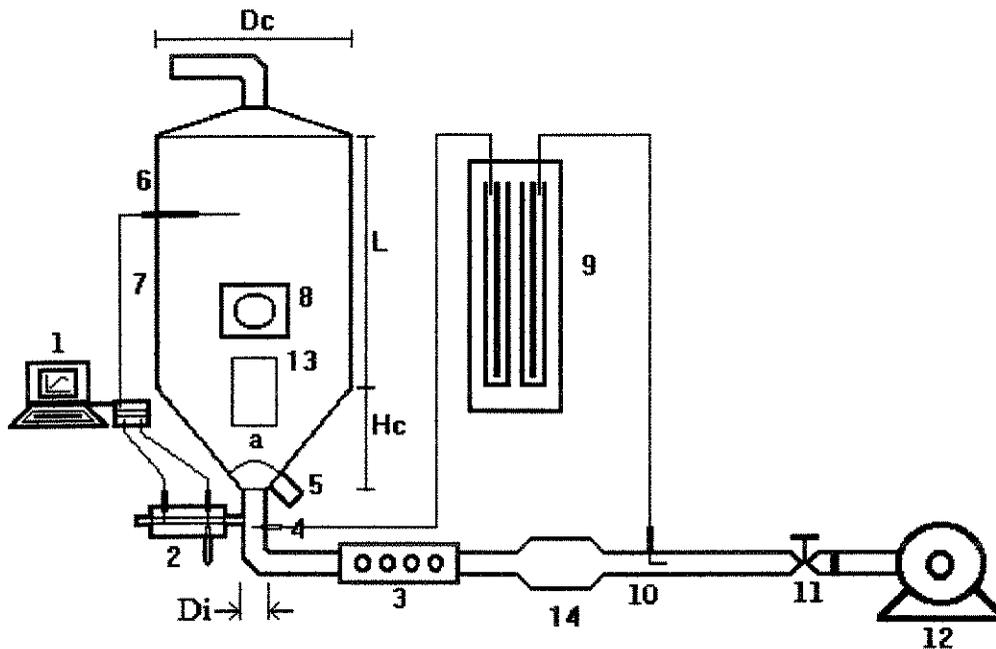
3.2.1 - O SECADOR LEITO DE JORRO CÔNICO

Este trabalho constitui-se em uma continuação dos estudos referentes à análise de quebra dos grãos de arroz na secagem em leito de jorro cônico feitos por Faria (1997) e é o segundo estudo sobre secagem de arroz em casca em leito de jorro no Laboratório de Processos em Meio Porosos (LPMP) do DTF/FEQ/UNICAMP.

O sistema de secagem consta, basicamente, de um soprador, um medidor de vazão, um resfriador, um aquecedor de ar por resistências elétricas, um medidor de queda de pressão, um psicrômetro de dupla mecha, uma coluna cônico-cilíndrica e tubos internos de diâmetros diferentes. A Figura 3.1 ilustra o sistema utilizado nos ensaios experimentais.

Para os experimentos que necessitavam do ar de secagem a temperaturas abaixo de 60 °C foi necessário resfriar o ar, pois a simples utilização do soprador aquecia o ar a temperaturas maiores que 60 °C. O resfriamento do ar de entrada se deu com o uso de um resfriador tipo tubo-carcaça, no qual o fluido refrigerante utilizado foi a água em contra-corrente com o fluxo de gás. Na saída de ar do resfriador estava acoplado um termopar para acompanhamento de controle da temperatura.

O soprador é do tipo turbo ventilador com 7,5 hp de potência. O controle do aquecimento do ar de secagem foi feito, na entrada do leito, com o auxílio do aquecedor elétrico com quatro resistências.



- | | |
|--|------------------------------------|
| 1 - aquisitor de dados | 8 - vigia |
| 2 - psicrômetro de dupla mecha | 9 - manômetro em "U" |
| 3 - aquecedor por resistência elétrica | 10 - tubo de Pitot |
| 4 - medidor de queda de pressão | 11 - válvula controladora de vazão |
| 5 - tubo de descarga de grãos | 12 - soprador (7,5 HP) |
| 6 - termopar | 13 - tubo interno |
| 7 - secador leito de jorro cônico | 14 - resfriador |

Figura 3.1 - Montagem Experimental do Sistema de Secagem (não está em escala).

A câmara de secagem é uma coluna cônico-cilíndrica, construída com folhas-de-flandres de 0,5 mm e reforçada com vergalhão de ferro, com as medidas observadas na Figura 3.2. Tanto a linha de alimentação, quanto o leito de jorro foram isolados termicamente com lã de rocha e alumínio corrugado. Os tubos internos empregados nos experimentos tinham diferentes diâmetros (D_i) e foram utilizados em alturas diferentes da entrada no leito (L_b):

- tubos internos com diâmetros de 5,08 cm, 7,62 cm;
- altura do tubo interno: 40 cm;
- distância da entrada do leito até o tubo interno: 7,00 cm e 14,00 cm.

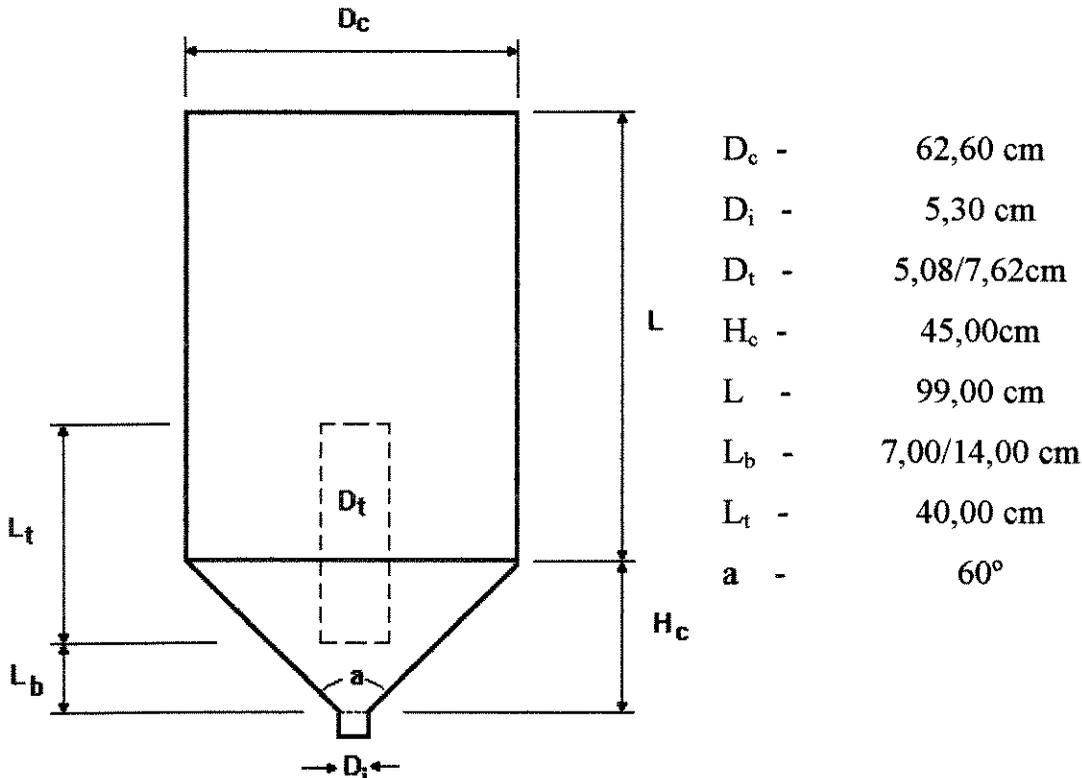
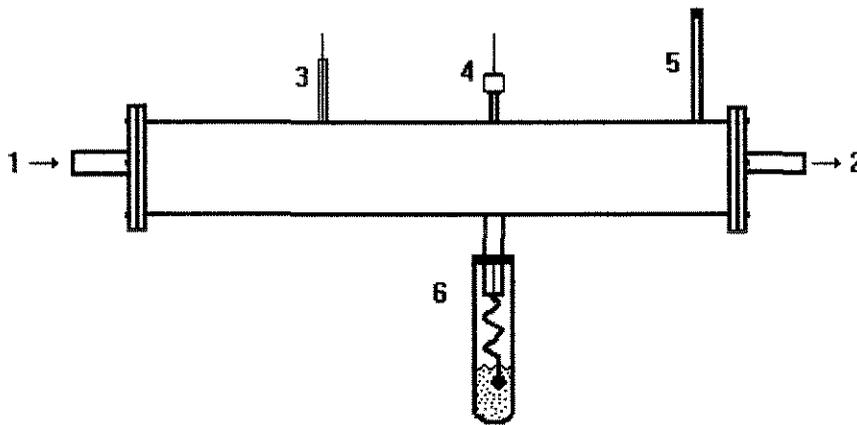


Figura 3.2 - Dimensões do leito de jorro cônico com tubo interno.

Havia na instalação um tubo de Pitot para medir a velocidade do ar na entrada no leito. O tubo de Pitot foi calibrado no laboratório do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, num tubo de vento Print & Partness.

Para auxiliar a obtenção de dados e o controle das variáveis foram acoplados na linha um psicrômetro de dupla mecha, termopares tipo T e manômetros em U. O psicrômetro de dupla mecha foi desenvolvido por Rocha (1988) e é constituído de um tubo interno com dois termopares para medir as

temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, conforme mostra a Figura 3.3. O controle da temperatura do ar de secagem foi feito pelo termopar de bulbo seco. Os termopares estavam ligados a um sistema de aquisição de dados acoplado a um micro-computador 486, com software aquisitor de dados AQDADOS LYNX CAD 12/32, para facilitar a confecção de gráficos e a coleta de dados. Um manômetro em U foi acoplado à linha, na entrada do leito, para mensurar a queda de pressão existente no leito.



- 1 - entrada do ar de secagem
- 2 - saída do ar de secagem
- 3 - termopar medidor da temperatura de bulbo seco
- 4 - termopar medidor da temperatura de bulbo úmido
- 5 - entrada auxiliar de água para o termopar de bulbo úmido
- 6 - recipiente com água e mecha para umidificação do termopar de bulbo úmido.

Figura 3.3 - Psicrômetro de dupla mecha. (Não está em escala).

3.2.2 - BENEFICIADORA

A operação de beneficiamento é baseada no mesmo princípio das máquinas de beneficiamento de arroz, modelo industrial. Trata-se de uma máquina Suzuki, de 0,5 HP de potência, com capacidade de operação de 100 g de arroz em casca. Ela é composta de um descascador, um brunidor, um classificador de arroz e um ciclone. O beneficiamento de arroz neste maquinário pode ser descrito da seguinte maneira: inicialmente, os grãos de arroz em casca são colocados na moega de alimentação. Em seguida, os grãos passam pelo descascador, sendo enviados para a câmara de aspiração onde as cascas são separadas dos grãos de arroz, só então os grãos de arroz sem casca são retirados da máquina. Depois disso, a amostra de grãos de arroz descascados é levada ao *trieur* para a separação dos grãos inteiros dos quebrados. Este processo dura em média de um a dois minutos.

A Figura 3.4 esquematiza o sistema de beneficiamento.

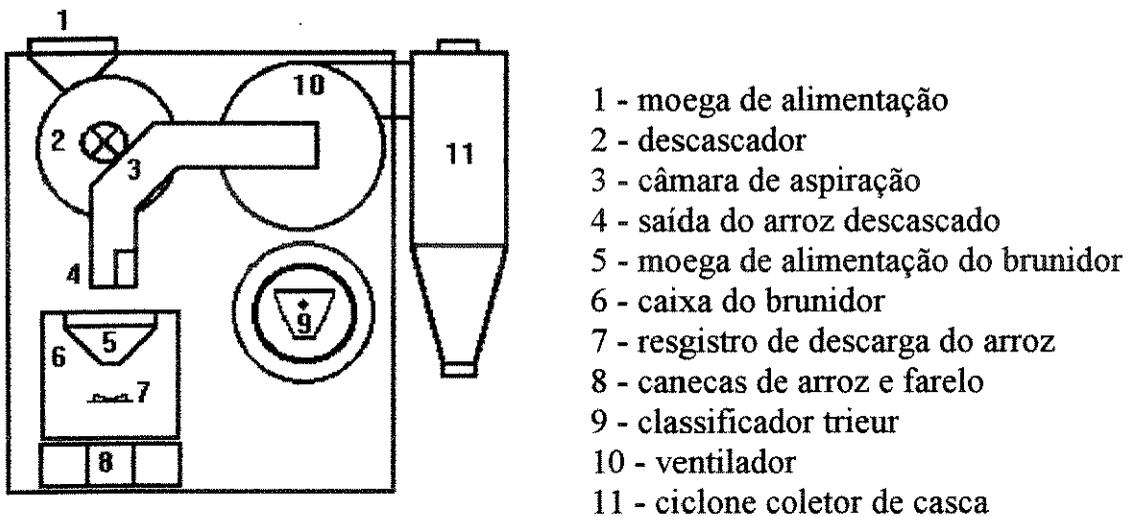


Figura 3.4 - Sistema de beneficiamento (não está em escala).

3.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento para o estudo da cinética de secagem e da quebra dos grãos de arroz em leito de jorro cônico com tubo interno está descrito a seguir.

Num primeiro instante, instalou-se no interior da coluna o tubo interno, com o diâmetro e a distância da entrada do leito pré-estabelecidos para o experimento.

Separou-se a carga de grãos úmidos que seria utilizada no experimento. Ligou-se o soprador e abriu-se a válvula de controle de vazão do ar e, em seguida, foi ligado o aquecedor, quando necessário, por aproximadamente 20 min até que o equipamento entrasse em regime permanente térmico. Quando o equipamento se encontrava em regime, o soprador era desligado e só então a carga de sólidos úmidos era colocada no interior da câmara de secagem.

Para iniciar a secagem deu-se a ignição no aquisitor de dados para que se efetuassem as medidas de temperaturas de bulbo seco, de bulbo úmido e dos grãos. Abriu-se a válvula controladora de vazão, no mesmo instante em que foi dada a ignição no aquisitor, até atingir valor desejado para a vazão de operação do secador, registrando-a.

No intuito de estudar a evolução da temperatura dos grãos de arroz em casca e o comportamento da quebra dos grãos durante a secagem, foram coletadas amostras de arroz em casca do interior do leito através da abertura na vigia do secador. Essas amostras pesavam, em média, entre 50 g e 60 g. Utilizou-se um recipiente plástico para retirar as amostras, sendo estas retiradas em intervalos de tempo entre 2 e 7 minutos até o término da secagem que ocorreria quando a temperatura dos grãos atingisse por volta de 60°C, que é a temperatura

limite para que os grãos de arroz não percam suas qualidades nutritivas. Para cada coleta de amostra, distribuídas e acondicionadas em dois cadinhos e em um calorímetro. O acompanhamento das curvas de secagem, da evolução da temperatura dos grãos e quebra dos grãos de arroz foram feitos concomitantemente.

No calorímetro fazia-se a leitura da temperatura dos grãos no instante da coleta da amostra. O calorímetro era formado por um recipiente plástico fechado, de dimensões de 70 mm de altura e 35 mm de diâmetro isolado com lã de rocha e alumínio corrugado, ao qual estava acoplado um termopar tipo T conectado no sistema de aquisição de dados.

As amostras acondicionadas em um dos cadinhos era pesada e levada a estufa, onde permaneciam por 24 h, a 110 °C. As amostras pesavam por volta de 30 g. Posteriormente eram retirados e colocados no dessecador por 30 min e novamente pesadas para determinação do teor de umidade contido nos grãos de arroz.

O outro cadinho era utilizado para se fazer a análise da quebra dos grãos de arroz durante a secagem. A amostra era pesada e, em seguida, levada à máquina beneficiadora de arroz para realizar o processo similar ao beneficiamento dos grãos. Após o beneficiamento, obtinha-se a massa de grãos inteiros e a massa de grãos inteiros mais quebrados. A fração de grãos inteiros da amostra era obtida segundo da Equação 1.1.

$$\omega = \frac{\text{massa de graos inteiros apos o beneficiamento}}{\text{massa total de graos apos o beneficiamento}} \quad (1.1)$$

O beneficiamento, na máquina testadora de arroz, consiste em levar a amostra de arroz em casca na moega do descascador, onde é descascado quase

que na sua totalidade (95% a 99%). Em seguida, a amostra passa pela câmara de aspiração onde a casca é eliminada, saindo pelo bocal do ciclone. Com o registro de descarga aberto, os grãos de arroz são coletados numa caneca central sem passar pelo brunidor. Para obter o percentual de quebra do arroz, utiliza-se o classificador *trieur* número 2, para grão de arroz longo. A amostra de arroz beneficiada é colocada no classificador e o mesmo é levado à máquina testadora durante um minuto, em funcionamento, e após este período ela é desligada. O classificador é retirado e os grãos que se encontram em seu interior são colhidos e classificado como grãos inteiros e, posteriormente, pesados. Os grãos de arroz quebrados depositados no cocho do *trieur* é retirado girando o cocho e aparando com uma concha que acompanha a máquina testadora de arroz. Os grãos quebrados depois de colocados no cadinho com os grãos inteiros são pesados e classificados como grãos inteiros mais quebrados.

Antes de utilizarmos a máquina testadora de arroz com um perfeito funcionamento, todos os seus principais componentes foram devidamente regulados.

O término da secagem foi determinado pela temperatura dos grãos, quando atingissem por volta de 60 °C. Nesse momento, o equipamento foi desligado. Uma amostra foi retirada e armazenada em recipientes plásticos abertos, na forma de uma coluna cilíndrica com base plana de 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro, mantidos em condições ambientais.

O procedimento para a análise da quebra dos grãos foi repetido para avaliar o rendimento de grãos inteiros durante o período de armazenamento. As amostras foram retiradas nos seguintes períodos após o término na secagem: 10, 20, 30 min; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 h; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21 e 30 dias.

Nas análises preliminares da redução de umidade observou-se que a umidade final dos grãos de arroz ficou superior àquela necessária para a estocagem, ou seja, 11% a 13% (b.u.). Deste modo, propôs-se uma técnica de secagem, a qual consistia na implantação dos ciclos de resfriamento do ar de secagem.

A implementação dos ciclos de resfriamento do ar consistia, basicamente, na redução da temperatura do ar de secagem quando a temperatura dos grãos de arroz em casca se aproximava dos 60 °C. Os ciclos de resfriamento tinham duração pré-determinada de 15, 30 e 45 min e a temperatura do ar de secagem era reduzida a um limite entre 35 °C e 40 °C.

Ao término de cada período de resfriamento, o ar de secagem teve a temperatura novamente elevada para o valor utilizado no início da operação. Este procedimento foi repetido pelo número de ciclos de resfriamento determinados para cada experimento. Foram realizados ensaios experimentais com dois e três ciclos de resfriamento.

Para a obtenção das curvas de redução de umidade, da elevação da temperatura dos grãos e do rendimento de grãos inteiros nos experimentos com ciclos de resfriamento utilizou-se o mesmo procedimento das análises preliminares.

3.4 - MEDIDAS

As variáveis medidas no sistema foram:

Velocidade do ar de entrada: o fluxo de ar era medido com o tubo de Pitot acoplado a um manômetro em “U”.

Temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido: as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido foram medidas utilizando-se termopares tipo T posicionados no psicrômetro de dupla mecha instalado no secador e acoplados ao sistema de aquisição de dados com registro contínuo.

Umidade do grão de arroz em casca: A umidade do grão de arroz em casca foi determinada pelo método descrito na seção 3.3, denominado método da estufa e calculada a partir das seguintes definições:

Umidade em base úmida :

$$U = \frac{\text{massa de arroz em casca úmido} - \text{massa de arroz em casca seco}}{\text{massa de arroz em casca úmido}}$$

Umidade em base seca :

$$M = \frac{\text{massa de arroz em casca úmido} - \text{massa de arroz em casca seco}}{\text{massa de arroz em casca seco}}$$

Temperatura do grão de arroz em casca: esta temperatura foi determinada pelo método descrito na seção 3.2 e registrada continuamente no sistema de aquisição de dados.

Rendimento dos grãos inteiros: O rendimento dos grãos inteiros (ω) foi determinado pelo método descrito na seção 3.3 e calculado segundo a Equação 1.1.

Carga de sólidos: A carga de sólidos úmidos para o secador leito de jorro cônico utilizada foi de 20 kg, conforme definido como ideal no trabalho de Faria (1997).

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão feitas as análises da influência da temperatura do ar de secagem, do diâmetro do tubo (D_t), da distância do entrada do ar de secagem no leito até o tubo interno (L_b) sobre a redução de umidade, temperatura dos grãos de arroz e fração de grãos inteiros na secagem de arroz em casca em batelada em leito de jorro cônico com tubo interno.

Devido às dificuldades encontradas para efetuar a redução de umidade em níveis comerciais de armazenamento, pois a temperatura dos grãos atingiu rapidamente os 60 °C, necessitou-se que o experimento fosse interrompido, impedindo maior retirada de umidade neste tipo equipamento. Sendo assim, foi proposto uma técnica de secagem com a utilização de ciclos de resfriamento, para minimizar a deficiência na secagem de arroz em casca em leito de jorro com tubo interno. Portanto, mais adiante a influência destes ciclos no percentual de grãos inteiros será estudada durante e após a secagem, ou seja, no período de estocagem.

Deste modo, iremos dividir este capítulo em duas partes.

4.1- Análise da influência da cinética de secagem convencional em leito de jorro cônico com tubo interno no rendimento de grãos inteiros utilizando-se o arroz em casca.

4.2- Análise do efeito dos ciclos de resfriamento na cinética de secagem e no rendimento de grãos inteiros de arroz em casca.

4.1 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CINÉTICA DE SECAGEM CONVENCIONAL NO RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS

4.1.1 - ANÁLISE DA SECAGEM

Foram realizados doze ensaios experimentais nas condições de operação apresentadas na Tabela 4.1. Contudo foram realizados alguns experimentos em duplicata.

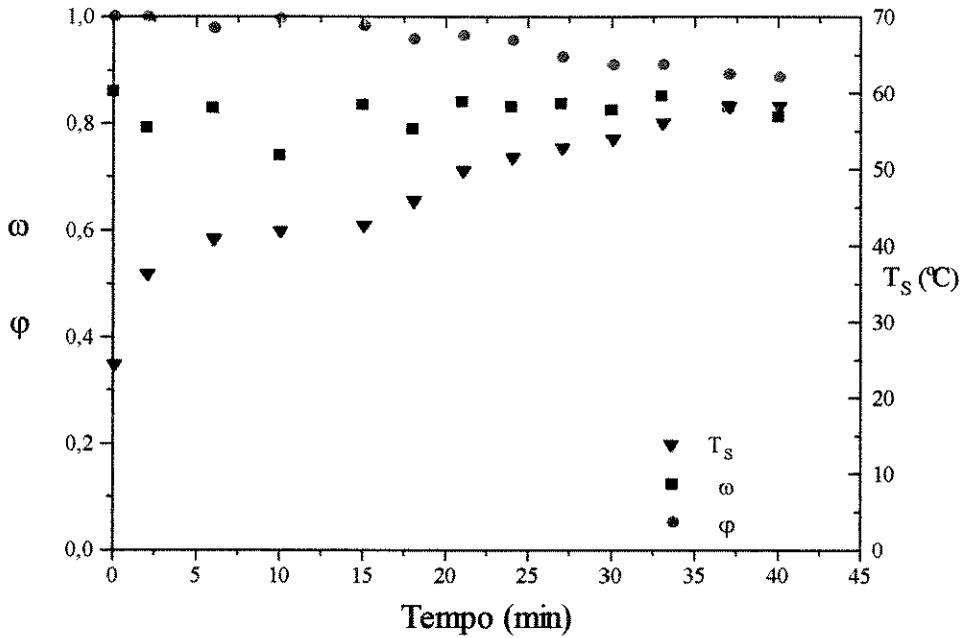
Tabela 4.1 - Intervalos de Operação.

Q/Q_{jm}	$T(^{\circ}C)$	W_o (kg)	U_o (b.u.)	$T_{so}(^{\circ}C)$
1,17 a 2,03	90 a 110	20	0,23 a 0,25	23 a 26

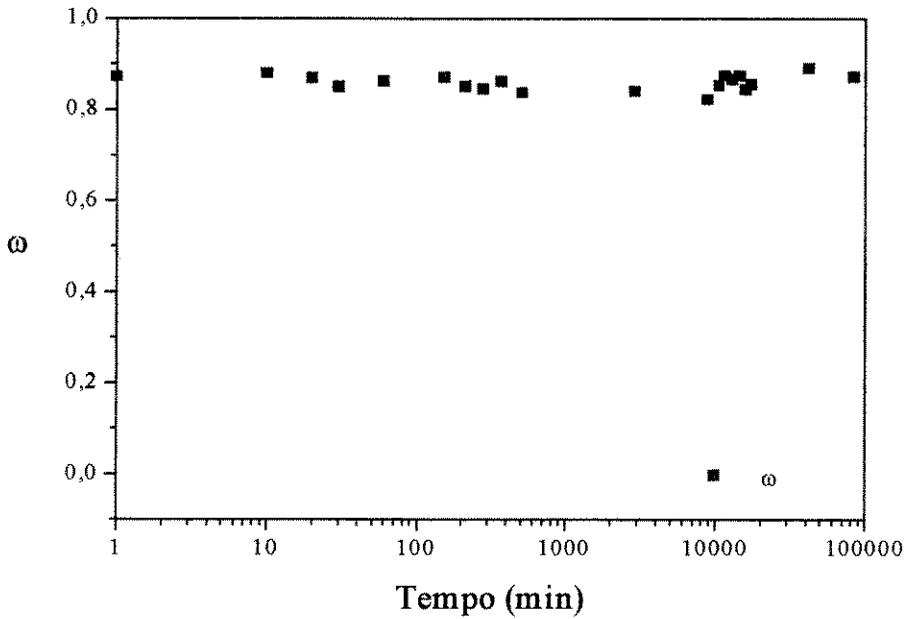
Utilizando-se a metodologia experimental apresentada no capítulo 3, foram obtidas as curvas experimentais de redução de umidade (base úmida), rendimento dos grãos inteiros e da evolução da temperatura dos grãos de arroz em casca.

Os resultados serão apresentados de acordo com a Figura 4.1, em que as Figuras (a) são referentes ao processo de secagem e as Figuras (b) são referentes ao período de armazenagem ou pós-secagem. Nos gráficos referentes à secagem encontram-se na abcissa, o tempo, enquanto que, na ordenada representam-se as variáveis: rendimento dos grãos inteiros ao longo do tempo, evolução da temperatura e umidade adimensional em base úmida dos grãos foram definidas da seguinte forma: ω ; $\varphi = \frac{U}{U_o}$ e T_s , respectivamente. Nos gráficos de pós-secagem, encontram-se na abcissa o tempo e na ordenada a variável rendimento dos grãos inteiros, eles foram construídos logo após o término da secagem. Na Figura 4.1b, por exemplo, na qual se lê 1 min em tempo real, leia-se 48 min em operação

total. Cabe salientar que a umidade relativa do ar ambiente, para os experimentos foi, em média, igual a 65%.

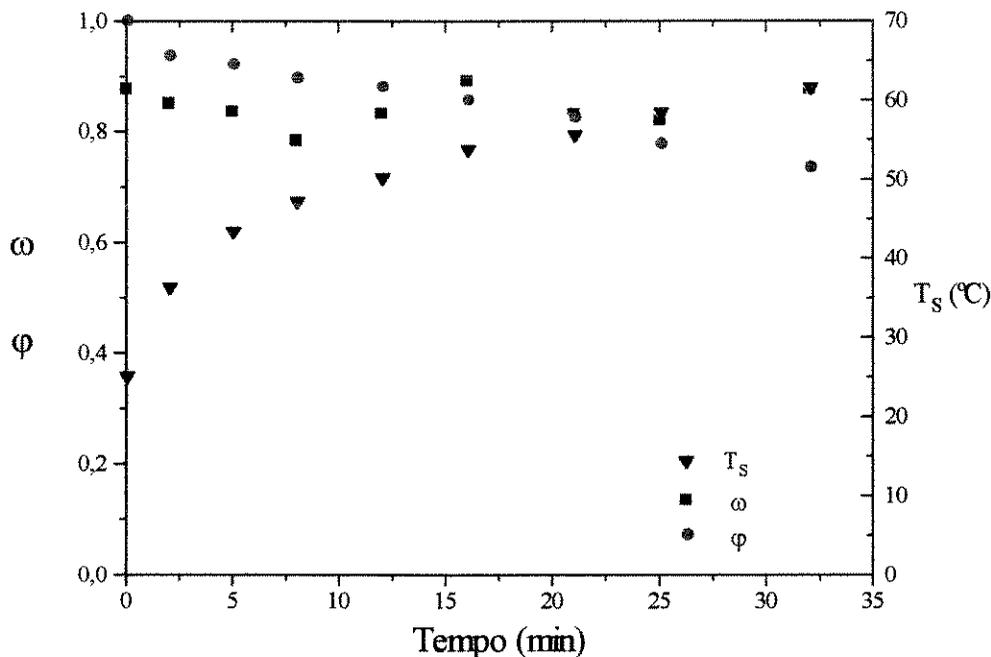


(a) - Secagem

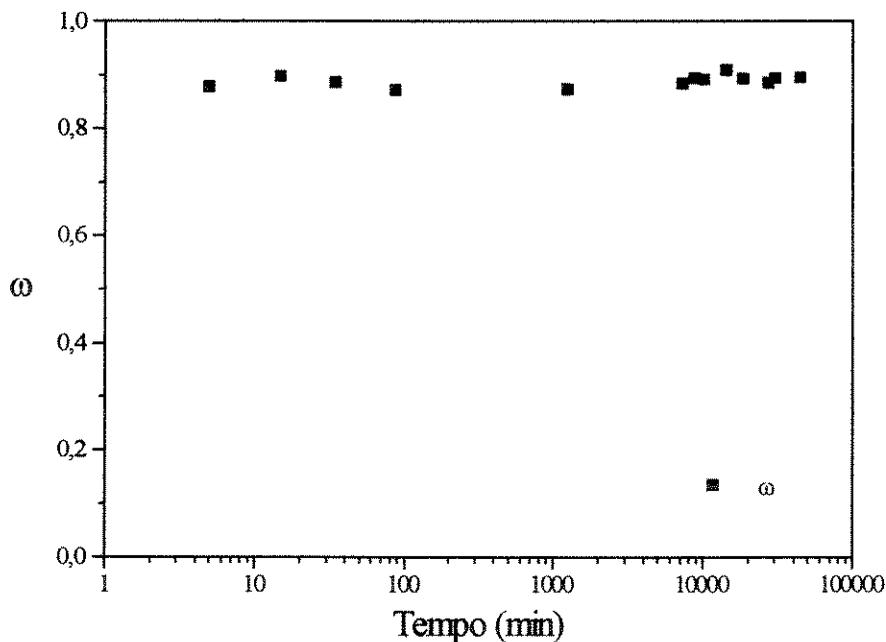


(b) - Pós-secagem

Figuras 4.1 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,23$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,43$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 5,08 \text{ cm}$.



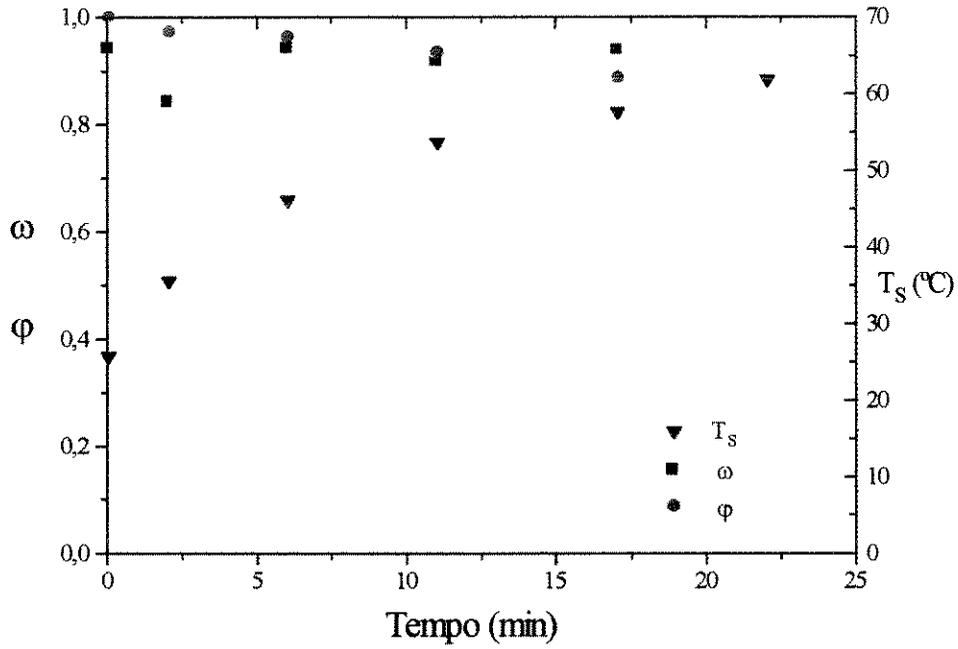
(a) - Secagem



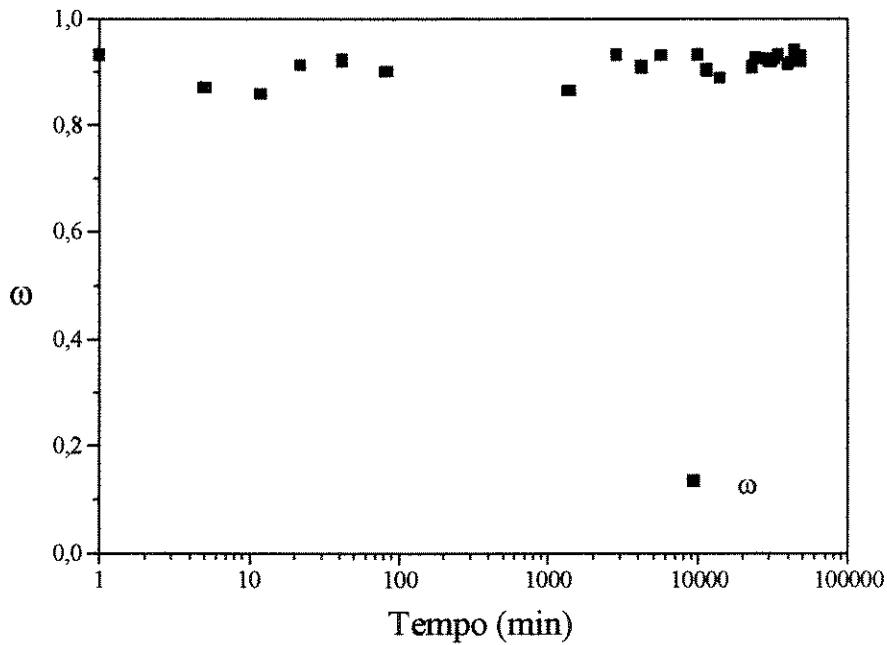
(b) - Pós-secagem

Figuras 4.2 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,24$; $L_b = 07$ cm e $D_t = 5,08$ cm.



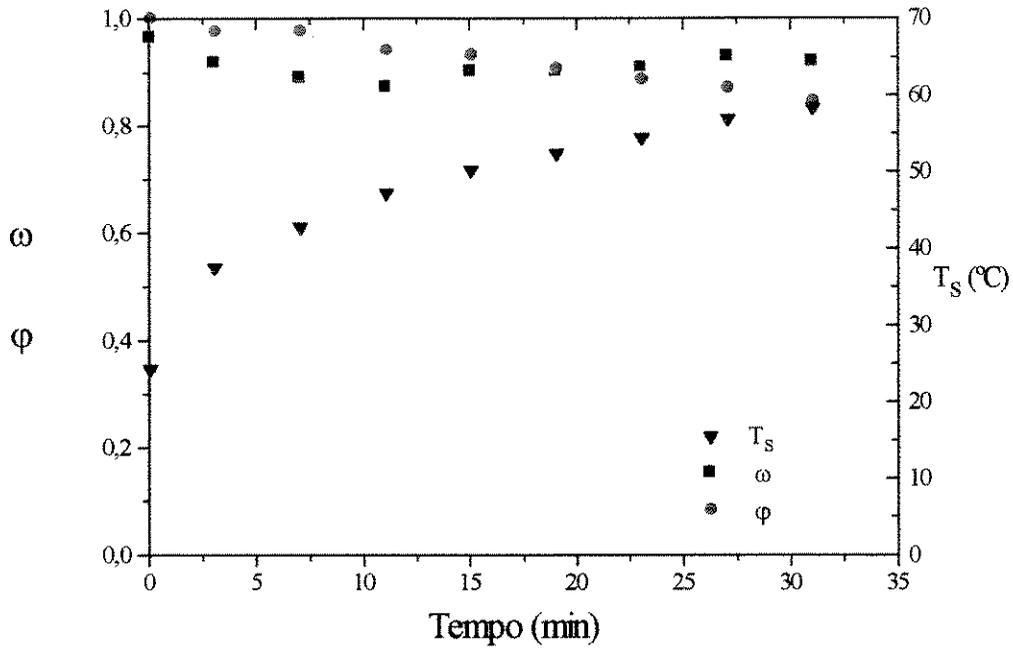
(a) - Secagem



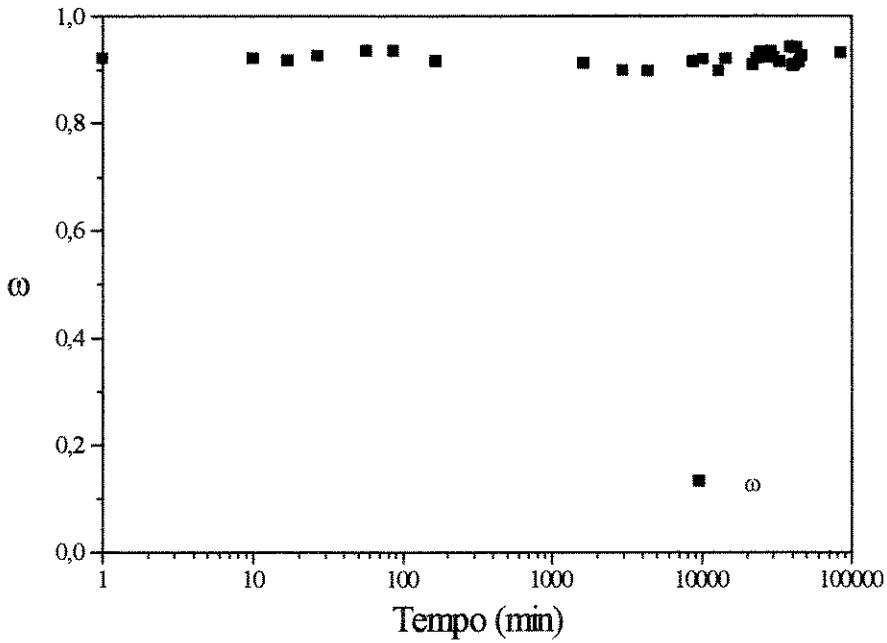
(b) - Pós-secagem

Figuras 4.3 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,24$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 2,03$; $L_b = 07 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$



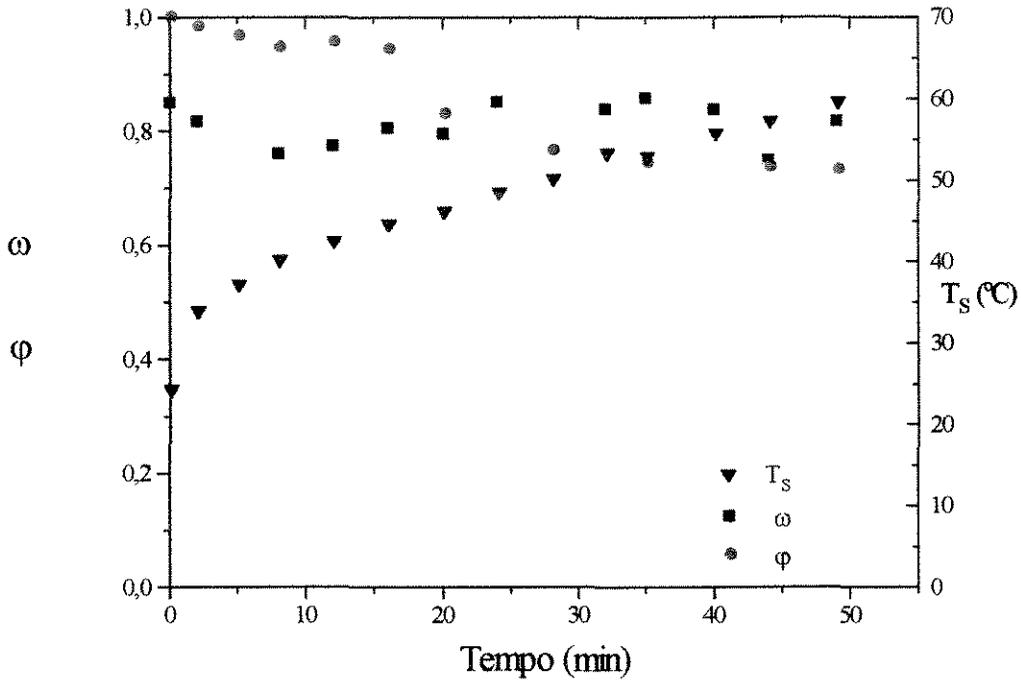
(a) - Secagem



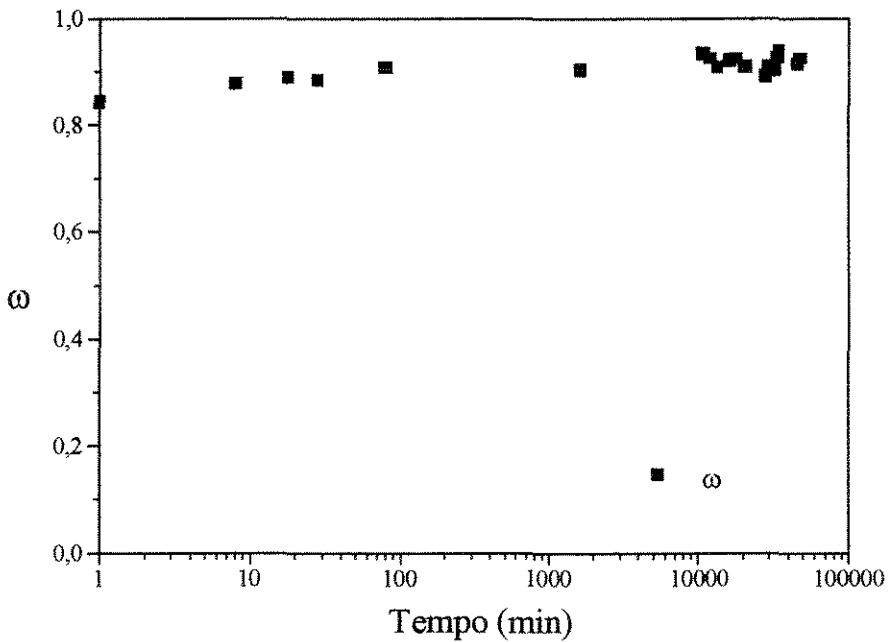
(b) - Pós-secagem

Figuras 4.4 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 100^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.



(a) - Secagem



(b) - Pós-secagem

Figura 4.5 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,24$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

As Figuras 4.1 a 4.5 representam parte dos resultados experimentais obtidos. Os demais resultados estão apresentados no Apêndice A. Pode-se observar que existe um comportamento padrão para a secagem dos grãos de arroz em casca em leito de jorro cônico com tubo interno. A temperatura dos grãos atinge rapidamente a temperatura limite, estipulada em 60 °C, exigindo o fim do ensaio experimental. Este comportamento deve-se ao fato de o grão de arroz perder rapidamente a umidade localizada na casca do grão devido à ação de uma quantidade substancial de energia ser fornecida a eles, acarretando numa elevação da temperatura no interior do mesmo. Apesar de ainda ter um grande teor de umidade no interior do grão, a transferência de umidade do interior do grão para o ar de secagem pode estar sendo dificultada pelo endurecimento do amido do grão de arroz em função de estar submetido a temperatura elevada. Este fenômeno é conhecido como “case hardening”. Esta “capa” de amido formada dificulta o movimento da água no interior do grão e, por conseqüência, diminui a taxa de secagem.

A secagem foi ineficiente, pois a utilização do tubo interno por si só reduz a transferência de massa, corroborando as observações de Barrozo (1985), Cremasco (1986) e Viswanathan et al. (1986). A redução da transferência de massa acontece porque com a utilização do tubo interno há uma redução do volume de partículas no leito, expostas ao ar de secagem e conseqüentemente diminui o contato das partículas com ar de secagem. Este fato acarretou um teor de umidade final dos grãos entre 18,5 % e 21 % (b.u.), ou seja, um valor bem acima daquele estipulado pelo Ministério da Agricultura que é por volta de 11 % a 13 %.

A redução de umidade, em todos os ensaios experimentais, obedeceu a Equação 2.1. Os valores experimentais a constante cinética de secagem (α) foram determinados, para cada experimento, plotando-se $\ln(U/U_0)$ versus tempo (t),

sendo α a inclinação da reta obtida com a utilização deste procedimento. O coeficiente de correlação foi sempre superior a 0,98, justificando a utilização do modelo, como pode ser observado na Figura 4.6.

$$\frac{U}{U_0} = e^{-\alpha t} \quad (2.1)$$

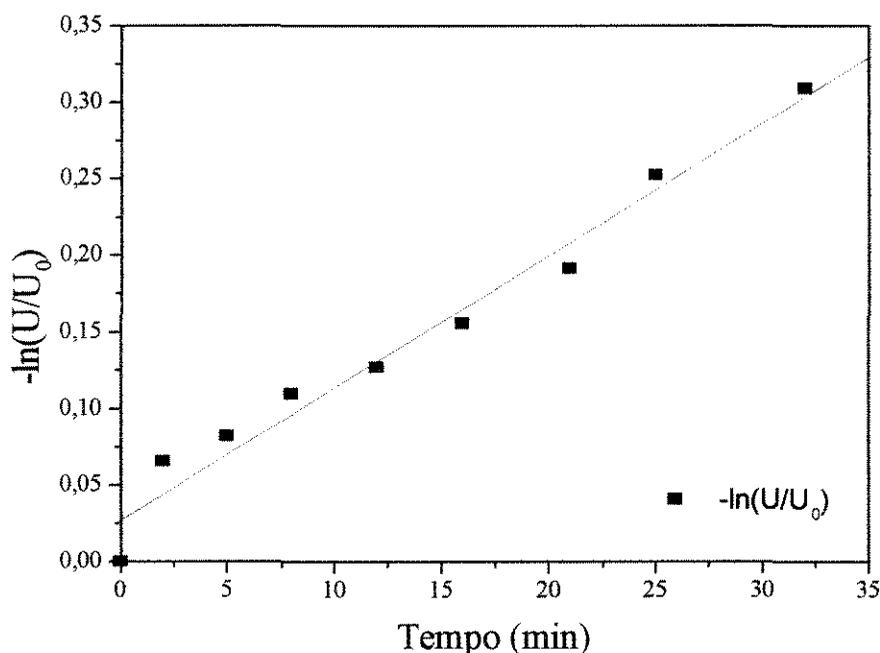


Figura 4.6 - $-\ln(U/U_0)$ versus tempo t , nas seguintes condições de operação:
 $T = 100^\circ\text{C}$; $U_0 = 0,25$; $W_0 = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.

Com os valores experimentais da constante cinética de secagem e os grupos adimensionais Q/Q_{jm} , L_b/D_t , e K_o , utilizou-se o método de mínimos quadrados bem como o método de Crout para solucionar numericamente os sistemas de Equações, encontrando-se a seguinte correlação:

$$\alpha = 5,491 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{1,574} \left(\frac{L_b}{D_t} \right)^{0,628} (K_0)^{-0,417} \quad (4.1)$$

utilizou-se oito ensaios experimentais para a determinação da correlação. O seu desvio médio relativo foi igual a 15,26% , calculado segundo as Equações:

$$D.M.R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D.R \times 100\% \quad (4.2)$$

com:

$$D.R = \frac{|\alpha_{exp} - \alpha_{cal}|}{\alpha_{exp}} \quad (4.3)$$

Para determinar a correlação referente à evolução da temperatura dos grãos de arroz em casca ao longo do tempo, utilizou-se a Equação 2.7.

$$\frac{T - T_s}{T - T_{s0}} = e^{-\beta t} \quad (2.3)$$

De maneira análoga, os valores experimentais da constante de evolução da temperatura dos grãos foi obtido plotando-se $\ln\left(\frac{T - T_s}{T - T_{s0}}\right)$ versus tempo t, sendo β a inclinação da reta, conforme demonstrado na Figura 4.7. O coeficiente de ajuste para a constante de evolução da temperatura dos grãos foi sempre maior superior a 0,96.

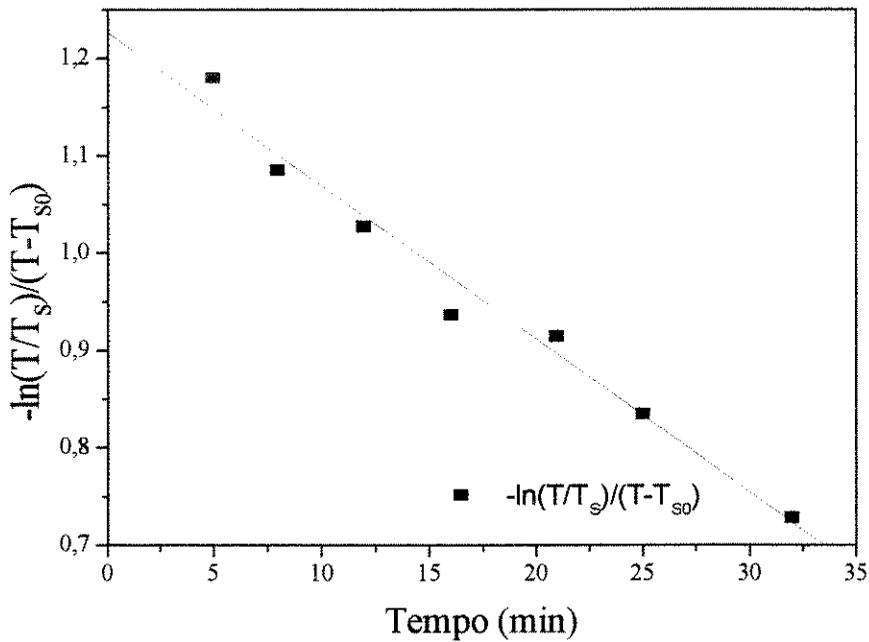


Figura 4.7 - $\ln((T-T_s)/(T-T_{s0}))$ versus tempo t, nas seguintes condições de operação: $T = 100^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

Com os valores experimentais procedem-se analogamente à obtenção da correlação para a constante de cinética de secagem, ou seja, utilizou-se o método de mínimos quadrados acoplado ao método de Crout e, com o formato proposto por Cremasco, Rocha e Massarani (1990), chegou-se à seguinte expressão:

$$\beta = 0,237 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,801} \left(\frac{L_b}{D_t} \right)^{0,442} (K_0)^{-1,772} \quad (4.4)$$

com a utilização de oito ensaios experimentais e o desvio médio relativo da correlação foi igual a 5,91% , calculado segundo:

$$\text{D.M.R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{D.R} \times 100\% \quad (4.5)$$

com:

$$D.R = \frac{|\beta_{\text{exp}} - \beta_{\text{cal}}|}{\beta_{\text{exp}}} \quad (4.6)$$

No intuito de quantificar a influência do uso do tubo interno na operação de secagem em um leito de jorro, considerando as mesmas condições de operação, dividiu-se as correlações encontradas neste trabalho para as constantes de cinética de secagem e evolução da temperatura dos grãos em um leito de jorro cônico com tubo interno, Equação 4.1, pela correlação para a constante de cinética de secagem em leito de jorro cônico determinada por Faria (1997), Equação 2.9. Analogamente, dividiu-se a constante de evolução da temperatura dos grãos em leito de jorro cônico com tubo interno, Equação 4.4, pela constante de evolução da temperatura dos grãos para o leito de jorro convencional, Equação 2.10, no intuito de quantificar a influência do uso do tubo interno na secagem em leito de jorro.

As Figuras 4.8 e 4.9 representam as razões entre as constantes da cinética de secagem para leito de jorro com tubo interno pelo leito de jorro cônico convencional (α_t/α) em função do diâmetro do tubo (D_t) e distância do tubo à base do cone (L_b) enquanto que as Figuras 4.10 e 4.11 representam a razão das constantes de evolução da temperatura dos grãos.

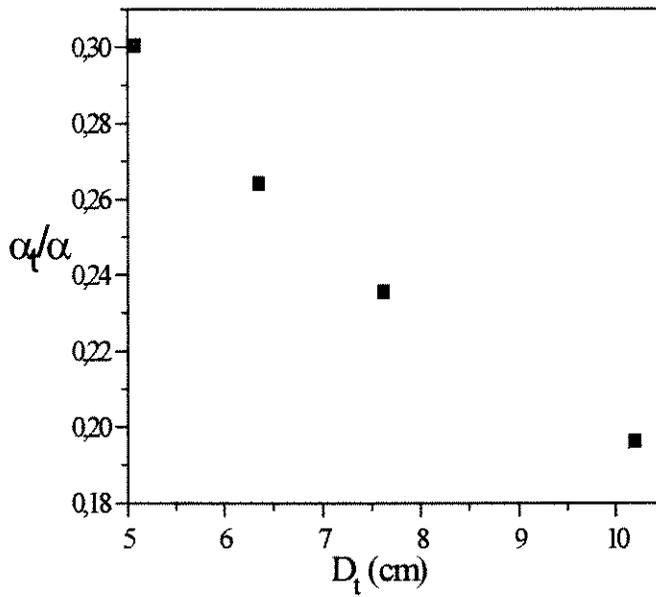


Figura 4.8: Efeito de D_t na constante de cinética de secagem.
 $U_0 = 0,24$; $W_0 = 20$ Kg; $T = 100$ °C; $Q/Q_{jm} = 1,2$; $L_b = 11$ cm.

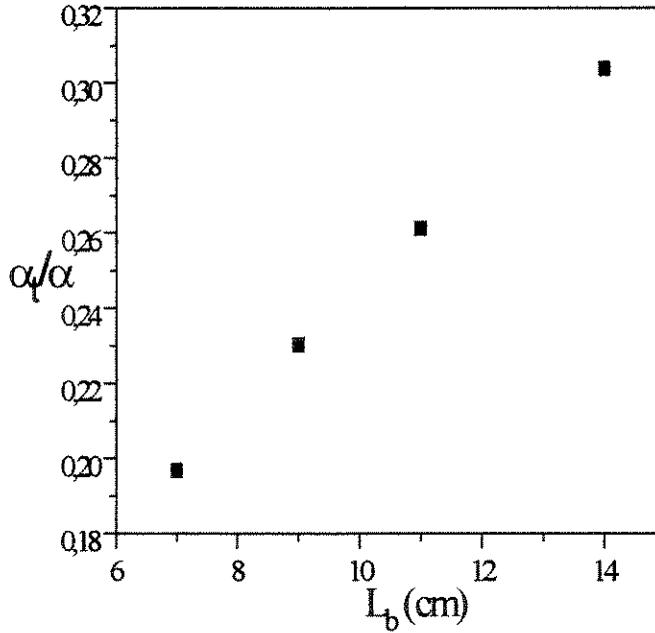


Figura 4.9: Efeito de L_b na constante de cinética de secagem.
 $U_0 = 0,24$; $W_0 = 20$ Kg; $T = 100$ °C; $Q/Q_{jm} = 1,2$; $D_t = 7,62$ cm.

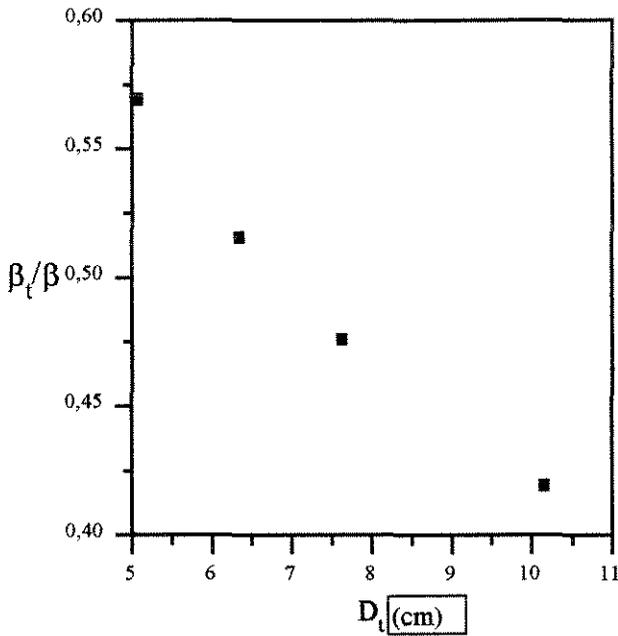


Figura 4.10: Efeito de D_t na constante de evolução da temperatura dos grãos.
 $U_0 = 0,24$; $W_0 = 20$ Kg; $T = 100$ °C; $Q/Q_{jm} = 1,2$; $L_b = 11$ cm.

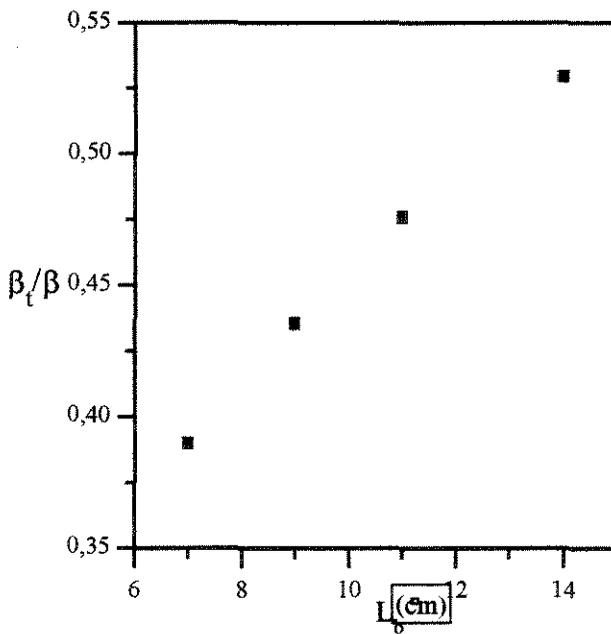


Figura 4.11: Efeito de L_b na constante de evolução da temperatura dos grãos.
 $U_0 = 0,24$; $W_0 = 20$ Kg; $T = 100$ °C; $Q/Q_{jm} = 1,2$; $D_t = 7,62$ cm.

As Figuras 4.8 e 4.10 nos mostram que com o aumento do diâmetro do tubo interno, diminui-se a influência do tubo interno no processo de secagem. Há uma redução das transferências de massa e de calor na secagem em função do aumento da quantidade de material presente no interior do tubo em relação a quantidade presente na região anular. Como a transferência de massa ocorre, substancialmente, na região anular isto acarreta numa diminuição da transferência de massa de água contida na partícula para o ar de secagem, corroborando as observações de Khoe e Brakel (1983).

Contudo o diâmetro do tubo interno não pode ser grande o suficiente para que haja formação de jorro interno ao tubo e nem pequeno o suficiente para que aconteça o jorro exterior ao mesmo. Com o aumento do diâmetro do tubo diminui-se a influência do tubo interno, pois quanto menor o tubo interno mais próximo o leito se torna de um leito de jorro convencional, já que ocorre um aumento da área útil de transferência de massa.

Ao analisar-se as Figuras 4.9 e 4.11, conclui-se que quanto maior a distância entre o tubo e a base cônica menor será a influência do tubo interno na secagem em leito de jorro cônico. Este comportamento deve-se ao fato de que quanto mais próximo o tubo estiver da base cônica menor será a altura de sólidos a ser rompida pelo jato de ar e, também, devido ao fato do fluxo de ar ser mais direcionado para o interior do tubo, ou seja, diminui-se a propagação do ar na região anular. Sendo assim, as transferências de calor e massa entre os grãos de arroz e o jato de ar restringem-se basicamente a região axial. Com o aumento de L_b , incrementa-se a vazão de ar que percola os grãos pela região anular, aproximando o comportamento fluidodinâmico do secador leito de jorro com tubo interno do secador leito de jorro convencional.

Observa-se, por intermédio da análise das Figuras 4.8 e 4.9, que variando tanto o distanciamento do tubo interno à base cônica do leito quanto o diâmetro do tubo, o desempenho do leito de jorro cônico com tubo interno orbita os 30 % (trinta por cento) se comparado com o leito de jorro cônico convencional para previsões mais otimistas.

A utilização do tubo interno além de reduzir consideravelmente o desempenho do secador quando comparado ao leito de jorro convencional, traz o inconveniente, como apresentado anteriormente, de não propiciar a remoção de umidade em níveis ideais de armazenamento. Para uma maior retirada de umidade utilizou-se a técnica dos ciclos de resfriamento que consiste na redução da temperatura do ar de secagem, ocasionando um decréscimo da temperatura do grãos e por fim prorrogando o término da secagem.

4.1.2- ANÁLISE DO RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS DE ARROZ SUBMETIDOS À SECAGEM

Utilizando-se ainda as Figuras 4.1 a 4.5 pode-se observar o comportamento referente ao rendimento de grãos inteiros. Nota-se, claramente, que há um comportamento padrão para todos os ensaios experimentais. Em nenhum deles há queda significativa do rendimento de grãos inteiros, mesmo havendo mudanças nas condições de operação. Os gráficos (b) foram construídos logo após o término da secagem. Na Figura 4.1b, por exemplo, na qual se lê 1 min em tempo real, leia-se 48 min em operação total, ou seja, a armazenagem dos grãos é imediatamente posterior ao término da secagem. Este fenômeno está associado principalmente ao fato de não estar ocorrendo uma secagem significativa dos grãos com a utilização do tubo interno no leito de jorro. A secagem, como já foi dito anteriormente, é cessada em função da temperatura

limite do grão, estipulada em 60 °C. Nos ensaios experimentais a temperatura do grão atingia este limite antes que fosse efetuada uma secagem eficiente, ou seja, a umidade dos grãos não alcançou o limite recomendado que é entre 11% e 13%. A umidade final dos grãos de arroz nesses ensaios permaneceu entre 18,5 % e 21 % (b.u.).

Pode-se constatar que, mesmo havendo uma elevação substancial da temperatura dos grãos, não houve quebras significativas, indicando que a ação do gradiente de temperatura interno ao grão pode ser desprezível. Este fato confirma a constatação de Lopes (1989), mesmo este autor tendo utilizado um secador tipo bandeja.

Pelo fato de haver uma pequena remoção de umidade nos grãos de arroz durante a operação de secagem, ocorre gradiente interno de umidade. Sendo este gradiente pequeno, ele não proporciona a quebra dos grãos, ou seja, o rendimento de grãos inteiros permanece constante.

Observando-se as Figuras 4.1 a 4.5, nota-se que há uma variação no rendimento de grãos inteiros no início das corridas experimentais. Este comportamento é resultado da utilização da máquina testadora em grãos de arroz com umidade muito elevada. O descasque é feito de maneira ineficiente, devido à ação mecânica dos rolos compressores e do efeito de “esmagamento do grão úmido”. Quanto mais secos os grãos estiverem, melhor será a operação de descasque.

Mesmo no período de armazenamento, o rendimento de grãos inteiros permanece praticamente inalterado, ou seja, a taxa de quebra também não foi influenciada pelas condições de operação da secagem e nem pelas condições ambientais de conservação do grão. Ao contrário do ocorrido no trabalho de Faria

(1997), no que há uma queda no rendimento de grãos inteiros devido às condições de operação da secagem, a taxa de rendimento de grãos inteiros mantém-se constante e em média foi de 87%; contudo não ocorreu a redução da umidade necessária para que o material pudesse ser armazenado.

4.2 - ANÁLISE DO EFEITO DOS CICLOS DE RESFRIAMENTO NA CINÉTICA DE SECAGEM E NO RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS DE ARROZ EM CASCA

Este tipo de análise foi proposto devido ao fato de não estar ocorrendo redução de umidade em condições de propiciar o armazenamento do grãos em níveis adequados, 11% a 13% b.u., nos ensaios realizados nas condições de operação apresentadas no item 4.1. Sendo assim, fez-se um estudo no qual, no momento em que a temperatura dos grãos se aproximasse de 60 °C, fosse diminuída a temperatura do ar de secagem para entre 35 °C e 40 °C. Desta maneira, os grãos eram aquecidos pelo ar de secagem até o momento em que a temperatura dos grãos se aproximasse de 60 °C e então o ar era resfriado.

Os ciclos de resfriamento consistem no acionamento do resfriador por um intervalo de tempo determinado sendo estes de 15, 30 e 45 min. Nesses intervalos o ar de secagem era resfriado até a temperatura estabelecer-se entre 35°C e 40 °C, propiciando a retirada de umidade dos grãos e, concomitantemente, a diminuição da temperatura dos grãos de arroz em casca. Realizaram-se experimentos com dois e três ciclos de resfriamento. Os períodos de aquecimento do ar de secagem foram chamados de ciclos de resfriamento.

Os ensaios experimentais que foram conduzidos com arroz em casca estão contidos nos intervalos conforme mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Intervalos de operação de secagem para a carga de arroz úmido.

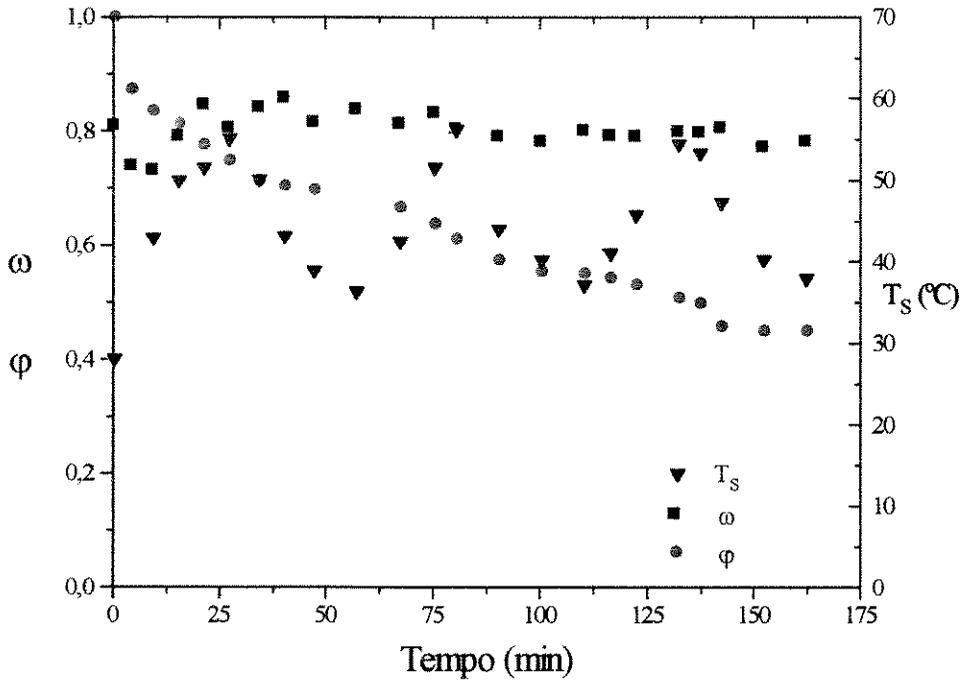
Q/Q_{jm}	T (°C)	U_o (b.u.)	T_{so} (°C)	n	t_c (min)
1,2 a 1,7	90	0,23 a 0,25	24 a 28	2 e 3	15, 30 e 45

As condições de operação foram determinadas em função das melhores condições obtidas na fase anterior.

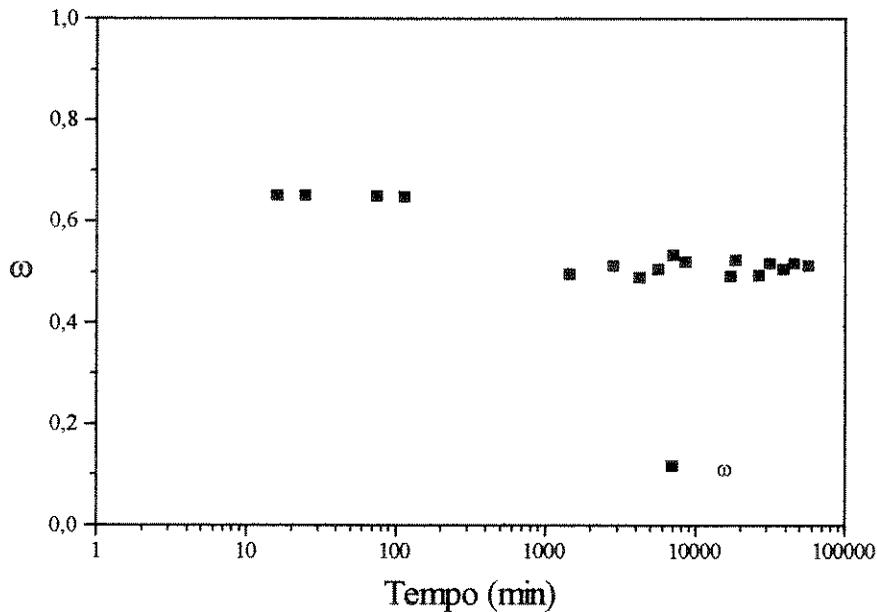
No caso da escolha do diâmetro do tubo interno, escolheu-se $D_t = 7,62$ cm, ao invés de $D_t = 5,28$ cm o qual apresentava melhor taxa de secagem. Isto se deve em virtude de a utilização do tubo de menor diâmetro ser problemática em função da ocorrência de entupimento do tubo interno provocando a interrupção do jorro e conseqüentemente dificuldade na manutenção do mesmo.

De maneira análoga aos outros ensaios experimentais obtiveram-se as curvas de redução de umidade (em base úmida), evolução da temperatura dos grãos de arroz em casca e de rendimento de grãos inteiros durante a secagem e após o beneficiamento.

Analogamente as Figuras anteriores, as Figuras 4.12 a 4.16 são assim descritas: os gráficos (a) representam a redução da umidade, a evolução da temperatura dos grãos e o rendimento de grãos inteiros de arroz, enquanto que os gráficos (b) representam o rendimentos dos grãos inteiros de arroz após a secagem. Sendo que estes últimos foram construídos logo após o término da secagem. Na Figura 4.12b, por exemplo, na qual se lê 1 min em tempo real, leia-se 176 min em operação total, ou seja, a armazenagem dos grãos é imediatamente posterior ao término da secagem.



(a) - Secagem

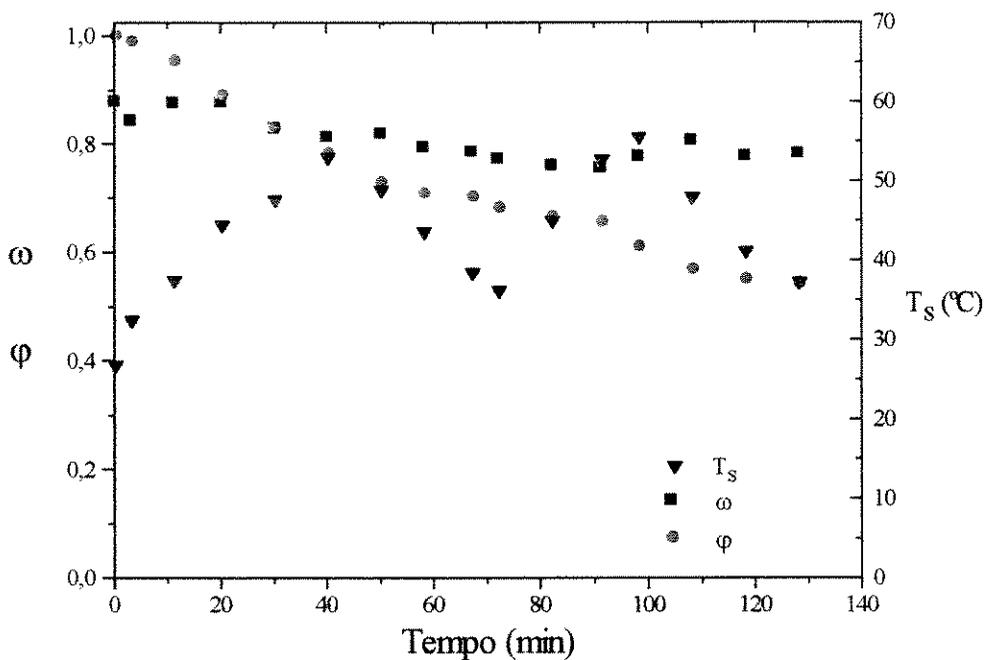


(b) - Pós-secagem

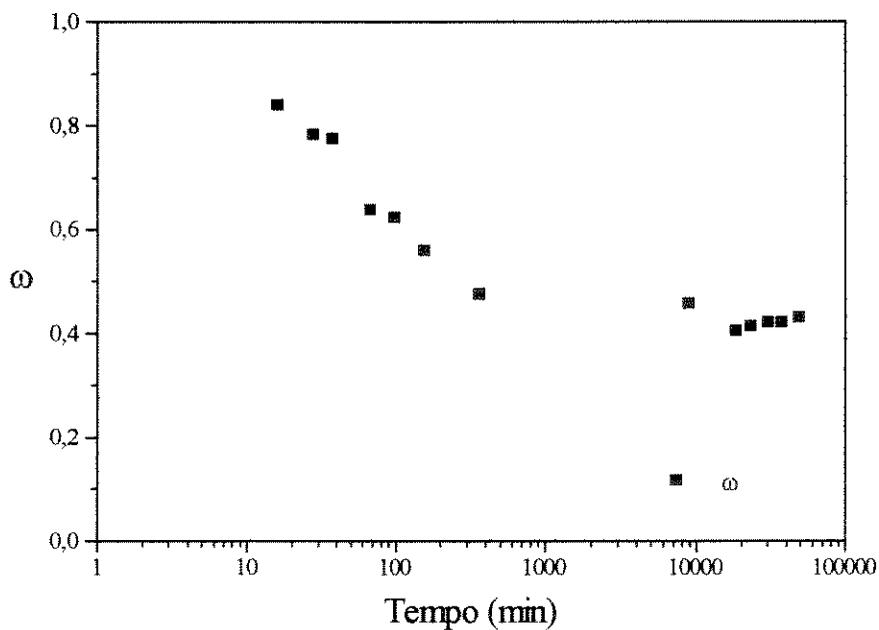
Figura 4.12 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,19$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.

Intervalo de tempo para resfriamento: 30 min e $n = 3$.



(a) - Secagem

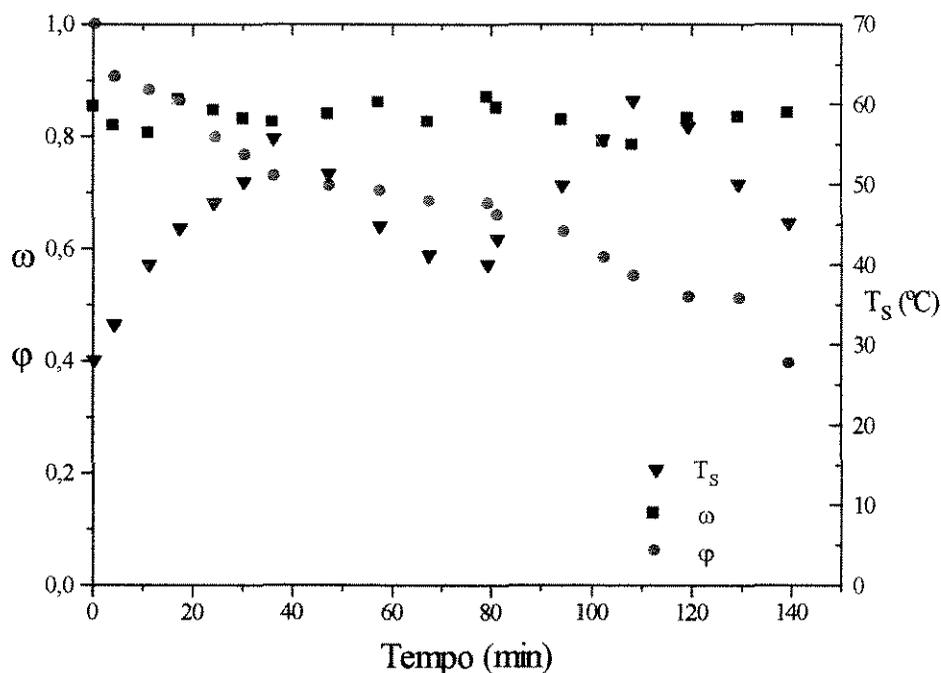


(b) - Pós-secagem

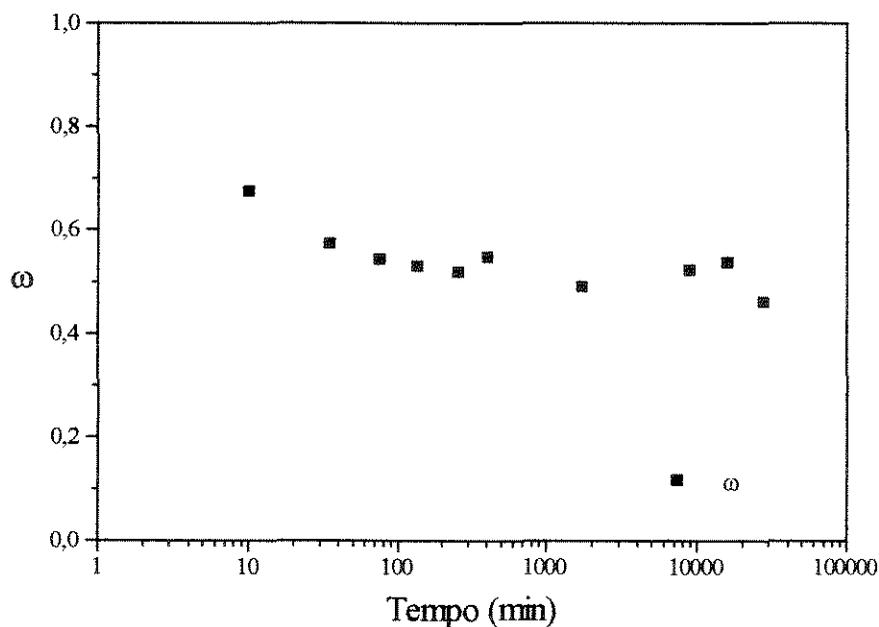
Figura 4.13 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,48$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

Intervalo de tempo para resfriamento: 30 min e $n = 2$.



(a) - Secagem

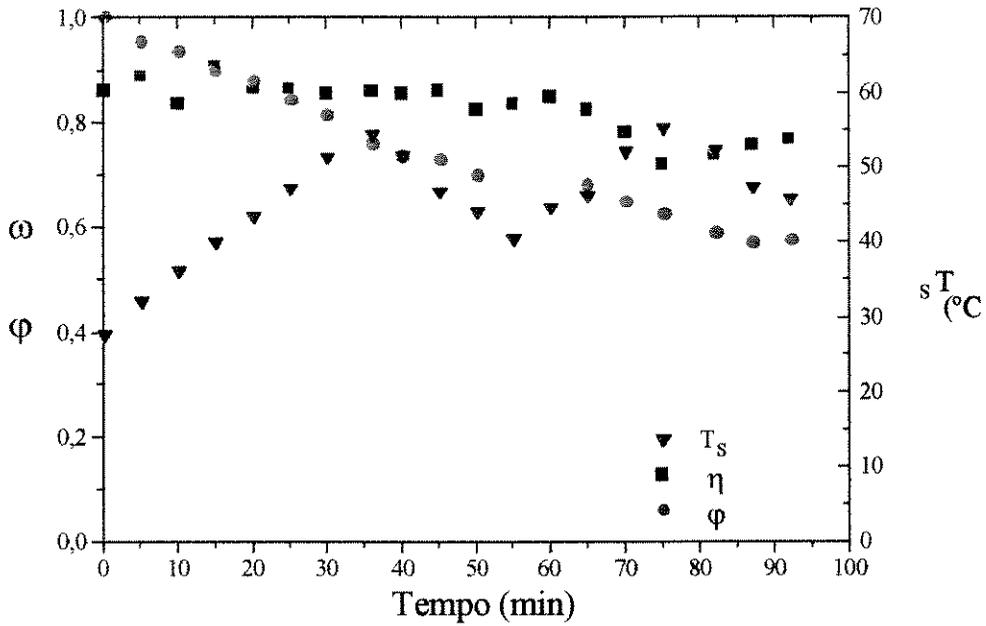


(b) - Pós-secagem

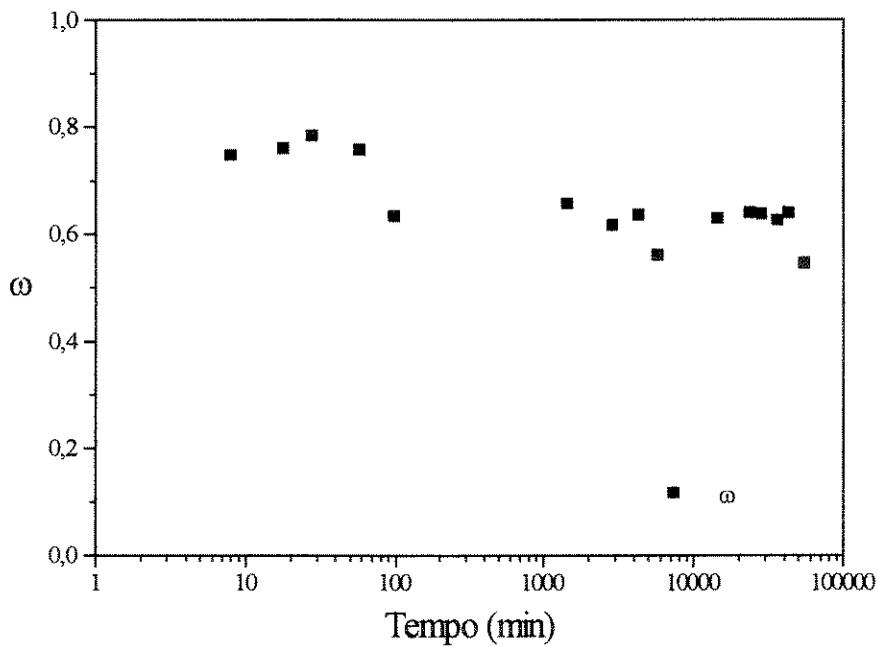
Figura 4.14 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,22$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,28$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.

Intervalo de tempo para resfriamento: 30 min -repouso



(a) - Secagem

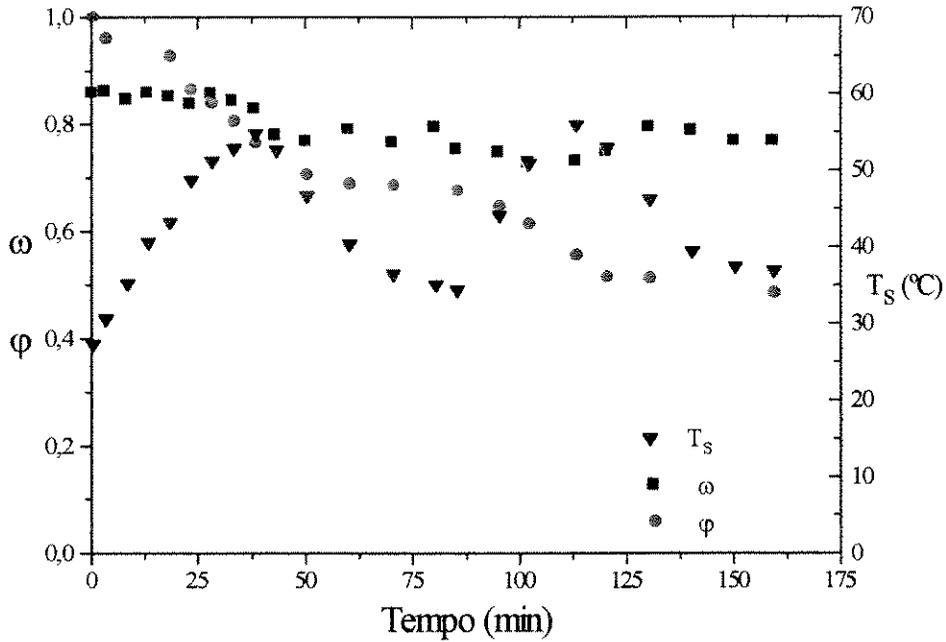


(b) - Pós-secagem

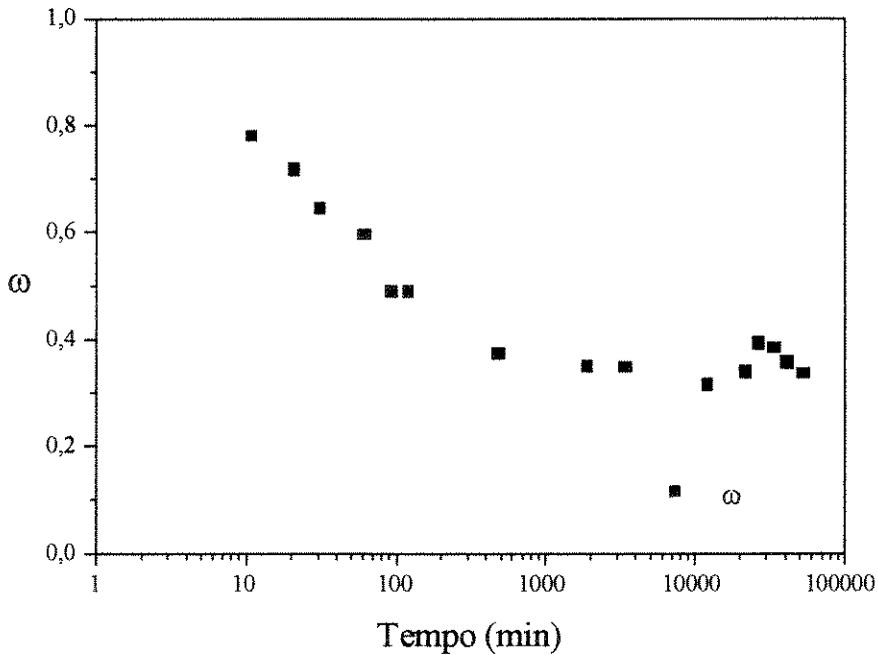
Figura 4.15 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,35$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

Intervalo de tempo para resfriamento: 15 minutos e $n = 2$.



(a) - Secagem



(b) - Pós-secagem

Figura 4.16 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,23$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

Intervalo de tempo para resfriamento: 45 min e $n = 2$.

Da inspeção das Figuras 4.12 a 4.16 observa-se que a redução de umidade foi significativamente maior com a utilização dos ciclos de resfriamento devido, principalmente, ao maior tempo do processo de secagem a que os grãos foram expostos e as variações das diferenças de temperatura entre a dos grãos de arroz e o ar de secagem o que, por certo, provocam gradiente de temperatura mais elevados em um mesmo intervalo de tempo, se comparados aos experimentos que não utilizem o recurso dos ciclos de resfriamento.

Como pode ser observado, não somente o teor de quebras de grãos é influenciado pela adoção dos ciclos de resfriamento de secagem, como também o processo de secagem como um todo. Recorrendo às Figuras 4.5 e 4.12 a 4.15 percebe-se a influência dos ciclos de resfriamento e observa-se que as secagens feitas com ciclos com tempo de resfriamento menor sofreram redução de umidade menor do que aquelas feitas com intervalo de tempo maiores devido à maior exposição dos grãos à operação de secagem. Observou-se que mesmo nos ciclos de resfriamento, a temperatura do ar de secagem é diminuída para entre 35°C e 40 °C, continua a ocorrer a remoção de umidade dos grãos.

A umidade final dos grãos para todos os experimentos com ciclos de resfriamento obtiveram uma redução de umidade condizente com os padrões do mercado, ou seja, entre 11% e 13% (b.u.) e obedeceram a Equação 2.1.

$$\frac{U}{U_0} = e^{-\alpha t} \quad (2.1)$$

Depois de fazer gráficos $\ln(U/U_0)$ versus tempo (t), foram determinados os valores experimentais da constante cinética de secagem com ciclos de resfriamento (α). O coeficiente de correlação para a constante cinética de secagem foi, sempre, maior que 0,90.

Propôs-se a seguinte formulação para a constante de cinética de secagem em experimentos realizados com ciclos de resfriamento (α).

$$\alpha = \alpha_0 + n\alpha_c \quad (4.7)$$

sendo:

α , a constante de cinética de secagem global;

α_0 , a constante de cinética de secagem para o período do primeiro aquecimento dos grãos, a qual é dada pela Equação 4.1;

α_c , a constante de cinética de secagem, referindo-se a secagem a partir do encerramento do aquecimento dos grãos,

n , o número de ciclos de resfriamento.

A constante α_0 foi obtida a partir da Equação 4.1 para valores de $L_b = 14$ cm, $D_t = 7,62$ cm e $W_0 = 20$ kg. Esses valores correspondem aos parâmetros experimentais utilizados nesta etapa do trabalho, pois foram os que apresentaram melhores condições de operacionalidade do secador. Sendo assim, a Equação 4.1 reduz-se à seguinte correlação:

$$\alpha_0 = 0,008 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{1,574} (K_0)^{-0,417} \quad (4.8)$$

Por intermédio dos dados experimentais, obteve-se a correlação para α_c , utilizando-se o método de mínimos quadrados acoplado ao método de Crout, e seguindo a proposta de Cremasco, Rocha e Massarani (1991), para a constante da cinética de secagem com ciclos de resfriamento para os grãos de arroz em casca.

$$\alpha_c = 0,08 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{0,657} (K_0)^{-0,391} \left(\frac{t_c}{t_{s0}} \right)^{0,083} \quad (4.9)$$

O desvio médio relativo para esta constante calculada por intermédio das Equações 4.2 e 4.3 foi de 6,24%, enquanto o desvio padrão médio observado foi igual a 0,562. Utilizou-se 16 pontos para a proposição da Equação 4.9.

Essa correlação é função dos grupos adimensionais Q/Q_{jm} , K_0 e t_c/t_{s0} , sendo t_c o intervalo de tempo para o ciclo de resfriamento e t_{s0} o tempo necessário para o grão alcançar a temperatura limite (60 °C) na primeira secagem.

O termo adimensional $\left(\frac{t_c}{t_{s0}} \right)$ quantifica a influência do ciclos de resfriamento na operação de secagem. Sendo assim, a constante global da cinética de secagem é obtida da soma entre as Equações 4.8 e 4.9:

$$\alpha = 0,008 \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{1,574} (K_0)^{-0,417} \left[1 + 10n \left(\frac{Q}{Q_{jm}} \right)^{-0,917} (K_0)^{0,026} \left(\frac{t_c}{t_{s0}} \right)^{0,083} \right] \quad (4.10)$$

Nota-se que caso não se adotar os ciclos de resfriamento, tem-se $n = 0$ e a Equação 4.10 reduz-se à 4.8.

4.1.2- ANÁLISE DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE INTEIROS DE ARROZ SUBMETIDOS À SECAGEM COM CICLOS DE RESFRIAMENTO

A análise do rendimento dos grãos inteiros foi feita da mesma maneira que a utilizada no item 4.1.2, ou seja, por meio da interpretação dos gráficos (a) e (b) das Figuras 4.12 a 4.17. No gráfico (a) tem-se o rendimento de grãos inteiros durante a secagem e nos gráficos (b) durante o período de estocagem.

Verifica-se nesses gráficos que a quebra dos grãos de arroz aumenta com a utilização dos ciclos de resfriamento. Inclusive, já existe uma tendência de quebra dos grãos de arroz antes do término da secagem. Evidencia-se, por outro lado, que a taxa de quebra ocorre mais acentuadamente durante o período de armazenamento. O intervalo de tempo no qual acontece a taxa de quebra situa-se entre 100 e 10000 min após a etapa de secagem. A partir de 10000 min a fração de grãos inteiros permanece constante.

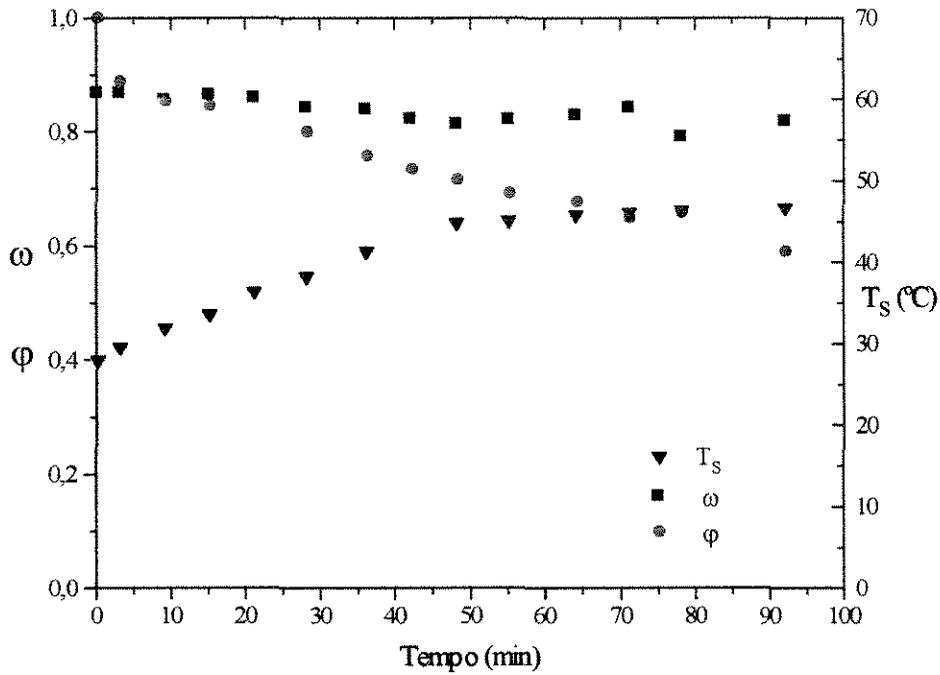
Observa-se nas Figuras 4.5 e 4.12 a 4.16 a influência dos ciclos de resfriamento no rendimento de grãos inteiros e, por intermédio delas, pode-se perceber que as secagens feitas com a adoção dos ciclos de resfriamento com intervalos de tempos mais curtos obtiveram rendimento de grãos inteiros maior. Este resultado pode ser atribuído às grandes variações de temperatura dos grãos somado à redução da umidade no interior dos grãos. Portanto, quanto maior o intervalo de tempo dos ciclos de resfriamento, maiores serão as diferenças de temperatura e as diferenças de umidade entre o grão e o ar de secagem.

A quebra dos grãos também pode ser resultado da longa exposição dos grãos à atividade mecânica no interior do secador, adicionado à atuação dos

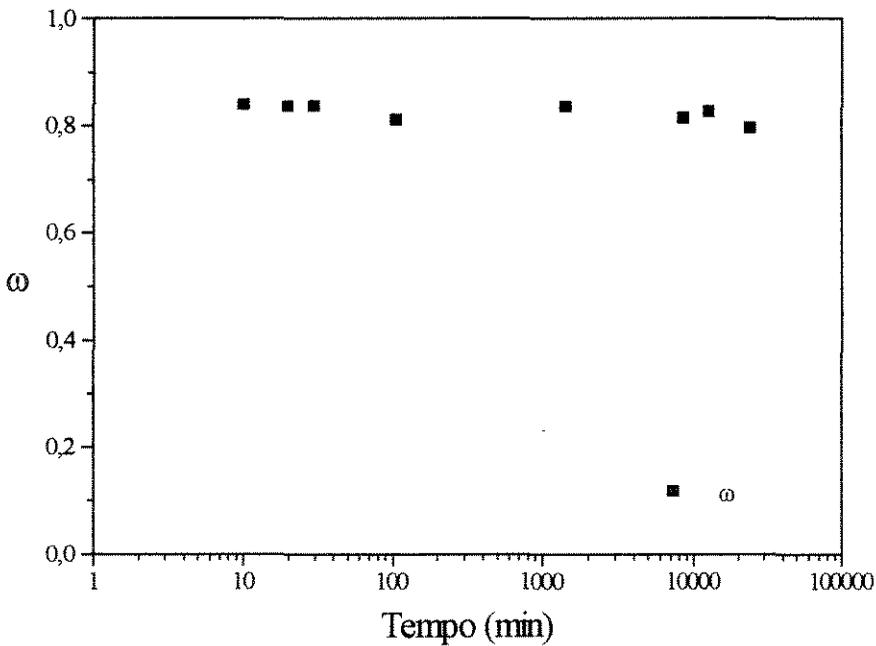
gradientes internos de temperatura e de umidade para os ciclos de resfriamento com intervalos de tempo maiores. Para todos os experimento em que foi utilizado os ciclos de resfriamento houve uma queda substancial do rendimento final de grãos inteiros, estando entre 35 % e 60 %.

Os experimentos realizados com intervalo de tempo para o ciclo de resfriamento de 15 min e dois ciclos de resfriamento, $n = 2$, apresentaram a menor taxa de queda, aproximadamente 60%. Os ensaios realizados com 30 min exibiram o rendimento final de grãos inteiros variando entre 40% e 50%. Sendo que ambos se encontram na faixa recomendada pelo Ministério da Agricultura para a comercialização. Quando o período de tempo dos ciclos de resfriamento foi de 45 min, o rendimento final de grãos inteiros sofreu sua maior redução, permanecendo constante por volta de 35 %, o qual está abaixo do indicado pelo Ministério da Agricultura.

Comparando as Figuras 4.12 a 4.15 e 4.16, temos uma diferença na aplicação dos ciclos de resfriamento. Nas Figura 4.12 a 4.15, a temperatura do ar de secagem é diminuída a 40 °C quando a temperatura dos grãos de arroz se aproxima dos 60 °C, sendo assim há uma diminuição da temperatura do grão de arroz para por volta de 45 °C, 40 °C e 35 °C nos intervalos de tempo para os ciclos de secagem de 15 min, 30 min e 45 min, respectivamente. O período de resfriamento é pré-determinado e, em seguida, o processo de aquecimento do grão é retomado, seguido de novo resfriamento. Ao se analisar essas Figuras, nota-se que nos experimentos em que o tempo de resfriamento foi maior, ocorreu uma redução na fração de grãos inteiros. Este fenômeno pode estar associado à maior diferença de temperatura entre os grãos e o ar de secagem durante os ciclos de resfriamento/secagem à ação mecânica do jorro.



(a) - Secagem



(b) - Pós-secagem

Figura 4.17 - Curvas de variação do rendimento de grãos inteiros, redução da umidade e temperatura dos grãos nas seguintes condições de operação:

$T = 60^\circ\text{C}$; $U_o = 0,22$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,28$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$.

Na Figura 4.14, o processo de resfriamento foi efetuado de maneira diferente. Os grãos foram colocados em repouso por 30 min ao término da secagem fora do secador nas condições ambientais. A carga de arroz era retirada ao término de cada ciclo de secagem e repousava sobre uma lona plástica, de área de aproximadamente $1,5 \text{ m}^2$. Durante o período que a carga fora do secador foram medidas a umidade dos grãos, a fração de inteiros e a temperatura dos grãos. As amostras eram retiradas em intervalos de 10 min. O resfriamento ocorre “ao natural” e, ao término desses 30 min, a carga foi recolocada no leito e sofreu um novo processo de secagem e depois novamente retirado para um novo resfriamento. Comparando-se o resultado experimental, Figura 4.17, com a correlação proposta por Faroni (1989), utilizando a temperatura de secagem de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e o intervalo de repouso de trinta minutos, verifica-se que o percentual calculado pela Equação 2.13 foi de 44,0 % de grãos inteiros, enquanto que o resultado experimental obtido neste trabalho esteve por volta de 81,0 %. Esta diferença pode estar relacionada com o tipo de secador utilizado, no caso da autora, um secador tipo bandeja.

Na secagem utilizando o repouso, Figura 4.14, pode-se observar que o rendimento de grãos inteiros é maior no final do período de estocagem. Este aumento no rendimento, se compararmos com a Figura 4.13, pode ser resultado da ação mecânica que os grãos deixaram de sofrer no interior do secador leito de jorro com tubo interno durante o período de resfriamento.

A Figura 4.17 apresenta o experimento feito com temperatura do ar de secagem de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sem ciclos de resfriamento. Sendo assim os grãos de arroz não alcançaram a temperatura limite para interromper o experimento e a operação de secagem, mesmo que mais demorada, retirou umidade dos grãos de maneira a colocá-los nos padrões necessários para o armazenamento, ou seja, umidade de 11 % a 13 % (b.u.). Pela interpretação dos gráficos (a) e (b) percebe-se que não

existe queda significativa no rendimento de grãos inteiros neste ensaio experimental. Este fenômeno pode ser explicado pela não variação da temperatura do ar de secagem, pois os grãos tendem a entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, sendo que o equilíbrio térmico é alcançado de maneira menos abrupta que os experimentos realizados com a aplicação dos ciclos de resfriamento. O percentual de grãos inteiros praticamente manteve-se constante.

Por intermédio dos dados experimentais de rendimentos dos grãos inteiros para as secagens utilizando os ciclos de resfriamento e as secagens sem a utilização dos mesmos e das Equações 4.1, 4.4 e 4.10, utilizando, novamente, o método de mínimos quadrados acoplado ao de Crout para o rendimento de grãos inteiros propôs-se a seguinte correlação:

$$\omega_f = \frac{0,39}{\alpha^{0,18} \beta^{0,03}} \quad (4.11)$$

em que ω_f é o rendimento final de grãos inteiros ao final do período de estocagem.

A Equação 4.11 prevê a quebra dos grãos no final do período de armazenamento dos grãos, tanto para os experimentos nos quais houve a utilização dos ciclos de resfriamento quanto para aqueles que não o utilizaram

O desvio médio desta correlação foi de 13,43 % de acordo com a Equação 4.12. Utilizou-se 17 pontos experimentais para a determinação da Equação 4.11.

$$D.M.R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D.R \times 100\% \quad (4.12)$$

$$\text{com: D. R.} = \frac{|\omega_{f_{\text{exp}}} - \omega_{f_{\text{cal}}}|}{\omega_{f_{\text{exp}}}} \quad (4.13)$$

4.3 - ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE GRÃOS INTEIROS POR INTERMÉDIO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO UTILIZADAS NUM SECADOR LEITO DE JORRO CÔNICO COM TUBO INTERNO

A estimativa do rendimento final dos grãos inteiros no final do período de armazenamento pode ser feita com a utilização da Equação 4.11, a qual depende das condições de operação do secador.

A quebra dos grãos de arroz na secagem utilizando leito de jorro com tubo interno acontece, significativamente, somente no período de armazenamento. A metodologia apresentada a seguir pode ser utilizada para secagens com ou sem a adoção dos ciclos de resfriamento.

1) Determina-se o do número de Kossovich (K_0) por intermédio dos seguintes dados: a umidade inicial dos grãos de arroz (U_0), a temperatura inicial dos grãos de arroz (T_{s0}), a temperatura do ar de secagem (T), o calor latente de vaporização da água (λ_{vap}) e a capacidade calorífica do arroz (C_{ps}).

2) Com os números adimensionais Q/Q_{jm} , L_b/D_t e K_0 , determina-se o valor da constante de evolução da temperatura dos grãos (β), utilizando-se a Equação 4.4.

3) Com o auxílio do valor obtido experimentalmente para β e assumindo que a primeira secagem termina no momento em que a temperatura dos grãos de arroz

atinge 60°C. Calcula-se o tempo necessário para a primeira secagem (t_{s0}) por intermédio da Equação 2.3.

4) Fixando-se o tempo e número de resfriamento, t_c e n , respectivamente. Determina-se o valor da constante cinética de secagem global (α), por intermédio da Equação 4.10.

5) De posse dos valores de α e β , estima-se o rendimento final de grãos inteiros (ω_f) para a operação utilizando-se a Equação 4.13.

Desta maneira pode-se estimar o rendimento de grãos inteiros ao final da secagem com os valores de operação do secador e os valores da umidade inicial e temperatura inicial dos grãos de arroz.

Exemplo: Para as seguintes condições de operação do secador leito de jorro com tubo interno estime o rendimento final de grãos inteiros:

$Q/Q_{jm} = 1,2$; $D_t = 7,62$ cm; $L_b = 14$ cm; $T = 80$ °C; $T_{s0} = 25$ °C; $U_0 = 0,24$ (b.u.), $n = 1$; $t_c = 30$ min e $W_0 = 20$ kg.

1) $K_0 = 6,525$.

2) $\beta = 0,01293$ s⁻¹.

3) $t_{s0} = 78,25$ min.

4) $\alpha = 0,0426$ s⁻¹.

5) $\omega_f = 0,6433$.

Neste caso o rendimento de inteiros foi de 64,33%, o qual está dentro do recomendado pelo Ministério da Agricultura.

CAPÍTULO CINCO

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1- CONCLUSÕES

Este estudo mostra que a secagem de arroz em casca em leito de jorro cônico com tubo interno e em batelada, com carga fixa em 20 kg, e o rendimento na forma de grãos inteiros de arroz podem ser controlados por meio das condições de operação do secador.

Utilizando-se o arroz em casca oriundo do campo, verificou-se que o cereal vem com alto teor de umidade, em torno de 26% em b.u. Ao submeter a carga úmida de arroz em casca à secagem, observou-se que os grãos atingem rapidamente a temperatura limite de 60 °C sem que, no entanto, houvesse retirada suficiente de umidade para proporcionar aos grãos de arroz em casca os critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura para comercialização, 11% e 13 % (b.u.). Constatou-se que a umidade contida no grão já aquecido situava-se entre 18,5% e 21%. Durante a secagem não se detectou quebra dos grãos. Isto pode ter ocorrido em função da não retirada substancial de umidade do seu interior.

Para solucionar o problema da alta umidade no produto final da secagem propôs-se, nesta Dissertação, a adoção de ciclos de resfriamento durante a secagem, ou seja, provoca-se um resfriamento do ar de secagem antes que a temperatura dos grãos atinja a temperatura limite de 60 °C. Observou-se que

houve, por intermédio, desta metodologia, uma redução de umidade que atingiu a condição de armazenamento do arroz, 11% a 13% (b.u.). Por outro lado, o rendimento de grão inteiros sofreu queda em todas os experimentos realizados com a aplicação dos ciclos de resfriamento. Dependendo da duração dos ciclos de secagem, o rendimento de grãos inteiros permanecia ou não nas condições exigidas pelo Ministério da Agricultura para comercialização do arroz. Para os experimentos realizados com dois e três ciclos de resfriamento e tempos de duração dos ciclos de secagem de 15 e 30 min, o percentual de grãos inteiros permaneceu acima do estipulado, mas para os ciclos de secagem com duração de 45 min o rendimento de grãos inteiros manteve-se abaixo das condições pretendidas.

Tanto o percentual de grãos inteiros quanto a cinética de secagem de grãos de arroz são alterados ao se utilizar os ciclos de resfriamento e observou-se que todas as variáveis de processo como temperatura do ar de secagem, razão entre a vazão do ar na operação de jorro e a vazão de jorro mínimo (Q/Q_{jm}), tempo do ciclo de resfriamento influenciam na cinética de secagem. Os experimentos realizados com ciclos de resfriamento mostraram que mesmo nos períodos nos quais ocorreram a redução da temperatura do ar de secagem, houve retirada significativa da umidade dos grãos.

Neste trabalho foram propostas correlações para o cálculo da constante de cinética de secagem (α), Equação 4.10, para experimentos que se utilizam ou não a técnica dos ciclos de resfriamento. Esta correlação é função de Q/Q_{jm} , K_0 e t_c/t_{s0} , sendo que a influência de Q/Q_{jm} é a maior entre elas. Porém no adimensional K_0 encontra-se a influência do calor de vaporização da água e a força mecânica exercida pelas moléculas de água no interior do grão quando da mudança de fase, favorecendo o aparecimento de trincas, os quais potencializaram o surgimento de quebras.

Na correlação proposta para a constante de evolução da temperatura dos grãos, Equação 4.4, utilizou-se apenas dos ensaios experimentais realizados sem a presença dos ciclos de resfriamento devido à dificuldade de trabalhar a variação da temperatura dos grãos quando estes são submetidos à secagem com ciclos de resfriamento. Esta correlação é função de Q/Q_{jm} , K_0 e L_b/Dt , sendo que a influência do K_0 é a maior nesta expressão, decorrente do fato de este adimensional ser função da temperatura do grão. Essa variável representa a energia gasta para aquecer o grão e para que ocorra a mudança de fase da água presente no interior do grão.

A quebra dos grãos de arroz está diretamente ligada à cinética de secagem e à temperatura dos grãos. Este fato foi comprovado com a correlação 4.11, a qual estima o rendimento final de grãos inteiros após o período de armazenagem. Nesta correlação observa-se que a ação de remoção de umidade tem maior influência na quebra dos grãos do que a ação do aumento da temperatura.

Desta maneira, a estimativa do rendimento de grãos inteiros para as condições operacionais deste trabalho, depende das condições de operação do secador leito de jorro cônico com tubo interno e os valores da temperatura inicial e umidade inicial dos grãos, bem como das variáveis relacionadas à adoção dos ciclos de resfriamento.

5.2- SUGESTÕES

Sugere-se estudos sem a adoção dos ciclos de resfriamento, com a utilização do ar secagem a temperaturas iguais ou inferiores a temperatura limite do grão (60 °C). Este procedimento fará com que a secagem não se interrompa e, por consequência, pode ocorrer uma redução de umidade dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Ministério da Agricultura em intervalos de tempo e em condições de operação vantajosas. Torna-se necessário, também, o estudo do rendimento de grãos inteiros, já que, por intermédio da Fig 4.17 verificou-se a existência da possibilidade de haver tanto a secagem quanto a quebra de grãos dentro das exigências do mercado.

A técnica desenvolvida nesta dissertação poderia ser utilizada na secagem de sementes de arroz. Mesmo porque, neste tipo de sistema, o controle de temperatura das sementes deve ser mais bem controlado. Neste sentido, a adoção de ciclos de resfriamento pode ser de grande valia.

CAPÍTULO 6**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARORA, V.K.; HENDERSON, S.M. e BURKHARDT, T.H. "Rice Drying Cracking versus Thermal and Mechanical Properties", Transactions of the ASAE, 320-327, 1973. *apud*: LOPES, C.C. "Estudo do Mecanismo de Quebra em Grãos de Arroz", Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP, 182p., Campinas, 1989.

BARROZO, M.A.S. "Secagem de Grãos em Leito de Jorro Não-Convencional", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 69 p., 1985.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. e HALL, C.H. "Drying Cereal Grains", Westport, Conn., AVI, 1974 *apud*: FARONI, L.R.D. "Determinação do Rendimento de Arroz", Tese de Mestrado, U.F. de Viçosa, Minas Gerais, 30p., 1983.

CALDERWOOD, D.L. e WEBB, B.D. "Effect of the method of dryer operation of performance and on the milling and cooking characteristics of rice", Transactions of the ASAE, St. Joseph, Mich., v. 14, n° 1, p. 142-6, 1971.

CANESIN, J.M. "Um Estudo da Secagem em Leito de Jorro", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.

CHEN, YI-LUEN e KUNZE, O.R. "Effect of Heating without Drying on the Brown Rice Kernel", presented at the 1979 Southwest Region Meeting American Society of Agricultural Engineers, Hot, Springs, Arkansas, 1979. *apud* : LOPES, C.C. "Estudo do Mecanismo de Quebra em Grãos de Arroz", Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP, 182p., Campinas, 1989

COUTINHO, P.L.A. "Secagem de Soja em Leito de Jorro", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983.

CREMASCO, M.A. "Secagem de Arroz em Batelada: Leito de Jorro Cônico", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 69p., 1986.

CREMASCO, M.A. e MASSARANI, G. "Secador em Batelada de Leito de Jorro para Arroz II", Anais do XIII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, v. 2, p.335, 1985.

CREMASCO, M.A. e MASSARANI, G. "Secador em Batelada de Leito de Jorro para Arroz III", Revista Brasileira de Engenharia, v. 4,p.37, 1987.

CREMASCO, M.A.; ROCHA, S.C.S. e MASSARANI, G. "Secagem de Milho em Leito de Jorro", Anais do XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, v.2, p.382, Uberlândia, 1987.

CREMASCO, M.A.; ROCHA, S.C.S. e MASSARANI, G. "Drying of Corn and Rice in Conical Spouted Bed: Part II", Actas del IV Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, v.2, p.313, Chile, 1991b.

DUTRA, C.H.N.C. “Determinação do Leito de Jorro Não-Convencional”, Tese M.Sc., COPPE/RJ, Rio de Janeiro, 1984.

FARIA, C.D.F. “Análise do Rendimento de Grãos Inteiros na Secagem de Arroz em Casca em Batelada em um Leito de Jorro Cônico”, Tese de Mestrado, Unicamp, Campinas/SP, 1997.

FARONI, L.R.D. "Determinação do Rendimento de Arroz", Tese de Mestrado, U.F de Viçosa, Minas Gerais, 30p., 1983.

FERRO DA CUNHA, L. e MASSARANI, G, “Análise do Desempenho de Secadores em Batelada em Leito de Jorro para Arroz”, V Encontro Nacional de Secagem, Lavras, 1985.

FIGUEROA, R. “A Influência da Temperatura e Umidade Relativa do Ar e do Teor de Umidade Inicial do Grão na Secagem”, ITAL, n 3, p. 19, Campinas, 1978.

HENDERSON, S.M. "The Causes and Characteristics of Rice Checking", Rice Journal, v.57, n.6, p.16, 1958.

JULIANO, B.O.; “The Rice Caroyopsis anda its Composition, in Rice”, Chemistry and Technology, D.S. Houston(Ed.) American Association of Cereal Chemist, ETS, Pool, Minnesota.

KHOE, G.H. e Van BRAKEL, J. “Drying Characteristics of a Draft Tube Spouted Bed”, Canadian International Chemical Engineering., v. 61, p. 426, 1983.

KUNZE, O.R. e HALL, C.W. "Moisture Adsorption Characteristics of Brown Rice", Transactions of the ASAE, v.10, n.4, p.448-450, 435, 1967. *apud* : LOPES, C.C.

"Estudo do Mecanismo de Quebra em Grãos de Arroz", Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP, 182p., Campinas, 1989

KUNZE, O.R. "Moisture Adsorption Influences on Rice", Journal of Food Process Engineering, v.1, n.2, p.167-181, 1977.

KUNZE, O.R. "Fissuring of the Rice Grain After Heated Air Drying", Transactions of the ASAE, v.22, n.5, p.1197, 1979.

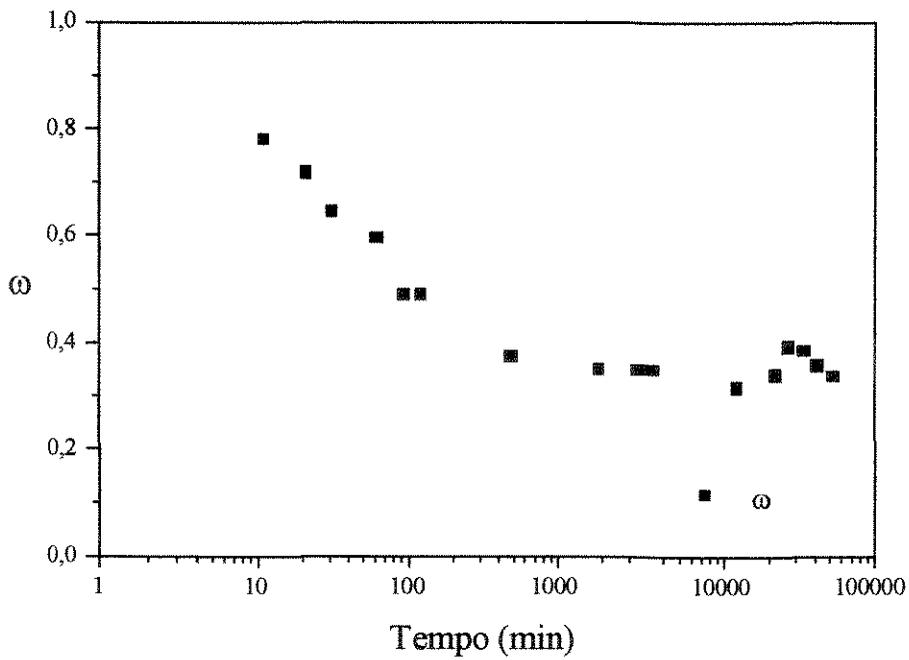
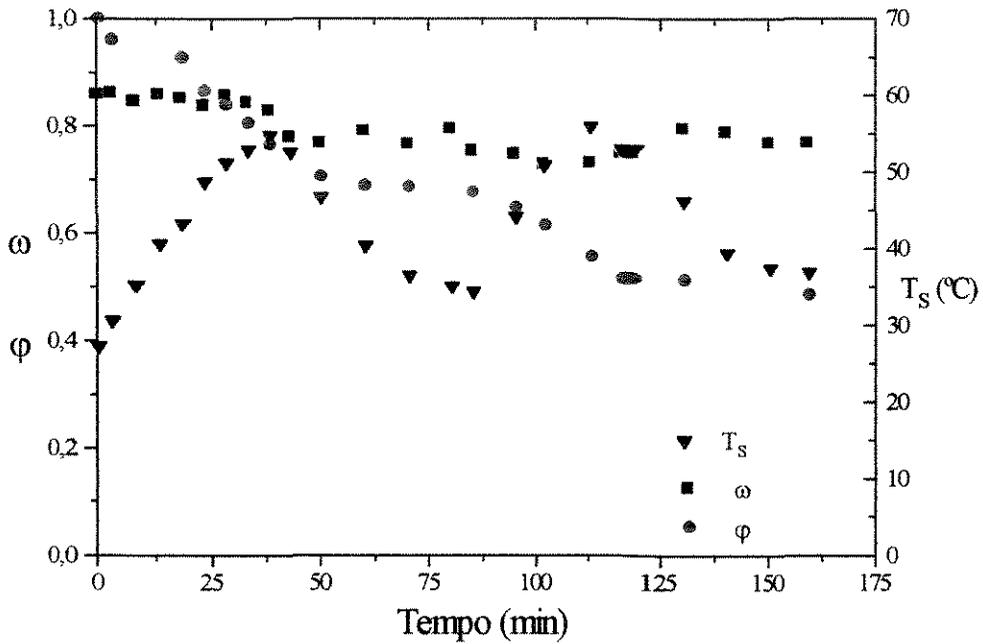
LOPES, C.C. "Estudo do Mecanismo de Quebra em Grãos de Arroz", Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP, 182p., Campinas, 1989.

MATHUR, K.B. e GISHLER, P.S. "A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles", AIChE J., v.1, p.157, 1955.

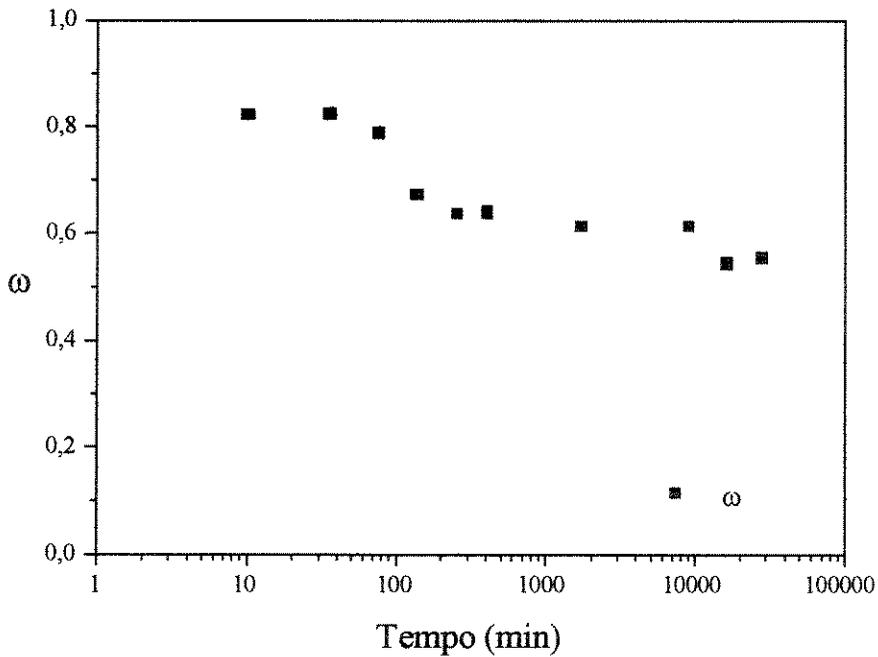
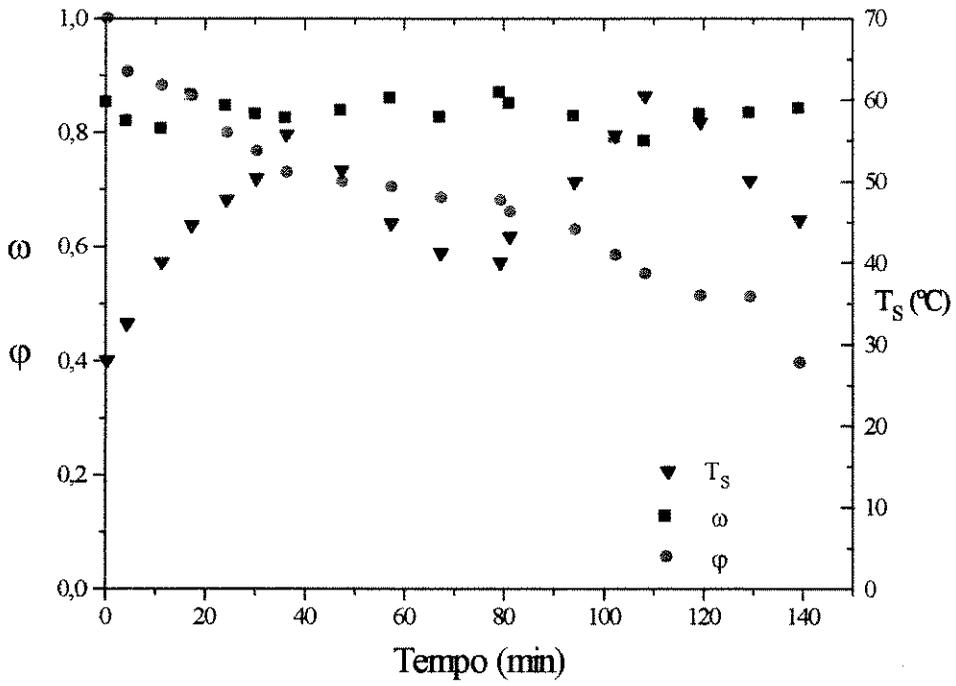
MATHUR , K.B. e EPSTEIN, N. "Spouted Beds", Academic Press Inc., New York, 1974

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S. e BRUNS, R.E., "Planejamento e Otimização de Experimentos", Editora da Unicamp, Campinas-SP, 1995.

NOGUEIRA, A.C.L. "Avaliação de Secagem de Arroz por Fluxo Cruzado em Escala de Laboratório", Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP, Campinas, 1991.



Figuras A12 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,23$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm
 Intervalo de tempo para resfriamento: 45 min e $n = 2$.



Figuras A14 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,22$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,28$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$
 Intervalo de tempo para resfriamento: 30 min - passo convencional.

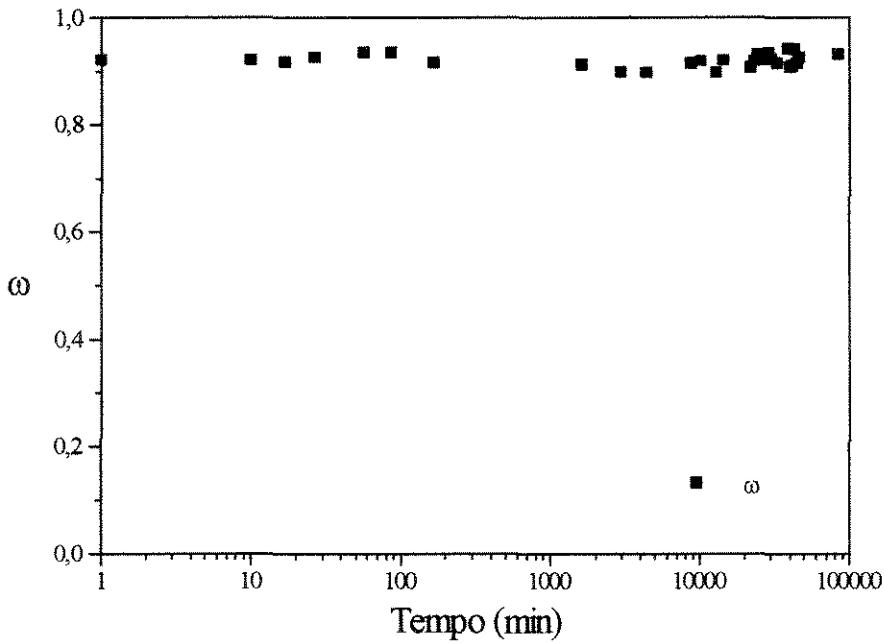
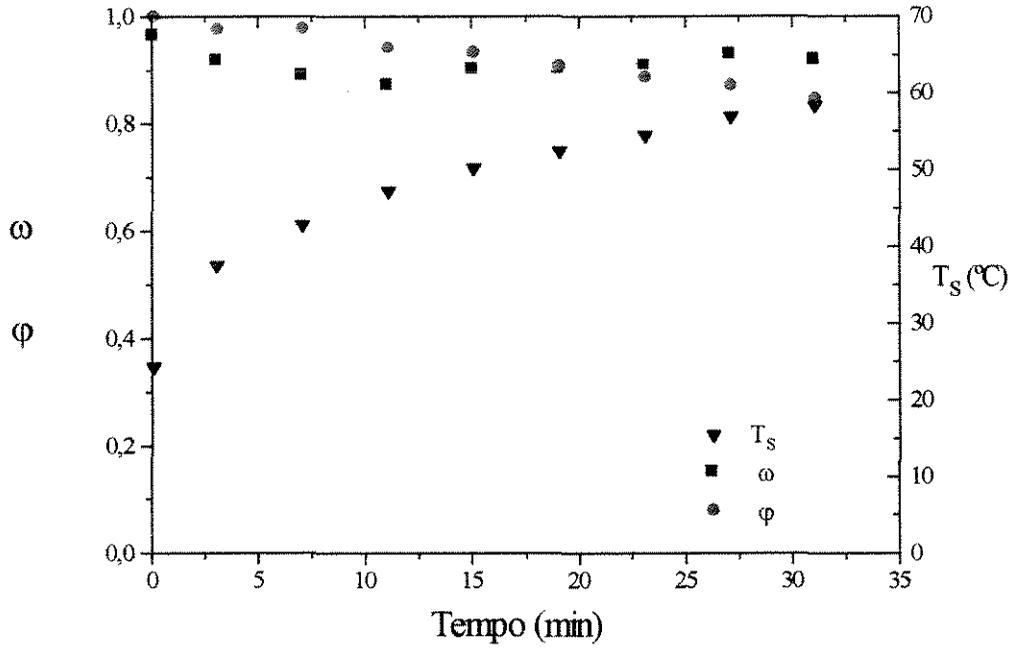
PASSOS, M.L.; MUJUNDAR, A.S. and RAGHAVAN, V.G.S. "Spouted and Spouted-Fluidized Beds for Grain Drying", Drying Technology, v.7, n° 4, p. 663-696, 1989.

PETERSON, W.S. "Spouted Bed Dryer", Can.J.Chem.Eng., v. 40, p.226, 1962.

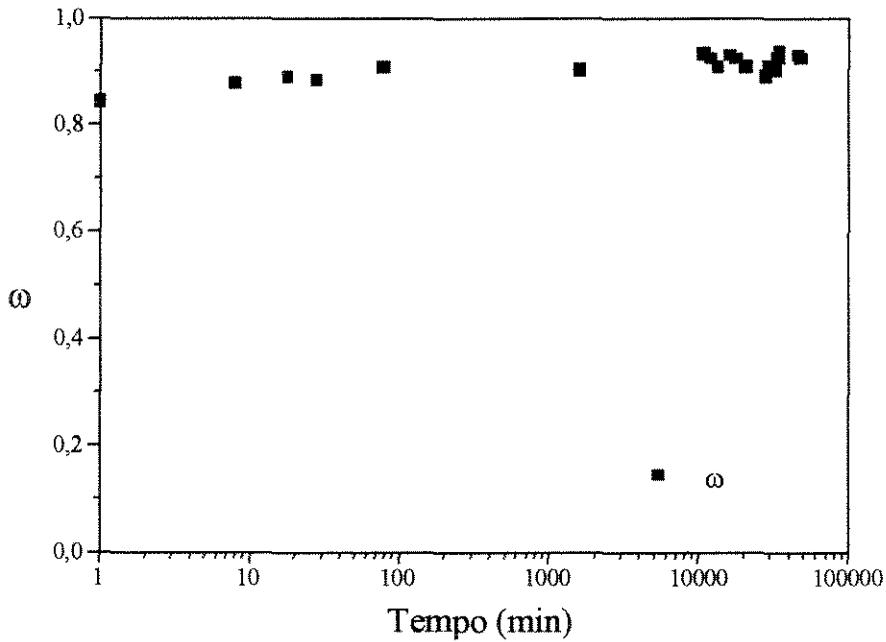
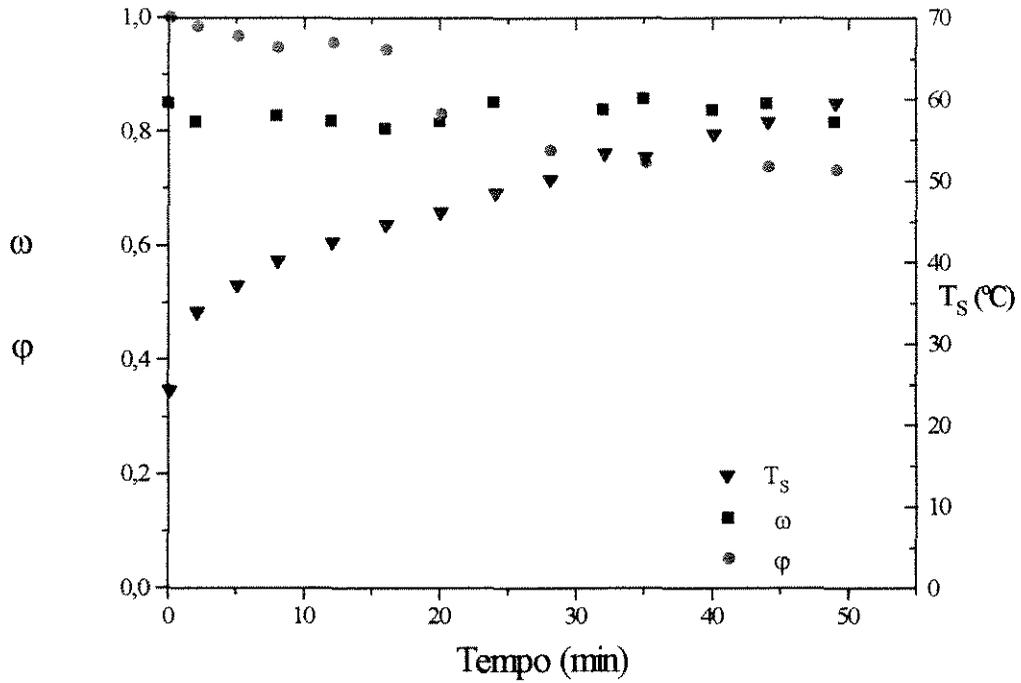
SABBAH, M.A.; FOSTER, G.H.; HAUGH, C.G. e PEART, R.M., "Effect of Tempering after Drying on Cooling shelled Corn", Transactions os ASAE, St. Joseph, Mich., v.15, p. 763-5, 1972.

STEFFE, J.F.; SINGH, R.P. e BAKSHI, A.S., "Influence of Tempering Time on Rice Milling Yields nad Moisture Removal", Transactions os ASAE, St. Joseph, Mich., 1978. (ASAE paper, 78-3055)

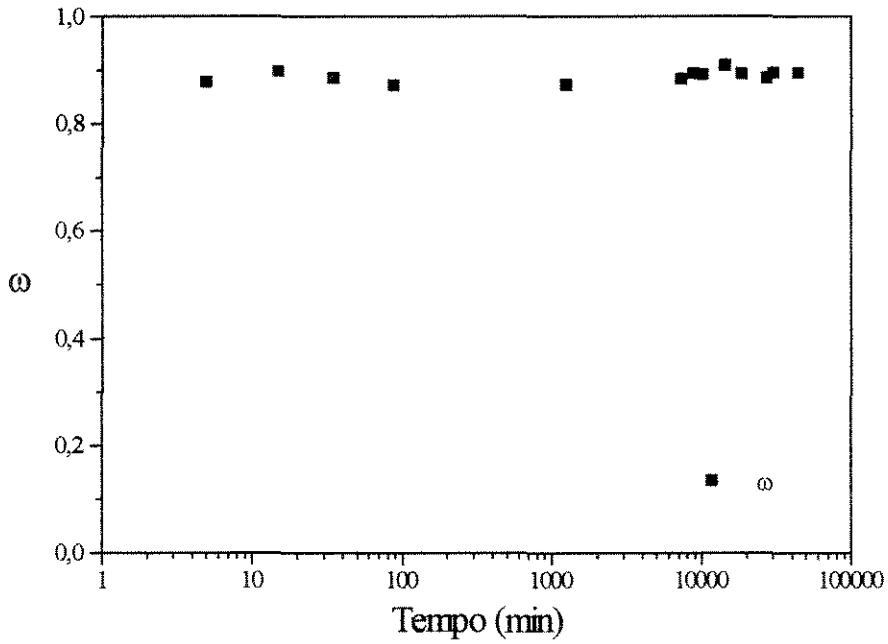
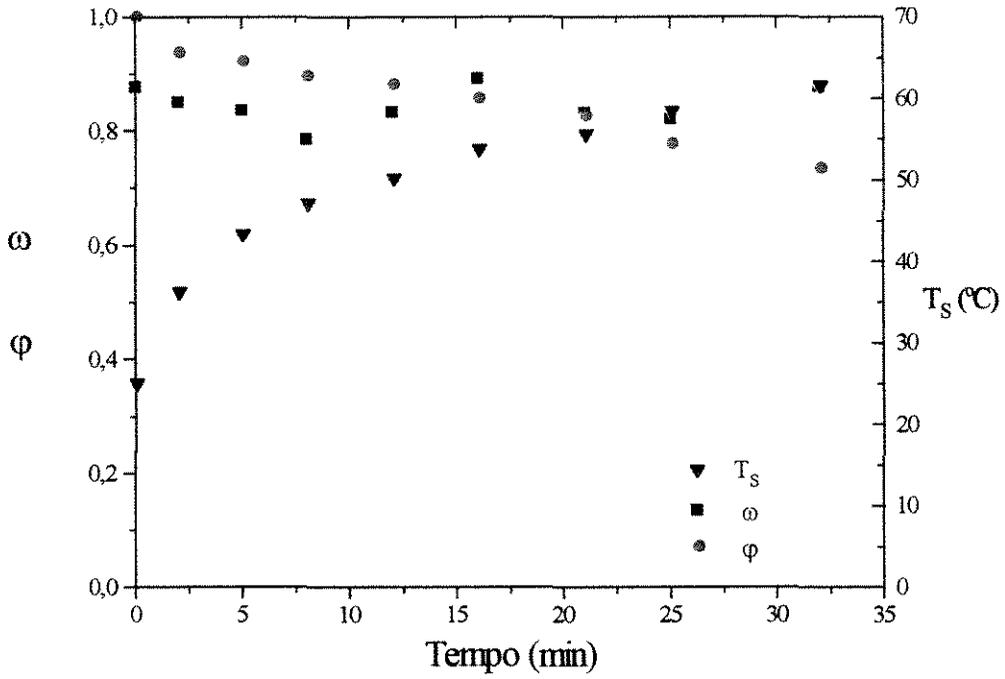
VISWANATHAN, K.; LYALL, M.S. e RAYCHAUDHURI, "Spouted Bed Drying of Agricultural Grains", The Canadian Journal of Chemical Engenieering, v. 64, p. 223-232, 1986.



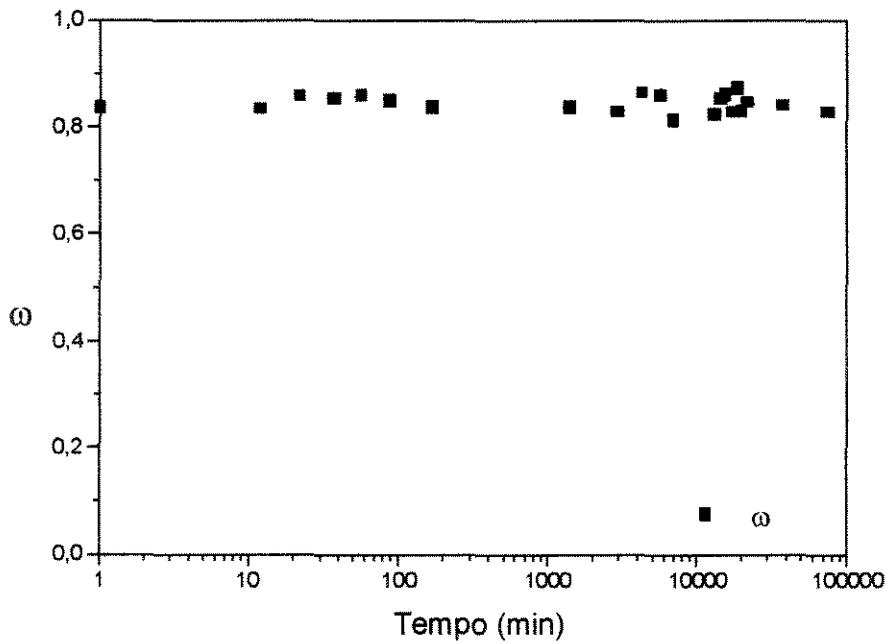
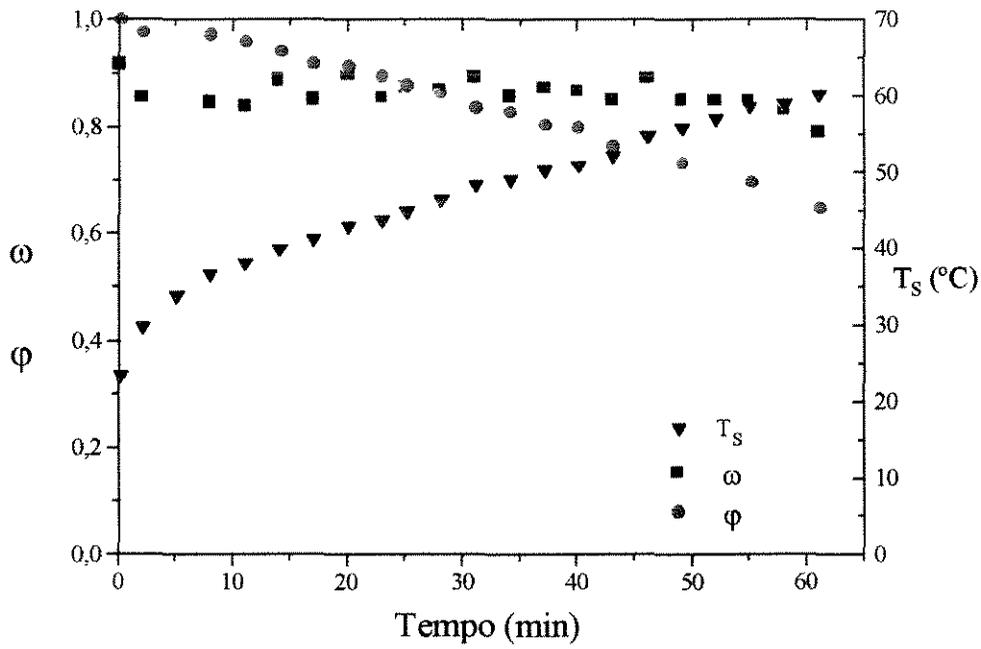
Figuras A1 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 105^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,24$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,17$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.



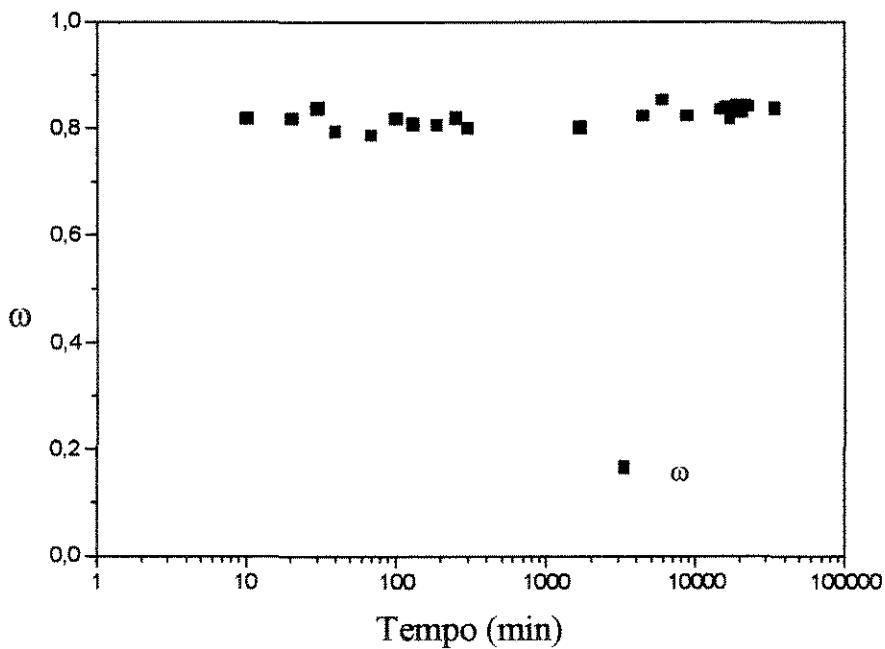
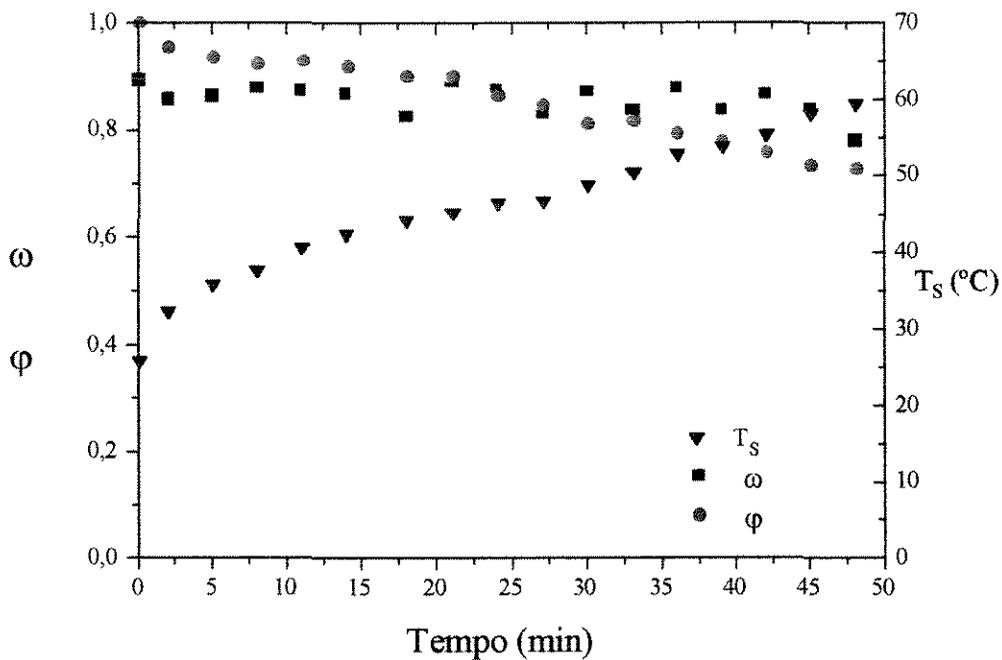
Figuras A2 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,48$; $L_b = 14$ cm e $D_t = 7,62$ cm.



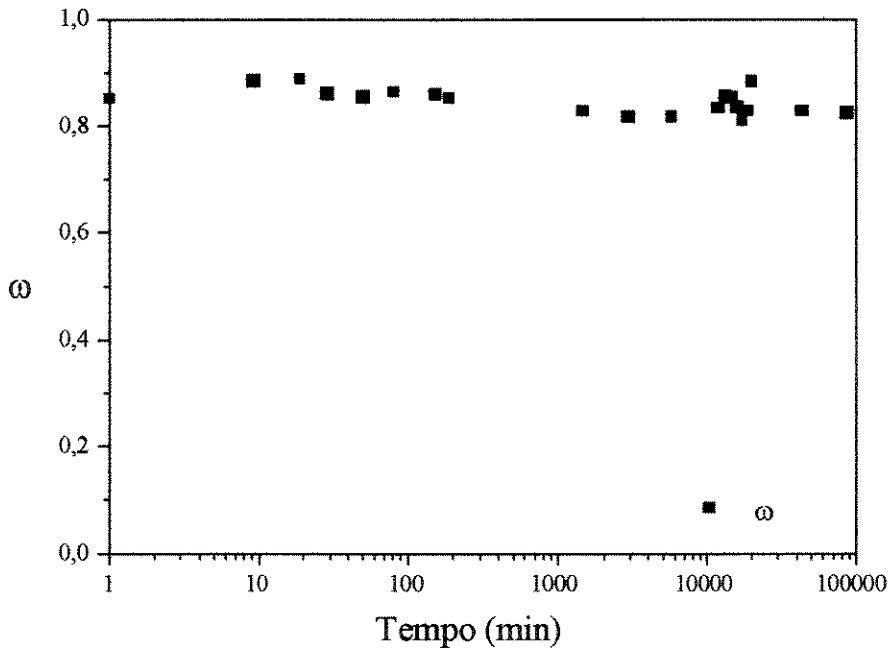
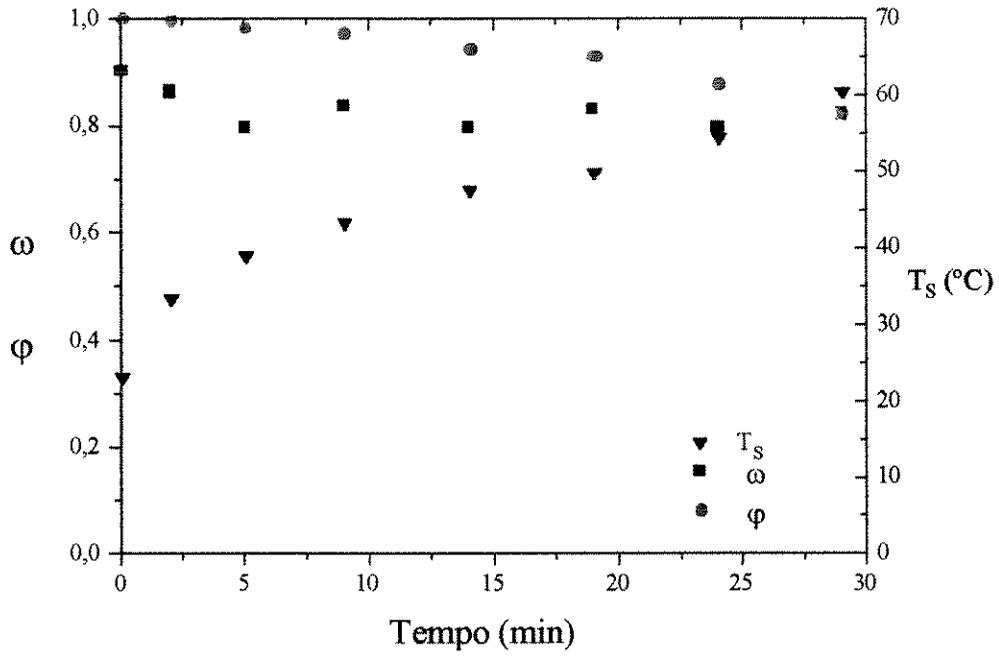
Figuras A3 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 100^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20$ kg; $Q/Q_{jm} = 1,24$; $L_b = 7$ cm e $D_t = 5,08$ cm.



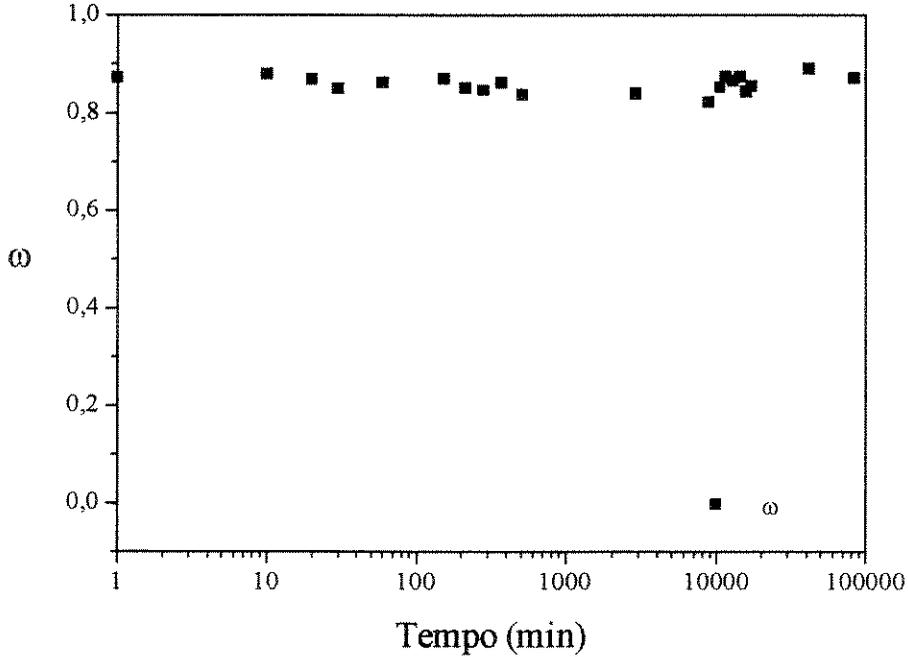
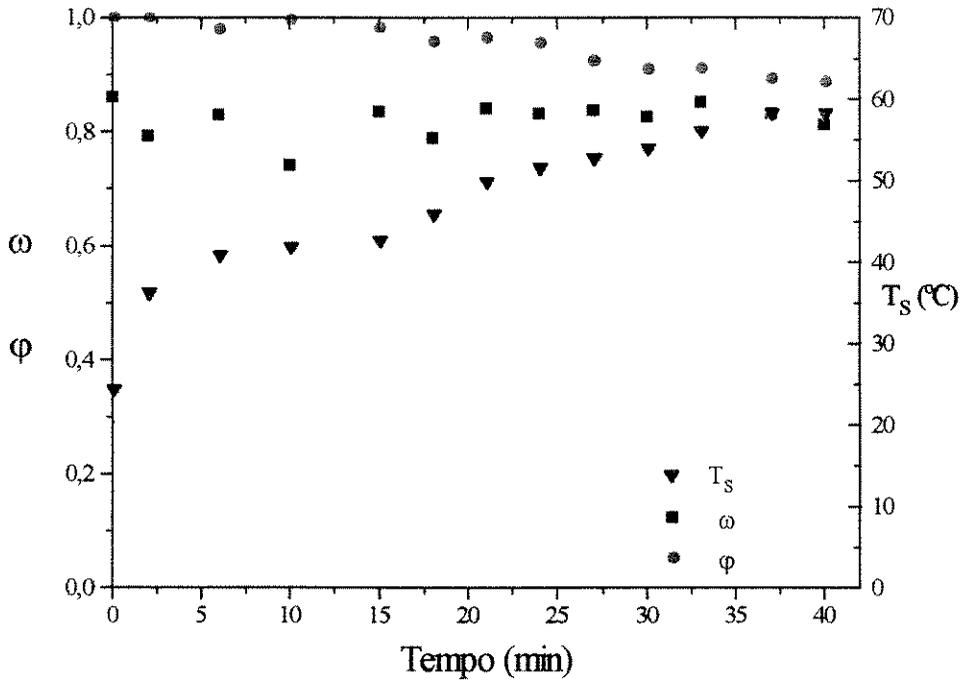
Figuras A4 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 105^\circ\text{C}$; $U_o = 0,24$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{im} = 1,41$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 5,08 \text{ cm}$.



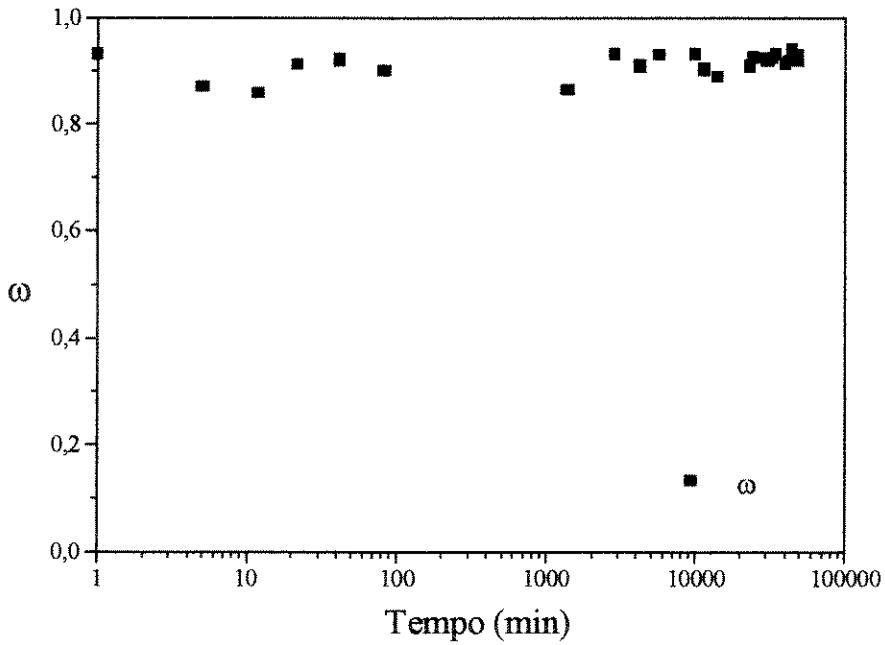
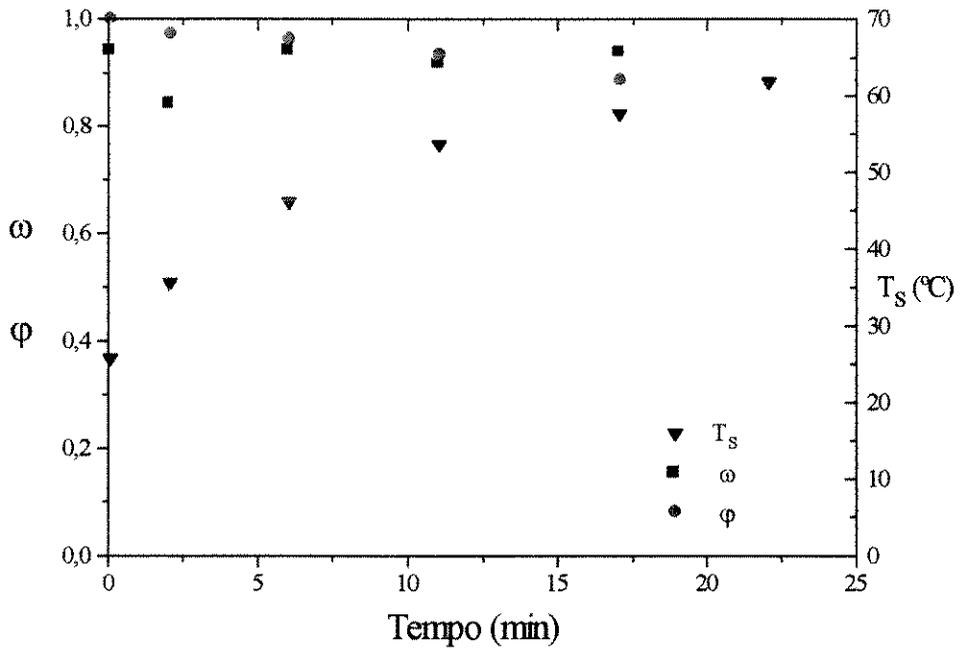
Figuras A5 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 100^\circ\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{im} = 1,19$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 5,08 \text{ cm}$.



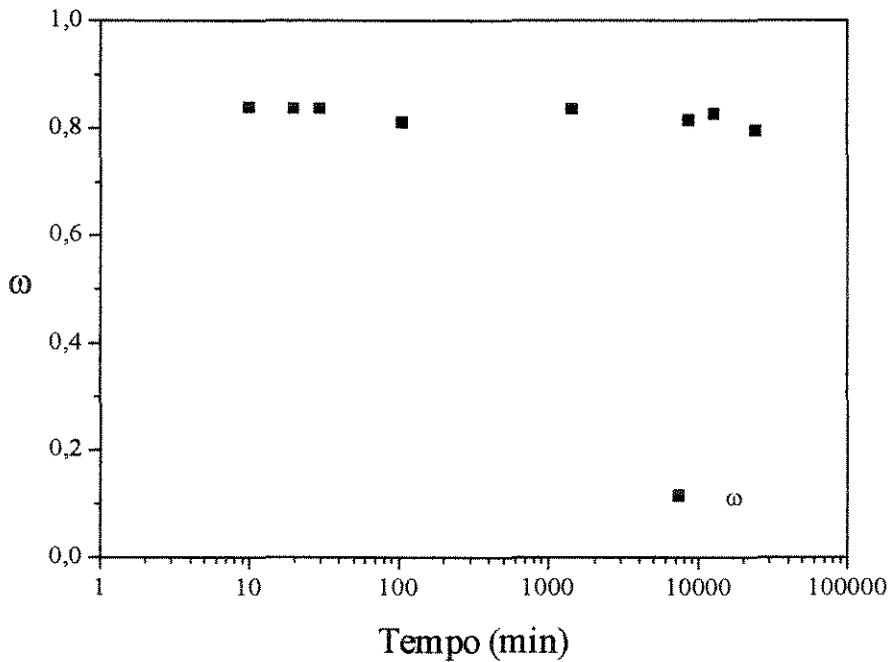
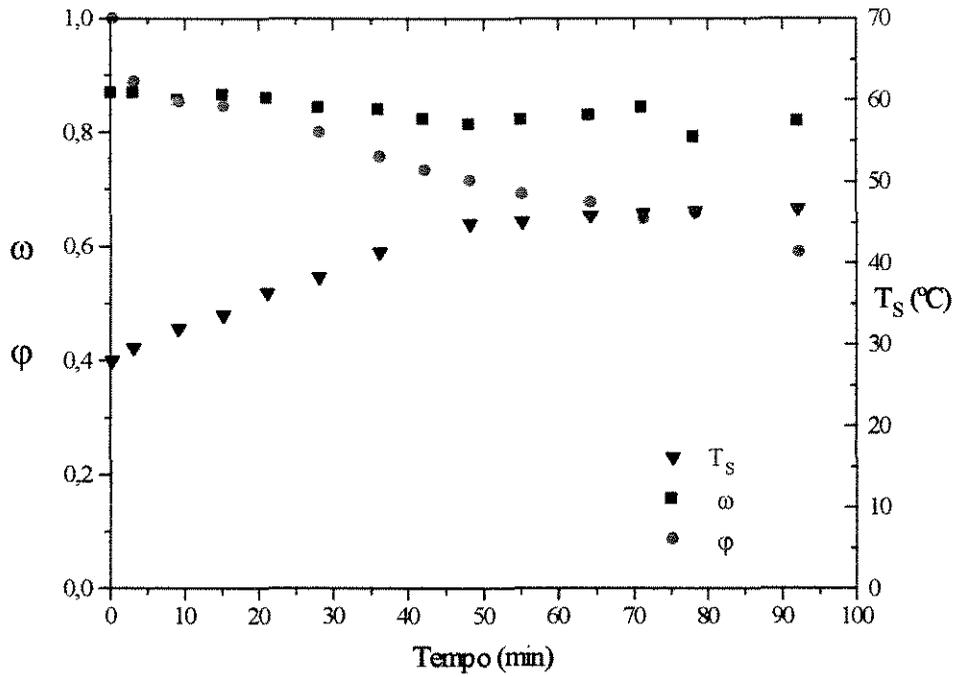
Figuras A6 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$; $U_o = 0,24$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,24$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 5,08 \text{ cm}$.



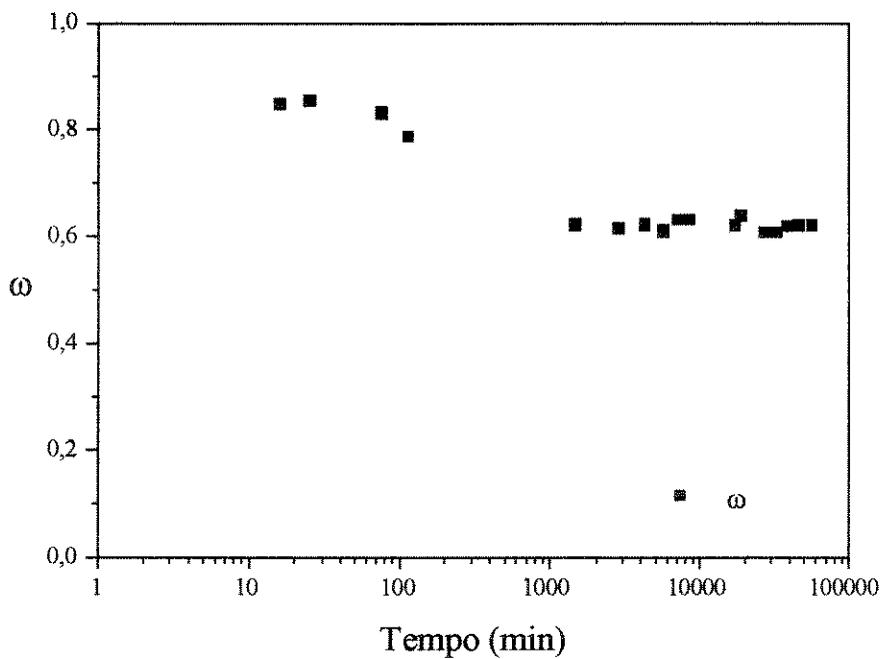
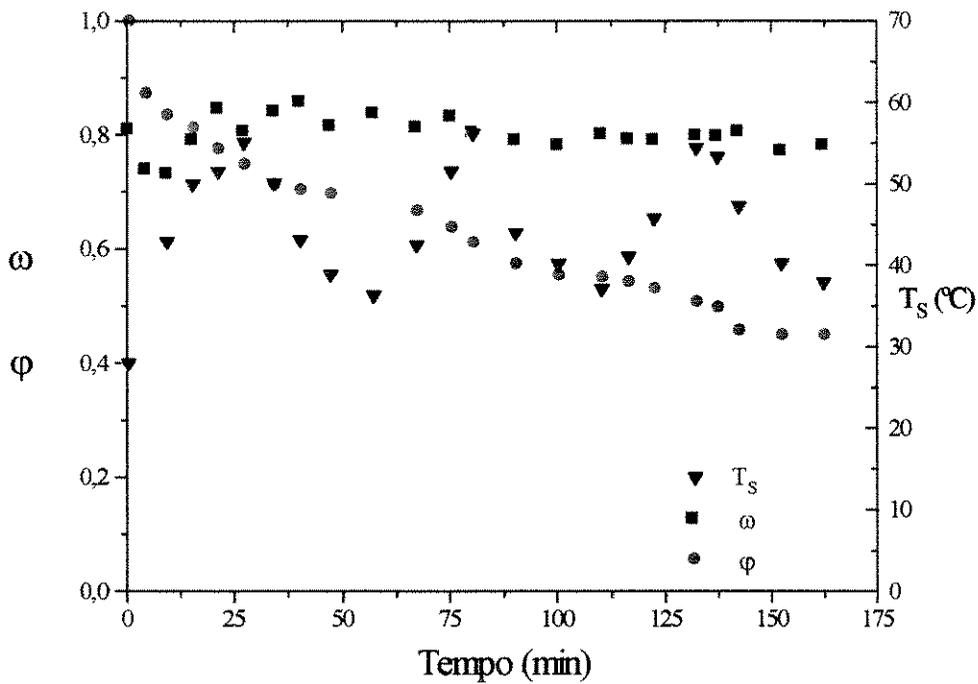
Figuras A7 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,23$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,43$; $L_b = 7 \text{ cm}$ e $D_t = 5,08 \text{ cm}$.



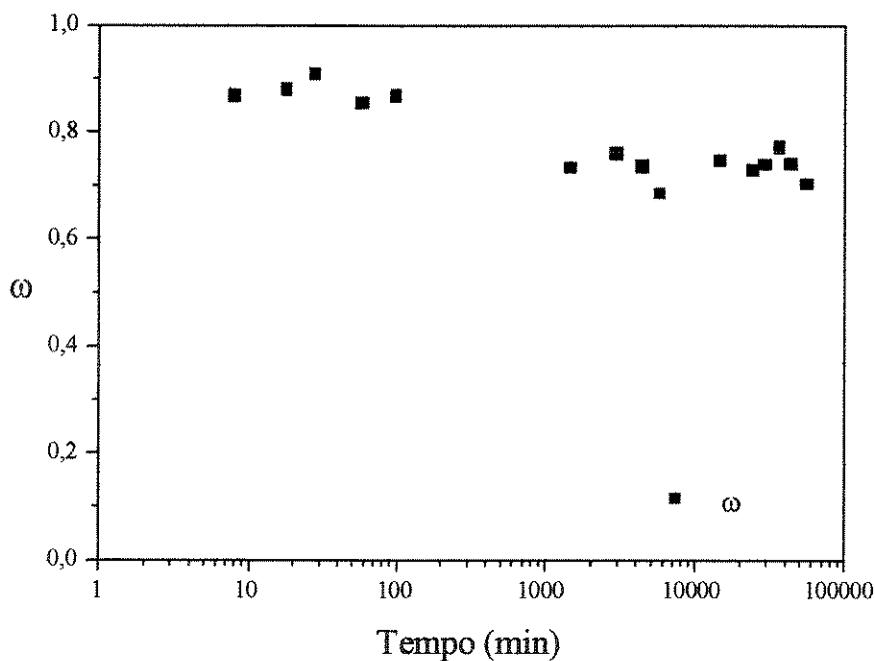
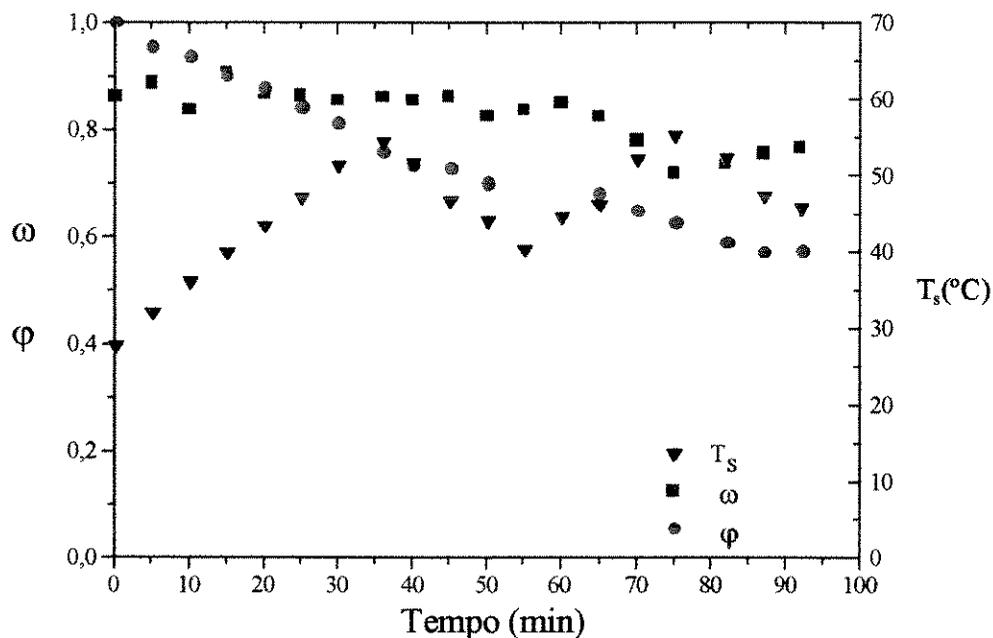
Figuras A8 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,24$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 2,03$; $L_b = 7 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$



Figuras A9 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 60^\circ\text{C}$; $U_o = 0,22$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,28$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$



Figuras A10 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^{\circ}\text{C}$; $U_o = 0,25$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,19$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$
 Intervalo de tempo para resfriamento: 30 min e $n = 3$.



Figuras A11 - Ensaio Experimental realizado nas seguintes condições de operação:
 $T = 90^\circ\text{C}$; $U_o = 0,23$; $W_o = 20 \text{ kg}$; $Q/Q_{jm} = 1,35$; $L_b = 14 \text{ cm}$ e $D_t = 7,62 \text{ cm}$
 Intervalo de tempo para resfriamento: 15 min e $n = 2$.