

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE FEIJÃO EM  
LEITO FIXO, LEITO DE JORRO E LEITO DE JORRO  
FLUIDIZADO**

**Ana Claudia Camargo de Lima**

**Orientadora: Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha**

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

**Campinas**

**1995**

UNIDADE	30
N.º CHAMADA	T/UNICAMP
	L628A
V.	5
FORMAÇÃO	3:125929
PROJ.	4331,95
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$11,00
DATA	19/10/95
N.º CPD	

CM-00078083-7

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

L628a Lima, Ana Claudia Camargo de  
Análise experimental da secagem de feijão em leito  
fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado / Ana  
Claudia Camargo de Lima.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientadora: Sandra Cristina dos Santos Rocha.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Secagem. 2. Feijão. 3. \*Secadores para grãos.  
I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.  
III. Título.

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado apresentada por Ana Claudia Camargo de Lima e aprovada pela banca examinadora em 29 de agosto de 1995.



---

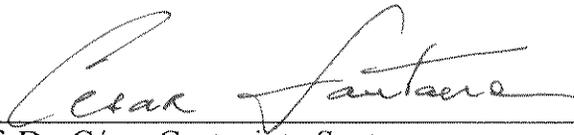
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Cristina dos Santos Rocha

Dissertação de mestrado apresentada e aprovada, em 29 de agosto de 1995, pela banca examinadora constituída pelos professores:



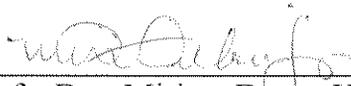
---

Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha



---

Prof. Dr. César Costapinto Santana



---

Profa. Dra. Miriam Dupas Hubinger

*Aos meus pais, Jayme e Marilene  
e aos meus irmãos Sandra, André e Jayminho.*

*Ao Alexandre.*

## AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela orientação, dedicação e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, pelo incentivo à minha inscrição no mestrado.

À Profa. Dra. Maria Aparecida Azevedo Pereira da Silva do Laboratório de Análise Sensorial - Departamento de Planejamento Alimentar e Nutrição da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, pela orientação na parte referente à análise sensorial. À Ana Paula D'Elia Vinhal Ricardo pelo auxílio na aplicação dos testes da análise e pela instrução na utilização do software para avaliação dos resultados.

Ao aluno de graduação Jeronimo César Rodrigues Souza, pela colaboração na realização dos experimentos.

Ao Alexandre, pela sua calma e disposição em ajudar. Pela troca de idéias, por sua presença.

Aos amigos que, de uma forma ou outra, em muito contribuíram: através de sugestões ao trabalho, pela companhia. Às pessoas que ajudaram na solução dos pequenos problemas, colaborando para que o trabalho chegasse ao fim.

À CAPES e à FAPESP pelo suporte financeiro.

Aos meus pais. O apoio, incentivo e carinho que eles não medem esforços em proporcionar, mesmo à distância, me ajudaram bastante.

## RESUMO

Neste trabalho analisou-se experimentalmente a secagem de feijão IAC-Carioca em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. Uma montagem em escala de laboratório e operada em batelada foi utilizada, contendo um secador construído em vidro, com a base cônica e a coluna cilíndrica, onde foi possível operar-se com os três tipos de secadores. Para a obtenção dos dados experimentais utilizou-se a técnica de planejamento fatorial, sendo avaliadas as influências das seguintes variáveis no processo: carga de sólidos, com valores de 1500 e 3000 g, umidade inicial dos grãos, com valores de 20 e 30 % b.s., e temperatura do ar de secagem, com valores de 73 e 83°C. Esta análise foi feita para cada secador por meio das curvas de secagem, variação da temperatura dos grãos com o tempo e taxa de secagem e também via resultados estatísticos obtidos do planejamento fatorial. Os secadores foram também avaliados com base em critérios energéticos definidos no trabalho: eficiência de secagem e coeficientes de secagem. Os três secadores operando nas mesmas condições apresentaram comportamento muito semelhante e o leito fixo apresentou desempenho ligeiramente superior. O resultado da análise realizada, no entanto, não foi significativo a ponto de se indicar o secador de leito fixo como o mais adequado. Com este trabalho foi confirmado o potencial de utilização de secadores de leito de jorro para grãos, e verificada a possibilidade de também se utilizar o leito de jorro fluidizado como secador. Foi ainda realizado um teste de análise sensorial, para verificação dos efeitos que as temperaturas elevadas do ar de secagem causaram nos grãos e os resultados indicaram que os diferentes tratamentos não alteraram o nível de aceitação do produto como alimento.

## ABSTRACT

In this work the drying of IAC-Carioca beans was analyzed experimentally in fixed, spouted and spout-fluid beds. An apparatus in laboratory scale, batch operated, was used, having a dryer made of glass, with a conical base and a cylindrical column, where it was possible to operate the three different kinds of dryers. To obtain experimental data a factorial design technique was used, where the influence of the following variables in the process were evaluated: the load of solids, with values of 1500 and 3000 g, initial grain moisture content, with values of 20 and 30 % d.b., and drying air temperature, with values of 73 and 83 °C. This analysis was done for each dryer by means of drying curves, grain temperature evolution with time, drying rate and also by means of statistical results got from factorial design. The dryers were also analyzed based on energetic criteria defined in the work: drying efficiency and drying coefficients. The three dryers operating in the same conditions showed very similar behavior and fixed bed dryer showed a performance just a little better. The result of the analysis done, therefore, was not significant in such a way to point the fixed bed dryer as the more adequate dryer. With this work it was confirmed the potential of using spouted bed grain dryers and verified the possibility of using spout-fluid bed as a dryer. A sensorial analysis was performed to verify the effects that high temperature air drying caused in the grains and the results showed that different treatments didn't change the acceptance level of the product as food.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2 - Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
2.1 Secagem de grãos .....	3
2.1.1 Secagem de feijão.....	4
2.2 Leito fixo.....	6
2.2.1 Secagem de grãos em leito fixo.....	6
2.2.1.1 Modelos de não-equilíbrio.....	8
2.2.1.2 Modelos de equilíbrio.....	11
2.2.1.3 Modelos logarítmicos.....	11
2.3 Leito de jorro.....	12
2.3.1 Secagem de grãos em leito de jorro.....	15
2.4 Leito de jorro fluidizado.....	18
2.4.1 Secagem de grãos em leito de jorro fluidizado.....	20
2.5 Cinética de secagem.....	21
2.6 Estudos comparativos.....	23
2.6.1 Leito de jorro e leito fixo.....	23
2.6.2 Leito de jorro e leito de jorro fluidizado.....	24
2.7 Eficiência energética de secagem.....	25
<b>3 - Materiais e Métodos.....</b>	<b>28</b>
3.1 Material utilizado.....	28
3.1.1 Reumidificação dos grãos.....	29
3.2 Equipamento experimental.....	31

3.2.1 Sistema de secagem.....	31
3.2.1.1 O leito secador.....	34
3.2.2 Medidas experimentais.....	38
3.3 Variáveis do processo.....	42
3.4 Análise sensorial.....	43
<b>4 - Resultados e Discussão.....</b>	<b>44</b>
4.1 Obtenção dos dados experimentais - planejamento fatorial.....	44
4.2 Influência da reumidificação.....	63
4.3 Influência da retirada de amostras na secagem.....	67
4.4 Variação da temperatura dos grãos no secador de leito fixo.....	70
4.5 Comparação entre os secadores.....	74
4.6 Avaliação energética da secagem.....	89
4.7 Modelagem empírica.....	96
4.8 Análise sensorial.....	106
<b>5 - Conclusões e Sugestões.....</b>	<b>110</b>
5.1 Conclusões.....	110
5.2 Sugestões.....	112
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>113</b>
<b>Apêndice A.....</b>	<b>119</b>
<b>Apêndice B.....</b>	<b>121</b>
<b>Apêndice C.....</b>	<b>149</b>

## LISTA DE TABELAS

3.1 - Propriedades Físicas do Feijão IAC-Carioca.....	28
4.1 - Especificação dos experimentos.....	46
4.2 - Umidade final do grão - Leito Fixo.....	46
4.3 - Umidade final do grão - Leito de Jorro.....	47
4.4 - Umidade final do grão - Leito de Jorro Fluidizado.....	47
4.5- Efeitos das variáveis e suas interações - Leito Fixo.....	61
4.6 - Efeitos das variáveis e suas interações - Leito de Jorro.....	61
4.7 - Efeitos das variáveis e suas interações - Leito de Jorro Fluidizado.....	61
4.8 - Experimentos realizados com feijão pós-colheita.....	63
4.9 - Experimentos realizados sem amostragem.....	68
4.10 - Relação $U_f/U_o$ para os experimentos realizados com e sem amostragem.....	68
4.11 - Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito Fixo.....	91
4.12 - Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito de Jorro.....	92
4.13 - Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito de Jorro Fluidizado.....	93
4.14 - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito fixo.....	100
4.15 - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito de jorro.....	101
4.16 - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito de jorro fluidizado.....	102
4.17 D.R.M. das correlações para o parâmetro A.....	103

4.18 D.R.M. das correlações para o parâmetro B.....	103
4.19 D.R.M. das correlações para o parâmetro C.....	104
4.20 D.R.M. das correlações para o parâmetro D.....	104
4.21 - Análise de Variância (ANOVA) .....	105
4.22 - Médias de aceitação.....	106

## LISTA DE FIGURAS

2.1 - Esquema de secagem em leito fixo.....	6
2.2 - Esquema de um leito de jorro - MATHUR E EPSTEIN (1974).....	14
2.3 - Mapeamento dos regimes de escoamento em leito de jorro fluidizado ar a 20°C - VUKOVIC et al. (1984).....	19
2.4 - Curvas típicas de secagem - DAUDIN (1983) .....	22
3.1.Sistema de secagem: 1.Compressor 2.Resistências 3.Válvula 4.Placa de orifício 5.Termopar 6. Ar secundário 7.Leito 8.Manômetro 9.Painel 10.Amostrador.....	32
3.2 Montagem experimental .....	33
3.3 - Esquema do leito secador: 1.Alimentação de grãos 2.Medida de temperatura 3.Medida de pressão 4.Flange 5.Entrada do ar secundário 6.Amostragem .....	34
3.4 Leito secador.....	35
3.5 - Detalhamento da parte cônica do leito.....	36
3.6 - Detalhamento do distribuidor de ar secundário.....	37
4.1 - Influência da temperatura do ar Leito Fixo - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 20% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	49
4.2 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 20% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	50
4.3 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 20% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	51
4.4 - Influência da umidade inicial do grão Leito Fixo - M: 1500 g T <sub>a</sub> : 73°C (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	53
4.5 - Influência da umidade inicial do grão Leito de Jorro - M: 1500 g T <sub>a</sub> : 73°C (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	54

4.6 - Influência da umidade inicial do grão Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g $T_a$ : 73°C (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	55
4.7 - Influência da carga de sólidos Leito Fixo - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	57
4.8 - Influência da carga de sólidos Leito de Jorro - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	58
4.9 - Influência da carga de sólidos Leito de Jorro Fluidizado - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	59
4.10 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro - $T_a$ :70 °C(pós-colheita)/ 73°C $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g.....	64
4.11 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro - $T_a$ : 70 °C(pós-colheita)/ 73°C $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g.....	64
4.12 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro - $T_a$ :80 °C(pós-colheita)/83°C $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g.....	65
4.13 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro $T_a$ :80 °C (pós-colheita)/83°C $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g.....	66
4.14 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro Fluidizado $T_a$ :70 °C (pós-colheita)/73°C $U_o$ : 20% M: 1500 g.....	66
4.15 - Influência da reumidificação - Umidade do grão em função do tempo Leito de Jorro Fluidizado $T_a$ :70(pós-colheita)/73°C $U_o$ : 20% M: 3000 g.....	67
4.16- Influência da retirada de amostras Leito de Jorro - $T_a$ : 83°C - $U_o$ : 20% b.s - M:1500 g Umidade do grão em função do tempo.....	69
4.17- Influência da retirada de amostras Leito de Jorro - $T_a$ : 83 °C - $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g Umidade do grão em função do tempo.....	69
4.18 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador Leito Fixo - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g.....	71

4.19 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador Leito Fixo - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g.....	72
4.20 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador Leito Fixo - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g.....	73
4.21 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s. a) 1500 g b) 3000.....	75
4.22 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	76
4.23 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 30% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	77
4.24 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	78
4.25 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g.....	80
4.26 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20%b.s. M: 3000 g.....	80
4.27 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20%b.s. M: 1500 g.....	81
4.28 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g.....	81
4.29 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 30% b.s. M: 1500 g.....	82
4.30 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 73°C $U_o$ : 30% b.s. M: 3000 g.....	82
4.31 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30%b.s. M: 1500 g.....	83
4.32 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem $T_a$ : 83°C $U_o$ : 30%b.s. M: 3000 g.....	83

4.33 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo T <sub>a</sub> : 73°C U <sub>o</sub> : 20% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	85
4.34 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo T <sub>a</sub> : 83°C U <sub>o</sub> : 20% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	86
4.35 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo T <sub>a</sub> : 73°C U <sub>o</sub> : 30% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	87
4.36 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo T <sub>a</sub> : 83°C U <sub>o</sub> : 30% b.s. a) 1500 g b) 3000 g.....	88
4.37 - Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito Fixo - T <sub>a</sub> : 73°C U <sub>o</sub> : 20% b.s. M:1500g.....	97
4.38 - Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito de Jorro - T <sub>a</sub> : 73°C U <sub>o</sub> : 20% b.s. M: 1500 g.....	97
4.39- Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito de Jorro Fluidizado - T <sub>a</sub> : 73°C U <sub>o</sub> : 20% b.s. M: 1500 g.....	98
4.40 - Histograma de frequência de valores hedônicos e % de provadores relativos - amostra 1 (controle).....	107
4.41- Histograma de frequência dos valores hedônicos e % de provadores relativos- amostra 2 (73 °C).....	108
4.42 - Histograma de frequência dos valores hedônicos e % de provadores relativos- amostra 3 (83 °C).....	109
A1 - Ficha de avaliação utilizada na análise sensorial das amostras.....	120
B1 - Influência da temperatura do ar Leito Fixo - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 20% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	122
B2 - Influência da temperatura do ar Leito Fixo - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 30% b.s. (a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	123

B3 - Influência da temperatura do ar Leito Fixo - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 30% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	124
B4 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 20% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	125
B5 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 30% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	126
B6 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 30% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	127
B7 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 20% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	128
B8 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g U <sub>o</sub> : 30% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	129
B9 - Influência da temperatura do ar Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g U <sub>o</sub> : 30% b.s.	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	130
B10 - Influência da umidade inicial do grão Leito Fixo - M: 3000 g T <sub>a</sub> : 73°C	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	131
B11 - Influência da umidade inicial do grão Leito Fixo - M: 1500 g T <sub>a</sub> : 83°C	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	132
B12 - Influência da umidade inicial do grão Leito Fixo - M: 3000 g T <sub>a</sub> : 83°C	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	133
B13 - Influência da umidade inicial do grão Leito de Jorro - M: 3000 g T <sub>a</sub> : 73°C	
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo...	134
B14 - Influência da umidade inicial do grão Leito de Jorro - M: 1500 g T <sub>a</sub> : 83°C	

(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	135
B15 - Influência da umidade inicial do grão	
Leito de Jorro - M: 3000 g $T_a$ : 83°C	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	136
B16 - Influência da umidade inicial do grão	
Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g $T_a$ : 73°C	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	137
B17 - Influência da umidade inicial do grão	
Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g $T_a$ : 83°C	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	138
B18 - Influência da umidade inicial do grão	
Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g $T_a$ : 83°C	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	139
B19 - Influência da carga de sólidos	
Leito Fixo - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	140
B20 - Influência da carga de sólidos	
Leito Fixo - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 30% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	141
B21 - Influência da carga de sólidos	
Leito Fixo - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	142
B22 - Influência da carga de sólidos	
Leito de Jorro - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	143
B23 - Influência da carga de sólidos	
Leito de Jorro - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 30% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	144
B24 - Influência da carga de sólidos	
Leito de Jorro - $T_a$ : 83°C $U_o$ : 20% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	145
B25 - Influência da carga de sólidos	
Leito de Jorro Fluidizado - $T_a$ : 73°C $U_o$ : 20% b.s.	
(a)Umidade do grão em função do tempo (b)Temperatura do grão em função do tempo...	146

## B26 - Influência da carga de sólidos

Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo... 147

## B27 - Influência da carga de sólidos

Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo... 148

## C1 - Influência da retirada de amostras - Leito Fixo

M: 1500 g  $U_o$ : 20% b.s.  $T_a$ : 83°C

Umidade do grão em função do tempo..... 150

## C2 - Influência da retirada de amostras - Leito Fixo

M: 3000 g  $U_o$ : 20% b.s.  $T_a$ : 83°C

Umidade do grão em função do tempo..... 150

## C3 - Influência da retirada de amostras - Leito de Jorro Fluidizado

M: 1500 g  $U_o$ : 20% b.s.  $T_a$ : 83°C

Umidade do grão em função do tempo..... 151

## C4 - Influência da retirada de amostras - Leito de Jorro Fluidizado

M: 3000 g  $U_o$ : 20% b.s.  $T_a$ : 83°C

Umidade do grão em função do tempo..... 151

## NOMENCLATURA

A	- parâmetro da equação 4.7	
b	- altura manométrica	mmHg
B	- parâmetro da equação 4.7	
b.s.	- base seca	-
b.u.	- base úmida	-
C	- parâmetro da equação 4.8	
CS	- coeficiente de secagem	kg água / kJ
cp	- calor específico à pressão constante	(kJ / kg K)
D	- parâmetro da eq. 4.8	
Dc	- diâmetro da coluna	m
Di	- diâmetro de entrada do fluxo de ar na coluna	m
$\Delta$ PL	- variação de pressão no leito	cm H <sub>2</sub> O
$\Delta$ H	- calor latente de vaporização	kJ/kg
E	- energia	kJ
E.C.R.	- taxa de consumo específico	adimensional
E.S.C.	- consumo energético específico	(kJ / kg água)
EF	- eficiência de secagem (eq. 2.4)	adimensional
EFF2	- coeficiente de secagem	adimensional
EN	- coeficiente de consumo energético (eq. 2.5)	adimensional
ES	- eficiência de secagem	adimensional
F	- secador de leito fixo	
h	- pressão estática	cm H <sub>2</sub> O
H	- altura da coluna preenchida com grãos	m
J	- secador de leito de jorro	
JF	- secador de leito de jorro fluidizado	
K	- parâmetro da eq. 3.3	
LM	- coeficiente fluidodinâmico de secagem	adimensional
M	- massa (carga) de sólidos	g
Q	- vazão	m <sup>3</sup> /min
Qsec	- vazão secundária	m <sup>3</sup> /min
r	- coordenada radial	
R	- posição da camada de grãos mais próxima da parede da coluna do secador	m
t	- tempo	min
T	- temperatura	(°C)
U	- umidade do grão	(% b.s.)
V <sub>A</sub>	- vazão anular	kg/s
V <sub>mf</sub>	- vazão de mínima fluidização	kg/s
V <sub>N</sub>	- vazão do fluido no tubo à entrada do jorro	kg/s
x	- posição no secador	m

W	- vazão mássica	kg/min
WS	- vazão de sólidos	kg/s
Y	- umidade absoluta do ar	-
z	- coordenada axial	

### Subscritos

a	- ar
amb	- ambiente
ag	- água
e	- equilíbrio
ev	- evaporada
f	- final
g	- grãos
ga	- gás
o	- inicial
s	- sólidos
ter	- térmica
v	- vaporização
1	- entrada
2	- saída

### Letras Gregas

$\alpha$	coeficiente de descarga	adimensional
$\varepsilon$	fator de compressibilidade	adimensional
$\phi$	diâmetro	mm
$\eta$	coeficiente de secagem	adimensional
$\theta$	temperatura de vaporização da água	adimensional

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A secagem de sólidos por ar quente é uma operação muito utilizada na áreas agrícola, química e alimentícia, sendo crescente ultimamente o número de trabalhos destinados a este assunto.

Com a era da informatização, têm surgido cada vez mais pesquisas destinadas a modelar e simular o fenômeno da secagem, visando com isto a economia de tempo e matéria-prima e a compreensão, por modelos matemáticos, de um fenômeno aparentemente simples, mas com muito ainda a ser desenvolvido. Ao mesmo tempo, novas tecnologias vêm sendo estudadas, visando desenvolver equipamentos que apresentem potencial de utilização como secadores, concomitantemente ao aperfeiçoamento dos já existentes.

No que se relaciona à secagem de grãos, grande é o número de trabalhos encontrados na literatura, variando desde a determinação de propriedades físico-químicas até a simulação dos mais diversos tipos de secadores, incluindo o estudo da cinética de secagem, fundamental para o projeto de tais equipamentos. Esta importância dada à secagem de grãos é um fenômeno facilmente compreendido quando se leva em consideração que estes grãos são, a nível mundial, uma importante fonte de alimentação e um maior aproveitamento da produção implica em cuidados na colheita, manuseio, secagem e estocagem.

Portanto são encontrados trabalhos relacionados à secagem dos mais diversos grãos: trigo, arroz, milho, soja, cevada. Segundo SHAN-HUA (1989), o Brasil é o maior produtor mundial de feijão, com a produção voltada praticamente para o mercado interno, porém nota-se na literatura nacional uma carência de dados relacionados ao determinado grão. Conforme dados obtidos junto ao IBGE (1990), em 1989 a produção nacional de feijão foi de 2.327.973 t, com rendimento médio de 447 kg/ha, sendo o estado de São Paulo responsável pela produção de 325.926 t. Com relação aos países estrangeiros a

literatura relacionada ao feijão é pouco abrangente, fato aceitável, uma vez que o feijão é muito pouco ou, até mesmo, não consumido.

Este trabalho teve por objetivos:

- Analisar experimentalmente a secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado;
- Avaliar a influência das variáveis temperatura do ar de secagem, umidade inicial do grão e carga de sólidos (grãos) no processo, através das curvas de secagem, evolução da temperatura do grão com o tempo, taxas de secagem;
- Realizar a comparação entre a performance dos secadores por meio de critérios energéticos, eficiência de secagem e coeficientes de secagem, definidos neste trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados aspectos gerais da secagem de grãos e alguns trabalhos relacionados ao feijão: secagem e armazenamento. Uma apresentação dos modelos teóricos de secagem em leito fixo é feita, uma vez que se trata de um equipamento bastante conhecido e vários são os trabalhos de secagem de grãos em tal secador. Informações sobre a fluidodinâmica do leito de jorro e do leito de jorro fluidizado são fornecidas e é feita uma apresentação das pesquisas desenvolvidas utilizando os leitos de jorro e jorro fluidizado como secador. Ainda são discutidos estudos comparativos de secagem com estes secadores, cinética de secagem e critérios de avaliação energética.

#### **2.1 Secagem de grãos**

No Brasil a secagem natural, na qual os grãos ficam espalhados em uma camada fina, expostos ao calor do sol, é amplamente difundida e predominante em relação à secagem artificial, também chamada de mecânica, realizada por meio de secadores. A última é uma operação relativamente cara, pois demanda uma grande quantidade de energia para o aquecimento e transporte do ar, porém segundo BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), apresenta algumas vantagens:

- a) Colheita antecipada, reduzindo assim perdas devido a tempestades e trincamento natural;
- b) Planejamento da colheita, utilizando melhor máquinas e mão-de-obra, uma vez que a colheita não é função do teor de umidade do grão no campo;
- c) Maior tempo de estocagem sem deterioração;
- d) Preços mais elevados do produto em determinadas épocas;

e) Aumento das possibilidades de utilização do grão, pois o grau de germinação não é prejudicado;

f) Comercialização do produto com maior qualidade.

A secagem quando realizada por meio de secadores utiliza geralmente ar quente, com as seguintes finalidades, segundo PUZZI (1977):

- Aumentar a pressão do vapor de água existente nos grãos, pelo aquecimento dos mesmos, favorecendo assim a saída da umidade. Parte do calor do ar proporciona um aumento da temperatura do produto (calor sensível) e parte fornece o calor necessário para a vaporização da água dos grãos (calor latente);
- Diminuir a umidade relativa do ar, aumentando sua capacidade de absorver umidade.

Uma grande variedade de secadores para grãos se encontra no mercado, sendo em sua maioria secadores convectivos: secadores de leito fixo, de leito deslizante, de fluxos cruzados. A escolha de um determinado secador, em geral, é função das características do produto e sua posterior utilização. São considerados os custos e as facilidades operacionais em função da qualidade final do produto, sendo interessante a escolha de um secador que possua uma versatilidade para os mais variados tipos de grãos.

### **2.1.1 Secagem de feijão**

Dentre os grãos, o feijão ocupa um importante papel na alimentação brasileira. Presente diariamente nas refeições, é usado como alimento básico por conter proteínas em larga escala, sendo uma alternativa para o consumo de carne e de outros produtos protéicos.

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão, com sua produção voltada praticamente para o consumo interno. Porém, em relação a outros tipos de grãos, muito pouco se encontra, na literatura nacional, sobre pesquisas realizadas com feijão. Menor ainda é o número de trabalhos que tratam da

secagem de feijão. A maior parte dos trabalhos está relacionada ao armazenamento do grão, nos quais controla-se a temperatura e a umidade relativa e analisa-se as características finais do grão, tais como propriedades físico-químicas e organolépticas (ANTUNES (1979)).

Como exemplo de pesquisa relacionada à secagem de feijão, pode-se citar o trabalho de SHAN-HUA (1989), que realizou experimentos de secagem em camada delgada com feijão carioquinha, em ambiente condicionado, controlando-se as seguintes variáveis: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. Caracterizou assim as curvas de secagem de feijão, através de modelagem empírica e teórica. Segundo o autor, condições drásticas como alta vazão, alta temperatura e mínima umidade relativa são desnecessárias para secagem de feijão, recomendando valores moderados de operação: temperatura do ar de 50°C, umidade relativa do ar de 55% e velocidade do ar igual a 0,3 m/s.

De acordo com XAVIER (1994), grande parte do feijão comercializado em uma cooperativa em Campinas é seco em leito fixo. O secador consiste de um silo, no qual o ar quente é fornecido pela parte inferior e com venezianas ao longo da estrutura, visando a ventilação. Porém a operação é dispendiosa, pois há a necessidade de remoção dos grãos do secador, isto é, a transferência de um leito para outro durante a operação após determinado período de secagem, com a finalidade de homogeneizar os grãos quanto ao teor de umidade.

## 2.2 Leito Fixo

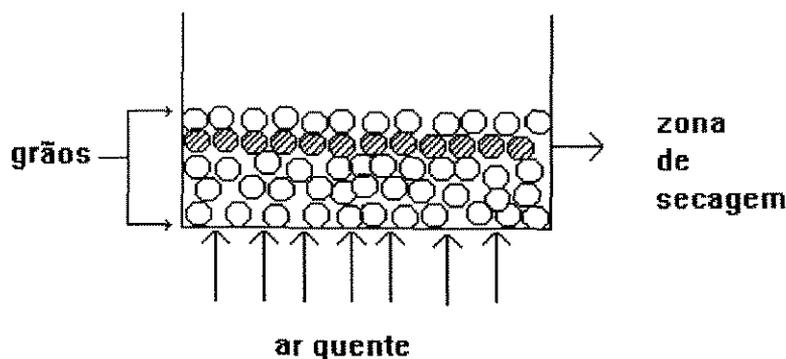
O leito fixo, também chamado estático, consiste de um arranjo de partículas dispostas em determinado espaço de forma que um fluido passe através destas, geralmente em sentido ascendente, sem arrastá-las.

Na indústria química as utilizações de equipamentos com colunas contendo recheio, tipo leito fixo, são bastante variadas: adsorção e absorção de gases, secagem de partículas úmidas, trocas iônicas, reações catalíticas heterogêneas.

### 2.2.1 Secagem de grãos em leito fixo

O secador de leito fixo é um dos tipos de secadores mais utilizados para secagem de grãos. É um método de simples operação e que acarreta baixos custos de instalação. Pode-se citar como exemplo de utilização de secadores de leito fixo o sistema de secagem em silos, muito utilizado como secador em propriedades rurais de pequeno e médio porte.

A figura 2.1 é representativa do sistema de secagem em leito fixo.



**Figura 2.1** - Esquema de secagem em leito fixo

No secador em leito fixo o ar de secagem move-se do fundo ao topo do leito e, conforme BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), "a transferência de umidade do grão para o ar acontece em uma faixa finita ou zona de grãos. No início da secagem esta faixa encontra-se no fundo do leito, movendo-se através da massa de grãos em sentido ascendente de tal forma que ao final toda a massa se encontra seca".

Os grãos abaixo desta zona apresentam um valor de umidade  $U_e$  em equilíbrio com o ar de secagem enquanto que os acima da zona de secagem apresentam umidade inicial  $U_0$ . Quando se move através da zona de secagem o ar retira umidade do grão por evaporação e é resfriado, pelo mesmo processo, de  $T_a$ , temperatura do ar a  $T_g$ , temperatura do grão.

Nota-se portanto dois gradientes ao longo da zona de secagem: gradiente de umidade de  $U_0$  a  $U_e$  e gradiente de temperatura de  $T_a$  a  $T_g$ .

A secagem de grãos em leito fixo é classificada como secagem em camada espessa, sendo este termo utilizado para um leito de grãos (estacionário ou móvel) no qual ocorrem gradientes de temperatura e umidade entre os grãos e o ar de secagem. Por outro lado a expressão secagem em camada delgada ou camada fina é aplicada, segundo JAYAS et al. (1991), a:

- um único grão livremente suspenso no ar ou a uma monocamada de grãos;
- uma multicamada de grãos, caso a temperatura e a umidade do ar de secagem possam ser consideradas no mesmo estado termodinâmico para qualquer tempo de secagem.

Os autores salientam que a espessura da camada, para se considerar como camada delgada, pode aumentar se a velocidade do ar aumentar e se também o estado termodinâmico do ar de secagem se aproximar do estado de equilíbrio, nas transferências de calor e massa com o grão seco nesta camada.

Uma revisão muito completa em relação aos artigos e livros que apresentam teorias de secagem de grãos em camada espessa foi realizada por CENKOWSKI, JAYAS E PABIS (1993). Os autores classificam os modelos de secagem em não-equilíbrio, equilíbrio e logarítmico e afirmam que esta

classificação é no entanto arbitrária. Os modelos de não-equilíbrio e logarítmicos são aplicados em todas as teorias de secagem de grãos, enquanto os modelos de equilíbrio aplicam-se a leito fixo apenas em dois casos: secagem a altas temperaturas (até 60°C) ou a baixas temperaturas (até 5°C acima da temperatura ambiente).

São apresentados a seguir modelos de secagem em camada espessa.

#### 2.2.1.1. Modelos de não-equilíbrio

Estes modelos assumem que não há equilíbrio de calor e massa entre o ar de secagem e o grão ao longo do leito. São modelos teóricos para secagem de grãos, e podem ser utilizados desde que haja uma diferença de temperatura suficientemente elevada entre o ar de secagem e o grão (temperatura do ar mais elevada que a temperatura ambiente em 5°C).

Como exemplo de modelos de não-equilíbrio pode-se citar os trabalhos de BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), SPENCER (1969) E SHARP (1982), sucintamente aqui descritos.

#### Modelo de Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974)

BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974) fizeram as seguintes considerações no desenvolvimento deste modelo:

- a) a diminuição do volume de um leito de grãos é negligenciável durante a secagem;
- b) os gradientes de temperatura no interior das partículas são negligenciáveis;
- c) a condução de calor e a transferência de massa entre as partículas é desprezível;
- d) a vazão do ar em relação aos grãos é do tipo 'plug-flow';
- e) mudanças na temperatura e umidade do ar ao longo do tempo ( $\partial T_a / \partial t$  e  $\partial Y / \partial t$ ) são desprezíveis quando comparadas às mudanças de temperatura e umidade ao longo de uma determinada espessura  $x$  do leito na direção do fluxo de ar ( $\partial T_a / \partial x$  e  $\partial Y / \partial x$ );

- f) as paredes do secador são consideradas adiabáticas com capacidade calorífica desprezível;
- g) as capacidades caloríficas do ar úmido e do grão são constantes durante curtos períodos de tempo;
- h) são conhecidas uma equação de camada delgada e a isoterma de umidade de equilíbrio.

Este modelo foi baseado principalmente nas suposições de BAKKER-ARKEMA, BICKERT E PATTERSON (1967), que realizaram uma modelagem de secagem de produtos biológicos à taxa constante. Na modelagem os autores consideraram um processo de secagem não-estacionário, no qual a umidade e a temperatura da partícula dependem da posição no secador,  $x$ , e do tempo de secagem,  $t$ . A partir de um volume de controle, obtido do leito fixo, quatro incógnitas foram identificadas: umidade média dos grãos, umidade do ar de secagem, temperatura dos grãos e temperatura do ar de secagem. Para solução destas incógnitas um sistema de quatro equações diferenciais foi proposto por meio dos balanços de massa e energia para o ar de secagem e o grão. Com relação à equação para determinação da umidade do grão os autores comentaram que se pode optar entre uma equação teórica (do tipo da difusão) ou uma relação empírica, do tipo equação em camada delgada, determinada especificamente para as condições de secagem, em geral expressa como uma função da umidade do grão,  $U$ , umidade de equilíbrio,  $U_e$ , temperatura do ar de secagem,  $T_a$ , e tempo de secagem,  $t$ .

#### Modelo de Spencer (1969)

Segundo SPENCER (1969) os modelos de secagem que estavam sendo desenvolvidos nesta época eram fundamentados em muito empirismo. Exemplificou o modelo de BOYCE (1965), no qual foi desenvolvido um modelo para secagem de cevada, representando um leito fixo como uma série de camadas delgadas de grãos, aplicando ao leito uma modelagem semi-empírica de secagem de grãos em camada delgada.

No modelo de SPENCER (1969) o autor baseou-se em um volume elementar, de área unitária e espessura  $dx$ , e fez as seguintes considerações:

- a) As propriedades térmicas do grão seco, de sua umidade e do ar são constantes na faixa de temperaturas utilizadas;
- b) A transferência de calor por condução dentro do leito é desprezível;
- c) O efeito da condensação dentro do leito é desprezível;
- d) O problema é unidimensional.

Um sistema de quatro equações diferenciais resultou do equacionamento do modelo: balanços de massa e energia para o ar e o grão, sendo que no caso do balanço de massa para o grão foi utilizada uma equação de secagem em camada delgada. Nos balanços foram consideradas as variações de temperatura e umidade do ar em relação ao tempo de secagem.

#### Modelo de Sharp (1982)

SHARP (1982) realizou uma revisão dos modelos de secagem a baixas temperaturas (temperatura do ar variando entre temperatura ambiente e no máximo  $5^{\circ}\text{C}$  acima desta), propondo um modelo baseado em um leito elementar com área unitária em relação ao fluxo de ar. O autor obteve um sistema de quatro equações diferenciais e comentou, após o equacionamento, que os termos ( $\partial T_a/\partial t$  e  $\partial Y/\partial t$ ) eram muito pequenos e podiam ser desprezados. Entretanto não fez referência à faixa de validade destas considerações.

CENKOWSKI, JAYAS E PABIS (1993) citam o trabalho de LAWS E PARRY (1983) no qual um modelo matemático geral foi desenvolvido para a secagem de grãos em quatro tipos básicos de sistemas de secagem: leito fixo, fluxo cruzado, escoamento concorrente e contra-corrente. O modelo de equações diferenciais parciais proposto considerou o ar úmido e o grão úmido como uma mistura binária, assumindo fluxo de massa unidimensional e massas específicas constantes para o ar e o grão, desprezando os efeitos de

aquecimento por condução e radiação. No caso do leito fixo o sistema resultante foi de equações diferenciais ordinárias.

#### 2.2.1.2 Modelos de equilíbrio

Sob condições de baixa temperatura e baixa vazão, pode-se considerar que a secagem em leito fixo ocorre próxima ao equilíbrio. Para o equilíbrio de calor e massa ao longo do leito, supõe-se que não há resistências à transferência de calor e massa no interior do leito. Esta consideração implica em coeficientes de transferência de calor e massa infinitos.

Assim, o sistema de quatro equações diferenciais parciais é reduzido a duas equações, que são os balanços de umidade para o ar e para o grão, uma vez que a temperatura do ar é considerada igual a temperatura do grão e a umidade do grão passa a ser a umidade de equilíbrio.

THOMPSON, PEART E FOSTER (1968) foram os primeiros a desenvolver um modelo de equilíbrio para a secagem de grãos, aplicando o modelo à secagem de milho. Modelaram a secagem em uma camada delgada de grãos e então combinaram várias camadas de maneira tal a formar o leito. Determinaram uma temperatura de equilíbrio entre o grão e o ar, que foi utilizada como a temperatura do ar de secagem enquanto que para a umidade do grão desenvolveram uma expressão de umidade de equilíbrio.

#### 2.2.1.3 Modelos Logarítmicos

Segundo PARRY (1985) o primeiro modelo logarítmico para a secagem de grãos foi desenvolvido por HUKILL (1954), que obteve uma análise simplificada da secagem em leito fixo, relacionando a taxa de secagem de uma camada espessa de grãos ( $\partial U/\partial t$ ) com a variação espacial da temperatura do ar de secagem nesta mesma camada ( $\partial T_a/\partial x$ ). PARRY (1985) comentou que o próprio autor observou que o seu modelo subestimava o tempo requerido para secagem dos grãos até um determinado teor de umidade especificado, porém

atribuiu este fato a imprecisões na condição de contorno para o adimensional de umidade,  $(U - U_e) / (U_o - U_e)$ .

Os modelos logarítmicos são ainda muito utilizados devido à sua simplicidade, mas são pouco precisos e só devem ser aplicados à secagem a baixas temperaturas e baixas vazões.

### 2.3 Leito de Jorro

Desde seu surgimento, o leito de jorro tem sido objeto de pesquisa em um grande número de países. Suas aplicações envolvem diversas áreas e como exemplo de aplicações industriais do leito de jorro pode-se citar a secagem de materiais granulares (produtos agrícolas e materiais poliméricos), a secagem de suspensões e soluções, o recobrimento de comprimidos, entre outros (MATHUR E EPSTEIN (1974)).

Este leito foi desenvolvido inicialmente, segundo MATHUR E EPSTEIN (1974), como um método de secagem de trigo realizado por MATHUR E GISHLER (1955a). Após estudos com diferentes materiais sólidos, utilizando-se água e também ar como fluido para movimentação das partículas, MATHUR E GISHLER (1955b) chegaram à seguinte conclusão: "o mecanismo de fluxo de sólidos assim como o de gás, nesta técnica, é diferente daquele da fluidização, porém parece atingir o mesmo propósito para partículas grandes que fluidização para materiais finos".

A primeira unidade para uso industrial do leito de jorro foi instalada no Canadá, em 1962, para secagem de ervilha, lentilha e semente de linho.

O leito de jorro, segundo a definição de MATHUR E EPSTEIN (1974), consiste basicamente de um vaso aberto no topo, preenchido com sólidos particulados relativamente grandes. Uma abertura pequena, no centro da base, possibilita a injeção vertical do fluido. Com a injeção do fluido um jato é formado através de uma cavidade central, dentro do leito. Por este jato as partículas são transportadas, em movimento ascendente, até uma determinada

altura. A partir daí, caem novamente na região anular situada entre a cavidade central e a parede da coluna, movendo-se de uma forma lenta em movimento descendente. Desta maneira é estabelecido um movimento sistemático e cíclico. A região diluída central é denominada jorro e a região periférica anular, ânulo. As partículas que se encontram a uma altura superior à do ânulo formam a fonte.

Um leito de jorro é apresentado na figura 2.2.

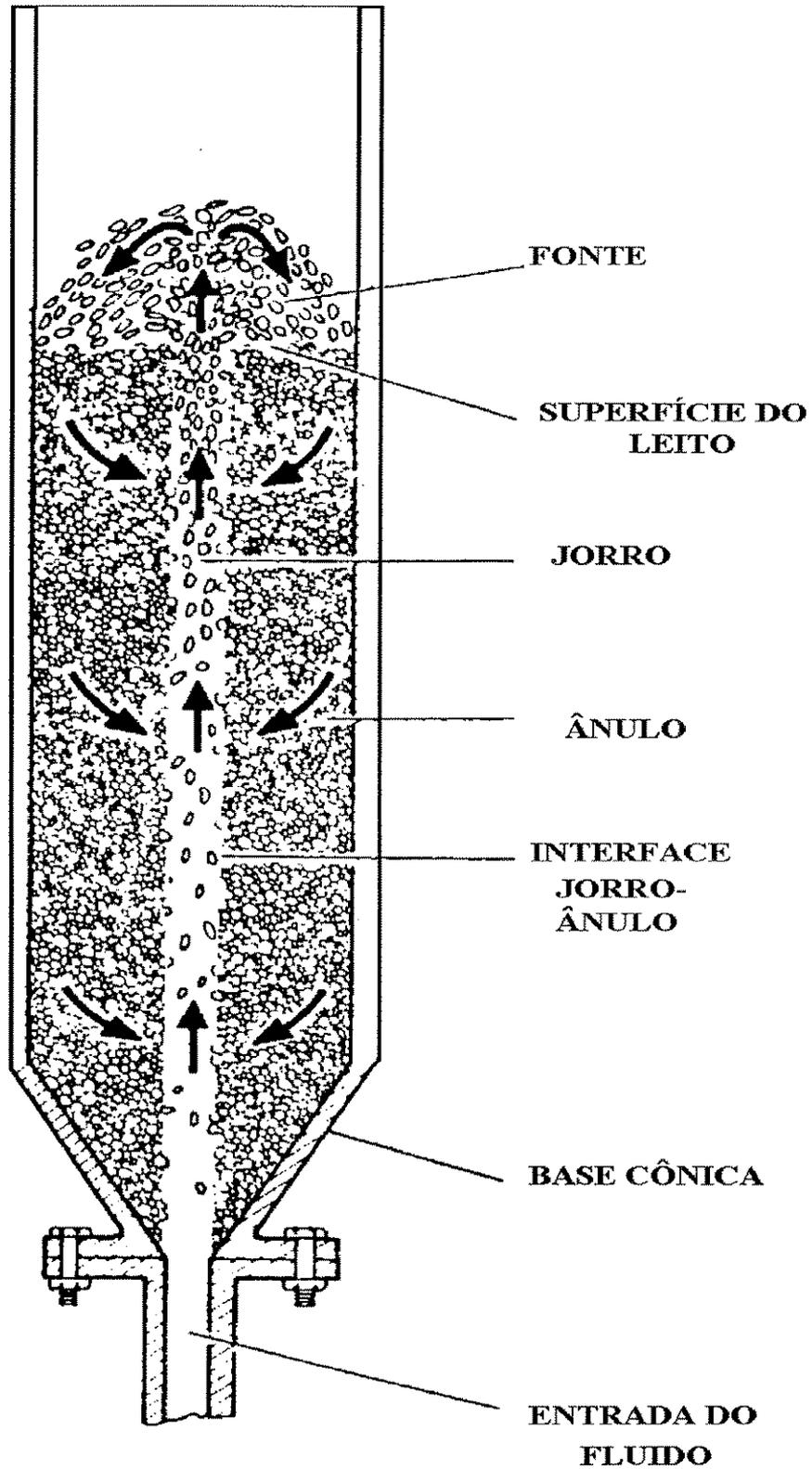


Figura 2.2 - Esquema de um leito de jorro  
 MATHUR E EPSTEIN (1974)

A utilização da base cônica visa o aumento do movimento dos sólidos e a eliminação de zonas mortas. O vaso quase sempre é um cilindro, no entanto modificações na geometria do leito têm ocorrido ultimamente, visando assim adaptar o sistema às necessidades do usuário.

Em função das vantagens de sua dinâmica, diversas operações podem ser realizadas em leito de jorro. A agitação de sólidos, juntamente com o contato efetivo gás-sólido, é favorável à secagem, aquecimento e resfriamento de sólidos granulares, além da possibilidade de limpeza de gases. O movimento cíclico regular dos sólidos favorece o recobrimento e a granulação, sendo o atrito provocado pelas colisões um mecanismo importante na secagem de suspensões e soluções em partículas inertes.

Porém, em leitos de jorro cônico-cilíndricos (base cônica e coluna cilíndrica) a vazão de ar é determinada pelas necessidades de se obter um jorro estável e as dimensões do leito dependem também das propriedades da partícula. Assim, para uma determinada configuração de leito, o jorro ocorre para uma combinação gás utilizado, partículas e velocidade do gás. As necessidades de transferência de calor e massa são de certa forma limitadas pela necessidade de se atingir o mecanismo de jorro.

### **2.3.1 Secagem de grãos em leito de jorro**

A grande vantagem da utilização de secadores em leito de jorro em relação a secadores convencionais é a obtenção de uma elevada diferença de temperatura entre o ar e o leito. Além disto, altas temperaturas do ar não causam danos aos grãos facilmente, devido ao baixo tempo de residência da partícula no jorro.

Desde sua utilização para secagem de trigo, várias pesquisas vêm sendo realizadas utilizando-se o leito como secador dos mais variados grãos.

BRUNELLO, PECK E DELLA NINA (1974) estudaram a secagem de malte de cevada em um secador tipo jorro cônico-cilíndrico operando em batelada, utilizando três diferentes temperaturas de ar de secagem (60, 80 e 90°C) e três cargas de sólidos, tendo o malte umidade inicial de 80% b.s. Demonstraram então que a secagem pode ser conduzida em temperaturas mais elevadas que nos equipamentos clássicos e propuseram

um modelo semi-empírico, baseado na hipótese de que o transporte de massa se faz através de membranas semi-permeáveis, presentes nas células que contém o material dos grãos.

VISWANATHAN, LYALL E RAYCHAUDHURI (1986) realizaram experimentos de secagem de milho, arroz, ervilha e trigo em leito de jorro cônico-cilíndrico. Utilizaram leitos com diâmetro da coluna ( $D_c$ ) de 0,10 m, 0,25 m e 0,31 m, todos com ângulo da base de  $60^\circ$ . Nos dois leitos maiores os experimentos foram realizados com um tubo interno modificado, o qual continha fendas ao longo de seu comprimento e na base, com a finalidade de obter uma melhor circulação de sólidos. A massa de sólidos utilizada nos experimentos foi bastante variada: desde 0,067 kg até 9,88 kg e as operações foram realizadas em batelada e contínuo. A partir dos dados obtidos desenvolveram uma correlação empírica para a taxa de secagem, com validade para temperatura do ar até  $130^\circ\text{C}$ , com o objetivo de ser utilizada em projeto de secadores de leito de jorro.

CREMASCO, ROCHA E MASSARANI (1987) obtiveram dados dinâmicos e as curvas de secagem para milho em leito de jorro cônico com tubo interior. O leito utilizado possuía  $D_c = 0,626$  m e diâmetro de entrada do fluxo de ar,  $D_i$ , igual a 0,053 m. O equipamento mostrou-se adequado à redução da umidade do milho, sem prejudicar a qualidade do grão. Segundo eles, "o leito de jorro pode ser uma opção para o pequeno produtor, desde que em sua propriedade haja uma rotatividade de plantio (soja, milho, arroz, feijão), de modo que o secador possa sempre estar ativo durante o período da entressafra".

A secagem de arroz em leito de jorro cônico foi estudada por CREMASCO E MASSARANI (1987). Os dados foram obtidos em uma unidade piloto, com ângulo de  $60^\circ$  operando a temperaturas do ar entre  $80$  e  $110^\circ\text{C}$ , com tubo interior para cargas superiores a 18 kg, tendo  $D_c = 0,626$  m e  $D_i = 0,053$  m. Um economizador em leito fixo foi usado, com fins de aproveitar energeticamente o ar de secagem

ALVES FILHO E MASSARANI (1987) realizaram a secagem de café cereja em leito de jorro cônico, com ângulo de  $60^\circ$ , altura de 0,9 m e diâmetros da base e do topo de 0,13 e 0,10 m respectivamente. Afirmaram ser difícil a secagem do produto em secadores mecânicos devido a problemas de não uniformidade do produto, polpa solta, impurezas e

concluíram que o leito de jorro é uma boa alternativa. Neste trabalho a umidade final do produto foi fortemente influenciada pela temperatura do ar e, em menor escala, pela umidade inicial do produto.

KALWAR E RAGHAVAN (1993) realizaram experimentos de secagem de milho em leito de jorro bidimensional com placas internas. O leito bidimensional é uma modificação dos tradicionais leitos cônico-cilíndricos e tem como principal objetivo minimizar o problema de 'scale-up' dos comumente estudados. Utilizaram dois leitos geometricamente similares: um em escala de laboratório, com ângulo da base de 60° e 0,50 m de largura, 0,04 m de profundidade, 1,50 m de altura e outro em escala piloto, com mesmo ângulo da base e dimensões de 0,75m, 0,06 m e 2,0 m respectivamente. Concluíram que a taxa de secagem foi influenciada pela temperatura do ar à entrada, temperatura inicial do grão, massa de grãos no leito, teor de umidade inicial dos grãos, tempo médio do ciclo das partículas, umidade relativa do ar à entrada e geometria do leito. Segundo os autores a secagem na escala piloto foi muito mais rápida do que na escala de laboratório, proporcionalmente à massa utilizada em cada; a cinética de secagem foi do tipo camada delgada e a equação de Page descreveu bem o processo, sendo que nos parâmetros do modelo, determinados empiricamente, foram consideradas a geometria do leito e as características de operação.

FREITAS E PASSOS (1995) modelaram a secagem de grãos em leito de jorro cônico operando em batelada. As variáveis da dinâmica do leito foram determinadas em função das dimensões do secador, do tipo e da quantidade de grãos a ser processada e obtiveram como parâmetros de projeto o tempo, a vazão de ar e a temperatura de secagem. Os resultados da modelagem foram comparados satisfatoriamente com dados experimentais da secagem de arroz e urucum, em leitos cônicos, com tempos de secagem não superiores a 30 minutos. Segundo as autoras esta modelagem destina-se ao projeto de secadores simples, para atender a demanda do pequeno produtor agrícola.

Após a apresentação destes trabalhos, a grande maioria realizada nos últimos 10 anos, o que se nota no cenário nacional e internacional em relação à utilização de secadores em leito de jorro para grãos é ainda o que MASSARANI (1987) concluiu, após ter realizado e orientado vários trabalhos de secagem em leito de jorro: "Há uma literatura

volumosa sobre a secagem de grãos em leito de jorro, mas grande é a dúvida sobre a viabilidade de utilização do secador de modo competitivo”.

## 2.4 Leito de Jorro Fluidizado

O leito de jorro fluidizado consiste em uma modificação do leito de jorro convencional, com a finalidade de melhorar a operabilidade, as características de transferência de calor e a eficiência de contato sólido-fluido. Esta modificação ocorre através do fornecimento de uma vazão auxiliar de fluido na região anular, transformando este leito em um equipamento híbrido, com características de jorro e fluidização.

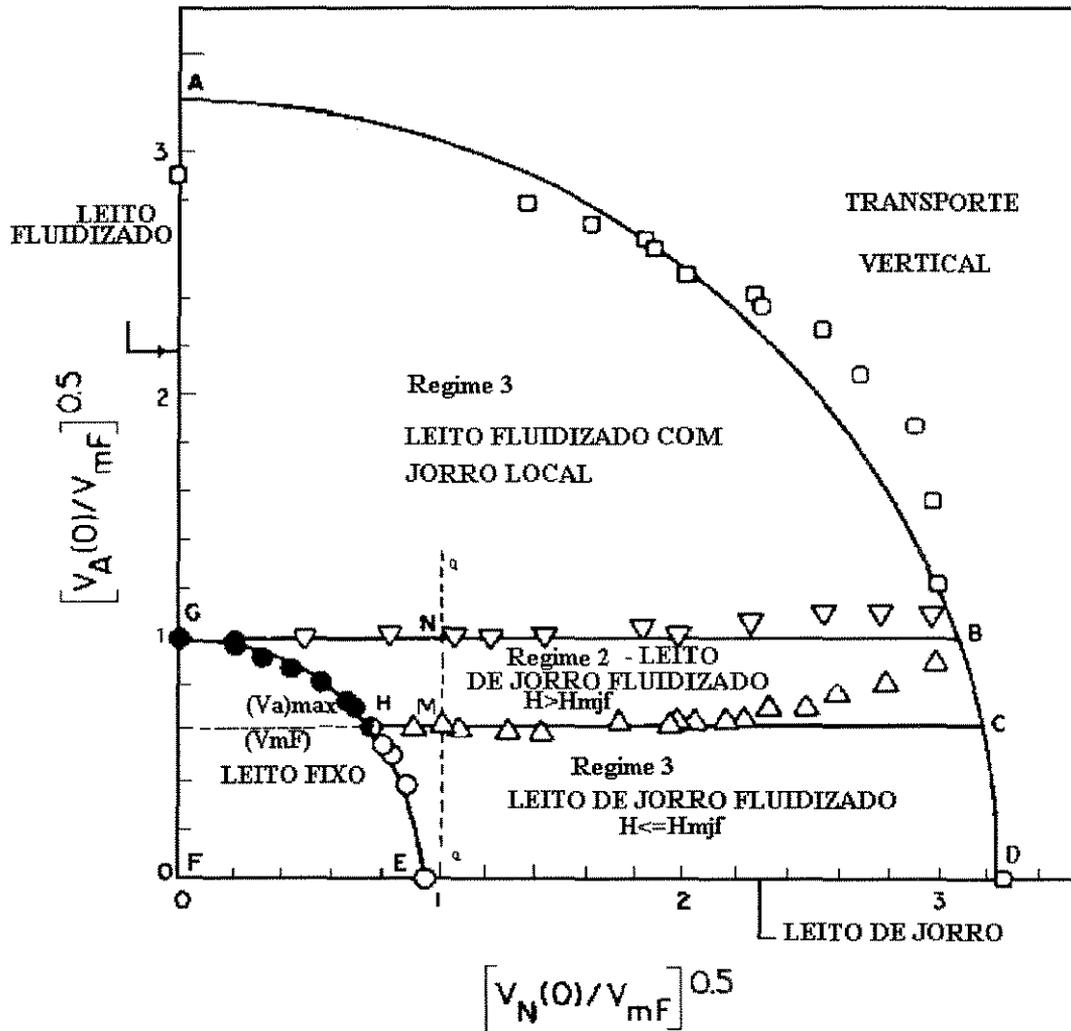
A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura trata das características hidrodinâmicas do leito de jorro fluidizado, uma vez que se trata de uma criação relativamente nova e pouco se conhecia sobre os resultados desta transformação.

VUKOVIC et al. (1984) comentam que os extremos de um leito de jorro fluidizado são o leito de jorro, quando todo o fluxo passa através da entrada principal, e o leito fluidizado, quando o fluxo total é uniformemente distribuído através da seção de entrada do jorro e da região anular. Neste trabalho realizaram o mapeamento dos regimes de escoamento em um leito de jorro fluidizado, utilizando ar e também água como fase fluida e partículas esféricas de carbonato de cálcio como fase sólida. Três regimes de escoamento foram identificados:

Regime 1 - Região EHCD na figura 2. 3. Leito de jorro fluidizado, com a altura inicial do leito igual ou menor que a altura máxima de jorro estável nas condições de jorro-fluidização mínima e aparência muito similar a do leito de jorro. Nesta fase, variações na vazão de ar à entrada da região anular podem ocasionar a fluidização da mesma.

Regime 2 - Região HGBC na figura 2. 3. Presença de duas regiões : um leito fluidizado situado no topo de um leito de jorro fluidizado, com ânulo e jorro bem definidos. Aparência de leito de jorro com altura maior que a altura máxima de jorro estável, nas condições de jorro mínimo.

Regime 3 - Região AGB na figura 2. 3. A velocidade do fluido é maior que a velocidade de mínima fluidização em qualquer região do ânulo com início da formação de bolhas na região anular. A partir desta fase aumentos na vazão da região anular podem provocar o transporte das partículas.



**Figura 2.3** - Mapeamento dos regimes de escoamento em leito de jorro fluidizado ar a 20°C -  $V_N$ = vazão do fluido no tubo de entrada do jorro,  $V_A$ = vazão anular,  $V_{mF}$ = vazão de mínima fluidização

VUKOVIC et al. (1984)

SUTANTO, EPSTEIN E GRACE (1985) determinaram a hidrodinâmica de um leito de jorro fluidizado, utilizando três tipos diferentes de partículas (poliestreño,

polietileno e painço) com tamanhos na faixa de 2 a 4 mm e uma meia-coluna com  $D_c = 0,15$  m, sendo ar a fase fluida. Quatro diferentes tipos de escoamento foram identificados e mapeados: leito fixo, jorro com aeração, jorro fluidizado, jato em jorro fluidizado. É evidenciado o fato de haver consideráveis diferenças nos mapeamentos de escoamentos em leito de jorro fluidizado, fato atribuído em parte às diferenças na geometria do distribuidor de ar e em parte à terminologia utilizada. Os autores citaram como exemplo CHATTERJEE (1970), que utilizou o termo leito de jorro fluidizado para as condições em que as partículas da região anular que circundam o jorro central estão realmente fluidizadas enquanto LITTMAN et al. (1976) utilizaram o mesmo termo para a condição em que o jorro normal é acompanhado de uma aeração adicional, mas não fluidização do ânulo. Neste trabalho os autores consideraram a definição de CHARTTERJEE como a da região de jorro-fluidização e a definição de LITTMAN et al. como a da região de jorro com aeração. Salientaram ainda que leitos de jorro fluidizado, com ou sem tubo interno, têm sido estudados para craqueamento térmico do óleo cru e gaseificação do carvão entre outros.

#### **2.4.1 Secagem de grãos em leito de jorro fluidizado**

Não se tem conhecimento sobre experimentos de secagem de grãos realizados em leito de jorro fluidizado.

Como exemplo de trabalho relacionado a este assunto pode-se mencionar o de PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989), no qual foi realizada a simulação da secagem de arroz, trigo e milho em leito de jorro fluidizado cônico-cilíndrico. Este secador, operando em regime de jorro com aeração, apresentou maior eficiência de secagem quando comparado a um secador de leito de jorro similar, com mesmo volume e mesma relação  $D_c/D_i$ , para condições de altas taxas de alimentação de sólidos, WS, (secagem de trigo, temperatura do leito igual a  $59,5^\circ\text{C}$ , WS, vazão de sólidos, entre 250 e 850 kg/h) e baixas temperaturas do ar de secagem (secagem de arroz, WS = 250 kg/h, temperatura do leito entre  $40,8$  e  $52,3^\circ\text{C}$ ). Ressaltaram a necessidade de confirmação destas considerações por meio de experimentos, por se tratar de uma análise preliminar

na qual faltam dados mais precisos em relação à aerodinâmica de partículas não esféricas em tal leito.

## 2.5 Cinética de Secagem

Para a simulação do funcionamento de um secador industrial é indispensável conhecer a cinética de secagem do produto. Este cálculo pode ser teórico, através das equações de transferência de calor e de massa ou empírico, a partir de dados obtidos em laboratório com o produto desejado.

Segundo BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974) "a predição da taxa de secagem de um produto biológico é mais complicada durante o período de taxa decrescente do que durante o período de taxa constante". Isto porque além de serem considerados os mecanismos de transferência externos (transferência convectiva de calor e de massa), deve-se também considerar os mecanismos de transferência internos ao produto (difusão de calor e massa). Conforme os autores, apesar de haver várias teorias para predizer o período de taxa decrescente em secagem de grãos, apenas relações semi-teóricas ou empíricas têm sido úteis aos projetistas de secadores.

DAUDIN (1983) descreveu a evolução das transferências de calor e massa ao longo da secagem através das curvas características de secagem (figura 2.4), que são:

- a) evolução da umidade do produto;
- b) cinética da secagem;
- c) evolução da temperatura do produto.

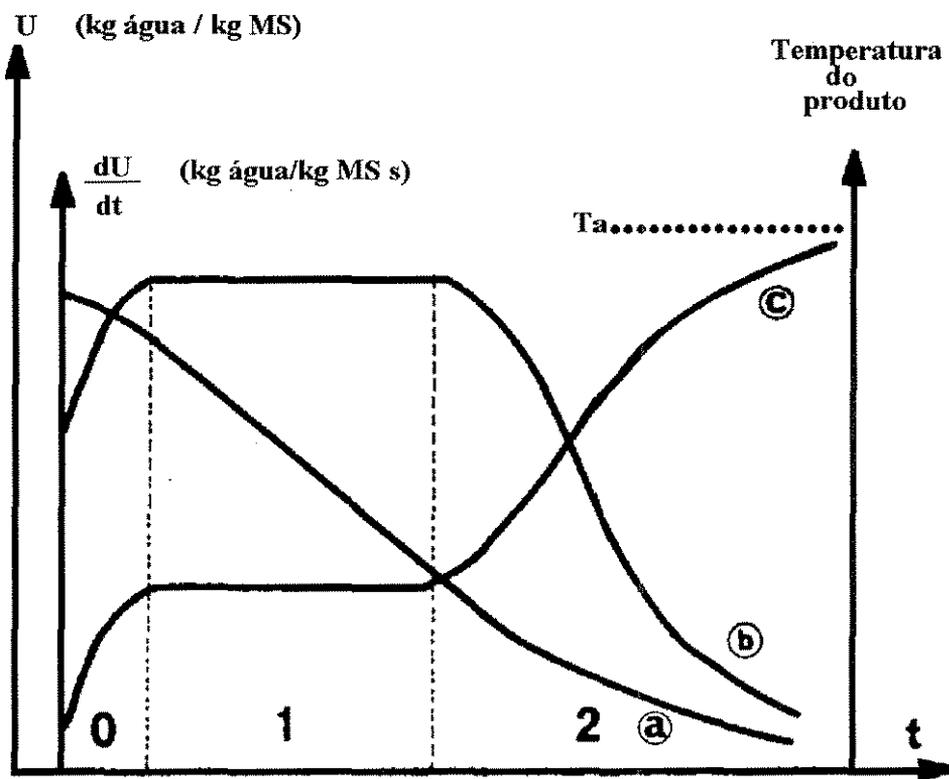


Figura 2.4 - Curvas típicas de secagem  
DAUDIN (1983)

O autor fez então uma divisão das curvas em três regiões:

Região 0 - Também chamada de período de entrada em regime, pois se trata de um período no qual ocorrerá a 'ambientação' do produto às condições de secagem, uma vez que o produto se encontra geralmente em uma temperatura inferior à do ar de secagem. Ocorre então um aumento da temperatura do sólido até atingir-se um equilíbrio térmico com as condições de secagem; a diminuição da umidade do sólido; o aumento da

velocidade de secagem. Há também o equilíbrio da pressão parcial do vapor de água na superfície do sólido com o ambiente.

Região 1 - É o período de secagem à taxa constante. Devido à grande quantidade de água presente, a água evapora como água livre. As transferências de calor e massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é constante até que se inicie a migração da água do interior do produto, quando toda a água da superfície tiver sido evaporada.

Região 2 - Período de secagem à taxa decrescente. Quando a água não se encontra na superfície do produto, a resistência interna à transferência de massa começa a dominar o processo. A transferência de calor não é mais compensada pela evaporação da água, o produto sofre uma elevação de temperatura e tende assintoticamente à temperatura do ar. Pode-se interpretar a redução da taxa de secagem pela diminuição da superfície molhada, ou então por um abaixamento da pressão parcial do vapor de água na superfície do produto. No fim deste período o produto se encontra em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem é nula.

## **2.6 Estudos Comparativos**

Poucos trabalhos foram realizados com a finalidade de comparação do comportamento de secadores de leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado para grãos. Pode-se citar os trabalhos de SILVA (1991) e PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989) que compararam os secadores leito fixo e leito de jorro e leito de jorro e leito de jorro fluidizado respectivamente. A grande maioria dos trabalhos apresenta dados comparativos do comportamento dinâmico dos leitos de jorro e jorro fluidizado.

### **2.6.1 Leito de jorro e leito fixo**

SILVA (1991) realizou estudos comparativos de secagem de urucum em leito de jorro e leito fixo. Para isto foi utilizado um leito de jorro cônico-cilíndrico, com ângulo

da base de  $60^\circ$ ,  $D_c = 0,60$  m e  $1,0$  m de altura e um sistema de secagem em leito fixo com  $D_c = 0,18$  m e  $0,80$  m de altura, tendo uma base cônica preenchida com esferas de vidro para a distribuição do fluxo de ar. Neste trabalho foram obtidas as curvas de secagem para diferentes umidades iniciais das sementes, temperaturas e vazões do ar de aquecimento. No secador de leito de jorro a faixa de utilização de temperaturas do ar de secagem foi de  $45$  a  $65^\circ\text{C}$ , a umidade inicial das sementes variou entre  $13$  e  $36\%$  b.s., a vazão do ar entre  $146$  e  $190$   $\text{m}^3/\text{h}$  e a carga de sólidos entre  $10$  e  $30$  kg, tendo sido utilizado um tubo interno durante a realização dos experimentos. No caso do secador de leito fixo a temperatura do ar de secagem variou entre  $45$  e  $65^\circ\text{C}$ , a umidade inicial dos sólidos entre  $13,9$  e  $32,5$  % b.s. e a vazão do ar de secagem entre  $81$  e  $165$   $\text{m}^3/\text{h}$ . O autor não especificou, no entanto, se o secador processou a mesma carga de sólidos que o leito de jorro. As conclusões do trabalho foram que a temperatura foi um parâmetro que influenciou a cinética de secagem, tanto no leito de jorro quanto no leito fixo e que se forem utilizadas temperaturas muito elevadas, as características físico-químicas do urucum podem ser alteradas. Observou também que teores elevados de umidade do produto proporcionam uma secagem mais rápida e que a secagem ocorreu exclusivamente em taxa decrescente. Ainda, destacou que as curvas de secagem obtidas em leito fixo e leito de jorro apresentaram comportamento análogo, porém verificou a superioridade da secagem no secador de leito de jorro, devido ao maior contato do ar de secagem com as partículas, permitindo assim maior transferência de calor e massa entre os grãos em movimento e o fluido.

### 2.6.2 Leito de jorro e leito de jorro fluidizado

PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989) analisaram, através de simulação, a performance de secadores de leito de jorro cônico-cilíndrico para arroz, trigo e milho e compararam a eficiência de secagem deste secador com medidas otimizadas com um secador de leito de jorro fluidizado equivalente. Foram apresentadas as equações aerodinâmicas e térmicas necessárias para a otimização das dimensões do leito de jorro cônico-cilíndrico. O modelo da difusão do líquido foi utilizado para descrição do período de secagem em taxa decrescente, enquanto os parâmetros aerodinâmicos foram obtidos a partir de correlações semi-empíricas e de dados de laboratório. Conforme comentado no

item 2.4.1, o secador de leito de jorro fluidizado, operando no regime de jorro com aeração, apresentou maiores eficiências de secagem que o leito de jorro ( no caso de altas taxas de alimentação de sólidos, pois a operação foi simulada em regime contínuo, e baixas temperaturas do leito).

## 2.7 Eficiência energética da secagem

É conhecido o fato da secagem por meio de secadores convectivos ser uma das operações unitárias mais dispendiosas em termos energéticos, uma vez que para a evaporação da umidade uma quantidade de energia muito elevada é gasta e não recuperada. Um critério fundamental para a avaliação de secadores é então sua eficiência energética.

De acordo com STRUMILLO E KUDRA (1986), a secagem consome até 70% da energia total nas indústrias de produtos derivados de madeira, é responsável por cerca de 50% do consumo energético nas indústrias têxteis e utiliza acima de 60% do total de energia no processo de produção de milho nas fazendas. Segundo os autores, RICHARDSON E JENSON (1976) pesquisaram 17 tipos diferentes de secadores industriais para sólidos e concluíram que dentre eles apenas 5 contribuíam com 99% da energia total consumida pelo grupo: flash, torre cilíndrica, rotatório contínuo e batelada e leito fluidizado. STRUMILLO E KUDRA (1986) definiram a eficiência energética de um secador,  $\eta$ , como:

$$\eta = \frac{\text{energia necessária para evaporação da umidade em } T_{so}}{\text{energia total fornecida à operação}} \quad (2.1)$$

sendo  $T_{so}$  = temperatura de alimentação dos sólidos.

BIMBINET (1982) estabeleceu também alguns critérios para a avaliação energética de secadores convectivos. Em seu trabalho definiu um consumo energético específico (ESC) como a razão entre a energia térmica para operar o secador (no caso

considera apenas a energia necessária para aquecer o ar) e a massa de água removida no mesmo período de tempo:

$$ESC = \frac{\dot{E}_{aq,a}}{W_{ag,ev}} \quad (2.2)$$

$$[ESC] = \text{kJ} / \text{kg água}$$

Outra definição do autor é a taxa de consumo energético (ECR), que relaciona o consumo energético específico ao calor latente de vaporização da água em  $\theta$ , temperatura em que a água é vaporizada. O calor latente no caso é aquele necessário para vaporizar a água livre.

$$ECR = \frac{ESC}{\Delta H_{vag,\theta}} \quad (2.3)$$

A eficiência energética é então definida como o inverso da taxa de consumo energético, sendo mais elevada quanto melhor for a performance energética do secador:

$$EF = \frac{1}{ECR} \quad (2.4)$$

O autor fornece ordens de grandeza para os critérios acima estabelecidos. A título de ilustração: para secadores convectivos na indústria de alimentos, operando sem sistema de recuperação de energia, os valores de ESC se encontram entre 3300 e 6500 kJ/kg, ECR na faixa de 1,5 a 3,0 e a eficiência energética, EF, entre 0,3 e 0,7.

KAMINSKI et al. (1989) utilizaram um conceito de otimização multiobjetiva para o processo de secagem de L-lisina em leito fluidizado. Os critérios para otimização do processo foram: qualidade do produto, coeficiente de consumo energético, coeficiente volumétrico de evaporação, diâmetro final da partícula. Em seu trabalho o coeficiente de consumo energético, EN, foi definido como:

$$EN = \frac{W_{ag} \Delta H_{v ag \theta}}{W_{ga} cp_{ga} (T_1 - T_{amb})} \quad (2.5)$$

$W_{ag}$  = vazão mássica de água evaporada (Kg/s)

$W_{ga}$  = vazão mássica de gás (Kg/s)

$\Delta H_{v ag \theta}$  = entalpia de vaporização da água na temperatura de secagem (kJ/kg)

$cp_{ga}$  = calor específico do gás (kJ / kg K )

$T_1$  = temperatura do gás de secagem `a entrada do secador (K)

$T_{amb}$  = temperatura ambiente (K)

PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989) utilizaram uma definição de eficiência de secagem visando a comparação dos secadores de grãos de leite de jorro e de leite de jorro fluidizado (equivalente ao primeiro), ambos com geometria cônico-cilíndrica. Para os autores esta eficiência de secagem é a razão entre a energia necessária para aquecer o grão e evaporar a água e a energia total fornecida à operação. No mesmo trabalho um outro coeficiente foi definido, EFF2, como sendo a razão entre a quantidade de água evaporada e a energia total fornecida à operação. A energia total fornecida à operação inclui a energia necessária para aquecer o ar e a energia mecânica para bombeá-lo.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material Utilizado

Os experimentos foram realizados utilizando-se feijão, *Phaseolus vulgaris L*, tipo IAC-Carioca, classe CE, obtido junto ao Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes da Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo.

Algumas características da semente do feijão IAC-Carioca são: forma oblonga-curta, tegumento com cor creme ou creme marmorizado com listras havana, peso médio de 100 sementes em torno de 22 g.

Este feijão pode ser plantado em todo o estado de São Paulo, obedecendo às épocas de plantio.

As propriedades físicas do feijão são apresentadas na tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Propriedades Físicas do Feijão IAC-Carioca

Material	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro Médio (mm)	Esfericidade
Feijão Carioca	750	7,5	0,44

Os experimentos foram realizados no período de julho de 1994 a abril de 1995, envolvendo portanto a safra e a entressafra de feijão na região de Campinas. Devido a isto, grande seria a dificuldade de se obter o feijão diretamente do produtor, com as mesmas propriedades e em pequenas quantidades, repetidas vezes, em razão da limitação do número de equipamentos de apoio (estufa, cadinhos).

Por isso resolveu-se optar pela utilização de feijão semente, obtido com um teor de umidade inicial inferior ao desejado, porém bem caracterizado evitando assim

modificações de qualidade, composição básica, tamanho e resistência. A umidade do feijão adquirido encontrava-se em torno de 15% b.s., uma vez que já havia sofrido processo de secagem para ser armazenado. Para a realização dos experimentos utilizou-se então a técnica de reumidificação dos grãos.

Para posterior comparação em relação à qualidade do processo de reumidificação, foram realizados experimentos com feijão pós-colheita, obtido diretamente do campo, com umidade inicial aproximada de 21% b.s..

### **3.1.1 Reumidificação dos grãos**

Para a avaliação do comportamento de um secador comercial é necessário que se tenha uma grande quantidade de grãos, com um teor de umidade conhecido. Grãos pós-colheita são os mais apropriados para testes porém, quando isto não é possível ou economicamente viável, o teor de umidade dos grãos pode ser reconstituído pela adição de água.

SOKHANSANY, SINGH E WASSERMAN (1984) estudaram as características de secagem de trigo, cevada e canola em camada delgada, sujeitos a ciclos de secagem e posterior reumidificação; ciclos estes realizados 5 vezes com os mesmos grãos. Compararam então as taxas de secagem de grãos naturalmente úmidos e reumidificados. O tempo de secagem para trigo e canola não apresentou nenhuma tendência de um ciclo para outro, enquanto para cevada este tempo diminuiu gradualmente. Porém, uma diferença no tempo de secagem ocorreu para secagem de grãos naturalmente úmidos (pós-colheita) e o primeiro ciclo de reumidificação. A conclusão deste trabalho foi que os grãos não perdem sua umidade mais facilmente como um resultado da reumidificação. O que ocorre é uma variação na taxa de secagem entre os grãos pós-colheita e os grãos reaproveitados pela primeira vez.

No presente trabalho foi desenvolvido um método empírico para a reumidificação dos grãos. Este método consiste em espalhar os grãos em uma bancada, previamente coberta por plástico com papel absorvente por cima. Os grãos são distribuídos de um modo que formem uma monocamada. Uma determinada quantidade de água é então

borrifada nos grãos por meio de uma pisseta, aleatoriamente. Enquanto a água é borrifada, os grãos são misturados, visando assim a homogeneização da massa reumidificada. Papel absorvente é deixado em cima dos grãos, visando a absorção do excesso de água superficial. Os grãos são deixados em repouso, à temperatura ambiente por 24 horas.

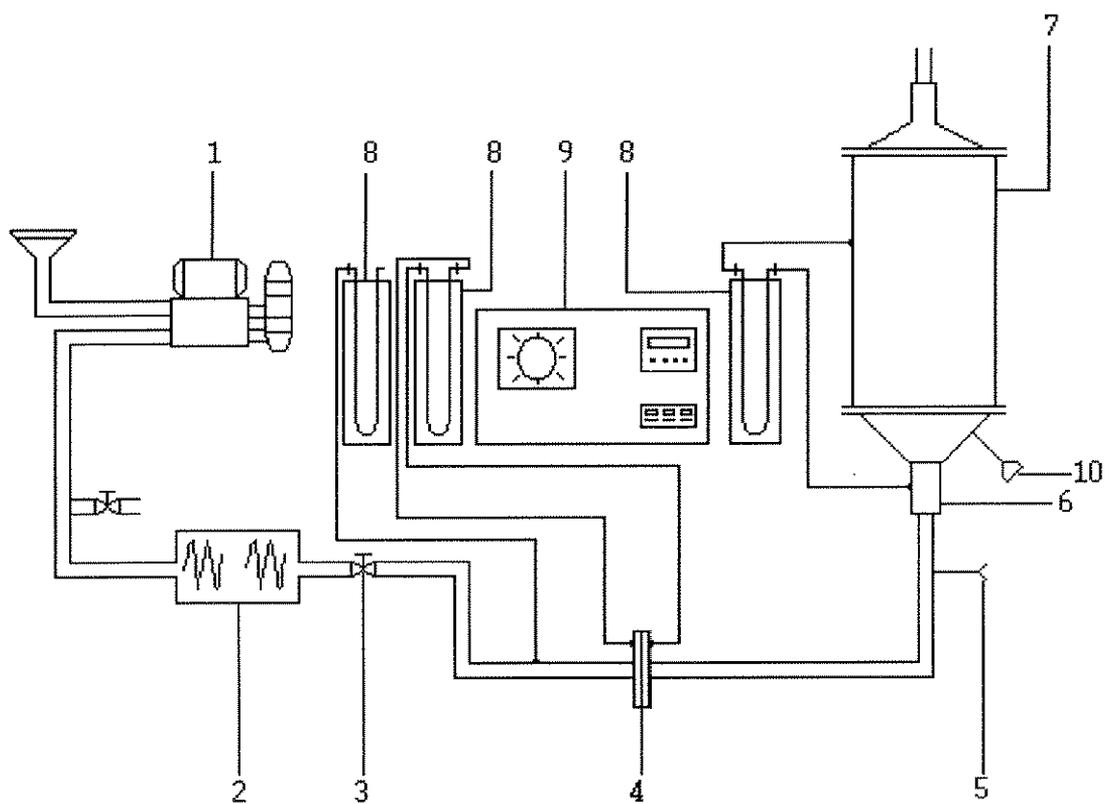
A quantidade de água a ser adicionada foi determinada através de testes de reumidificação, um trabalho extremamente demorado e difícil. O simples cálculo da quantidade de água necessária para elevar a umidade do grão, de seu valor inicial a um valor determinado, não foi suficiente devido à necessidade da água ser absorvida por toda a massa de grãos de uma maneira uniforme.

Outro aspecto importante em relação às características dos grãos é seu histórico no campo. SOKHANSANY, SINGH E WASSERMAN (1984) citam o trabalho de MILNER E SHELLENBERGER (1953), no qual estudos de campo em relação ao efeito das condições climáticas, como chuva e neve, nas características dos grãos foram realizados. Um decréscimo na massa específica de grãos de trigo foi notado, devido ao desenvolvimento de espaços com ar durante a secagem no campo de grãos muito úmidos. Através de fotografias de raio x, fissuras finas foram observadas em grãos secos (naturalmente úmidos e reumidificados). Este maior ou menor número de fissuras pode resultar portanto em uma diferente capacidade de absorção de água, durante a reumidificação, por grãos de mesma variedade.

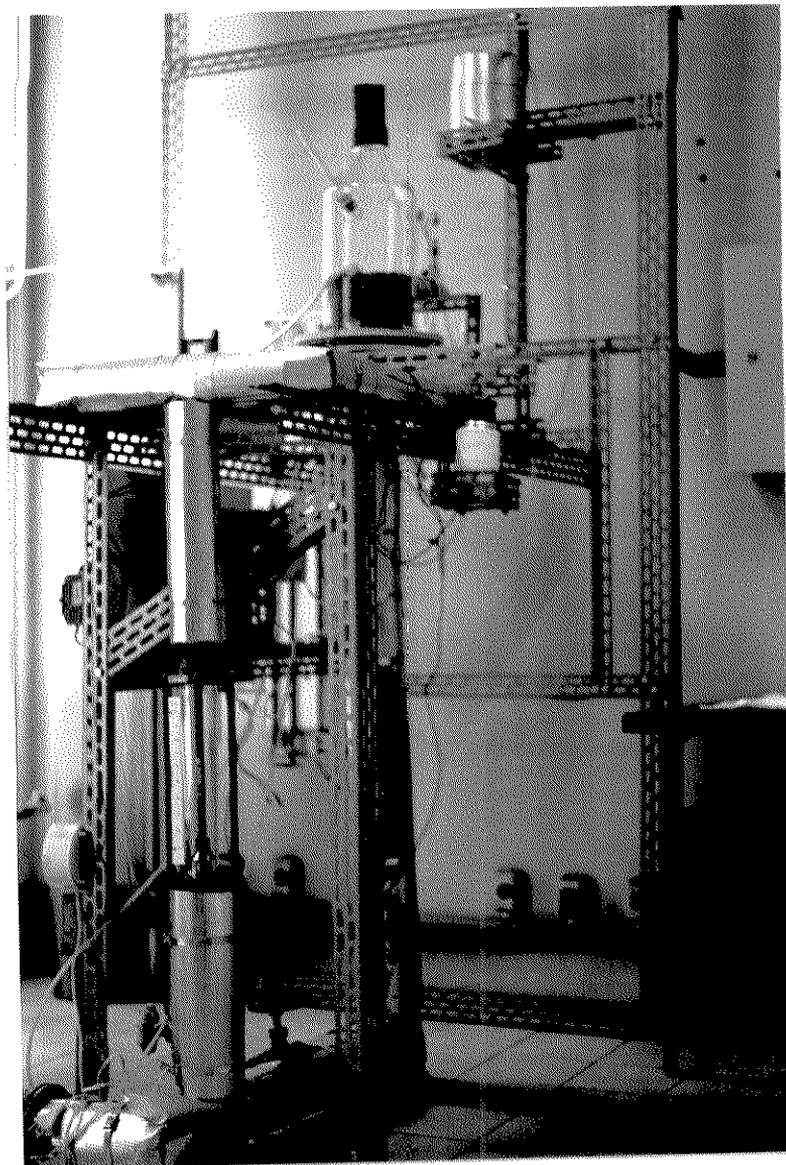
## **3.2 Equipamento Experimental**

### **3.2.1 Sistema de Secagem**

O sistema de secagem é composto basicamente por um compressor radial Ibram, de 7,5 cv de potência, aquecedor elétrico e o leito secador. A linha de alimentação de ar ao leito consiste de uma tubulação em ferro galvanizado, isolada térmicamente por lã de vidro e alumínio corrugado. Medidores de vazão, pressão e temperatura foram acoplados ao sistema, permitindo assim o monitoramento do processo e a obtenção dos dados necessários ao trabalho. As seguintes medidas foram efetuadas no decorrer de cada experimento: temperatura de entrada e saída do ar de secagem, vazão do ar de secagem, queda de pressão no leito, umidade e temperatura das partículas ao longo do tempo de secagem. A figura 3.1 é representativa do esquema do sistema de secagem e a figura 3.2 mostra a montagem experimental.



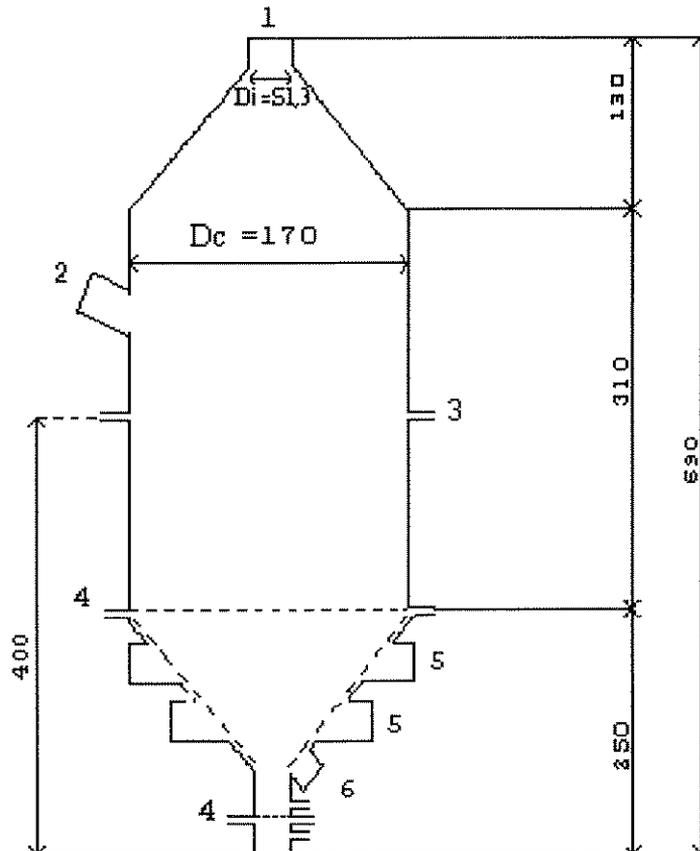
**Figura 3.1.** Sistema de secagem: 1.Compressor 2.Resistências 3.Válvula 4.Placa de orifício 5.Termopar 6. Ar secundário 7.Leito 8.Manômetro 9.Painel 10.Amostrador



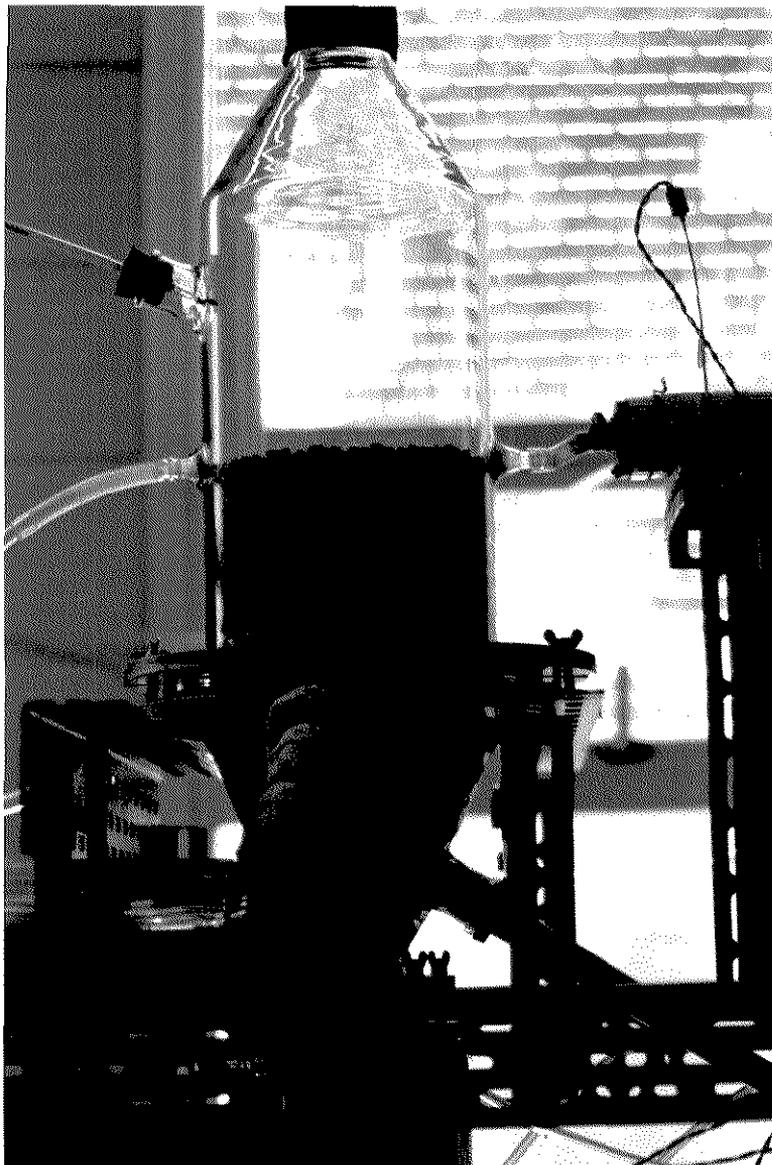
**Figura 3.2 - Montagem experimental**

### 3.2.1.1 O Leito Secador

O leito foi construído em vidro, para que se pudesse visualizar o movimento das partículas, de acordo com projeto mostrado na figura 3.3 (medidas em mm). A figura 3.4 mostra o leito secador.



**Figura 3.3** - Esquema do Leito Secador: 1. Alimentação de grãos 2. Medida de temperatura 3. Medida de pressão 4. Flange 5. Entrada do ar secundário 6. Amostragem

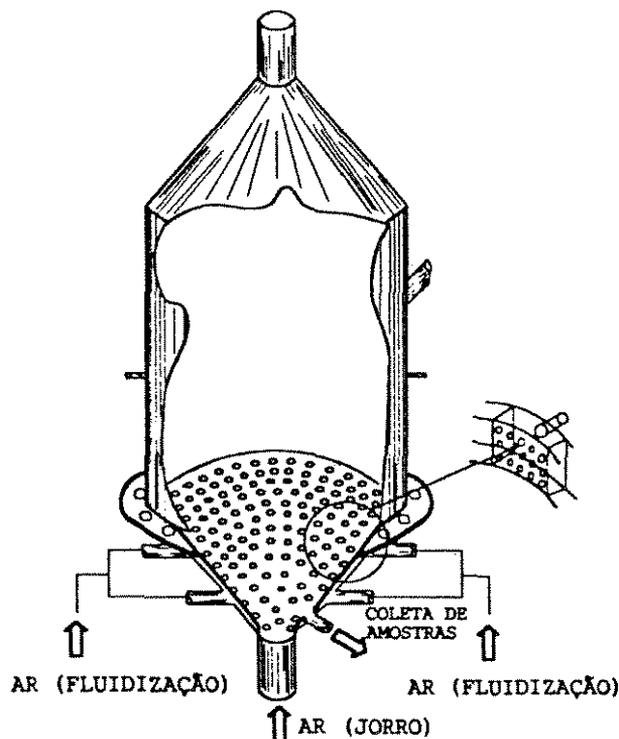


**Figura 3.4 - Leito secador**

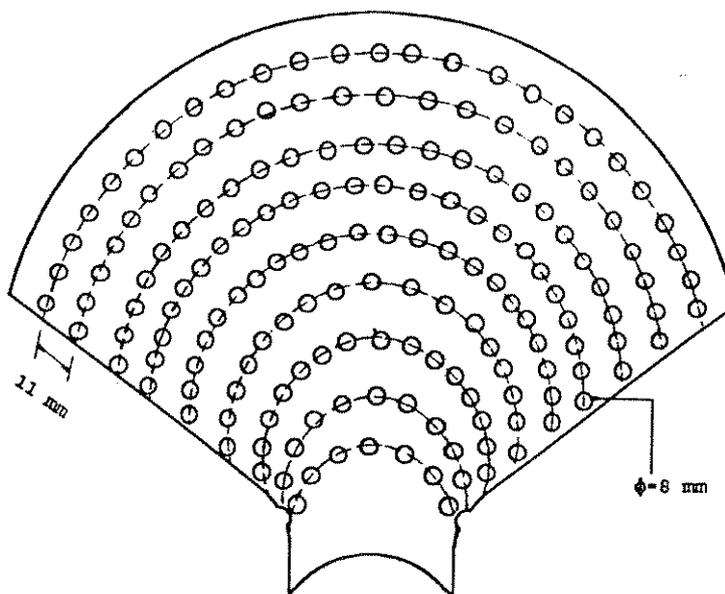
O leito é cilíndrico, com a base inferior cônica. Há um distribuidor de ar à entrada da base cônica, que consiste de um feixe cilíndrico de mangueiras de borracha, com uma tela de aço inox em sua parte superior. Apesar deste sistema aumentar a perda de carga no leito, ele é de fundamental importância, pois proporciona um fluxo de ar uniforme, atenuando a formação de canais preferenciais, e impede que os grãos entupam as mangueiras.

O leito foi projetado de forma que pudesse ser utilizado como leito de jorro, leito de jorro fluidizado, leito fixo e leito fluidizado, sendo que neste trabalho os três primeiros tipos foram utilizados.

Para que o leito tenha esta versatilidade, foi acoplada ao leito uma base cônica, provida de um distribuidor de ar secundário, por onde o ar é fornecido para obtenção do regime de jorro fluidizado. Este distribuidor consiste de uma camisa na parte interior do cone, perfurada ao longo de sua altura, com os furos distribuídos de maneira equidistante. A figura 3.5 mostra o detalhamento da parte cônica do leito e a figura 3.6 o detalhamento do distribuidor de ar secundário.



**Figura 3.5** - Detalhamento da parte cônica do leito



**Figura 3.6** - Detalhamento do distribuidor de ar secundário

O regime de jorro é obtido através do corte de ar secundário (controlado por uma válvula gaveta), utilizando-se apenas a vazão de ar principal (controlada por uma válvula globo).

Ainda, através da introdução de um distribuidor de ar na flange entre a base cônica e o corpo cilíndrico do leito, realizando-se a secagem apenas na parte cilíndrica, é possível operar-se em leito fixo ou fluidizado. Devido às características do grão, a secagem só pode ser realizada em leito fixo, sendo o distribuidor de ar uma tela de aço inox com mesmo diâmetro que a coluna cilíndrica.

### 3.2.2 Medidas Experimentais

#### Amostragem dos grãos

A temperatura e a umidade do grão ao longo do tempo de secagem foram obtidas por amostragem. Nos leitos de jorro e jorro fluidizado a amostragem foi feita por meio de um tubo de PVC, com uma cavidade na parte superior de seu comprimento, introduzido através de um orifício na base cônica. A massa de grãos a ser amostrada era função do tempo de permanência do tubo no interior do leito. No caso do leito fixo o amostrador consistia de um copo cilíndrico, construído em PVC, com altura igual a 40 mm e diâmetro de 32 mm, preso a uma haste de alumínio de 600 mm de altura, com capacidade para aproximadamente 10 g de feijão.

Foram retiradas 19 amostras durante cada experimento, ao longo de 150 minutos, tempo em que os grãos atingiam aproximadamente 12% b.s., umidade ideal para armazenamento. Os tempos (min) em que foram retiradas as amostras foram: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 37, 44, 52, 60, 70, 80, 90, 102, 114, 126, 138, 150.

#### Temperatura do grão

A amostra retirada foi diretamente colocada em um calorímetro para a determinação de sua temperatura.

O calorímetro se constitui de uma garrafa térmica de 175 mm de altura, com um termopar Cu-Ct introduzido no centro de sua tampa. Uma limitação do sistema amostragem/calorímetro, para jorro e jorro fluidizado, é a dificuldade em se amostrar sempre a mesma quantidade de grãos. Este é um fato bastante importante, pois como se trata da temperatura da mistura, uma maior ou menor massa de grãos resulta em uma temperatura maior ou menor do 'grão'.

Além da análise acima descrita (temperatura do grão x tempo de secagem), um mapeamento da temperatura do grão no secador em leito fixo foi realizado para 3 experimentos. Isto foi possível utilizando-se um termopar digital tipo espeto, com haste de 500 mm, medindo-se as temperaturas, em intervalos de 10 minutos, na posição central

( $r=0$ ) e na camada de grãos mais próxima à parede do leito ( $r=R$ ), para altura igual a  $H$  e  $H/2$ .

### Umidade do grão

A umidade do grão foi determinada pelo método de permanência em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  até peso constante. A amostra utilizada para determinação da umidade foi a mesma para determinação da temperatura do grão.

Testes preliminares mostraram que a partir de 72 h em estufa à temperatura acima, a variação da massa das amostras não era mais significativa. Este foi o tempo então padronizado como o tempo necessário para atingir-se peso constante.

O cálculo da umidade foi feito a partir das seguintes definições:

$$\text{Umidade em base úmida (\% b. u.)} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de matéria seca} + \text{massa de água}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Umidade em base seca (\% b. s.)} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de matéria seca}} \times 100 \quad (3.2)$$

A massa dos cadinhos vazios foi obtida após permanência em estufa durante 24 h e no dessecador por 1 h.

Durante o experimento, após a retirada das amostras, os cadinhos com os grãos ainda úmidos foram também deixados no dessecador, por aproximadamente 1 h, para então determinar-se sua massa.

O mesmo procedimento foi realizado quando os cadinhos com os grãos secos foram retirados da estufa.

Os cadinhos foram pesados em balança analítica digital.

Queda de pressão no leito

Foi obtida através de manômetro diferencial de tubo em U, utilizando-se água como fluido manométrico.

Temperatura do ar

A temperatura do ar à entrada do leito foi obtida por termopar Cu-Ct e à saída do leito por termômetro de mercúrio

Vazão de ar principal

A vazão de ar principal foi determinada através de uma placa de orifício em aço inox, com borda esquadrihada e tomada de pressão de canto, confeccionada segundo norma DIN, instalada na linha à saída do compressor.

A equação da placa foi obtida por rotina desenvolvida por OWER E PANKHURST (1977), baseada na equação de Bernoulli. A equação original apresenta a seguinte forma:

$$Q = K\varepsilon\alpha a_2 \sqrt{\left[ \frac{1}{1-m^2} (h_1 - h_2) \frac{b}{k1 + T_{a1}} \right]} \quad (3.3)$$

com Q em kg/min,

sendo:

$\varepsilon$  = fator de compressibilidade

$\alpha$  = coeficiente de descarga

$a_2$  = área do orifício (cm<sup>2</sup>)

m = área do orifício / área da tubulação

$T_{a1}$  = temperatura do ar na tubulação antes do orifício

$h_1 - h_2$  = variação de pressão na placa (cm de H<sub>2</sub>O)

b = altura barométrica

Se  $[t] = ^\circ\text{C}$  e  $[b] = \text{mmHg}$ :  $K=0,0573$  e  $k_1=273,0$ ;

Se  $h_1$ , pressão estática antes do orifício, for mais que 20  $\text{cmH}_2\text{O}$  acima ou abaixo da pressão atmosférica,  $b$  deve ser aumentado ou diminuído pelo equivalente de  $h_1$  em  $\text{mmHg}$ .

Portanto foi necessário o conhecimento da pressão estática e da variação de pressão na placa, obtidas então por manômetro diferencial de tubo em U, utilizando-se água como fluido manométrico.

#### Vazão de ar secundário

Determinada por rotâmetro Omel, sendo que a vazão secundária corresponde a uma fração da vazão principal medida pela placa de orifício.

### 3.3 Variáveis do Processo

Analisou-se a influência das seguintes variáveis: temperatura do ar de secagem, umidade inicial dos sólidos, carga de sólidos no processo de secagem. Estas variáveis foram estudadas em dois níveis e os experimentos foram realizados com todas as combinações possíveis destas, de acordo com planejamento fatorial de experimentos. Para cada um dos leitos foram realizados 8 experimentos com o feijão reumidificado. Além destes também foram realizados experimentos com feijão pós-colheita, obtidos diretamente do produtor, com teor de umidade natural em 21% b.s.. Porém devido à dificuldade de se conseguir uma grande quantidade e à problemas de armazenamento destes grãos úmidos, optou-se pela realização de apenas alguns experimentos com feijão pós-colheita, que foram realizados no leito de jorro e no leito de jorro fluidizado.

Para a carga de sólidos os valores estabelecidos para os experimentos foram 1500 g e 3000 g. Estas limitações foram devidas aos leitos de jorro e jorro fluidizado. O valor inferior foi determinado de modo que o feijão ocupasse a parte cilíndrica do leito, pois para cargas inferiores a 1500 g a secagem ocorreria em leito de jorro (ou jorro fluidizado) cônico. O valor superior foi fixado no valor correspondente à altura máxima de jorro estável, de modo que não houvesse oscilações nem a formação de 'slugging'. No que se refere à umidade inicial do produto, os valores escolhidos ficaram em 20% e 30% (b.s.). A escolha desses valores se deve ao teor de umidade do feijão pós-colheita em épocas de seca e em épocas de chuvas constantes (SHAN-HUA (1989)).

Os valores da temperatura de entrada do ar de secagem foram escolhidos de acordo com as limitações do equipamento. Para a faixa de vazões utilizadas, a temperatura do ar atinge cerca de 70°C, sem utilizar aquecimento elétrico, apenas pela compressão. Assim, ficou estabelecido o limite inferior de 73 °C e o superior de 83 °C. Esta análise permite identificar a influência da temperatura no processo de secagem, embora para um processo real estes valores sejam excessivamente elevados.

As vazões utilizadas foram, no caso do jorro, ligeiramente superiores às vazões de jorro mínimo, apenas para manutenção do jorro estável; para jorro fluidizado, ao atingir-se a vazão de jorro mínimo, fornecia-se um fluxo de ar secundário, controlado de forma a

manter a altura da fonte estável (altura máxima de jorro estável) enquanto no leito fixo trabalhou-se nas vazões ligeiramente inferiores às vazões de mínima fluidização.

Ao final de cada experimento foi analisada a qualidade do produto, em relação ao trincamento e à abertura dos grãos e encolhimento. Esta análise preliminar foi realizada qualitativamente, apenas por observação visual.

### **3.4 Análise Sensorial**

Já foi comentado que as temperaturas do ar de secagem utilizadas neste trabalho foram superiores à recomendada pela literatura para secagem de feijão, quando utilizado como alimento: os grãos devem atingir a temperatura máxima de 45°C, enquanto neste trabalho a secagem foi realizada a 73°C (temperatura dos grãos em torno de 60°C) e a 83°C (grãos a aproximadamente 70°C).

Optou-se, então, pela verificação dos efeitos que estas temperaturas causaram nos grãos em relação ao seu potencial de consumo.

Com este objetivo, um teste sensorial de aceitação foi realizado em conjunto com o Laboratório de Análise Sensorial - Departamento de Planejamento Alimentar e Nutrição - da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP.

O teste de aceitação foi o escolhido, por se tratar de um método relativamente simples e que ao mesmo tempo possibilita detectar possíveis alterações no nível de aceitação do produto junto ao mercado consumidor.

Três amostras foram preparadas: feijão semente (controle), no caso amostra 1, feijão reumidificado e seco a 73°C, amostra 2 e feijão reumidificado e seco a 83°C, amostra 3. Os experimentos de secagem escolhidos, para realização dos testes de análise sensorial, foram os realizados em leito fixo, com umidade inicial de 20% b.s. e carga de 3000 g. Esta escolha foi devida ao fato de que a secagem em leito fixo ocorre de maneira heterogênea, sendo as camadas inferiores de grãos aquelas que atingem maiores temperaturas, tendo assim uma maior proporção de grãos mais 'secos'. Como a temperatura obtida é um valor médio, esta é praticamente igual às atingidas nos leitos de

jorro e jorro fluidizado, porém uma diferença superior de 2 a 3°C se observou em algumas medidas.

As amostras foram preparadas de forma padronizada: 200 g de feijão foram macerados em água durante 17 h antes do cozimento, na relação 1:5 em massa de grão/massa de água. Imediatamente antes de se iniciar o cozimento em panela de pressão, 200 g suplementares de água foram adicionados aos grãos. Após cozido, o feijão foi temperado com Tempero para Feijão Knorr e deixado por 15 minutos, com mais 150 g de água quente, em fogo baixo sob pressão atmosférica. Os feijões reumidificados e secos foram submetidos a um tempo superior de cozimento, previamente determinado através de testes: 55 minutos para o feijão semente, 63 minutos para o feijão reumidificado e seco a 73 °C e 80 minutos para o feijão reumidificado e seco a 83°C. Para o último, uma maior quantidade de água foi adicionada junto com o tempero (450 g) para formação do caldo.

As três amostras foram servidas de forma monádica a 30 provadores (usuais consumidores de feijão), segundo desenho experimental de blocos completos casualizados. Cada amostra (5 grãos com um pouco de caldo) foi servida em béquer de 50 ml, codificado com número de 3 dígitos, junto com uma colher de inox. Os provadores foram solicitados a avaliar as amostras em cabines individuais, utilizando uma escala hedônica estruturada de 9 pontos, conforme mostrado na figura A1 do Apêndice A. (MEILGAARD , CIVILLE E CARR (1987)).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Obtenção dos dados experimentais - Planejamento Fatorial

Para a aquisição dos dados experimentais optou-se por utilizar um planejamento experimental, com o objetivo de analisar as influências das variáveis do processo na resposta final.

O planejamento fatorial foi o método escolhido, o qual segundo BOX, HUNTER E HUNTER (1978) consiste na realização de experimentos com todas as combinações possíveis dos valores das variáveis. Neste trabalho utilizou-se um planejamento fatorial a dois níveis, isto é, cada variável foi utilizada em dois valores, um chamado nível superior (+) e outro nível inferior (-). Este método fornece resultados que permitem avaliar a influência das variáveis e suas interações na resposta. Os autores salientam que esta é uma técnica mais eficaz que o método univariado, no qual uma variável é mantida em determinado valor enquanto as outras são alteradas, assumindo desta forma que o máximo valor de uma variável é independente do nível da outra, levando muitas vezes à conclusões não fundamentadas.

As variáveis do processo foram a temperatura do ar de secagem, a umidade inicial do grão e a carga de sólidos, que analisadas em dois níveis resultaram em 8 experimentos. Os experimentos foram igualmente realizados nos três leitos e são especificados na tabela 4.1. Experimentos realizados no secador de leito fixo são indicados pela letra F, no leito de jorro por J e no leito de jorro fluidizado por JF.

**Tabela 4.1 - Especificação dos experimentos**

<b>Experimento</b>	<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	<b>U<sub>o</sub> (%b.s.)</b>	<b>M (g)</b>
F1, J1, JF1	73	20	1500
F2, J2, JF2	83	20	1500
F3, J3, JF3	73	30	1500
F4, J4, JF4	83	30	1500
F5, J5, JF5	73	20	3000
F6, J6, JF6	83	20	3000
F7, J7, JF7	73	30	3000
F8, J8, JF8	83	30	3000

Os resultados dos experimentos foram então analisados através de gráficos e dos resultados do planejamento fatorial. A relação umidade final do grão pela umidade inicial,  $U_f/U_o$ , foi a variável considerada como resposta para o planejamento fatorial.

As tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 fornecem os resultados das umidades finais para os experimentos realizados respectivamente em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado.

**Tabela 4.2 - Umidade final do grão - Leito Fixo**

<b>Experimento</b>	<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	<b>U<sub>o</sub> (%b.s.)</b>	<b>M (g)</b>	<b>U<sub>f</sub> (%b.s.)</b>	<b>U<sub>f</sub>/U<sub>o</sub></b>
F1	72,72	18,74	1500,0	10,04	0,54
F2	83,57	21,53	1500,0	9,27	0,43
F3	72,56	27,97	1500,0	12,50	0,45
F4	82,53	30,76	1500,0	9,86	0,32
F5	73,20	19,94	3000,0	10,87	0,55
F6	82,79	20,98	3000,0	9,68	0,46
F7	72,41	32,77	3000,0	12,58	0,38
F8	82,78	32,35	3000,0	10,43	0,32

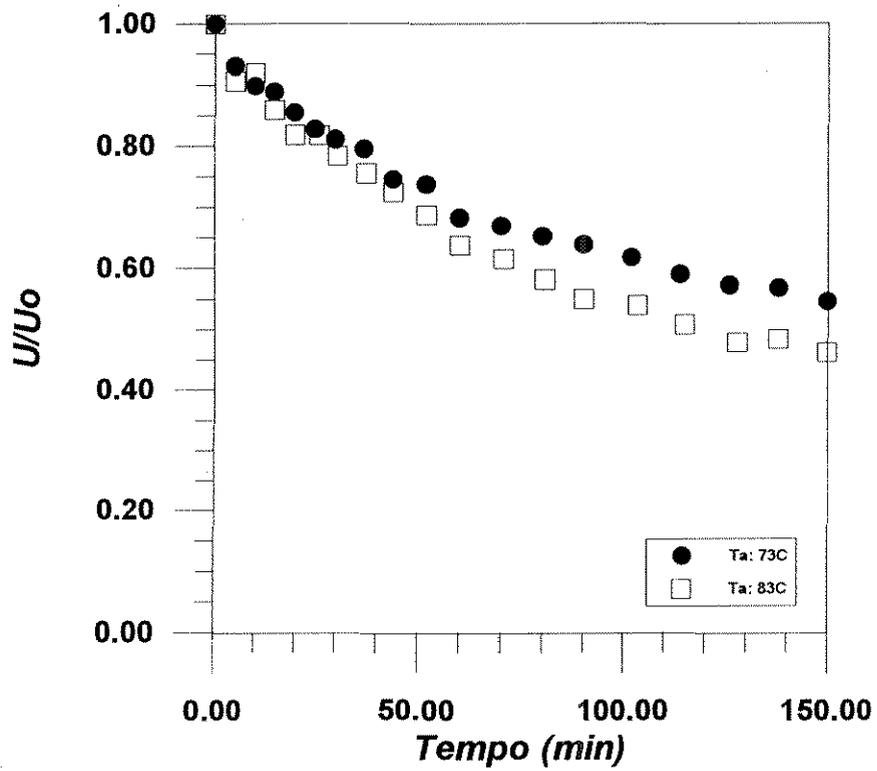
**Tabela 4.3 - Umidade final do grão - Leito de Jorro**

<b>Experimento</b>	<b>T<sub>a</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>U<sub>o</sub></b> <b>(%b.s.)</b>	<b>M</b> <b>(g)</b>	<b>U<sub>f</sub></b> <b>(%b.s.)</b>	<b>U<sub>f</sub>/U<sub>o</sub></b>
J1	72,39	21,40	1500,0	11,90	0,56
J2	82,55	20,30	1500,0	9,30	0,46
J3	73,31	28,44	1500,0	13,48	0,47
J4	83,34	29,69	1500,0	10,26	0,35
J5	73,01	21,19	3000,0	12,26	0,58
J6	82,77	20,77	3000,0	9,49	0,46
J7	73,37	28,89	3000,0	14,66	0,51
J8	82,55	30,68	3000,0	11,08	0,36

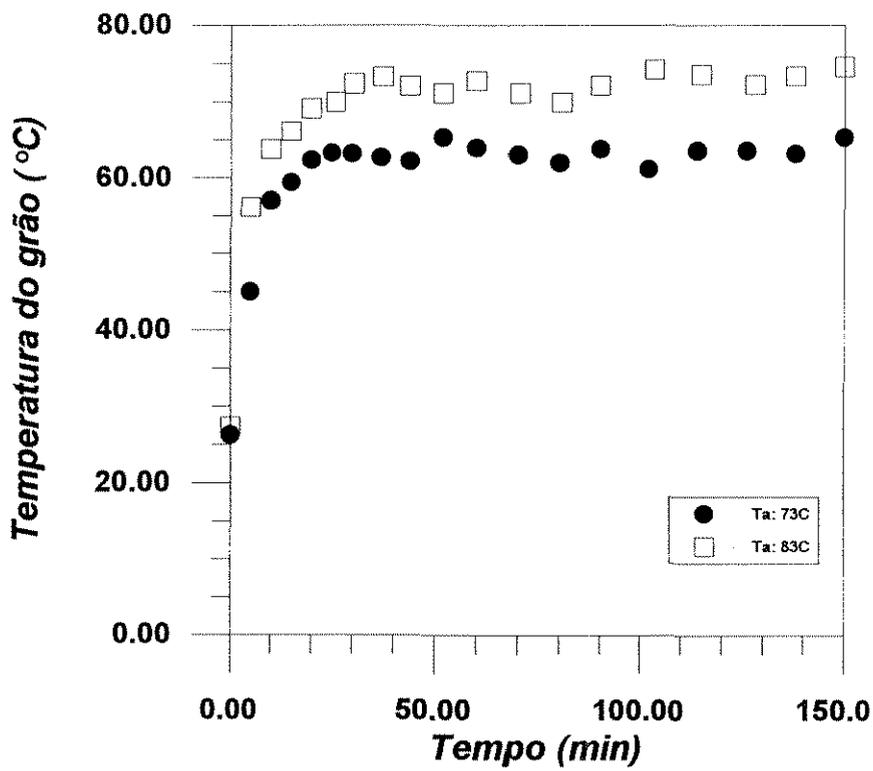
**Tabela 4.4 - Umidade final do grão - Leito de Jorro Fluidizado**

<b>Experimento</b>	<b>T<sub>a</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>U<sub>o</sub></b> <b>(%b.s.)</b>	<b>M</b> <b>(g)</b>	<b>U<sub>f</sub></b> <b>(%b.s.)</b>	<b>U<sub>f</sub>/U<sub>o</sub></b>
JF1	72,73	21,71	1500,0	12,35	0,57
JF2	82,77	22,13	1500,0	10,89	0,49
JF3	73,53	31,71	1500,0	12,89	0,41
JF4	82,56	32,40	1500,0	11,67	0,36
JF5	73,29	20,52	3000,0	12,15	0,59
JF6	82,75	19,51	3000,0	9,59	0,49
JF7	72,90	28,82	3000,0	13,64	0,47
JF8	82,82	28,47	3000,0	10,15	0,36

As figuras 4.1a, 4.2a e 4.3a representam a influência da temperatura do ar na umidade final do grão e as figuras 4.1b, 4.2b e 4.3b, a influência na temperatura do grão para os leitos fixo, de jorro e de jorro fluidizado respectivamente. Pode-se notar uma grande influência desta variável fazendo com que a secagem ocorra mais rapidamente para temperaturas do ar mais elevadas e, como é esperado, um maior aquecimento do grão nas operações realizadas a temperaturas superiores é observado. Ocorrem temperaturas mais elevadas dos grãos no secador de leito fixo, para as mesmas condições de operação que no leito de jorro e no jorro fluidizado, fato que pode ser explicado pela distribuição do ar: os grãos ficam suportados no distribuidor de ar de forma que o ar passa através de todo o leito, enquanto no jorro e no jorro fluidizado aproximadamente 80% da vazão de ar de entrada passa pela região central, diluída, denominada de jorro. Os sólidos que estiverem nessa região é que serão responsáveis pela transferência de calor por condução aos demais, na região anular.



(a)

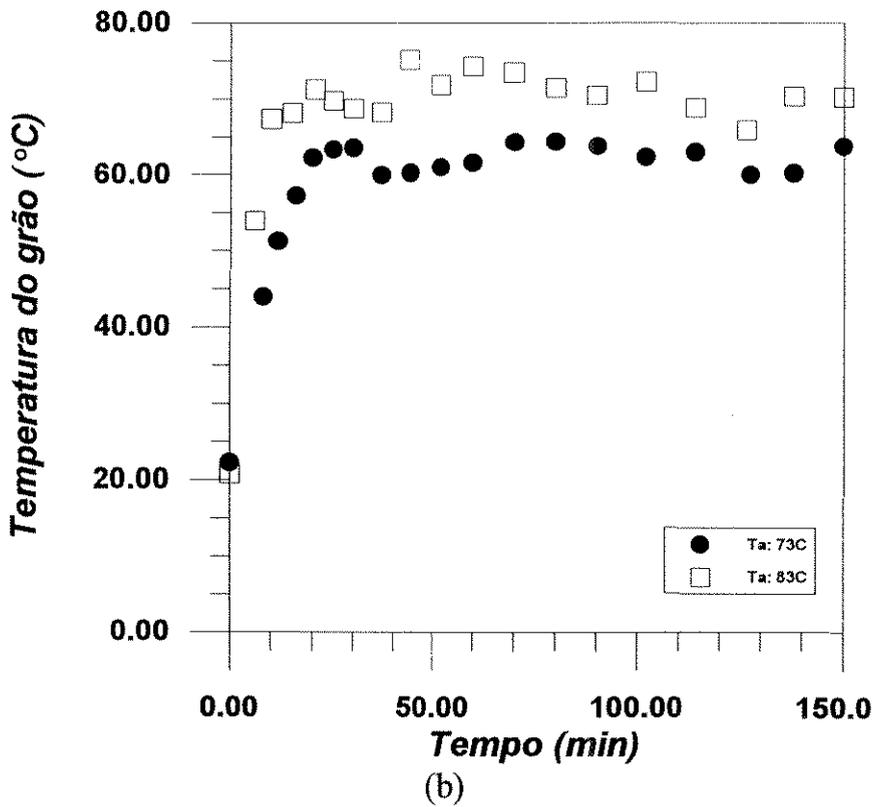
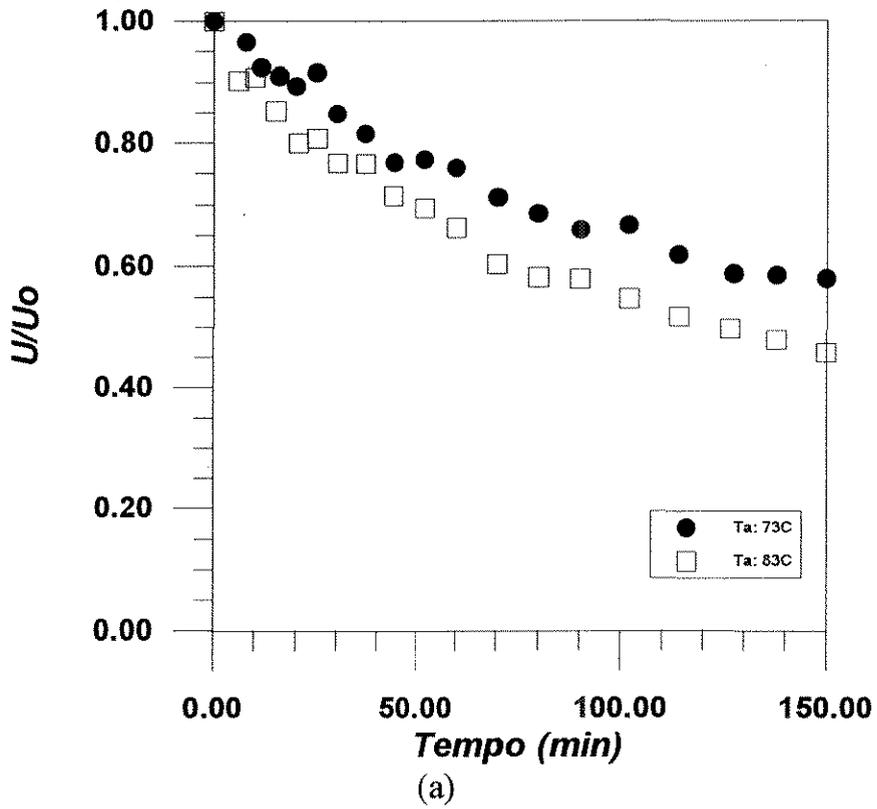


(b)

**Figura 4.1 - Influência da temperatura do ar**

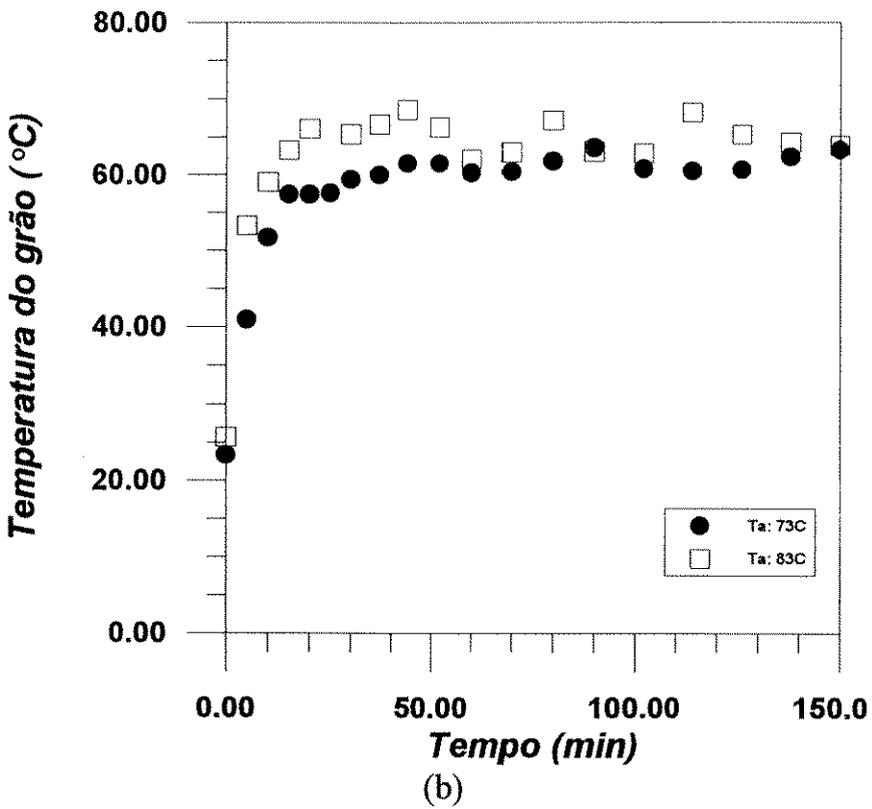
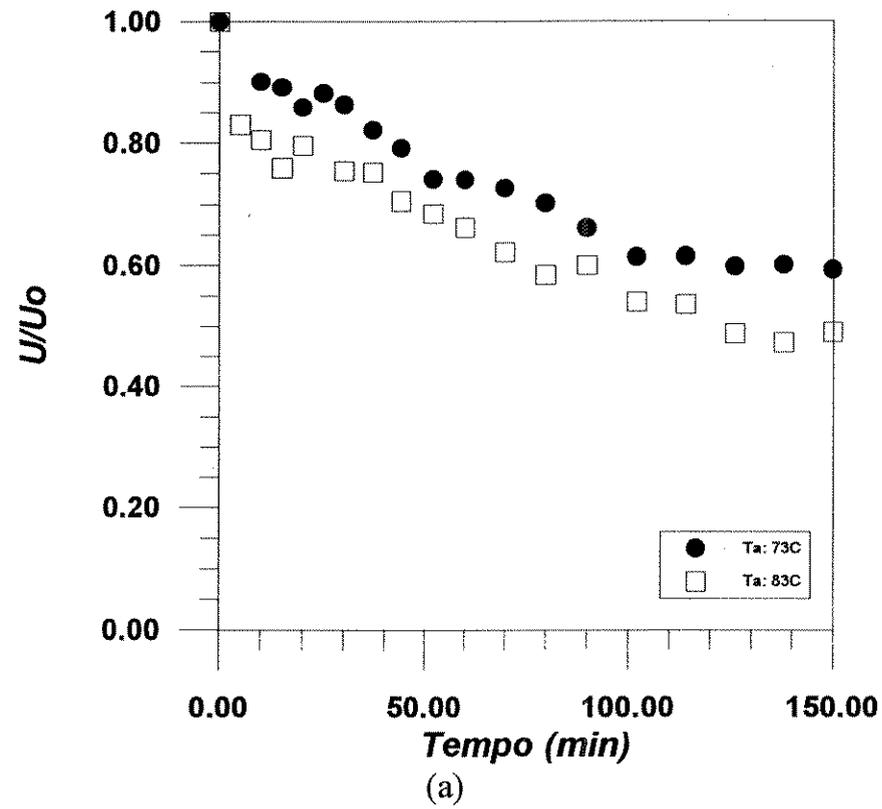
Leito Fixo - M: 3000 g  $U_o$ : 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura 4.2** - Influência da temperatura do ar  
Leito de Jorro - M: 3000 g U<sub>o</sub>: 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura 4.3 -** Influência da temperatura do ar  
 Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g U<sub>o</sub>: 20% b.s.  
 (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

A análise das figuras 4.4, 4.5 e 4.6 permite concluir a respeito da influência da umidade inicial do grão no processo de secagem em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. Através das figuras 4.4a, 4.5a e 4.6a fica evidente que para diferentes umidades iniciais a secagem é mais rápida quanto maior for o teor de umidade do grão (para mesmas temperaturas do ar e cargas de sólidos). Isto porque há um maior gradiente de concentração para a transferência de massa da água. Em relação ao aquecimento dos grãos, diferentes teores de umidade não resultam em mudanças significativas de temperatura (figuras 4.4b, 4.5b e 4.6b).

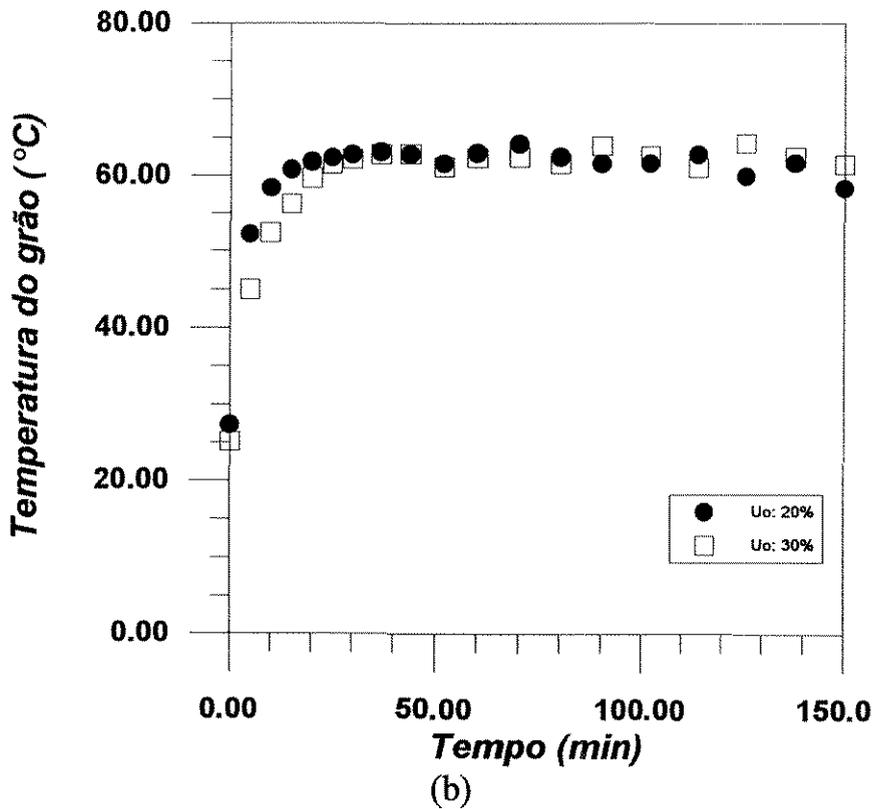
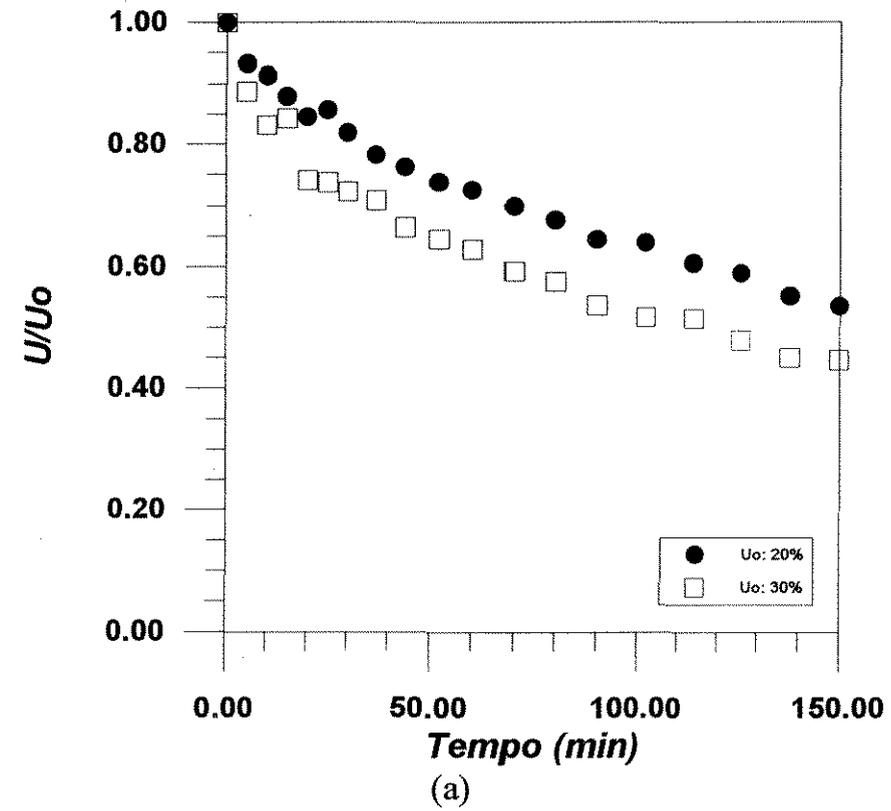
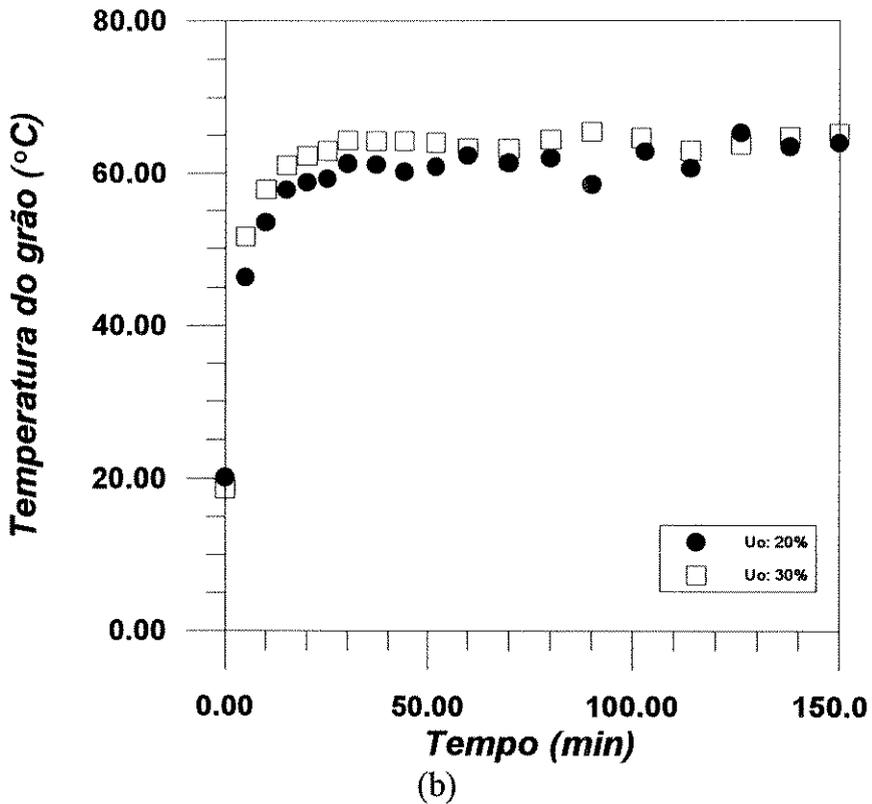
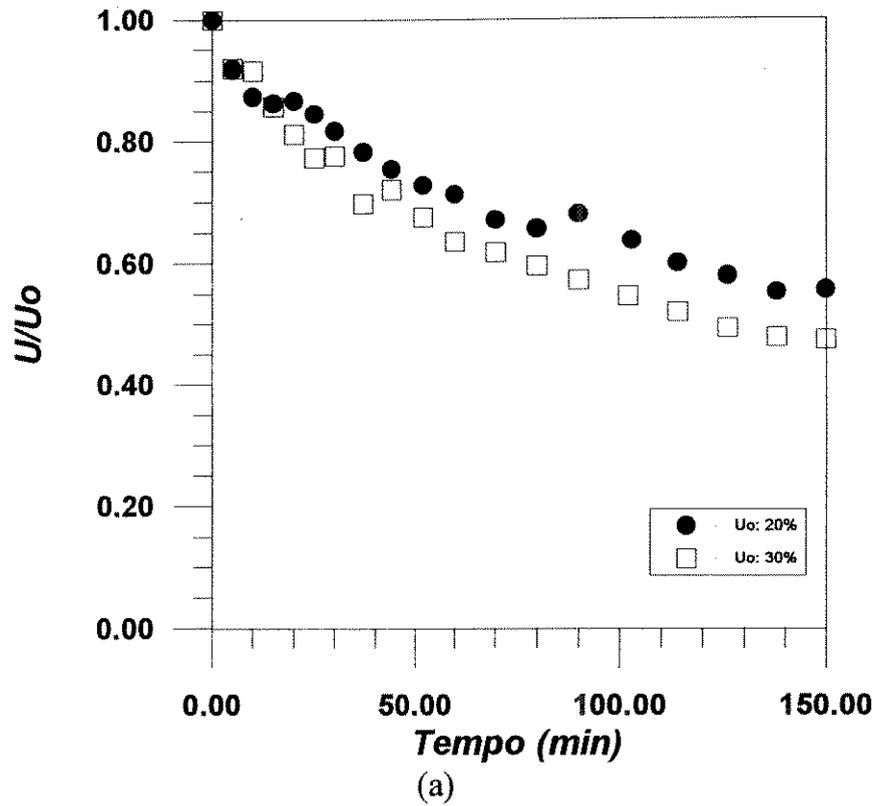


Figura 4.4 - Influência da umidade inicial do grão

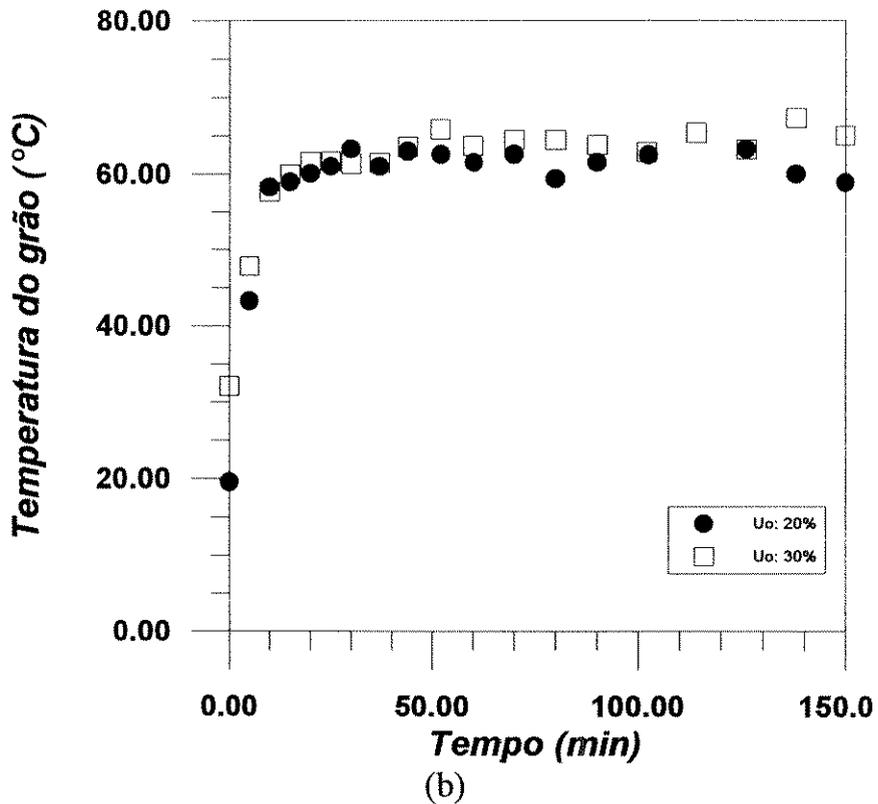
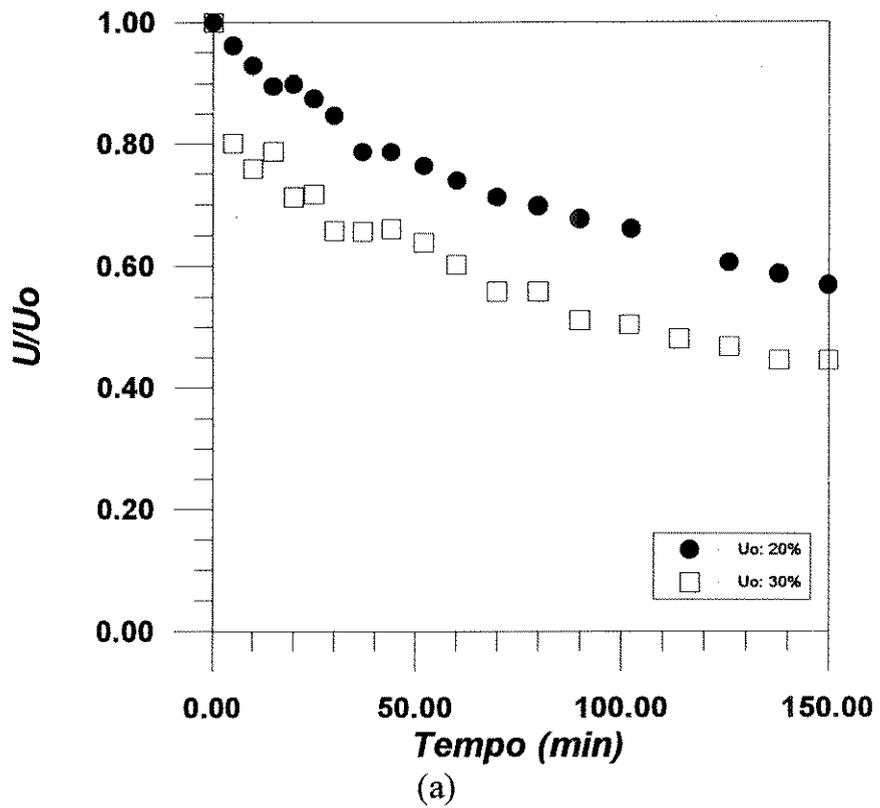
Leito Fixo - M: 1500 g  $T_a$ : 73°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura 4.5 - Influência da umidade inicial do grão**  
 Leito de Jorro - M: 1500 g  $T_a$ : 73°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

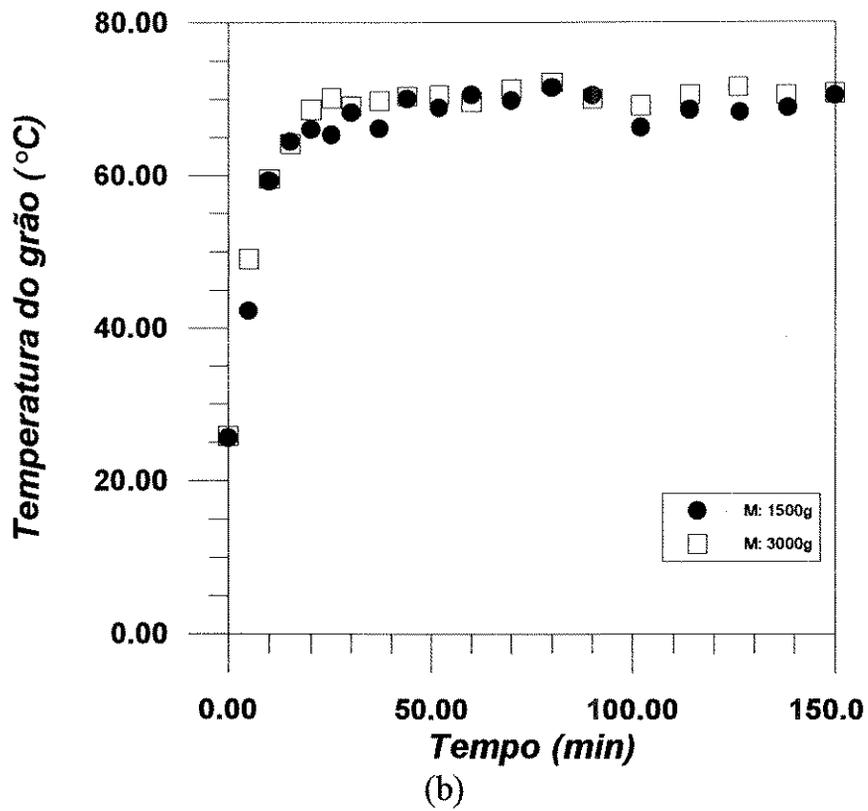
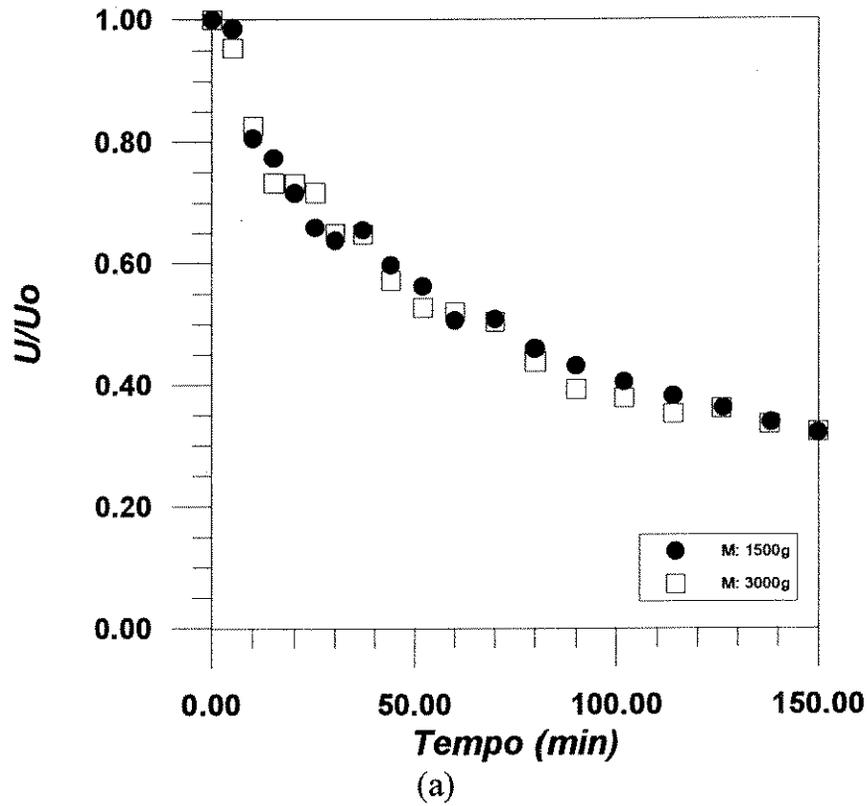


**Figura 4.6 - Influência da umidade inicial do grão**

Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g  $T_a$ : 73  $^{\circ}\text{C}$

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

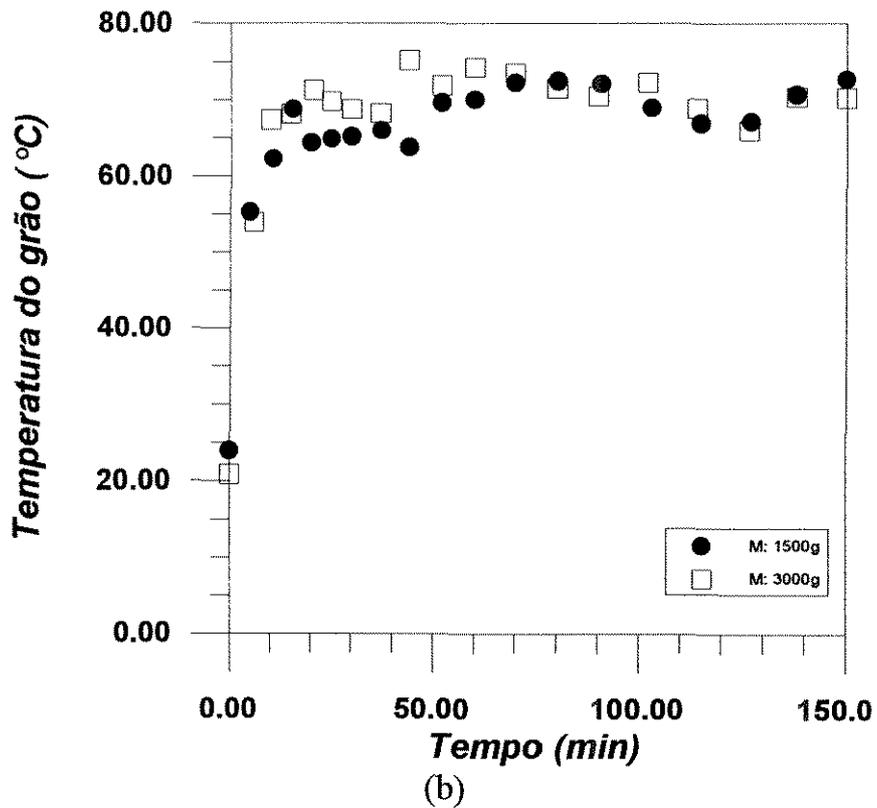
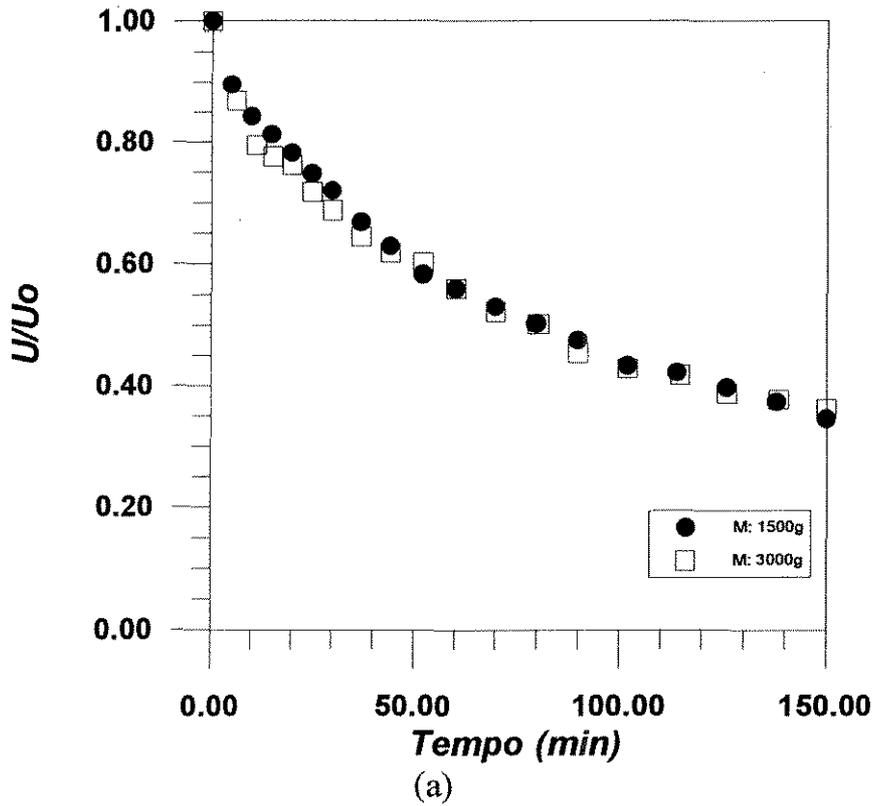
As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 se referem à análise da influência da carga de sólidos na secagem nos diferentes leitos estudados, fixo, jorro e jorro fluidizado, respectivamente. Como pode se notar nas figuras 4.7a, 4.8a e 4.9a não houve influência da carga no processo. Apesar de se utilizar vazões diferentes para diferentes cargas, elas não apresentaram influências pois no leito de jorro e leito de jorro fluidizado utilizou-se vazões ligeiramente superiores às vazões de jorro mínimo, enquanto no leito fixo as vazões foram inferiores às de mínima fluidização. Com relação ao aquecimento dos sólidos, no leito fixo (figura 4.7b) e no leito de jorro fluidizado (figura 4.9b) as curvas temperatura do grão versus tempo são coincidentes, enquanto no leito de jorro (figura 4.8b) a operação realizada com carga de 3000 g resultou em um maior aquecimento do grão. Este fato é pouco relevante, uma vez que as diferenças são muito pequenas e os demais experimentos forneceram gráficos onde as curvas da evolução da temperatura do grão para diferentes cargas são coincidentes.



**Figura 4.7 - Influência da carga de sólidos**

Leito Fixo -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 30% b.s.

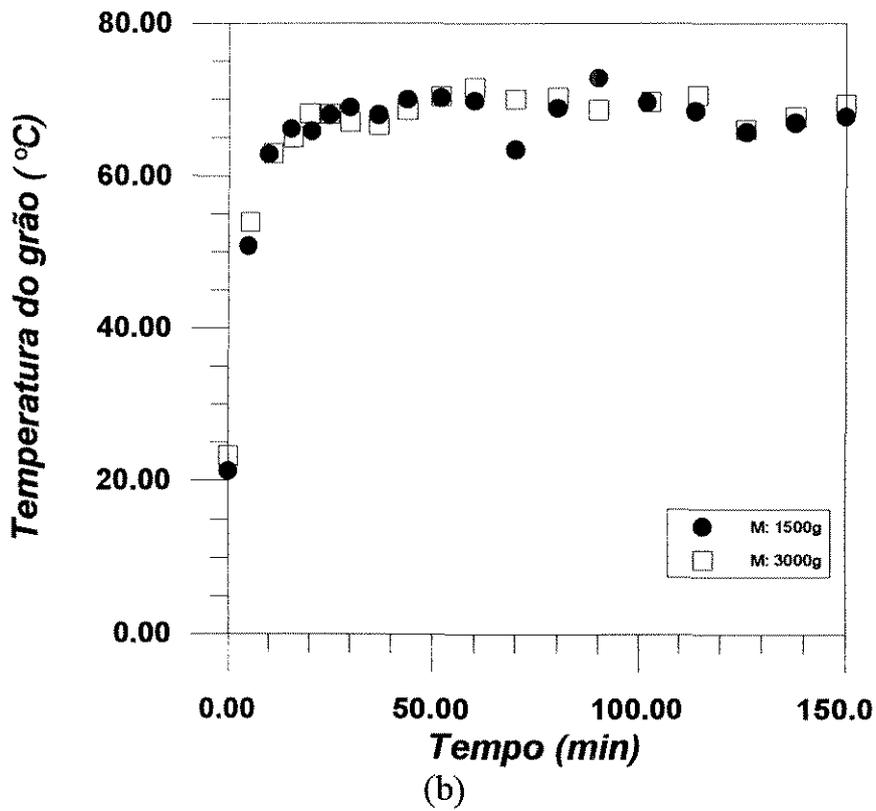
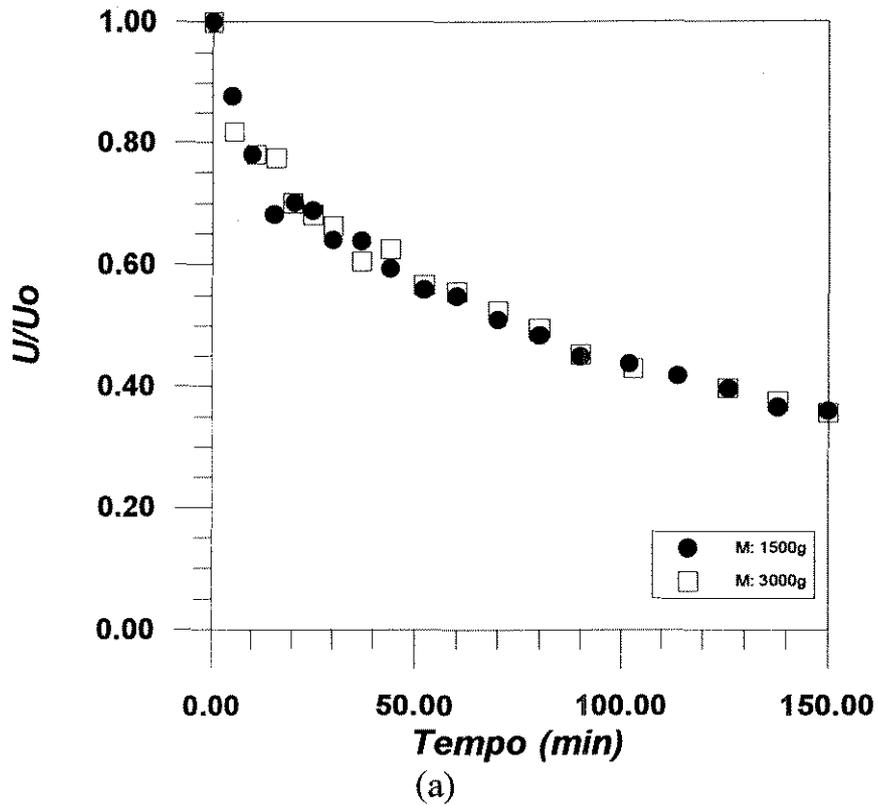
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura 4.8 - Influência da carga de sólidos**

Leito de Jorro -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura 4.9 - Influência da carga de sólidos**

Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

Os demais resultados das influências das variáveis são apresentados no Apêndice B.

As influências das variáveis: temperatura do ar de secagem, umidade inicial dos sólidos e carga de sólidos no processo de secagem de feijão nos três leitos podem ser avaliadas em conjunto, utilizando os resultados do planejamento fatorial.

Como resposta às modificações nos valores das variáveis (níveis superior e inferior) obteve-se diferentes relações umidade final/umidade inicial do grão, em um mesmo tempo de secagem de 150 minutos. As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 fornecem os resultados dos efeitos das variáveis e suas interações na resposta final. Os efeitos significativos, determinados a partir do teste estatístico 't' com 95% de confiança, foram confrontados com a qualidade da modelagem empírica, fornecida pelo planejamento fatorial quando se utilizava tais efeitos, além é claro do cuidado em se utilizar as duas ferramentas ao mesmo tempo: planejamento fatorial e análise dos gráficos obtidos, figuras 4.1 a 4.9. Assim, os efeitos realmente significativos foram a umidade inicial do sólido e a temperatura do ar de secagem. Para umidades iniciais mais elevadas, maior foi a quantidade de água retirada, com seu valor inicial no nível superior (30%) causando uma redução na relação  $U_f/U_o$  em 0,13 no caso do leito fixo, 0,09 no leito de jorro e 0,14 no leito de jorro fluidizado; em relação à temperatura do ar de secagem, seu valor superior causou a redução da relação  $U_f/U_o$  em 0,10 no leito fixo, em 0,12 no leito de jorro e 0,09 no leito de jorro fluidizado. Os valores médios da relação  $U_f/U_o$  foram 0,43 no leito fixo, 0,47 no leito de jorro e 0,47 no leito de jorro fluidizado. Esta é uma informação que indica que, em média, os leitos de jorro e jorro fluidizado proporcionaram a redução de 53% da umidade inicial do grão e o leito fixo, 57%. Não se notou efeitos de interação entre as variáveis.

**Tabela 4.5-** Efeitos das variáveis e suas interações

Leito Fixo

$\bar{U}_f/\bar{U}_o$	0,43
$T_a$	-0,10
$U_o$	-0,13
$T_a U_o$	0,003
$M$	0,008
$T_a M$	0,02
$U_o M$	-0,03
$T_a U_o M$	0,01

**Tabela 4.6 -** Efeitos das variáveis e suas interações

Leito de Jorro

$\bar{U}_f/\bar{U}_o$	0,47
$T_a$	-0,12
$U_o$	-0,09
$T_a U_o$	-0,01
$M$	0,02
$T_a M$	-0,01
$U_o M$	0,008
$T_a U_o M$	-0,003

**Tabela 4.7 -** Efeitos das variáveis e suas interações

Leito de Jorro Fluidizado

$\bar{U}_f/\bar{U}_o$	0,47
$T_a$	-0,09
$U_o$	-0,14
$T_a U_o$	0,005
$M$	0,02
$T_a M$	-0,02
$U_o M$	0,01
$T_a U_o M$	-0,01

sendo  $T_a$ : temperatura do ar de secagem,  $U_o$ : umidade inicial dos grãos,  $M$ : carga de sólidos e  $\bar{U}_f/\bar{U}_o$  a relação média da umidade final/umidade inicial.

O planejamento fatorial forneceu a partir dos efeitos calculados uma modelagem empírica, que relaciona a resposta do processo com as variáveis analisadas. No caso dos leitos fixo, de jorro e de jorro fluidizado, os modelos obtidos foram:

#### Secador de leito fixo

$$\frac{U_f}{U_o} = 0,43 - 0,049.T_a - 0,064 U_o \quad (4.1)$$

#### Secador de leito de jorro

$$\frac{U_f}{U_o} = 0,47 - 0,061.T_a - 0,046 U_o \quad (4.2)$$

#### Secador de leito de jorro fluidizado

$$\frac{U_f}{U_o} = 0,47 - 0,043.T_a - 0,068 U_o \quad (4.3)$$

## 4.2 Influência da reumidificação

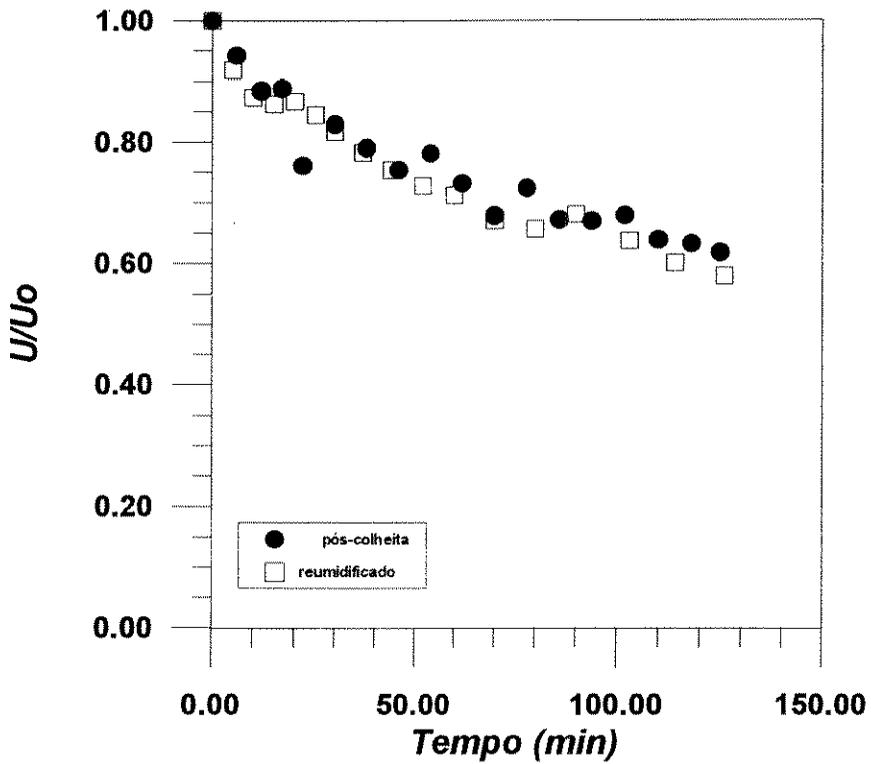
Uma análise foi realizada com o objetivo de comparar a secagem dos grãos reumidificados com aquela realizada com grãos contendo um teor de umidade natural. Para isto utilizou-se grãos vindos diretamente do campo, não submetidos à secagem de forma alguma, da mesma variedade e com mesma procedência que os grãos reumidificados utilizados nos experimentos.

Os experimentos foram realizados em leito de jorro e leito de jorro fluidizado e são especificados na tabela 4.8. A umidade inicial dos grãos se encontrava em torno de 21% b.s..

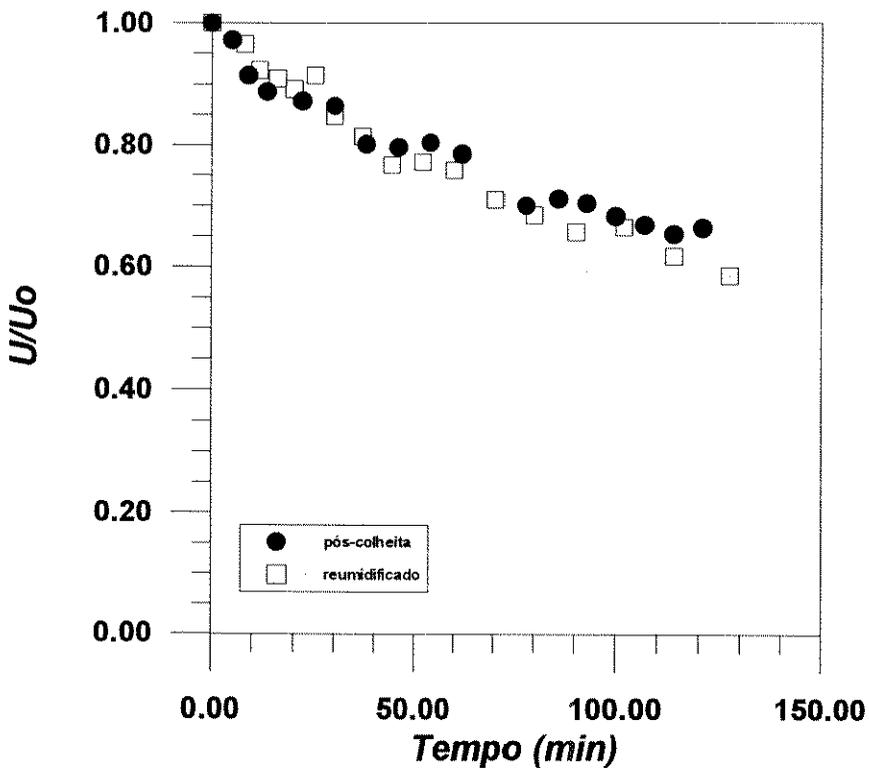
**Tabela 4.8** - Experimentos realizados com feijão pós-colheita

Experimento	T <sub>a</sub> (°C)	M (g)
JC1, JFC1	70	1500
JC2, JFC2	70	1500
JC3	80	3000
JC4	80	3000

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam a comparação entre os experimentos realizados com feijão reumidificado e feijão pós-colheita, no leito de jorro, a 73/70°C (pós-colheita) e 1500 g e 3000 g respectivamente. Pode se observar que nestes experimentos não são notadas diferenças no processo de secagem.

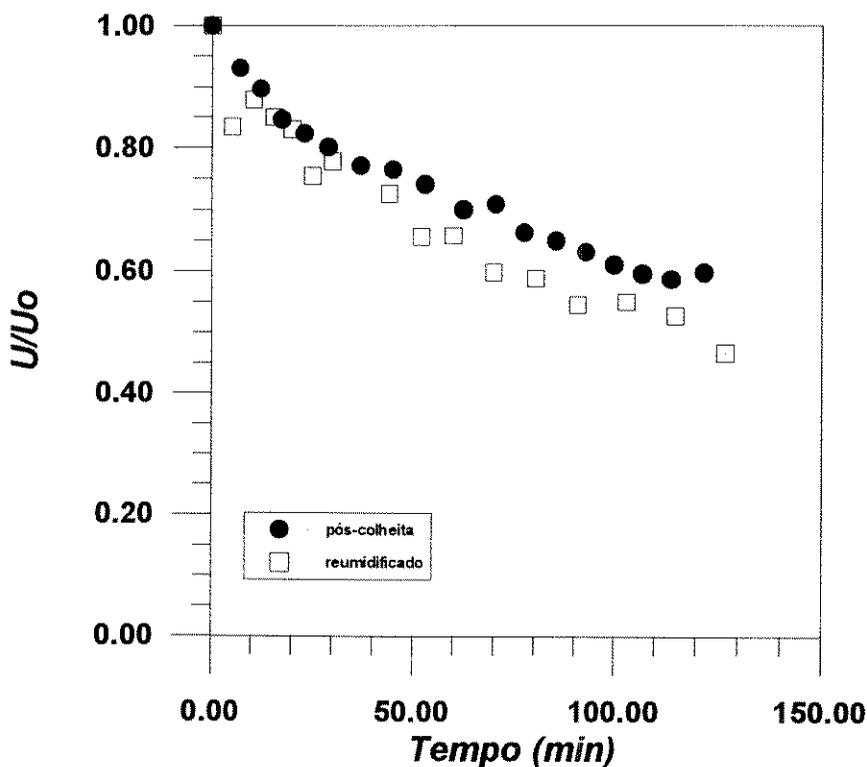


**Figura 4.10** - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo  
 Leito de Jorro -  $T_a$ : 70 °C(pós-colheita)/ 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g



**Figura 4.11** - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo  
 Leito de Jorro -  $T_a$ : 70 °C(pós-colheita)/ 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g

As figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 são representativas da comparação entre a secagem dos grãos naturalmente úmidos e reumidificados. O que se observa nestas figuras são diferenças entre a secagem do feijão pós-colheita e o reumidificado, levando à conclusão de que nestes experimentos não se conseguiu reproduzir exatamente os ciclos que ocorrem na natureza: chuvas e secas. É notável que no início da operação o comportamento é muito semelhante, podendo-se concluir que foi difícil a reprodução das condições nas quais a água se encontra mais fortemente ligada. Entretanto, o comportamento das curvas de secagem, apresentando apenas o período a taxa decrescente é o mesmo nos 2 casos: secagem de feijão reumidificado e pós-colheita.



**Figura 4.12** - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo  
 Leito de Jorro -  $T_a$ : 80(pós-colheita)/83°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g

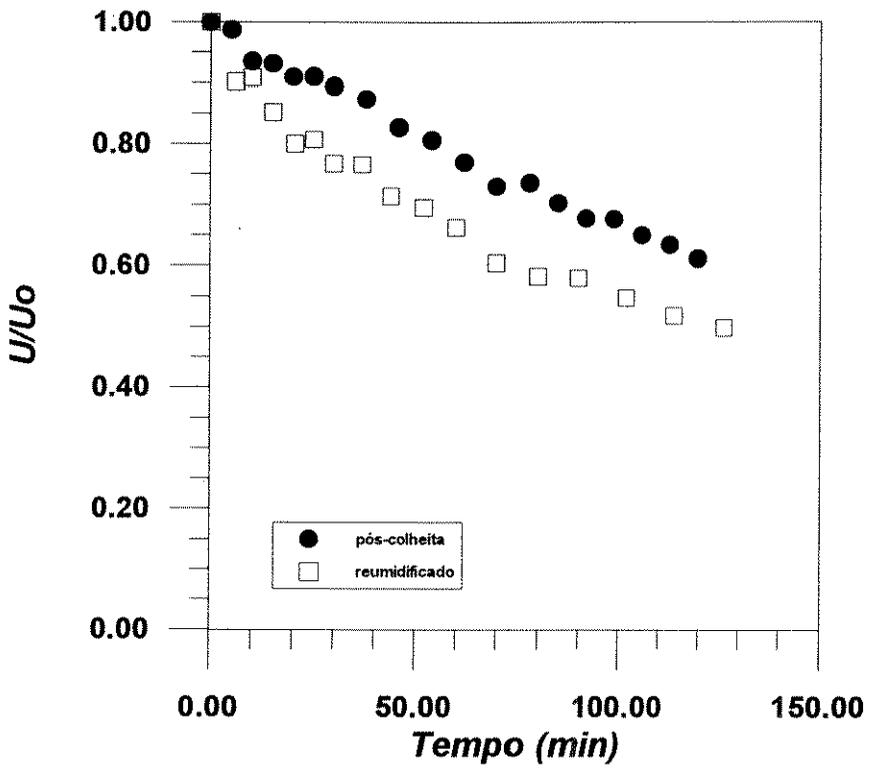


Figura 4.13 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo  
 Leito de Jorro  $T_a: 80(\text{pós-colheita})/83^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s. M: 3000 g

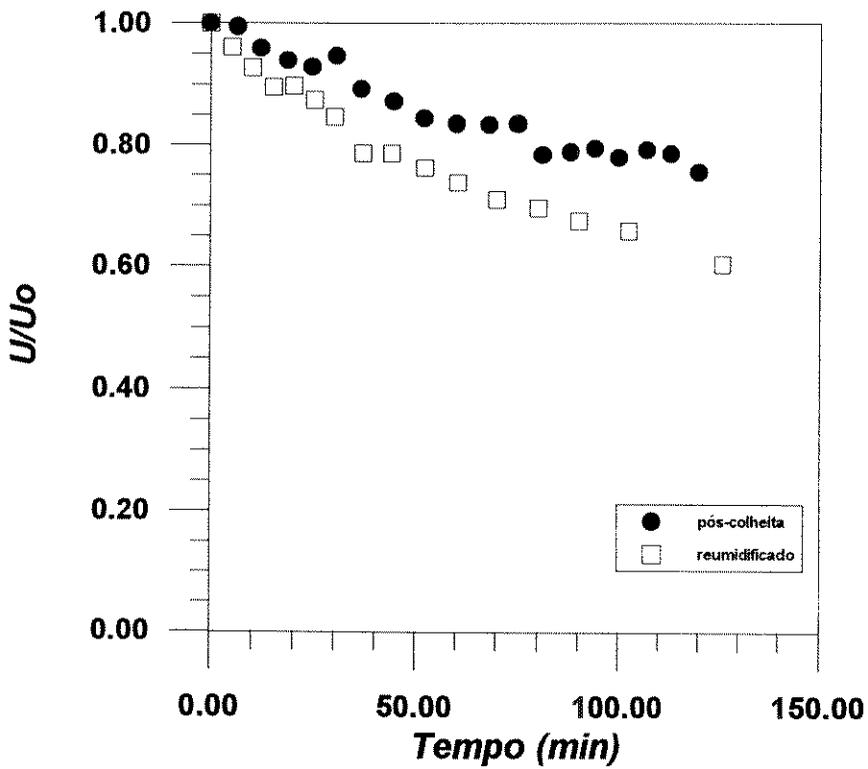
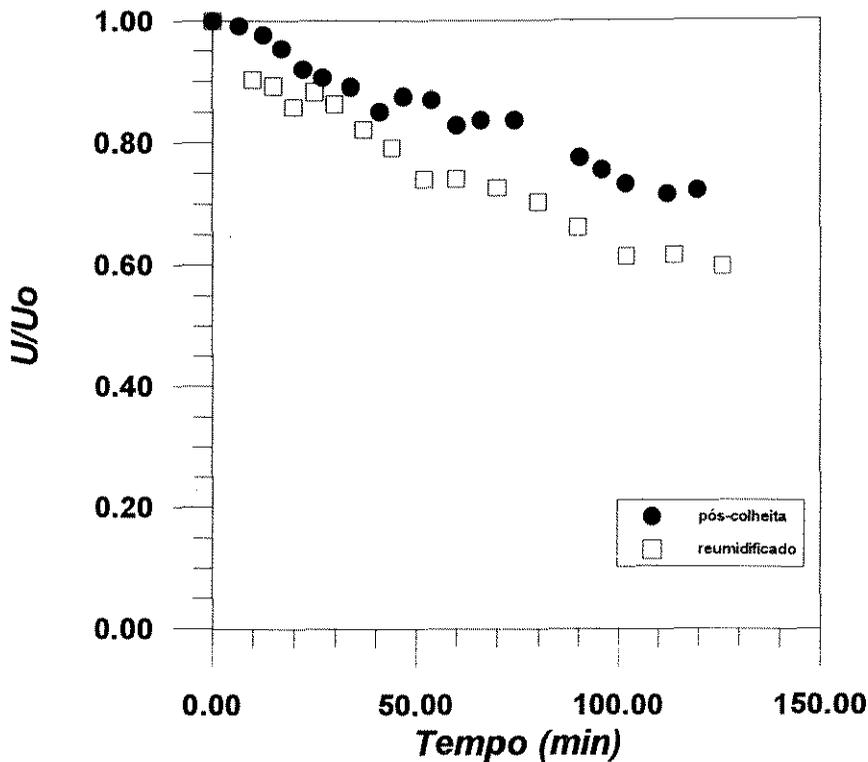


Figura 4.14 - Influência da reumidificação- Umidade do grão em função do tempo  
 Leito de Jorro Fluidizado  $T_a: 70(\text{pós-colheita})/73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  M: 1500 g



**Figura 4.15** - Influência da reumidificação - Umidade do grão em função do tempo  
Leito de Jorro Fluidizado  $T_a: 70(\text{pós-colheita})/73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$   $M: 3000\text{ g}$

### 4.3 Influência da retirada de amostras no processo de secagem

Para a análise da secagem foram retiradas amostras durante os experimentos, visando a determinação das curvas de secagem, da taxa de secagem e da variação da temperatura do grão. Buscando uma boa representatividade do experimento, foram retiradas 19 amostras ao longo dos 150 minutos de secagem, cada amostra contendo em torno de 20 g de feijão. Desta forma, no final dos experimentos havia cerca de 75% da carga inicial de sólidos no caso de 1500 g e aproximadamente 90% do valor inicial nas operações realizadas com 3000 g.

Como uma das variáveis estudadas foi a carga de sólidos, houve a preocupação em analisar se esta retirada de massa ao longo do experimento teve influência ou não na umidade final dos grãos. Optou-se então pela realização de experimentos sem retirada de amostras, nos quais eram obtidos apenas os dados iniciais e finais de umidade e

temperatura do grão. Assim foi possível verificar o efeito das cargas de 1500 e 3000 g e comparar a resposta com aquela obtida da realização dos experimentos usuais.

Os experimentos foram realizados nos três leitos, com cargas de 1500 e 3000 g, e são apresentados na tabela 4.9. A denominação SA significa sem amostragem.

**Tabela 4.9** - Experimentos realizados sem amostragem

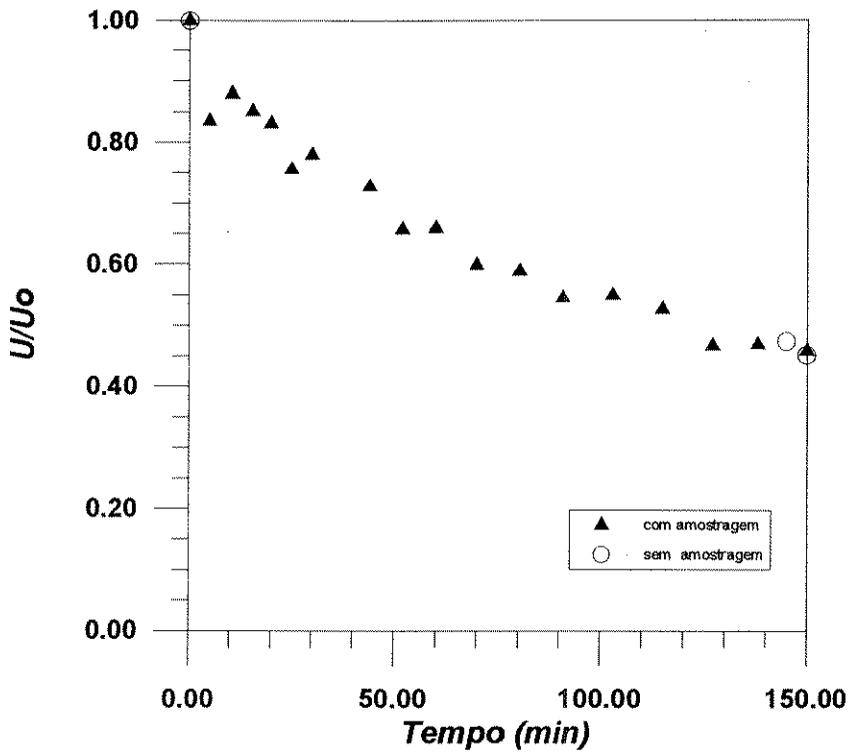
Experimento	$T_a$ (°C)	$U_o$ (%b.s.)	M (g)
FSA2, JSA2, JFSA2	83	20	1500
FSA6, JSA6, JFSA6	83	20	3000

A tabela 4.10 mostra a relação entre a umidade final e a umidade inicial do grão para os experimentos realizados com amostragem e sem amostragem. Os experimentos realizados com retirada de amostras apresentam as mesmas condições de processo que os da tabela acima: temperatura do ar, umidade inicial dos grãos e carga de sólidos e foram especificados na tabela 4.1.

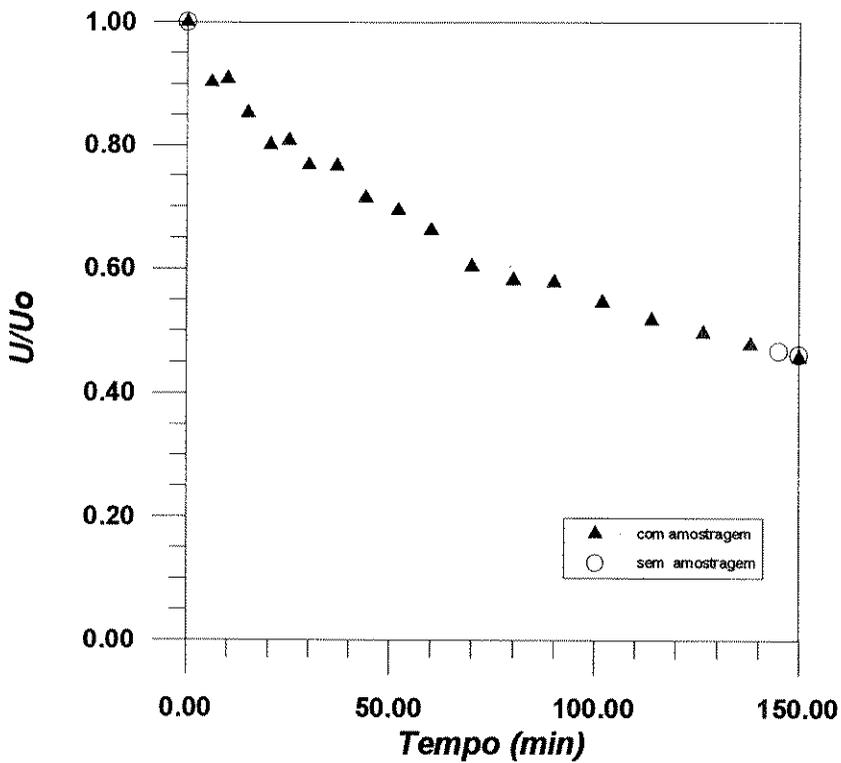
**Tabela 4.10** - Relação  $U_f/U_o$  para os experimentos realizados com e sem amostragem

Experimento	$U_f/U_o$		
	F	J	JF
2	0,43	0,46	0,50
SA2	0,42	0,45	0,49
6	0,46	0,46	0,49
SA6	0,42	0,46	0,49

Os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 fornecem os resultados da análise sobre a influência da retirada de amostras para leite de jorro com cargas de 1500 g e 3000 g respectivamente. Os demais resultados são apresentados no Apêndice C.



**Figura 4.16-** Influência da retirada de amostras  
 Leito de Jorro -  $T_a$ : 83°C -  $U_o$ : 20% b.s - M: 1500 g  
 Umidade do grão em função do tempo



**Figura 4.17-** Influência da retirada de amostras  
 Leito de Jorro -  $T_a$ : 83 °C -  $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g  
 Umidade do grão em função do tempo

#### 4.4 Variação da temperatura dos grãos no secador de leito fixo

É conhecido o fato do leito fixo ser um equipamento muito utilizado para a secagem de grãos, porém a secagem em seu interior não ocorre de maneira homogênea, uma vez que a temperatura (e conseqüentemente a umidade) dos grãos é uma função do tempo e da posição em que eles se encontram dentro do secador. Esta variação existe para diferentes posições axiais e também radiais.

Realizou-se um mapeamento da temperatura dos grãos no secador em leito fixo, na posição central ( $r = 0$ ) e na camada de grãos mais próxima da parede do leito ( $r = R$ ), ambas em duas alturas: na superfície do leito ( $z = H$ ) e na metade da região axial ( $z = H/2$ ) para os experimentos realizados sem amostragem :

FSA2: 83°C, 20% b.s., 1500 g

FSA6: 83°C, 20% b.s., 3000 g

FSA5: 73 °C, 20%b.s., 3000 g

O último experimento, FSA5, foi realizado apenas para o mapeamento da temperatura dos grãos, não sendo utilizado para análise da retirada de amostras.

Os resultados são apresentados nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20 para os experimentos FSA2, FSA6 e FSA5 respectivamente. Pode se notar diferenças de até 7°C para mesmos tempos de operação, em determinadas posições. Para leitos operando a cargas superiores espera-se que estas diferenças sejam mais acentuadas.

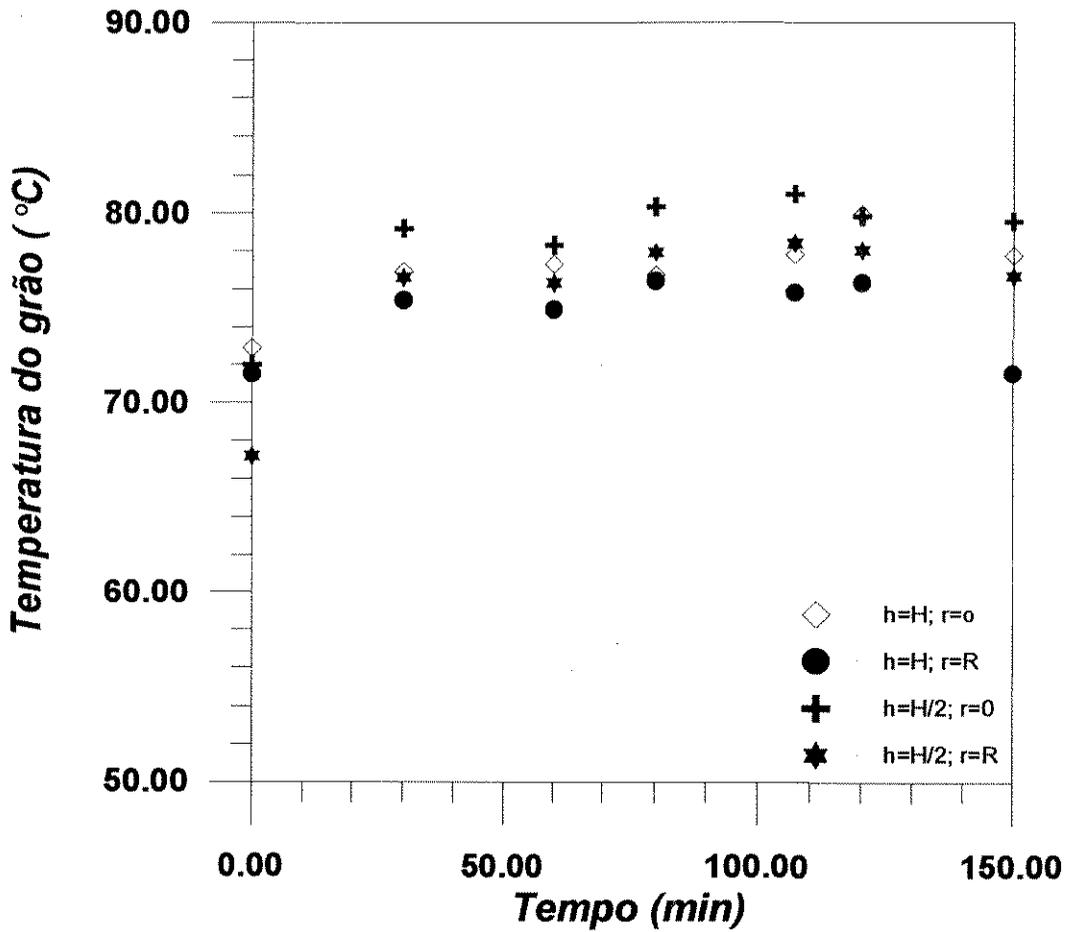


Figura 4.18 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador  
 Leito Fixo -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g

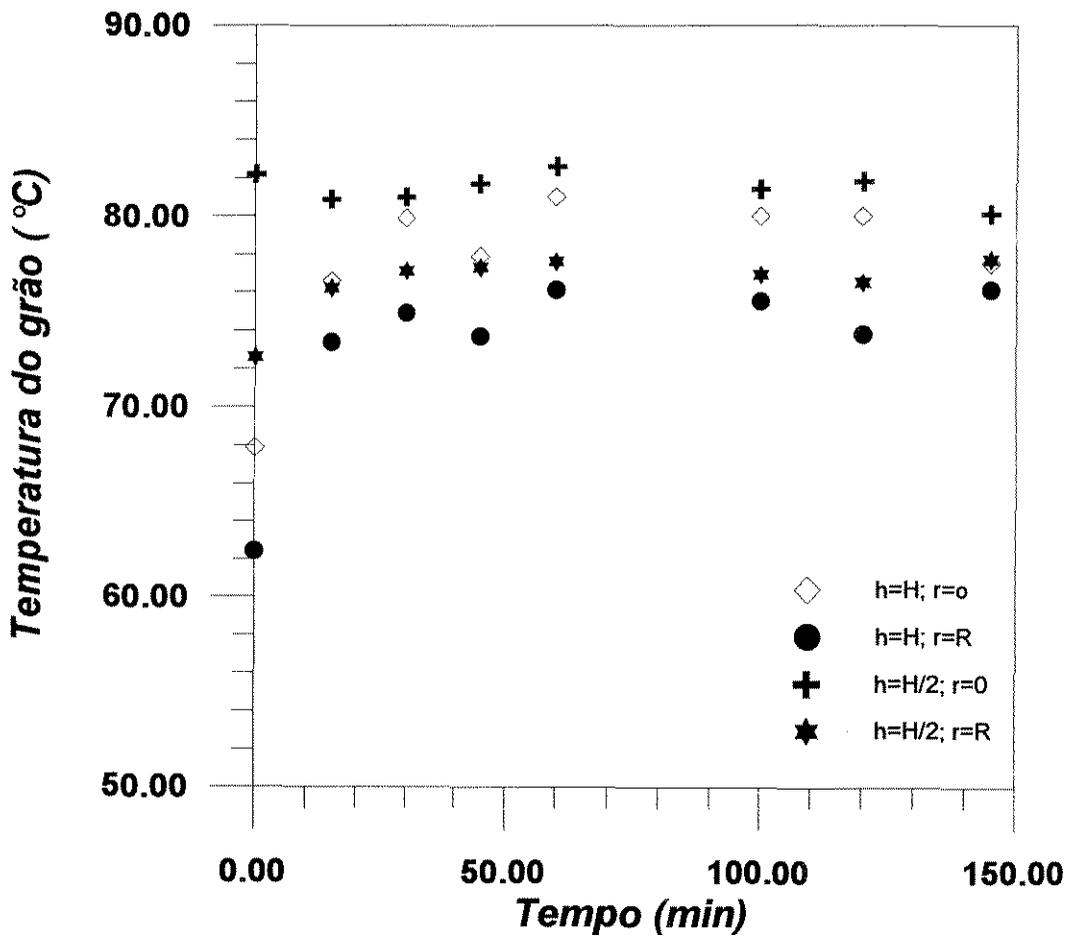


Figura 4.19 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador  
 Leito Fixo -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g

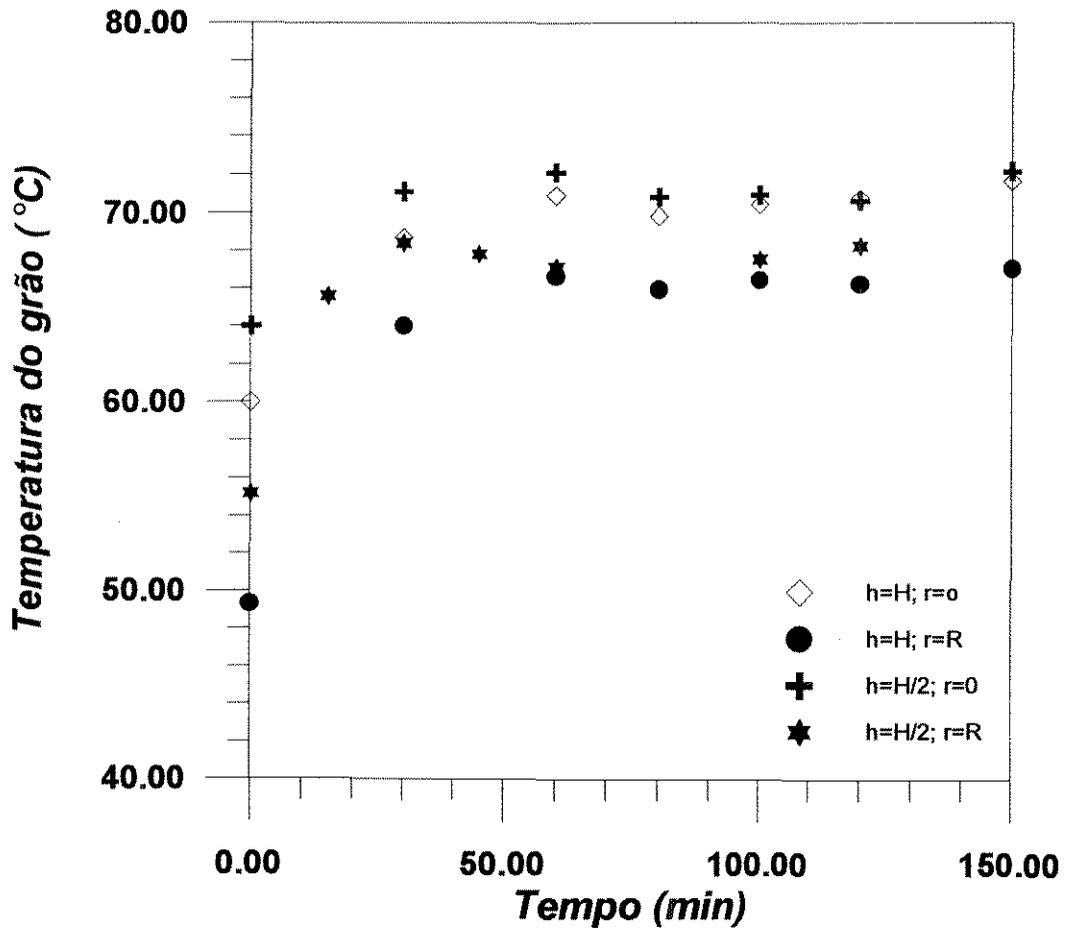
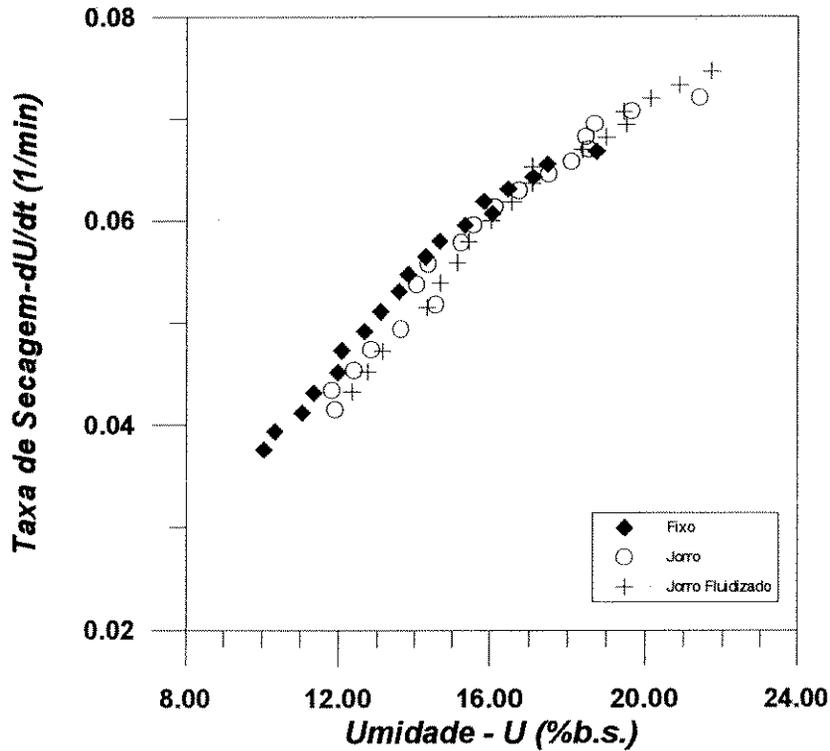


Figura 4.20 - Temperatura dos grãos em função do tempo e da posição no secador  
 Leito Fixo -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 3000 g

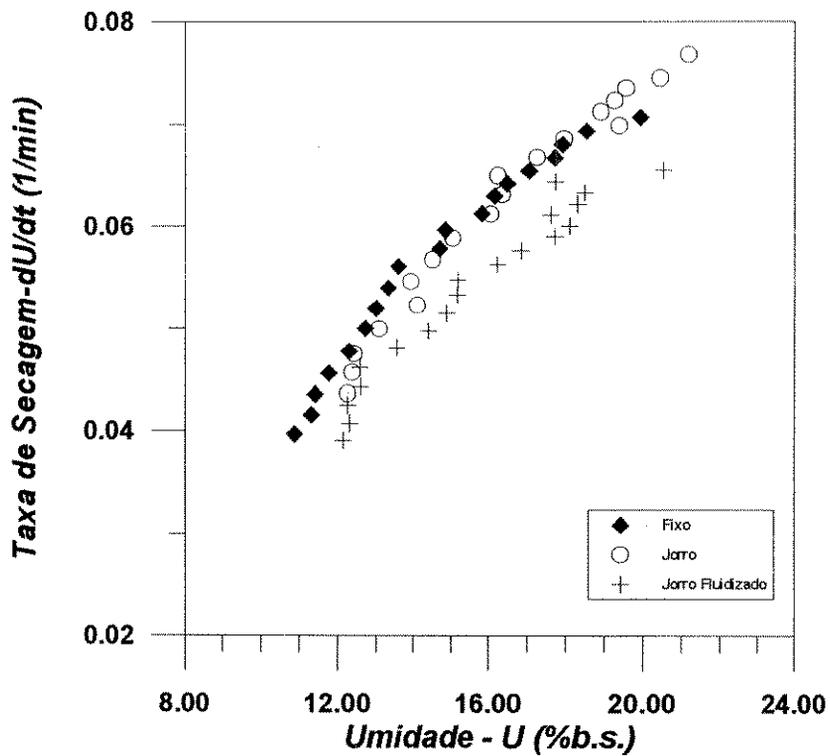
## 4.5 Comparação entre os secadores

A comparação entre os secadores foi feita primeiramente através da análise dos gráficos das curvas de secagem, das taxas de secagem e das curvas de temperatura do grão em função do tempo e posteriormente através dos cálculos baseados em critérios energéticos.

As figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 mostram o comportamento das curvas de taxa de secagem nos três leitos, nas seguintes condições de operação, respectivamente: 73°C e 20% b.s., 83°C e 20% b.s., 73°C e 30%b.s. e 83°C e 20% b.s., tendo os experimentos sido realizados com cargas de 1500 g (a) e 3000 g (b). Esta análise permite observar que a carga de sólidos praticamente não exerceu influência sobre a taxa de secagem, sendo que esta foi influenciada pela umidade inicial do grão e também pela temperatura do ar de secagem. Na grande maioria dos experimentos, observa-se que o leito fixo foi o que proporcionou maiores taxas de secagem. Ainda, observando-se as taxas de secagem o secador de leito de jorro foi o segundo melhor e, com menor desempenho, proporcionando menores taxas de secagem na grande maioria dos experimentos, o de jorro fluidizado. Porém é interessante ressaltar que os comportamentos foram muito similares, isto é, as diferenças observadas não são significativas a ponto de se indicar o secador mais adequado.

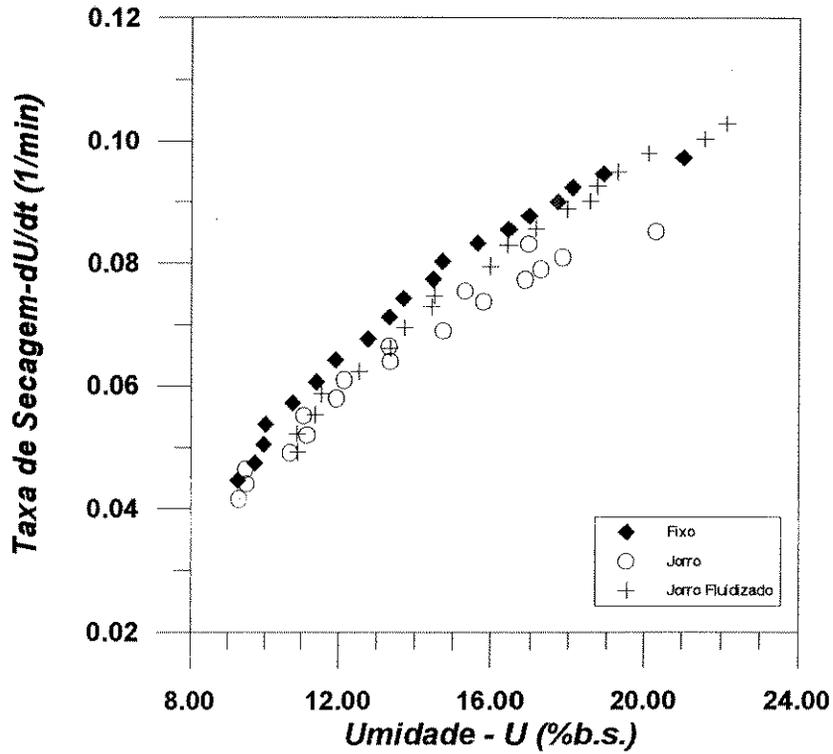


(a)

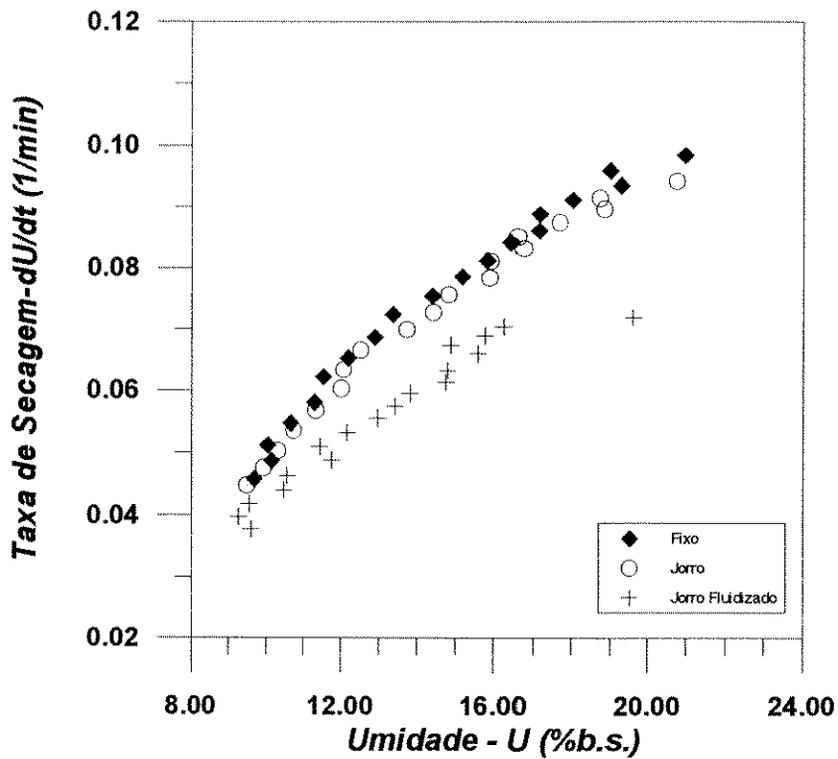


(b)

Figura 4.21 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

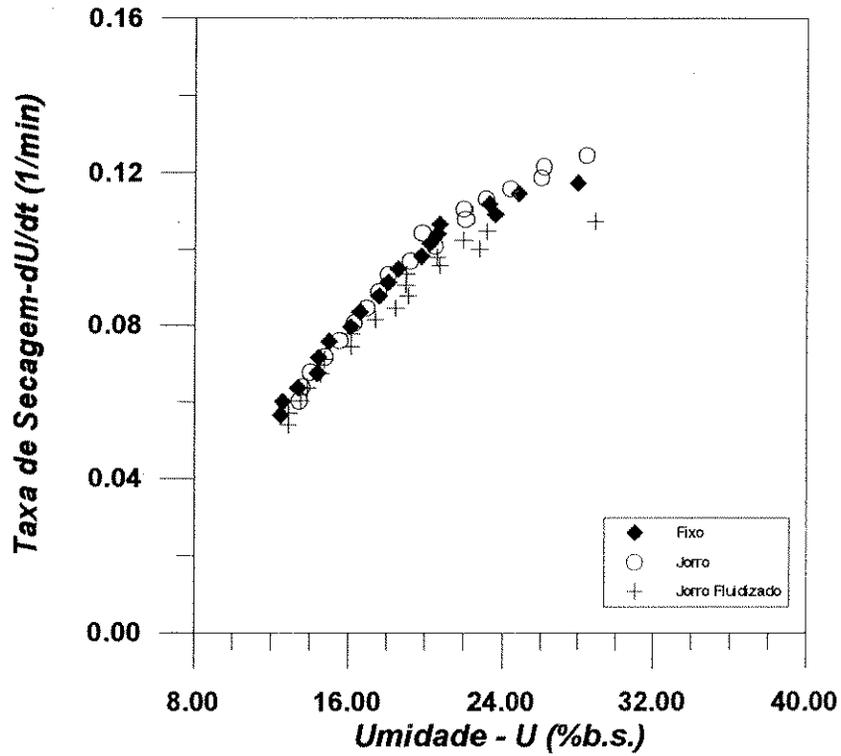


(a)

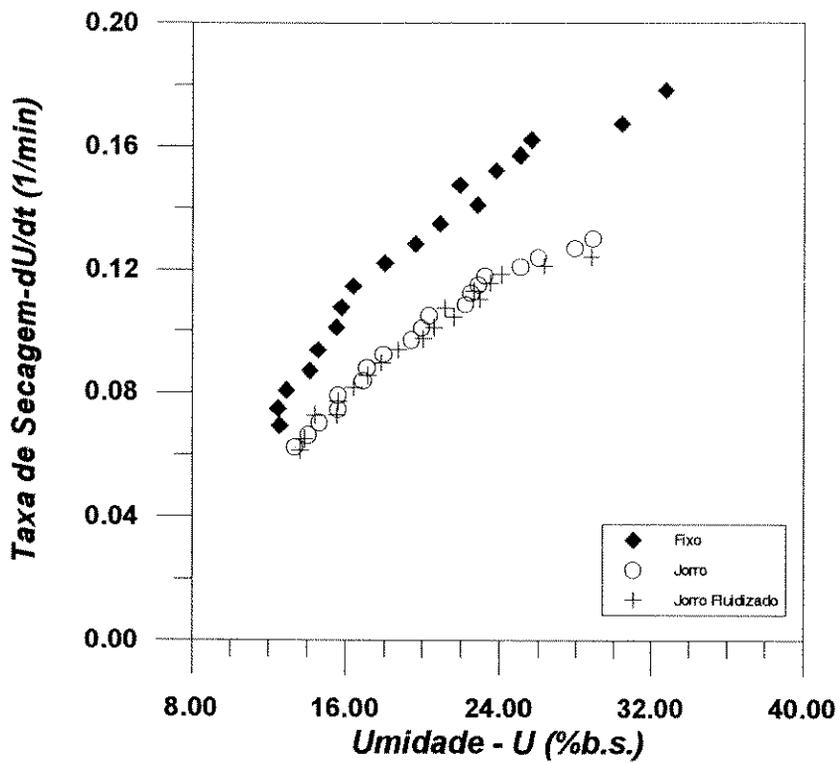


(b)

**Figura 4.22** - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem  
 $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

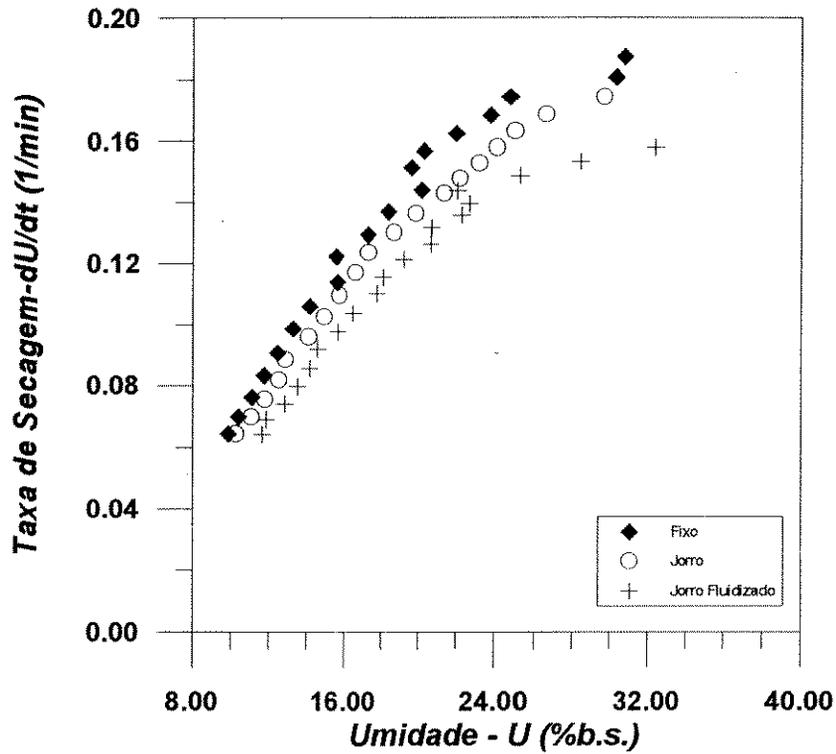


(a)

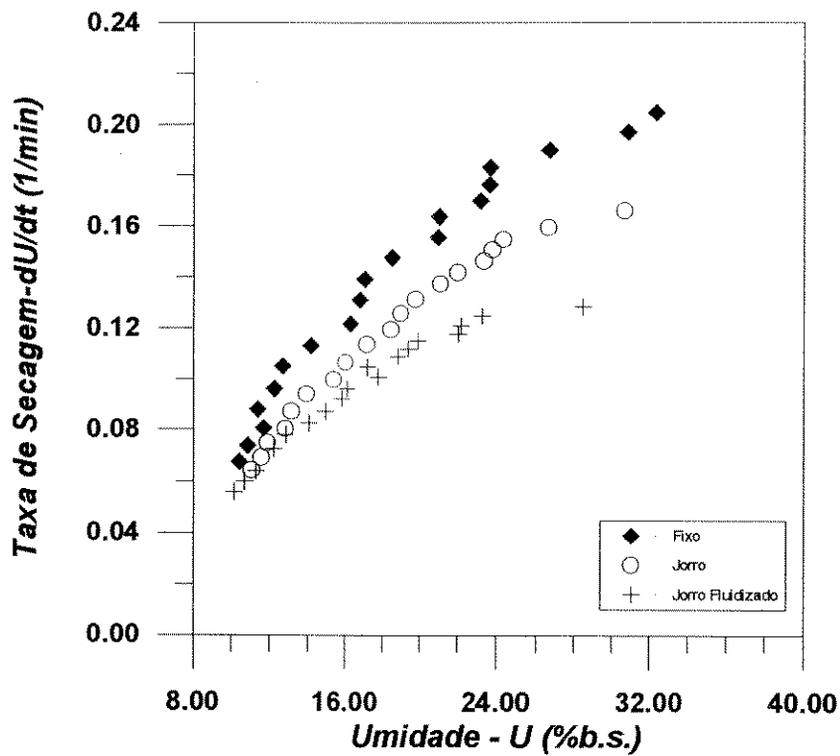


(b)

Figura 4.23 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 30\% \text{ b.s.}$   
 a) 1500 g b) 3000 g



(a)



(b)

Figura 4.24 - Comparação entre os secadores - Taxa de Secagem  
 T<sub>a</sub>: 83°C U<sub>o</sub>: 30% b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

Através da análise das figuras 4.25 a 4.32 nota-se o mesmo comportamento que o observado nas taxas de secagem, sendo que as curvas foram praticamente coincidentes para os três secadores quando operando nas mesmas condições.

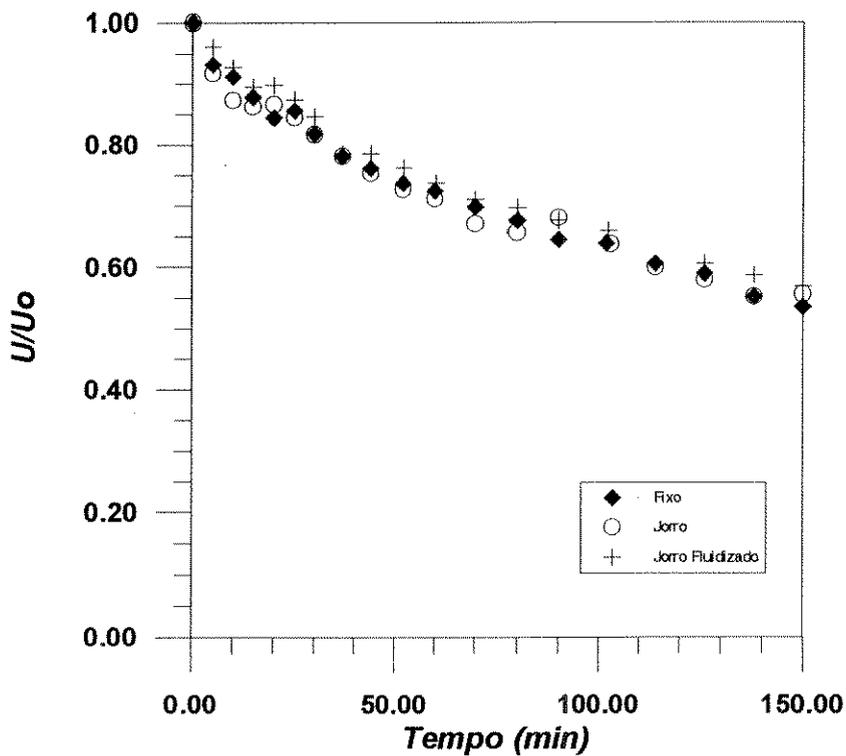


Figura 4.25 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s. M: 1500 g

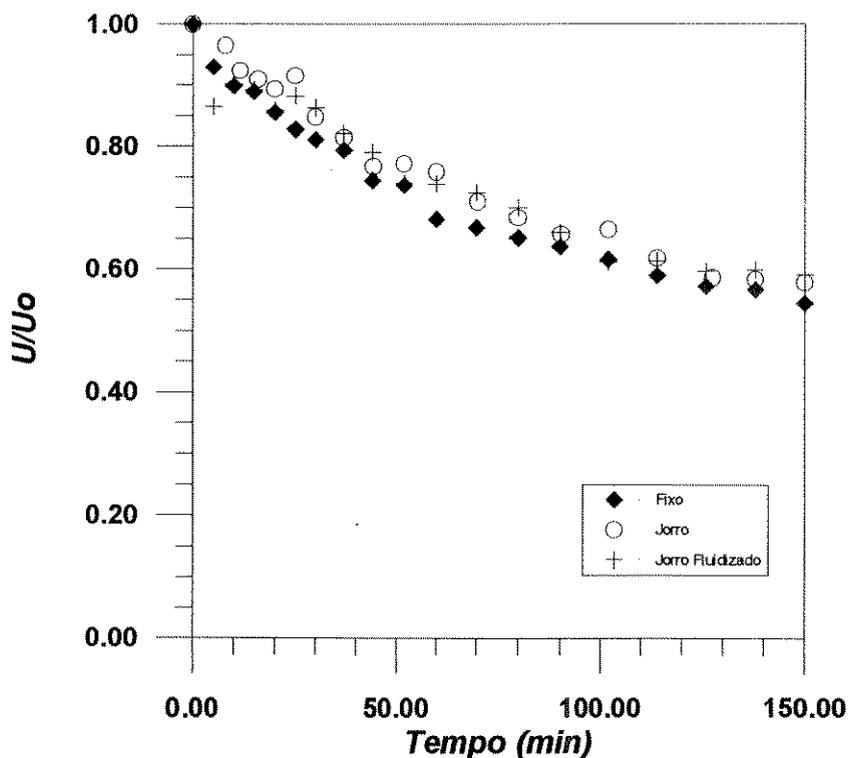


Figura 4.26 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s. M: 3000 g

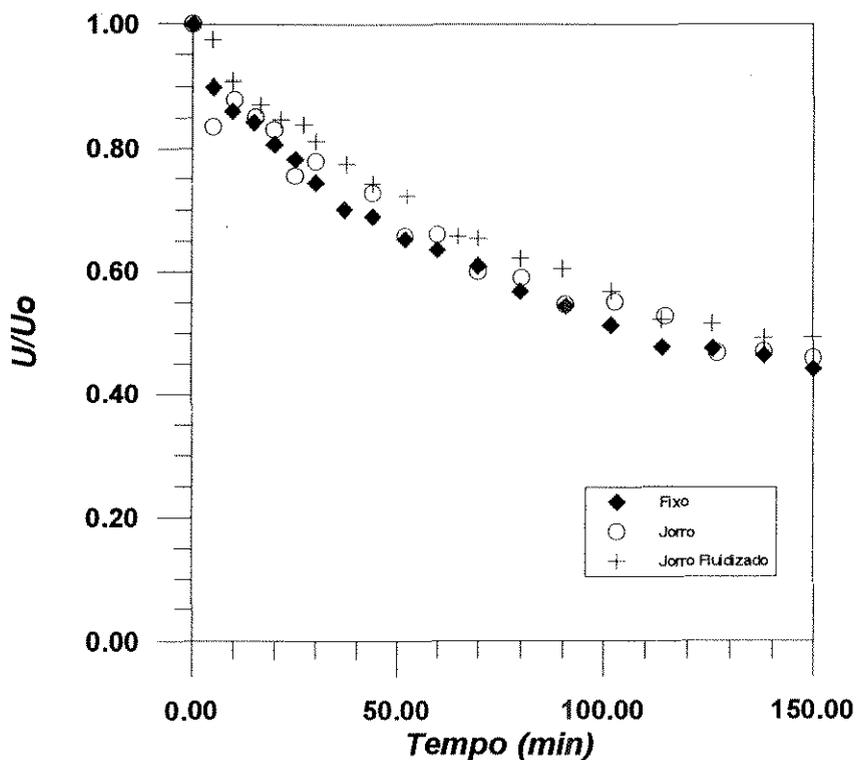


Figura 4.27 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 83^\circ\text{C}$   $U_o: 20\% \text{ b.s.}$   $M: 1500 \text{ g}$

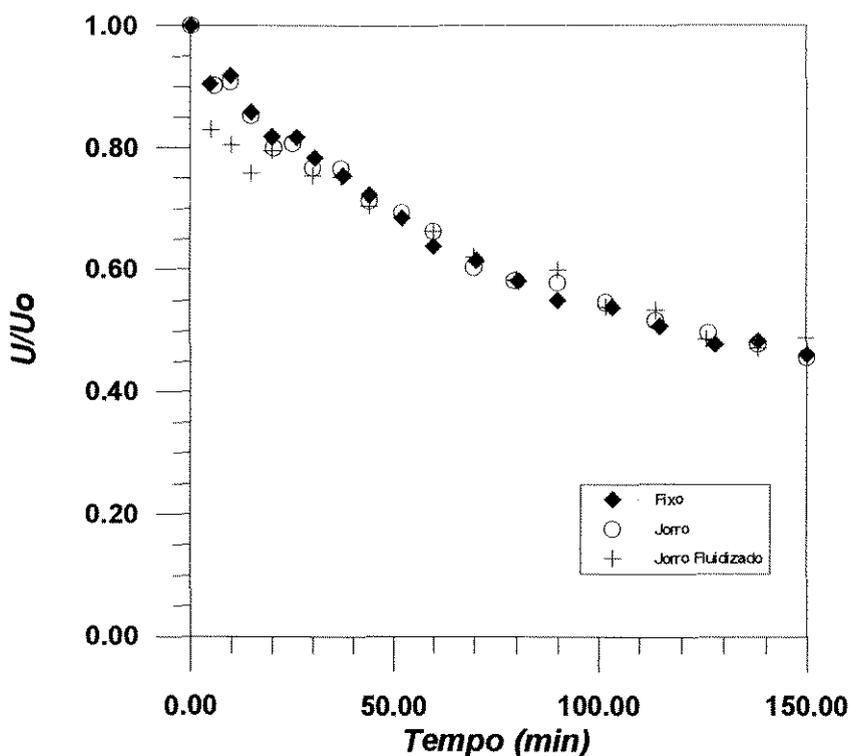


Figura 4.28 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 83^\circ\text{C}$   $U_o: 20\% \text{ b.s.}$   $M: 3000 \text{ g}$

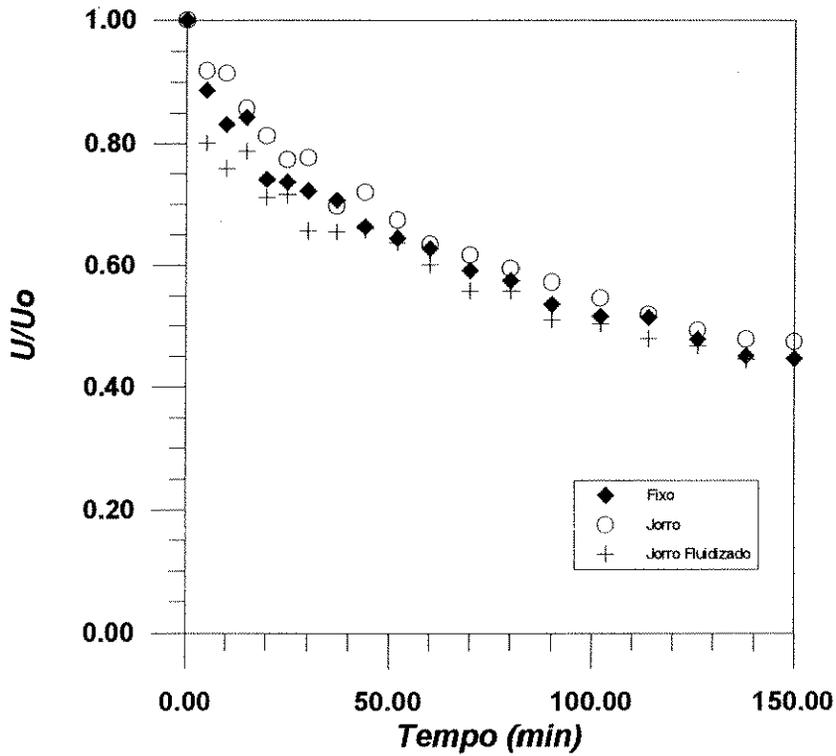


Figura 4.29 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 30\%$  b.s.  $M: 1500$  g

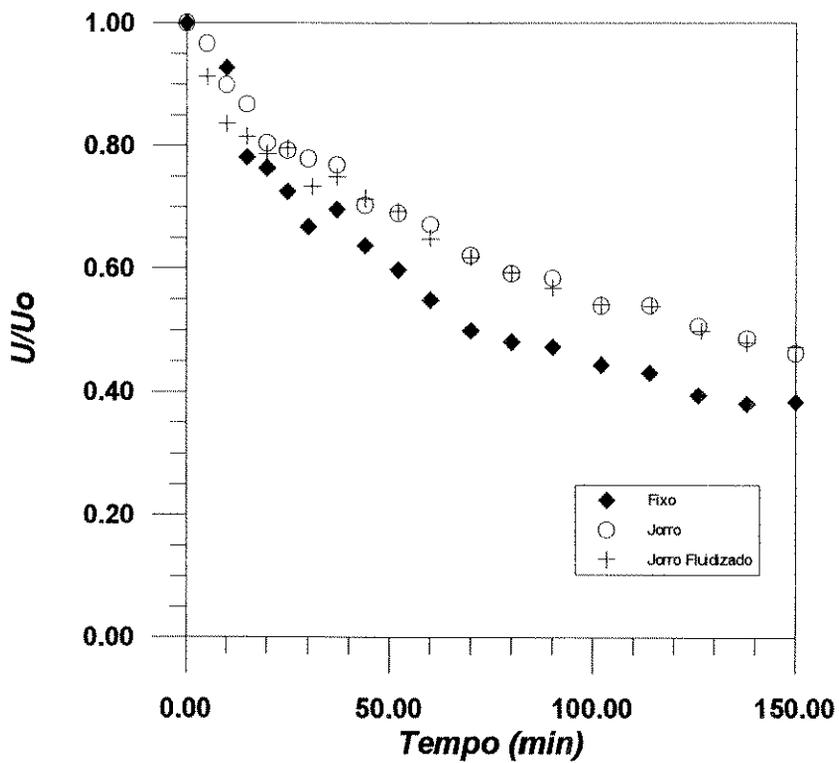


Figura 4.30 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 30\%$  b.s.  $M: 3000$  g

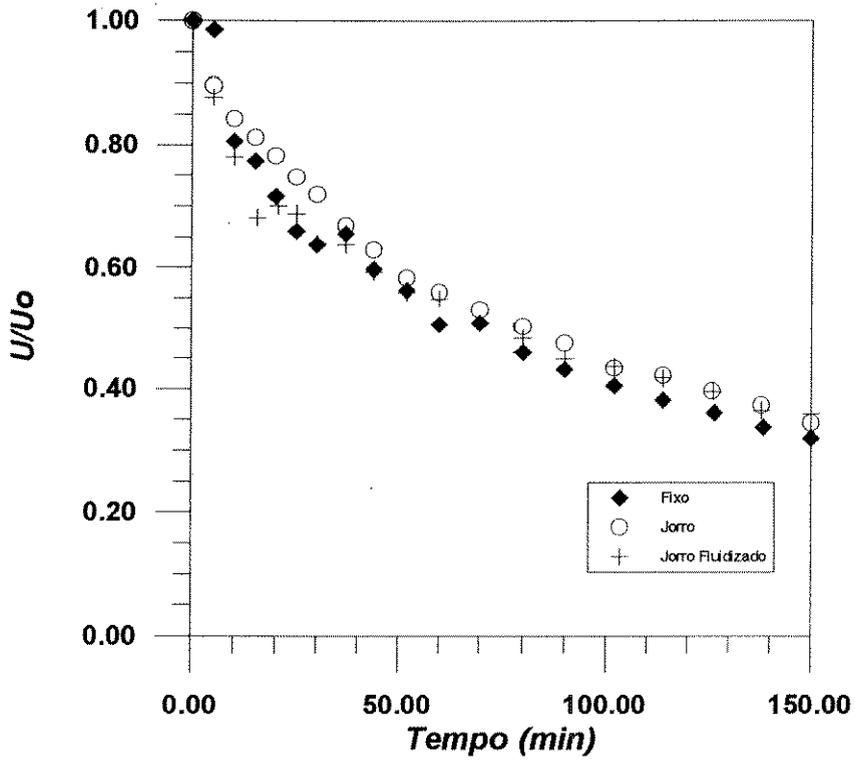


Figura 4.31 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 83^{\circ}\text{C}$   $U_o: 30\%b.s.$   $M: 1500\text{ g}$

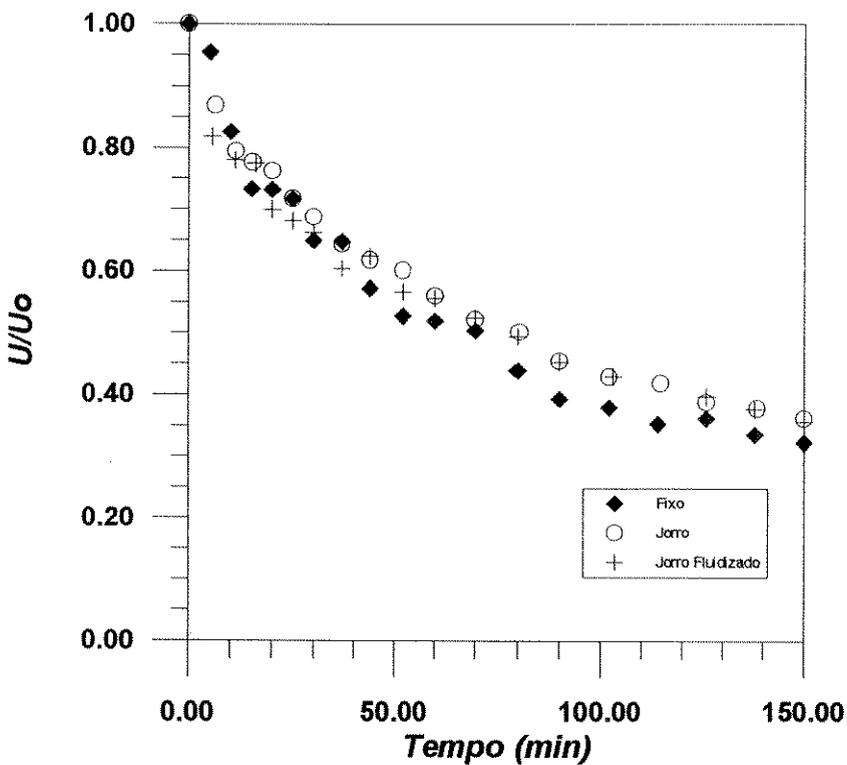
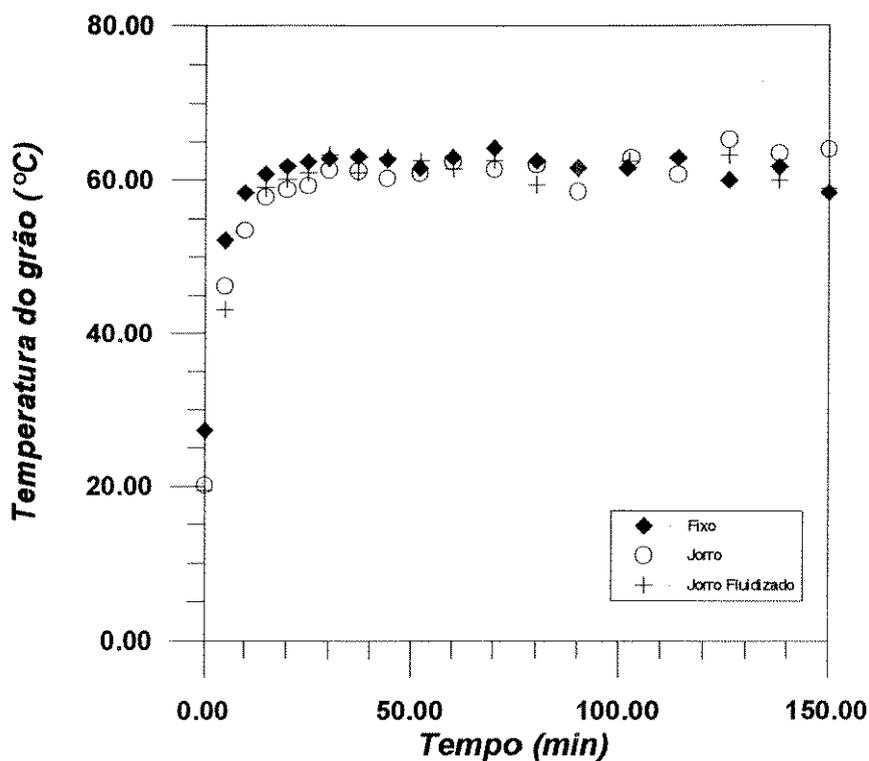


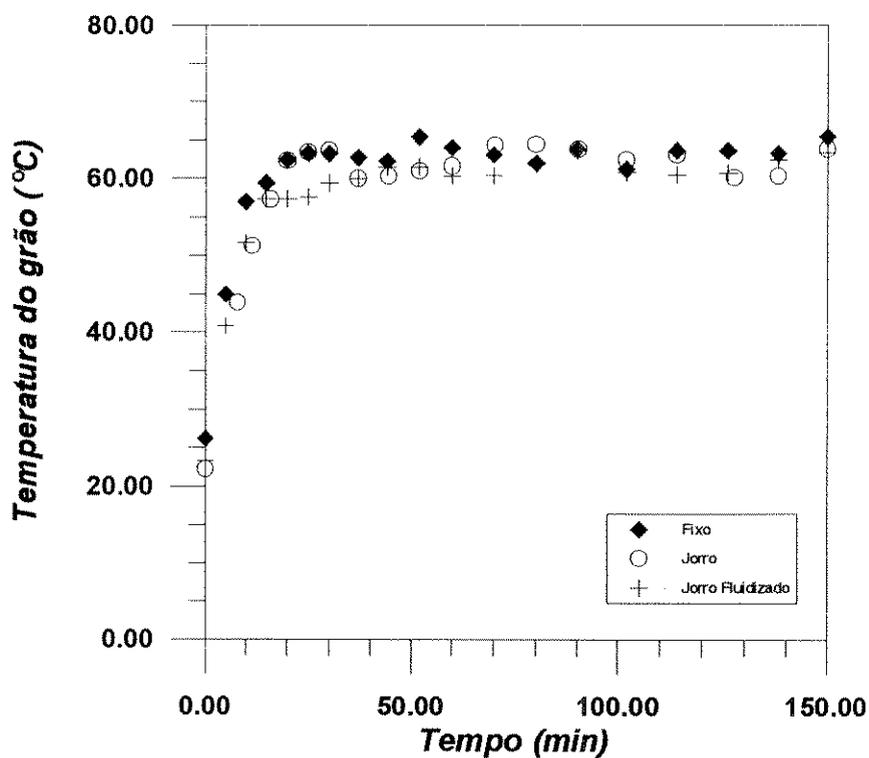
Figura 4.32 - Comparação entre os secadores - Curvas de Secagem  
 $T_a: 83^{\circ}\text{C}$   $U_o: 30\%b.s.$   $M: 3000\text{ g}$

Uma análise com relação ao aumento de temperatura dos grãos em função do tempo pode ser feita com base nas figuras 4.33 a 4.36.

Com relação aos secadores, observa-se um aquecimento ligeiramente menor dos grãos no leito de jorro fluidizado, para experimentos realizados a temperaturas superiores. Neste leito o fluxo de ar é dividido entre a região central e a região anular, sendo que na região anular utiliza-se aproximadamente 15% da vazão central; assim forneceu-se uma menor vazão de ar à região central, diminuindo a transferência de calor que ocorre quase que totalmente nesta região e, por consequência, aquecendo menos os grãos.

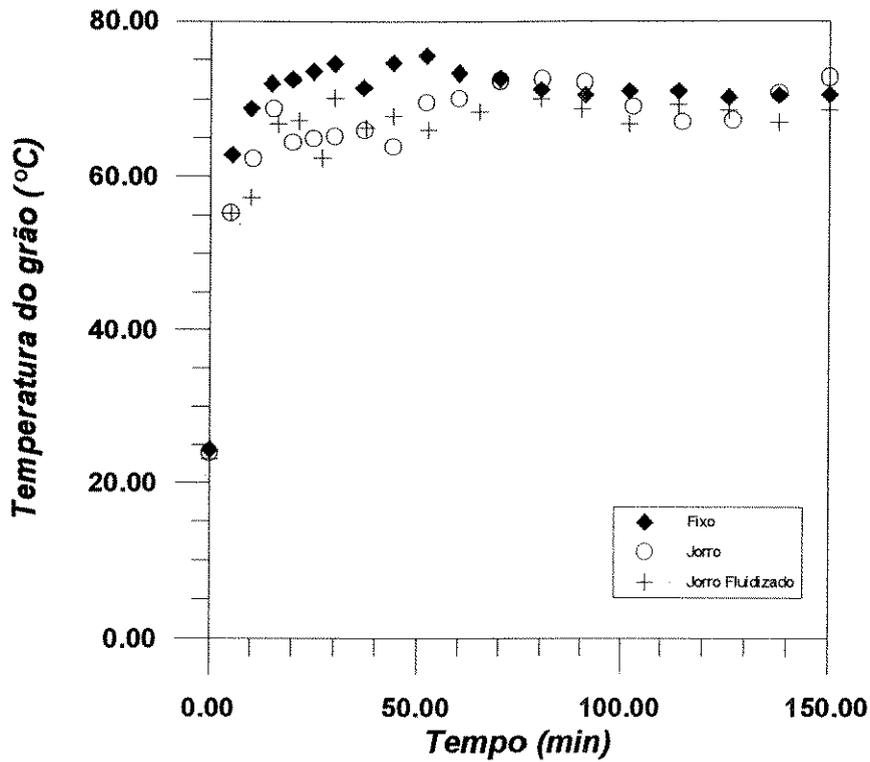


(a)

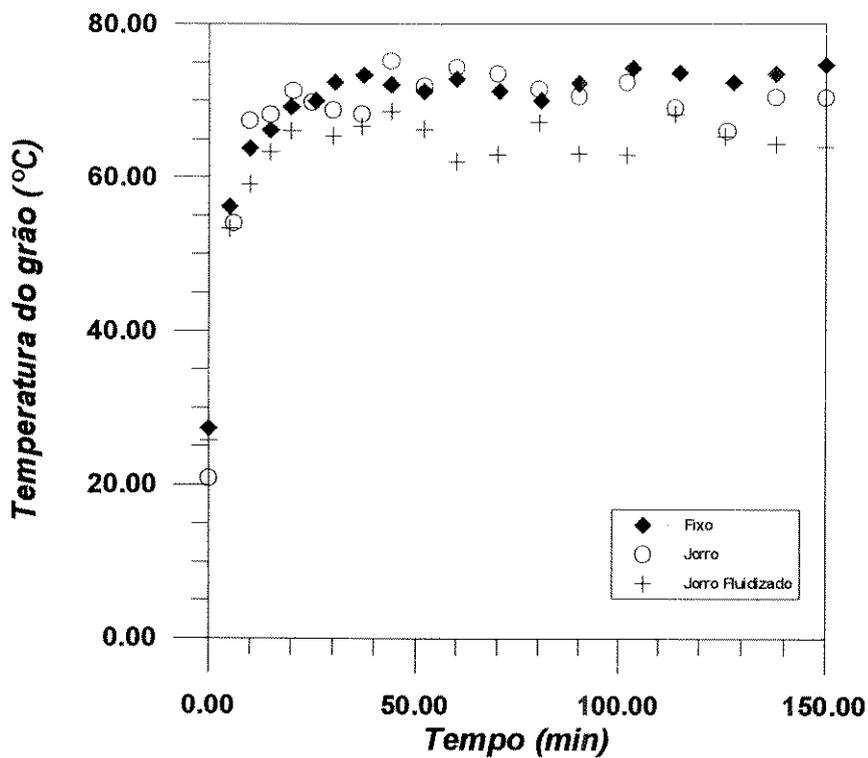


(b)

Figura 4.33 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

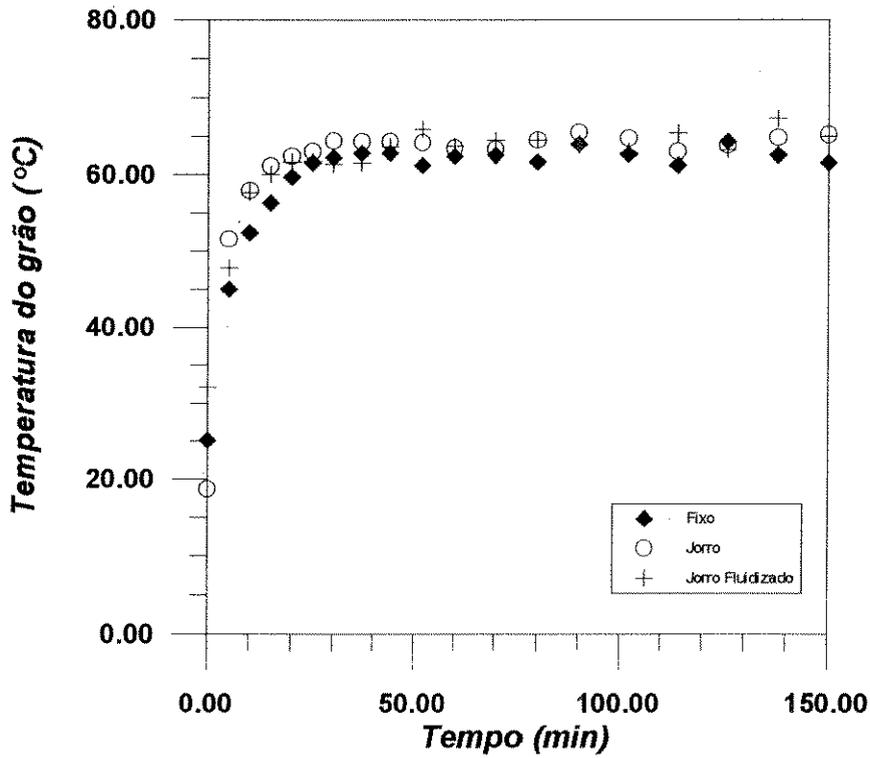


(a)

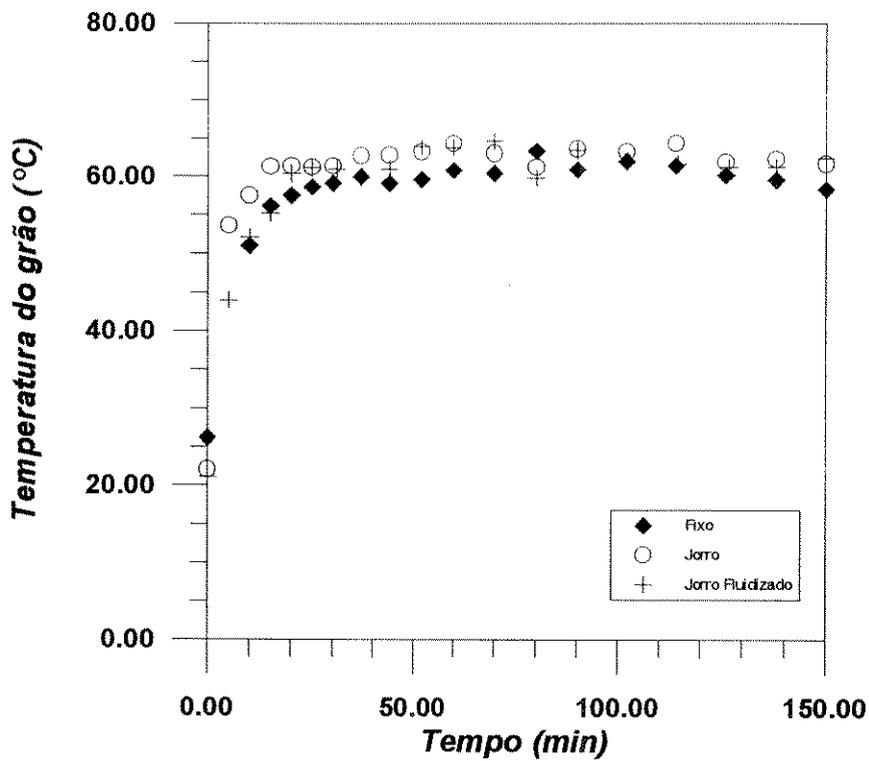


(b)

**Figura 4.34 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo**  
 $T_a: 83^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

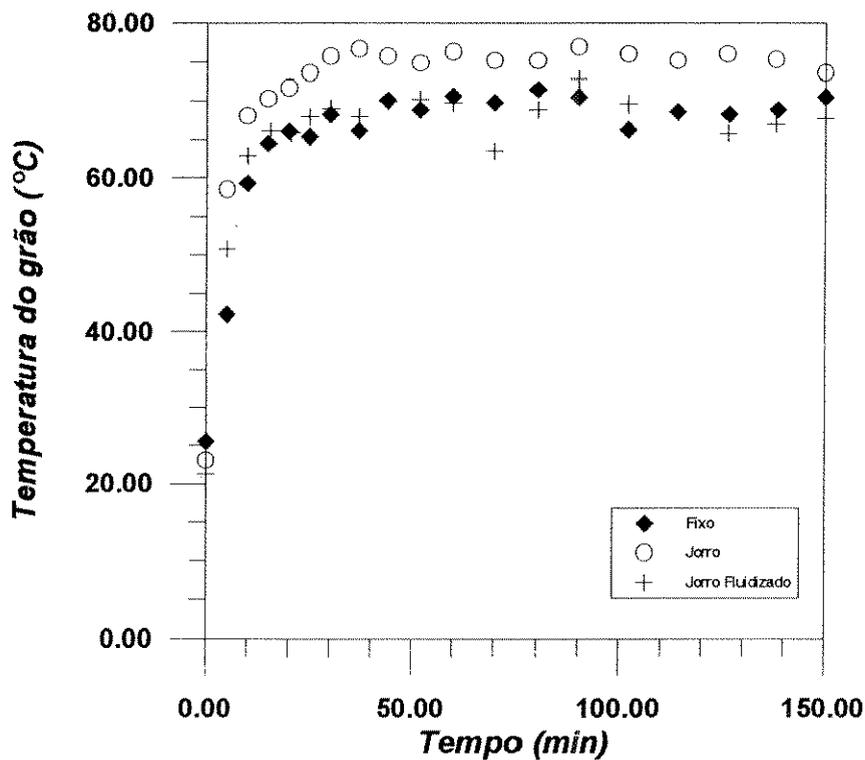


(a)

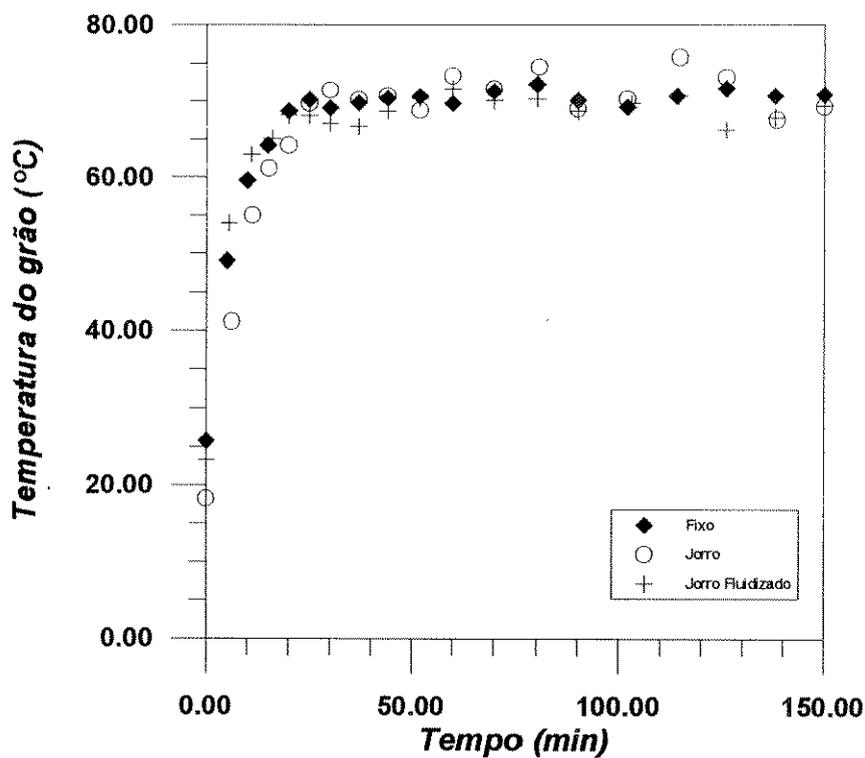


(b)

Figura 4.35 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo  
 $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 30\%$  b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g



(a)



(b)

Figura 4.36 - Comparação entre os secadores - Temperatura do grão em função do tempo  
 $T_a: 83^\circ\text{C}$   $U_o: 30\%$  b.s.  
 a) 1500 g b) 3000 g

#### 4.6 Avaliação energética da secagem

No presente trabalho o cálculo da eficiência energética foi realizado baseado na definição de PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989). A eficiência de secagem, ES, foi calculada como a energia necessária para aquecer o grão e evaporar a água em relação à energia total fornecida à operação. As seguintes considerações foram feitas para os cálculos energéticos:

- A energia necessária para aquecer o grão foi definida com base no tempo necessário para aquecê-lo de sua temperatura inicial até a temperatura final, que permanece praticamente constante até o final do experimento:  $m_g \cdot c_{p_g} \cdot (T_{gf} - T_{go})/t_{aqq}$  ;
- A energia necessária para evaporar a água foi considerada como o produto entre o calor de vaporização da água e a quantidade de água evaporada por tempo de secagem:  $\Delta H_{v,ag} \cdot (m_{ag\ ev} / \text{tempo de secagem})$ ;
- A energia térmica fornecida à operação foi calculada como  $W \cdot c_{p_a} \cdot (T_a - T_{ao})$ ;
- A energia total fornecida à operação foi considerada como a soma da energia térmica e da energia mecânica, utilizada para bombear o ar,  $\Delta P_L \cdot Q$ ;
- O calor latente de vaporização foi considerado como aquele necessário para evaporar a água livre, o que segundo MUTHU E CHATTOPADHYAY (1993) é válido quando o teor de umidade do grão não é muito baixo (consegue-se menos de 1% de erro para umidades do grão superiores a 25% b.s.). Os autores acima obtiveram as seguintes expressões em ASAE (1982), para o calor de vaporização em função da temperatura:
 
$$\Delta H_{v,ag} = 2502,535259 - 2,38576424T \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T_g \leq 65,56^\circ$$

$$\Delta H_{v,ag} = [7329155,98 - 15,9959641(T + 273)^2]^{1/2} \quad \text{para } 65,56^\circ\text{C} \leq T_g \leq 260^\circ\text{C};$$
- O calor específico do ar foi obtido em HIMMELBLAU (1984) enquanto o calor específico do grão em VASCONCELOS (1990).

Analisou-se também o processo por meio de um coeficiente de secagem, CS, definido por PASSOS, MUJUMDAR E RAGHAVAN (1989) como a quantidade de água evaporada por quantidade de energia fornecida à operação. Neste trabalho foi utilizado o termo quantidade de água evaporada por tempo de secagem ao invés de quantidade de água evaporada.

Um novo coeficiente foi ainda definido, LM, como a razão entre a energia gasta para vaporizar a água e a energia mecânica necessária para bombear o ar. Esta definição visa a comparação dos secadores através dos aspectos fluidodinâmicos, que são diferentes em cada um. Portanto, para este trabalho:

Eficiência de Secagem:

$$ES = \frac{E_{aqg} + E_{evag}}{ET} \quad (4.4)$$

$$[ES] = \text{adimensional}$$

$$E_{aqg} = m_g \cdot c_{p_g} \cdot (T_{gf} - T_{go}) / t_{aqg}$$

$$E_{evag} = \Delta H_{v,ag} \cdot (m_{ag ev} / \text{tempo de secagem})$$

$$ET = E_{ter} + EM$$

$$E_{ter} = W \cdot c_{p_a} \cdot (T_a - T_{ao})$$

$$EM = \Delta P_L \cdot Q$$

Coeficiente de Secagem CS:

$$CS = \frac{M_{ag ev} / \text{tempo de secagem}}{ET} \quad (4.5)$$

$$[CS] = \text{kg/kJ}$$

Coeficiente de Secagem LM:

$$LM = \frac{E_{evag}}{EM} \quad (4.6)$$

$$[LM] = \text{adimensional}$$

Os resultados são apresentados nas tabelas 4.11, 4.12, 4.13 para os leitos fixo, de jorro e de jorro fluidizado respectivamente. Os experimentos de 1 a 8 são especificados na tabela 4.1.

**Tabela 4.11 - Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito Fixo**

<b>Experimento</b>	<b>W (Kg/min)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Qsec (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>ES (%)</b>	<b>CS (Kg/KJ) x 10<sup>5</sup></b>	<b>LM</b>
1	1,35	1,42	0	6,14	1,5	1,91
2	1,39	1,51	0	6,61	1,5	2,36
3	1,36	1,42	0	9,22	2,5	3,39
4	1,35	1,46	0	9,47	2,7	4,55
5	1,66	1,75	0	10,98	2,3	1,50
6	1,70	1,83	0	10,12	2,2	1,82
7	1,71	1,79	0	15,67	4,9	3,28
8	1,76	1,90	0	14,95	4,3	3,27

**Tabela 4.12-** Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito de Jorro

<b>Experimento</b>	<b>W (Kg/min)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Qsec (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>ES (%)</b>	<b>CS (Kg/KJ) x10<sup>5</sup></b>	<b>LM</b>
<b>1</b>	1,88	1,97	0	4,68	1,0	0,88
<b>2</b>	1,83	1,98	0	4,52	0,9	1,01
<b>3</b>	1,94	2,05	0	5,69	1,4	1,22
<b>4</b>	1,95	2,11	0	6,35	1,7	1,59
<b>5</b>	2,27	2,38	0	7,30	1,5	0,81
<b>6</b>	2,27	2,45	0	7,56	1,6	1,04
<b>7</b>	2,34	2,46	0	8,71	2,3	1,22
<b>8</b>	2,33	2,52	0	9,29	2,5	1,66

**Tabela 4.13 - Vazões de Operação e Cálculo Energético para Leito de Jorro Fluidizado**

<b>Experimento</b>	<b>W (Kg/min)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Qsec (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Qsec/Q</b>	<b>ES (%)</b>	<b>CS (Kg/KJ) x10<sup>5</sup></b>	<b>LM</b>
1	1,70	1,78	0,23	0,13	3,93	0,9	0,88
2	1,80	1,94	0,23	0,12	3,88	0,9	0,93
3	2,02	2,13	0,23	0,11	5,36	1,7	1,42
4	1,70	1,84	0,24	0,13	6,63	1,9	1,73
5	1,86	1,96	0,42	0,21	7,29	1,5	0,83
6	1,81	1,96	0,45	0,23	6,95	1,6	0,98
7	1,88	1,97	0,42	0,21	10,29	2,7	1,51
8	1,85	2,00	0,43	0,22	10,68	2,9	1,85

Pela análise das tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 verifica-se que o leito fixo, comparativamente aos leitos de jorro e de jorro fluidizado, apresentou maiores eficiências de secagem, ES, em todos os experimentos. Isto pode ser explicado pela vazão de ar utilizada nos experimentos com este leito ter sido menor, levando portanto à utilização de uma menor quantidade de energia para aquecer o ar.

O coeficiente LM identifica o leito mais eficiente levando em consideração apenas o aspecto fluidodinâmico. Para este coeficiente os maiores valores foram atingidos no leito fixo, que apresentou os menores valores para o produto ( $\Delta P_L \cdot Q$ ), já que o calor latente de vaporização foi praticamente o mesmo, nos respectivos experimentos nos três leitos.

Com relação ao coeficiente CS, os valores obtidos para este coeficiente foram baixos, por se tratar de uma operação realizada em batelada. Os leitos de jorro e jorro fluidizado, nas mesmas condições experimentais, apresentaram valores muito próximos, fato este atribuído às características aerodinâmicas dos leitos serem muito similares.

Em cada um dos secadores estudados foi observado que a eficiência da secagem aumentou com o aumento da temperatura e foi fortemente influenciada pelo aumento da carga e da umidade inicial. Pode-se atribuir este fato à demanda energética: uma vez que se usou uma determinada quantidade de energia para aquecer o ar, para maiores umidades iniciais e cargas mais elevadas, maior é a quantidade de água evaporada, ou seja, melhor o aproveitamento energético. Em todos os leitos o experimento com maior eficiência energética foi o realizado a 83°C, 30% b.s. e 3000 g. A mesma relação foi confirmada para o coeficiente de secagem.

É possível afirmar que a utilização de critérios energéticos para a comparação da performance de secadores é uma ferramenta muito útil, principalmente no que concerne à escolha de determinado secador. Porém em escala de laboratório o que se encontra são valores muito próximos e eficiências de secagem muito baixas, fato este que se fosse observado individualmente resultaria na inviabilidade da operação sob o ponto de vista econômico. Trabalhando-se em escala piloto ou industrial, espera-se a obtenção de uma maior diferença entre os resultados, além de uma melhor caracterização da distribuição da umidade ao longo do leito. Em relação à utilização do secador de leito fixo em escala

industrial um fato conhecido e de grande desvantagem é o proporcionamento de uma distribuição heterôgenea da umidade dos grãos no equipamento.

No leito de jorro fluidizado, a utilização do ar secundário exerceu um papel importante em relação à homogeneidade da secagem, porém não se explorou a relação vazão de ar principal / vazão de ar secundário de forma a otimizar a curva de secagem. A vazão de ar utilizada foi escolhida em função da variável ‘carga de sólidos’. Procurou-se trabalhar com vazões mínimas necessárias para a manutenção do movimento nos leitos de jorro e jorro fluidizado de forma a se ter vazões mais próximas possíveis. No secador de leito fixo tentou-se utilizar vazões próximas às utilizadas nos outros secadores, contanto que fossem inferiores às vazões de mínima fluidização.

Torna-se muito importante a análise das vantagens e desvantagens de tais leitos em relação às características do produto final, às facilidades de controle da operação e a possibilidade de ‘scale-up’.

## 4.7 Modelagem empírica

Os dados da cinética de secagem foram ajustados através de uma modelagem empírica, de maneira a correlacionar a umidade dos grãos com o tempo de secagem. Optou-se por utilizar a modelagem empírica para se conseguir uma caracterização do experimento, baseando-se apenas na observação das curvas de secagem e nas condições controladas experimentalmente.

Foram utilizados dois modelos, sendo um do tipo equação exponencial simples (eq.4.7) e outro do tipo equação de Page (eq.4.8), que são apresentados abaixo.

Exponencial:

$$\frac{U}{U_0} = A \exp(-B \cdot t) \quad (4.7)$$

Page:

$$\frac{U}{U_0} = \exp(-C \cdot t^D) \quad (4.8)$$

O ajuste dos dados experimentais foi realizado através do método de Marquardt, obtendo-se os parâmetros A e B da equação (4.7) e C e D da equação (4.8). A maioria dos resíduos obtidos para o ajuste através da equação exponencial ficou entre  $1 \times 10^{-2}$  e  $6 \times 10^{-2}$  para os três secadores, sendo que no ajuste dos dados do leito de jorro fluidizado obteve-se desvios mais elevados. Com relação ao ajuste através da equação tipo Page os resíduos obtidos foram menores, sendo que maior parte se encontra em torno de  $3 \times 10^{-3}$ . Uma comparação entre os ajustes dos modelos exponencial e tipo Page com os dados experimentais é apresentada nas figuras 4.37, 4.38 e 4.39 para os experimentos F1, J1 e JF1, respectivamente, com o objetivo de exemplificação da qualidade dos ajustes. Por meio da análise dos resíduos e das figuras apresentadas conclui-se que a equação empírica do tipo Page foi a que ajustou melhor os dados experimentais.

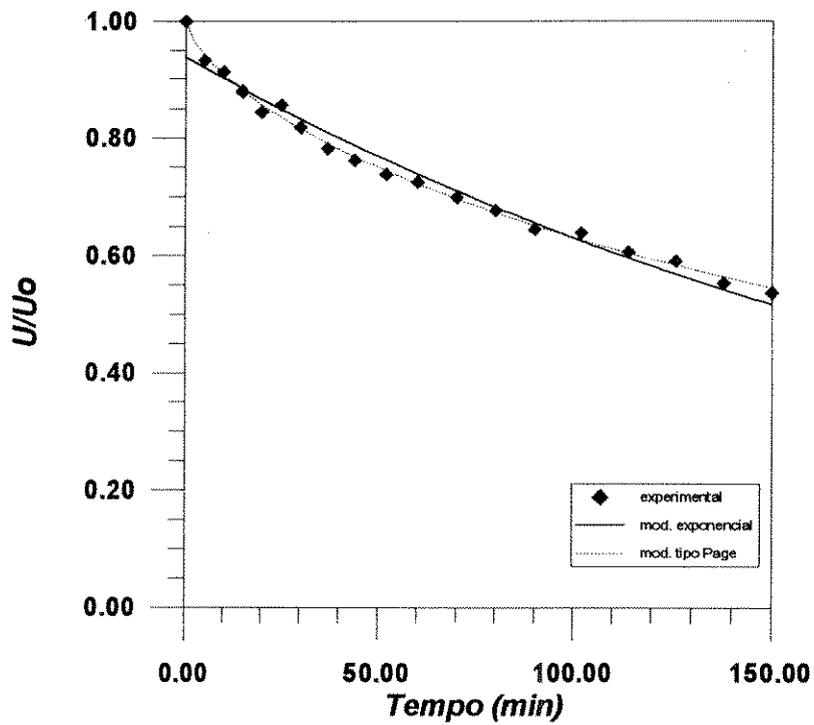


Figura 4.37 - Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito Fixo -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g

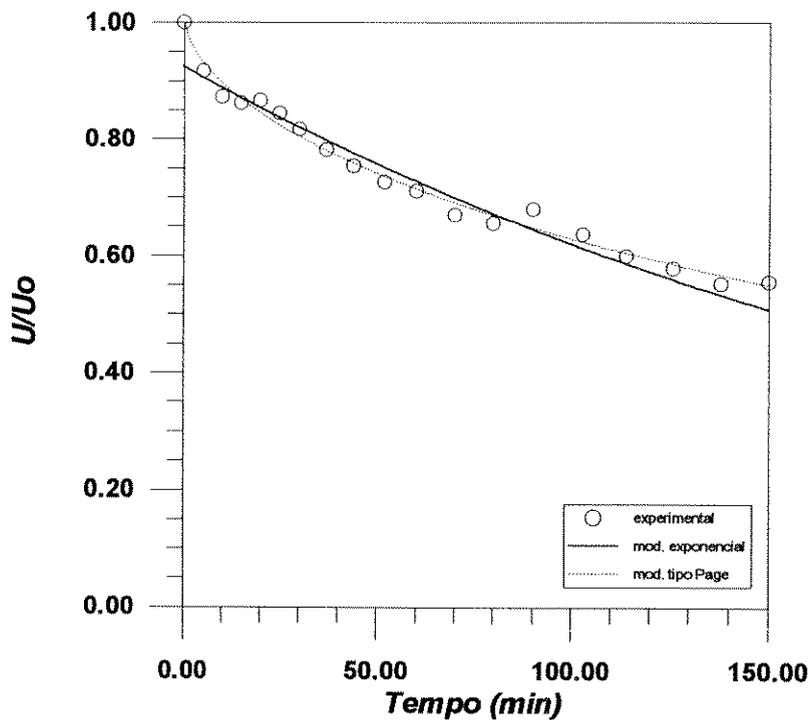
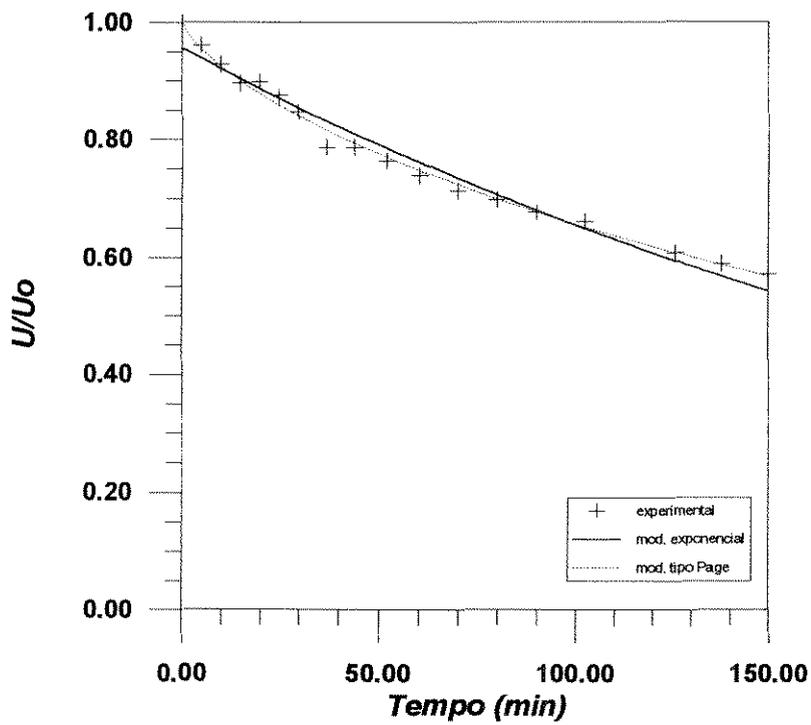


Figura 4.38 - Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito de Jorro -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g



**Figura 4.39-** Comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos empíricos - Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s. M: 1500 g

Os parâmetros obtidos foram então agrupados, para cada tipo de secador, e foram desenvolvidas correlações visando caracterizá-los como função das condições experimentais: temperatura do ar de secagem, umidade inicial dos grãos, carga de grãos. Uma análise mais completa relacionaria estes parâmetros também às características geométricas do leito, propriedades físicas do grão, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio, como o realizado no trabalho de KALWAR E RAGHAVAN (1993). Porém isto não foi possível neste trabalho por não se ter variado estas condições.

A tabela 4.14 fornece os resultados dos parâmetros das equações do tipo exponencial (A, B) e do tipo Page (C e D) para os experimentos realizados em leito fixo.

**Tabela 4.14** - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito fixo

Experimento	Exponencial	Exponencial	Tipo Page	Tipo Page
	A	B (x10 <sup>3</sup> )	C (x10 <sup>2</sup> )	D
1	0,93847	3,9903	2,0088	0,68051
2	0,91184	5,6018	3,1947	0,65215
3	0,88474	5,2755	4,6717	0,56868
4	0,90012	8,1608	4,3041	0,65753
5	0,93271	4,1051	2,3242	0,65654
6	0,93777	5,4526	2,1281	0,72636
7	0,90731	7,1619	3,5139	0,67695
8	0,90442	8,5620	4,0961	0,67594

Estes parâmetros foram então correlacionados como função da temperatura do ar de secagem ( $T_a$ ), medida em °C, da umidade inicial dos grãos ( $U_o$ ), adimensional (%) e da carga dos grãos, medida em kg, resultando nas seguintes expressões:

$$A = T_a^{0,033} U_o^{-0,079} M^{0,025} \quad (4.9)$$

$$B = T_a^{-1,8} U_o^{0,84} M^{0,025} \quad (4.10)$$

$$C = T_a^{-1,6} U_o^{1,18} M^{-0,41} \quad (4.11)$$

$$D = T_a^{0,027} U_o^{-0,12} M^{0,104} \quad (4.12)$$

A mesma análise foi realizada para o leito de jorro, sendo os parâmetros apresentados na tabela 4.15.

**Tabela 4.15** - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito de jorro

Experimento	Exponencial-	Exponencial	Tipo Page	Tipo Page
	A	B (x10 <sup>5</sup> )	C (x10 <sup>2</sup> )	D
1	0,92528	3,8548	2,5483	0,62921
2	0,89666	5,1311	3,8298	0,60308
3	0,92311	5,2507	2,8071	0,66419
4	0,91268	7,2706	3,3140	0,69149
5	0,96871	3,9481	1,0918	0,79512
6	0,92892	5,2747	2,4066	0,69680
7	0,93742	5,2466	2,2650	0,70521
8	0,88427	7,0080	4,4870	0,62656

Para o leito de jorro as correlações abaixo foram obtidas:

$$A = T_a^{-0,032} U_o^{-0,027} M^{0,026} \quad (4.13)$$

$$B = T_a^{-1,65} U_o^{0,61} M^{-0,032} \quad (4.14)$$

$$C = T_a^{-1,02} U_o^{0,34} M^{-0,303} \quad (4.15)$$

$$D = T_a^{-0,097} U_o^{-0,022} M^{0,13} \quad (4.16)$$

Com relação ao secador em leito de jorro fluidizado os resultados são apresentados na tabela 4.16.

**Tabela 4.16** - Parâmetros das equações exponencial e tipo Page para experimentos realizados em leito de jorro fluidizado

Experimento	Exponencial	Exponencial	Tipo Page	Tipo Page
	A	B (x10 <sup>3</sup> )	C (x10 <sup>3</sup> )	D
1	0,95649	3,8091	1,6299	0,73211
2	0,96010	5,1805	1,4679	0,78823
3	0,77741	5,3009	14,107	0,36548
4	0,84626	6,7872	7,1093	0,53114
5	0,87480	4,5265	1,9628	0,66744
6	0,93494	3,5690	5,4272	0,51461
7	0,83969	4,9693	3,5745	0,60892
8	0,88427	6,1041	7,4389	0,50649

Os parâmetros foram então correlacionados resultando nas seguintes expressões:

$$A = T_a^{0,18} U_o^{-0,27} M^{-0,040} \quad (4.17)$$

$$B = T_a^{-1,63} U_o^{0,57} M^{-0,058} \quad (4.18)$$

$$C = T_a^{-3,4} U_o^{3,67} M^{-0,46} \quad (4.19)$$

$$D = T_a^{0,45} U_o^{-0,72} M^{-0,23} \quad (4.20)$$

Para se avaliar as correlações calculou-se para cada parâmetro o desvio relativo (D.R.) entre o parâmetro ajustado pelos dados experimentais e o calculado pela correlação, da seguinte maneira:

$$D.R. = \left[ \frac{|\text{Valor}_{\text{ajustado}} - \text{Valor}_{\text{correlação}}|}{\text{Valor}_{\text{ajustado}}} \right] \times 100 \quad (4.21)$$

Para as correlações das equações (4.9) a (4.20) obteve-se um desvio relativo médio, D.R.M.:

$$\text{D.R.M.} = \frac{\sum_1^8 \text{D.R.}}{8} \quad (4.22)$$

Os valores dos desvios relativos médios das correlações para os parâmetros A, B, C, D são apresentados nas tabelas 4.17 a 4.20.

**Tabela 4.17** - D.R.M. das correlações para o parâmetro A

<b>Secador</b>	<b>D.R.M.(%)</b>	<b>Equação</b>
Fixo	0,71	(4.9)
Jorro	1,87	(4.13)
Jorro Fluidizado	3,55	(4.17)

**Tabela 4.18** - D.R.M. das correlações para o parâmetro B

<b>Secador</b>	<b>D.R.M.(%)</b>	<b>Equação</b>
Fixo	24,81	(4.10)
Jorro	25,36	(4.14)
Jorro Fluidizado	18,07	(4.18)

**Tabela 4.19** - D.R.M. das correlações para o parâmetro C

<b>Secador</b>	<b>D.R.M.(%)</b>	<b>Equação</b>
Fixo	13,46	(4.11)
Jorro	36,41	(4.15)
Jorro Fluidizado	52,51	(4.19)

**Tabela 4.20** - D.R.M. das correlações para o parâmetro D

<b>Secador</b>	<b>D.R.M.(%)</b>	<b>Equação</b>
Fixo	4,31	(4.12)
Jorro	5,53	(4.16)
Jorro Fluidizado	15,18	(4.20)

Conclui-se que as correlações são suficientes para prever os resultados dos parâmetros, uma vez que não apresentam desvios relativos médios elevados. Porém isto não se aplica às equações (4.15) e (4.19), para cálculo do parâmetro C, que apresentaram desvios relativos médios elevados: 36,41% para o leito de jorro e 52,51% para o leito de jorro fluidizado. Uma justificativa para este fato é que este parâmetro seja influenciado por outras condições, como por exemplo aspectos fluidodinâmicos (velocidade de jorro mínimo, taxa de circulação de sólidos, vazão do ar de secagem) e não apenas as analisadas neste trabalho.

## 4.8 Análise sensorial

Como já comentado no capítulo 3, foi realizado um teste de análise sensorial para avaliação dos efeitos que as temperaturas elevadas do ar de secagem causaram nos grãos, em relação ao seu potencial de consumo como alimento. Na realização da análise sensorial, junto a cada amostra foi entregue uma ficha contendo uma escala hedônica estruturada de 9 pontos.

A resposta de cada provador foi convertida em valores numéricos (0 = desgostei muitíssimo e 8.0 = gostei muitíssimo), os quais foram estatisticamente analisados por análise de variância univariada (ANOVA), fontes de variação: amostra e provador; teste de média Tukey ( $p \leq 0.05$ ) e análise gráfica da distribuição dos valores hedônicos versus porcentagem de provadores.

Os resultados da ANOVA indicaram que as amostras não diferem entre si ( $p \leq 0.05$ ) com relação à aceitação pelos provadores (Tabela 4.21).

**Tabela 4.21 - Análise de Variância (ANOVA)**

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
<b>Amostra</b>	2	1.21	0.60	0.5
<b>Provador</b>	29	95.01	3.28	2.69
<b>Resíduo</b>	58	70.63	1.22	
<b>Total</b>	89	166.85		

A distribuição dos valores hedônicos atribuídos pelos provadores (figuras 4.40, 4.41 e 4.42) confirma que as três amostras foram igualmente aceitas. De um modo geral, mais de 80% dos provadores reportaram graus de aceitação superiores a “gostei levemente”, independentemente da amostra avaliada.

A maior parte dos valores atribuídos pelos provadores se encontra entre os valores 5 e 7, que correspondem aos termos “gostei levemente” e “gostei muito” na escala hedônica. Na amostra 1, 73,34% dos valores se encontra neste faixa, na amostra 2, 70% e na amostra 3, 73,32%.

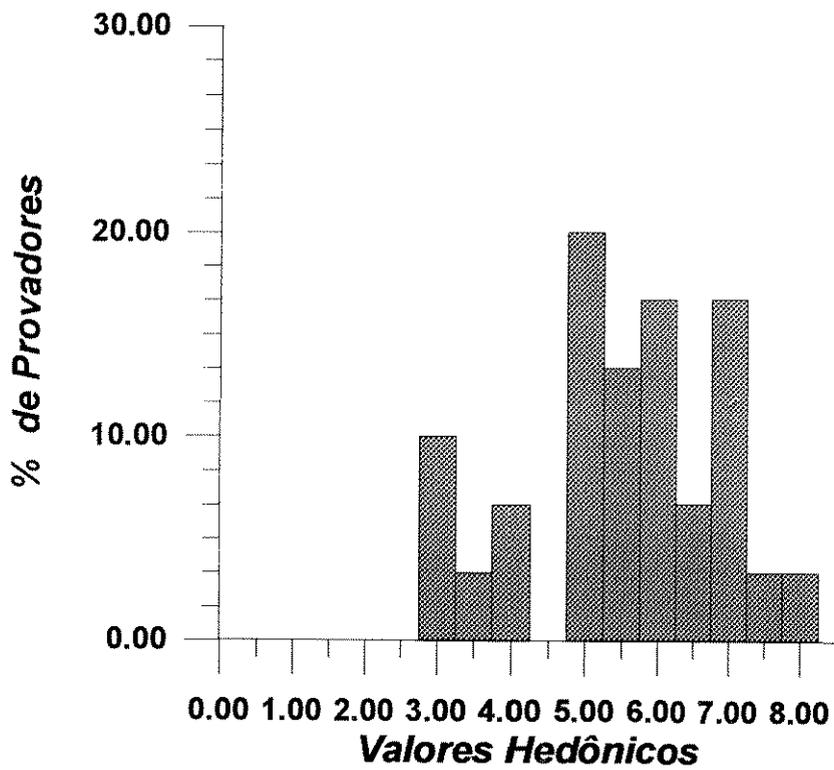
A tabela 4.22 apresenta as médias de aceitação de cada amostra.

**Tabela 4.22 - Médias de aceitação**

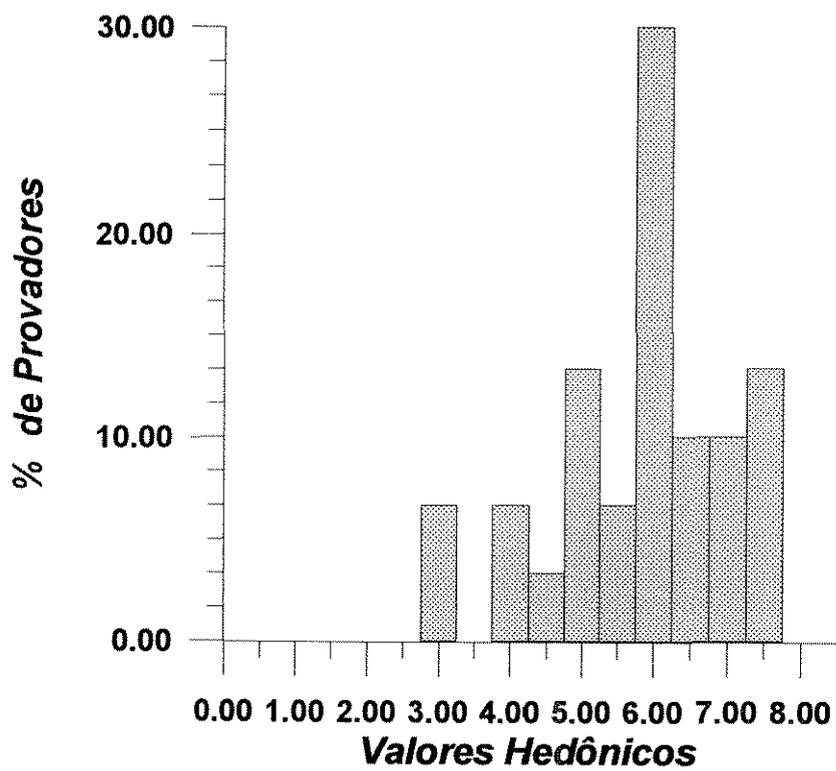
<b>Amostra</b>	<b>Média de Aceitação</b>
1	5.53
2	5.80
3	5.75

A média de aceitação das amostras foi 5.53 para a amostra 1; 5.80 para a amostra 2 e 5.75 para a amostra 3.

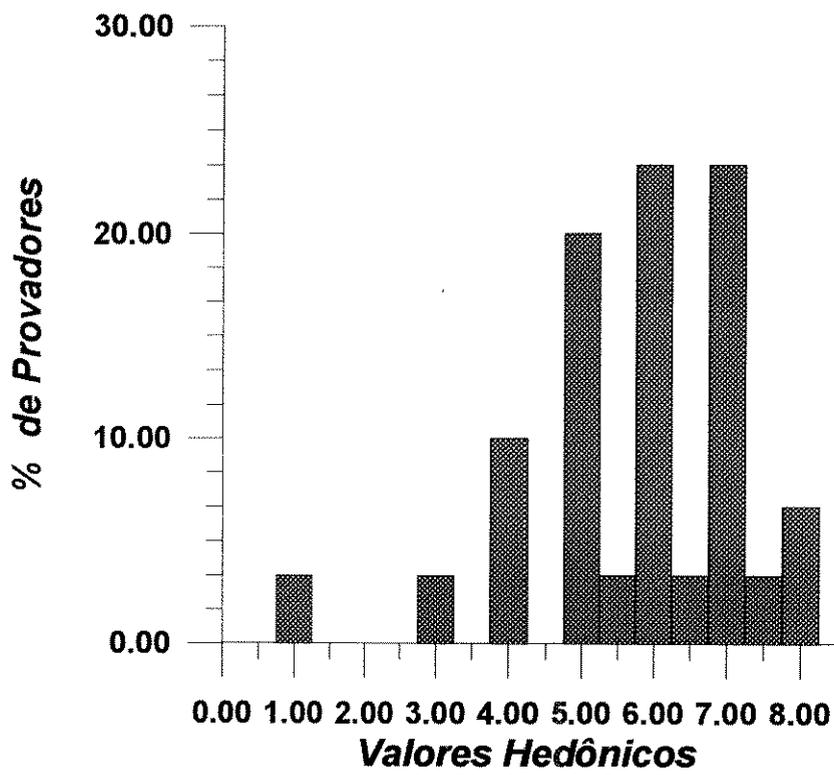
Desta forma, os resultados indicam claramente que os tratamentos aplicados às amostras de feijão não concorrem para uma diminuição ou aumento do nível de aceitação das amostras ( $p \leq 0.05$ ).



**Figura 4.40** - Histograma de frequência de valores hedônicos e % de provadores relativos - amostra 1 (controle)



**Figura 4.41-** Histograma de frequência dos valores hedônicos e % de provadores relativos-amostra 2 (73 °C)



**Figura 4.42** - Histograma de frequência dos valores hedônicos e % de provadores relativos-amostra 3 (83 °C)

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Com relação a obtenção de dados experimentais conclui-se que a técnica de planejamento fatorial se mostrou uma ferramenta bastante útil, pois permitiu a verificação das influências das variáveis do processo de uma forma sistemática, analisando ainda possíveis interações entre duas ou mais variáveis. Verificou-se que para os três leitões estudados, as influências significativas foram a temperatura do ar de secagem e a umidade inicial do grão, não havendo influência da massa de grãos nem de interações entre duas ou três variáveis.

A realização de experimentos com feijão pós-colheita, naturalmente úmido, para comparação com a secagem de feijão reumidificado, permitiu observar que a secagem com os dois tipos de grãos apresentou o mesmo comportamento, porém a umidade foi em alguns casos mais facilmente retirada para experimentos com feijão reumidificado, fato que é um indicativo de que em alguns dos experimentos não se conseguiu reproduzir no laboratório as mesmas condições que acontecem na natureza. É importante ressaltar que o comportamento cinético da curva foi o mesmo para os dois casos, apresentando somente o período de secagem à taxa decrescente.

A utilização de temperaturas de secagem superiores à recomendada pela literatura foi avaliada por meio do teste de análise sensorial e indicou que os diferentes tratamentos térmicos não modificaram o nível de aceitação do produto como alimento. No que diz respeito ao potencial de germinação do grão acredita-se que este tenha sido prejudicado, pois as temperaturas utilizadas foram praticamente 100% superiores à recomendada. Entretanto, os testes realizados neste trabalho se restringiram à análise do grão para consumo alimentar.

Pelos resultados obtidos da comparação entre os secadores não se pode afirmar que um dos três secadores é o mais indicado, uma vez que as diferenças não foram

significativas para curvas de secagem e, conseqüentemente, taxa de secagem. O que se observou foi um desempenho ligeiramente superior do leito fixo, fato este atribuído à forma da distribuição do ar de secagem sobre as partículas, o que proporcionou transferências de calor e massa mais efetivas.

Porém foram observadas diferenças de temperatura dos grãos no leito fixo, tanto na direção axial como na radial. Esse fato, já perceptível em pequena escala, tem conseqüências muito maiores quando se opera o secador em condições industriais, provocando uma não homogeneidade do produto final.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que os secadores de leito de jorro e de leito de jorro fluidizado apresentam potencial de utilização para a secagem de feijão, devido também ao fato de a geometria do feijão ter possibilitado o movimento cíclico dos grãos, característico de jorro, e não ter provocado o descascamento, mesmo ocorrendo atrito entre os grãos. Com relação ao leito de jorro, este fato reforça a comprovação de trabalhos já realizados com diferentes grãos: arroz, trigo, milho etc e em se tratando do secador de leito de jorro fluidizado, contribui sobremaneira uma vez que não se conhece trabalhos experimentais de secagem de grãos realizados em tal equipamento. Outra vantagem da utilização de leitos móveis é o fato de sua dinâmica possibilitar o transporte do material.

Outra verificação foi que as condições experimentais utilizadas para a secagem dos grãos foram adequadas, não provocando injúrias mecânicas nem trincamentos.

Com base nos critérios energéticos as operações foram bastante dispendiosas, o que já é conhecido quando se trata de secagem convectiva e aumenta ainda mais quando a operação é realizada em batelada. O leito fixo apresentou um desempenho superior em relação aos coeficientes energéticos avaliados, mas os valores numéricos indicam que as diferenças entre os três secadores não foram suficientes como critério para apontá-lo como o melhor secador.

Este trabalho também contribuiu determinando os parâmetros do modelo empírico para as curvas de secagem, na faixa dos valores experimentais utilizados, através da equação (4.5).

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Uma sugestão é que a análise aqui realizada seja feita com secadores em escala piloto, para verificação do comportamento da secagem nos três diferentes leitos, já que os experimentos em escala de laboratório indicaram a viabilidade de se utilizar secadores de leito de jorro e de leito de jorro fluidizado. Acredita-se que trabalhando-se em escalas maiores consiga-se maiores diferenças nos resultados de secagem e análise energética.

Com relação ao leito de jorro fluidizado este se mostrou um equipamento bastante promissor, pois proporcionou o movimento dos grãos de uma forma ordenada, sem danificá-los, aquecendo-os de uma forma mais branda. Como sugestão tem-se a realização da secagem de outros grãos em tal configuração. Neste caso torna-se importante a escolha do melhor regime de operação, de forma a maximizar as transferências de calor e massa. Um estudo mais detalhado da razão vazão secundária / vazão principal seria fundamental, havendo ainda a possibilidade de utilização de temperaturas diferentes nas regiões central e anular.

Uma avaliação econômica dos custos de instalação e manutenção dos leitos de jorro e jorro fluidizado em pequenas e médias propriedades rurais, projetados de forma a secar uma determinada carga / dia torna-se também necessária, para ser possível obter-se dados para uma análise técnico-econômica, que justificaria ou não a utilização destes equipamentos como secadores de grãos.

Com relação à cinética de secagem do feijão, sugere-se a realização de uma modelagem semi-empírica, de forma a melhor descrever o comportamento da secagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES FILHO,O; MASSARANI,G. Secagem de café cereja em leito de jorro. In: MASSARANI,G. Secagem de produtos agrícolas - coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p. 77-89.
- ANTUNES, P.L. Composição e propriedades nutricionais das proteínas do feijão rosinha G2 (*Phaseolus vulgaris L.*). Campinas, 1979. 166p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- AM. SOC. AGRIL. ENGRS. ASAE 1982 Agricultural engineers yearbook,. St. Joseph, apud MUTHU,V.P.; CHATTOPADHYAY,P.K. Prediction of heat of vaporization of moisture from cereal grains - a modelling approach, Drying Technology, v.11 n.7, p.1855-1862, 1993.
- BAKKER-ARKEMA,F.W.; BICKERT,W.G.; PATTERSON,R.J.Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions, J. agric. Engng. Res, v.12, n.4, p.297-307, 1967.
- BIMBINET,J.J. Criteria of energetic performance for convection-type dryers, Drying's 82, Washington, Hemisphere Publishing Company, p. 121-128, 1982.
- BOX, G.E.P.; HUNTER,J.H.; HUNTER,W.G. Statistics for experimenters - an introduction to design, data analysis and model building, New York, John Wiley & Sons, 1978. 653p.
- BROOKER,D.B.; BAKKER-ARKEMA,F.W.; HALL,C.W.; Drying cereal grains, The Avi Publishing Company Inc., 1974. 265p.

- BRUNELLO,G.; PECK,R.E.; DELLA NINA,G. The drying of barley malt in the spouted bed dryer, Can. J. Chem. Eng., v.52, p.201-205, 1974.
- CENKOWSKI,S.; JAYAS,D.S.; PABIS,S.; Deep-bed grain drying - a review of particular theories, Drying Technology, v.11, n.7, p.1553-1581, 1993.
- CHATTERJEE, A. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Develop., v.9, p.340, 1970 apud SUTANTO,W.; EPSTEIN,N.; GRACE,J.R. Hydrodynamics of spout-fluid beds, Powder Tech, v.44, p.205-212, 1985.
- CREMASCO,M.A.; MASSARANI,G. Secador em batelada de leito de jorro para arroz III. In: MASSARANI,G. Secagem de produtos agrícolas - coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p.69-76.
- CREMASCO,M.A.; ROCHA,S.C.S.; MASSARANI,G. Secagem de milho em leito de jorro. In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, Uberlândia, 1987. Anais, UFU, Uberlândia, 1987. v.2, p.382-393.
- DAUDIN,J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l' air chaud des produits biologiques solides, Science des Aliments, v.3, n.1, p.1-36, 1983.
- FREITAS,M.E.A.; PASSOS,M.L. Estudo da secagem de grãos e sementes em leito de jorro em regime transiente, In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, 1995. Resumos. Viçosa, UFV, 1995. Res.419.
- HIMMELBLAU,D.M. Engenharia química - princípios e cálculos, Rio de Janeiro - RJ, Editora Prentice Hall do Brasil, 1984. p. 467.
- HUKILL,W.V. Grain drying. In: ANDERSON,J.A.; ALCOCK,A.W. Storage of cereal grains and their products, Am.Ass.Cereal Chem., St. Paul, 1954 apud PARRY,J.L.

Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review, J. agric. Engng. Res., v.32, n.1, p.1-29, 1985.

KALWAR,M.I.; RAGHAVAN,G.S.V. Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates, Drying Technology, v.11, n.2, p.339-354, 1993.

KAMINSKI,W.; ZBICINSKI,I.; GRABOWSKI,S.; STRUMILLO,C. Multiobjective optimization of drying process, Drying Technology, v.7, n.1, p.1-16, 1989.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - Anuário Estatístico do Brasil 1990. Rio de Janeiro, IBGE, 1990, v.50. 784p.

JAYAS,D.S.; CENKOWSKI,S.; PABIS,S.; MUIR,W.E. Review of thin-layer drying and wetting equations, Drying Technology, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

LAWS,N. ; PARRY,J.L. Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying, Proc. R. Soc. London A, v.385, p.169-187, 1983 apud CENKOWSKI,S.; JAYAS,D.S.; PABIS,S.; Deep-bed grain drying - a review of particular theories, Drying Technology, v.11, n.7, p.1553-1581, 1993.

LITTMAN,H et al., In: KEAIRNS,D.L., Fluidization Technology, Washington D.C., Hemisphere, v.1, p.373, 1976 apud SUTANTO,W.; EPSTEIN,N.; GRACE,J.R. Hydrodynamics of spout-fluid beds, Powder Tech, v.44, p.205-212, 1985.

MASSARANI,G. Projeto de secadores de leito de jorro para grãos, In: MASSARANI,G. Secagem de produtos agrícolas - coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p.129-136.

MATHUR, K.B.; EPSTEIN,N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.

- MATHUR,K.B.; GISHLER,P.E. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying, J. Appl. Chem., v.5, p.624, 1955a apud MATHUR, K.B.; EPSTEIN,N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- MATHUR,K.B.; GISHLER,P.E. A technique for contacting gases with coarse solid particles, A. I. Ch. E. J., v.1, p.157, 1955b apud MATHUR, K.B.; EPSTEIN,N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- MEILGAARD,M.; CIVILLE,G.V.; CARR,B.T. Sensory evaluation techniques, Boca Raton, CRC Press Inc., 1987. 281p.
- MILNER,M.; SHELLENBERGER,J.A. Physical properties of weathered wheat in relation to internal fissuring detected radiographically, Cereal Chem., v.30, p.202-212, 1953 apud SOKHANSANY,S.; SINGH,D.; WASSERMAN,J.D. Drying characteristics of wheat, barley and canola subjected to repetitive wetting and drying cycles, Transactions of the ASAE, v.27, n.3, p.903-906, 1984.
- MUTHU,V.P.; CHATTOPADHYAY,P.K. Prediction of heat of vaporization of moisture from cereal grains - a modelling approach, Drying Technology, v.11 n.7, p.1855-1862, 1993.
- OWER,E.; PANKHURST,R.C. The measurement of air flows, Great Britain, 5.ed, Pergamon Press, 1977, 362 p.
- PARRY,J.L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review, J. agric. Engng. Res., v.32, n.1, p.1-29, 1985.
- PASSOS,M.L.; MUJUMDAR,A.S. ; RAGHAVAN, V.G.S. Spouted and spout-fluidized beds for grain drying, Drying Technology, v.7, n.4, p.663-696, 1989.

- PUZZI,D. Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos, São Paulo, Agronômica Ceres, 1977. 405 p.
- RICHARDSON,A.S.; JENSON,W.M.P. Energy research and development, Adm. Aerojet Nucl., Comp. report , nº E (10-1)-1375, 1976 apud STRUMILLO,C; KUDRA,T. Drying: principles, application and design, London, R. Hughes Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.
- SHAN-HUA,C. Modelos empíricos e teóricos de secagem analisados com base em dados para feijão, Campinas, 1989. 245 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- SHARP,J.R. A review of low temperature drying simulation models, J. agric Engng. Res., v.27, p.169-190, 1982.
- SILVA, G.F. Processamento de urucum em leite de jorro, Campina Grande, 1991.138 p. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.
- SPENCER,H.B. A mathematical simulation of grain drying, J. agric. Engng Res, v. 14, n.3, p.226-238, 1969.
- SOKHANSANY,S.; SINGH,D.; WASSERMAN,J.D. Drying characteristics of wheat, barley and canola subjected to repetitive wetting and drying cycles, Transactions of the ASAE, v.27, n.3 p.903-906, 1984.
- STRUMILLO,C; KUDRA,T. Drying: principles, application and design, London, Ed. R. Hughes Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.
- SUTANTO,W.; EPSTEIN,N.; GRACE,J.R. Hydrodynamics of spout-fluid beds, Powder Tech, v.44, n.3, p.205-212, 1985.

- THOMPSON,T.L.; PEART,R.M.; FOSTER,G.H.; Mathematical simulation of corn drying, Trans. ASAE, v.11, n.4 , p.582-586, 1968.
- VASCONCELOS,L.G.S. Simulação de secagem de feijão em fluxo cruzado, Campina Grande, 1990. 135 p. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.
- VISWANATHAN,K.; LYALL,M.S.; RAYCHAUDHURI,B.C. Spouted bed drying of agricultural grains, Can. J. Chem. Eng., v.64, p.223-232, 1986.
- VUKOVIC,D.V. et al. Flow regimes for spout-fluid beds, Can. J. Chem. Eng., v.62, p.825-829, 1984.
- XAVIER,N.J.D. Comunicação pessoal, Campinas, 1994.

## **APÊNDICE A**

**Neste apêndice é apresentada a ficha de avaliação utilizada na análise sensorial.**

## ESCALA HEDÔNICA ESTRUTURADA

NOME: \_\_\_\_\_ DATA: \_\_\_\_\_

Avalie a amostra usando a escala abaixo para descrever o quanto você gostou ou desgostou do produto.

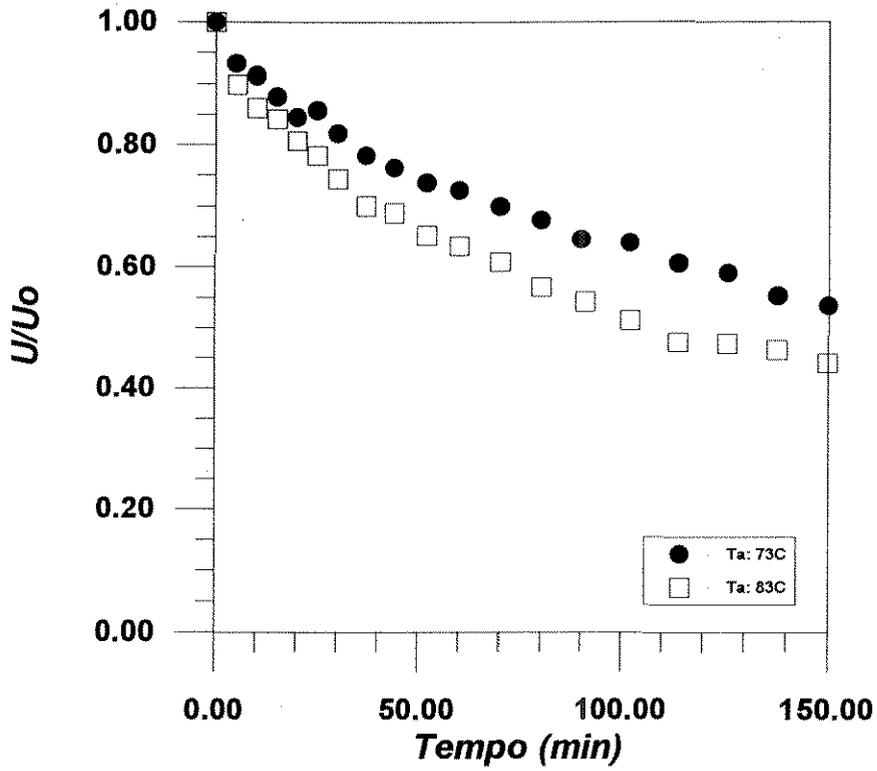
Amostra nº \_\_\_\_\_

gostei muitissimo  
gostei muito  
gostei moderadamente  
gostei levemente  
nem gostei nem desgostei  
desgostei levemente  
desgostei moderadamente  
desgostei muito  
desgostei muitissimo

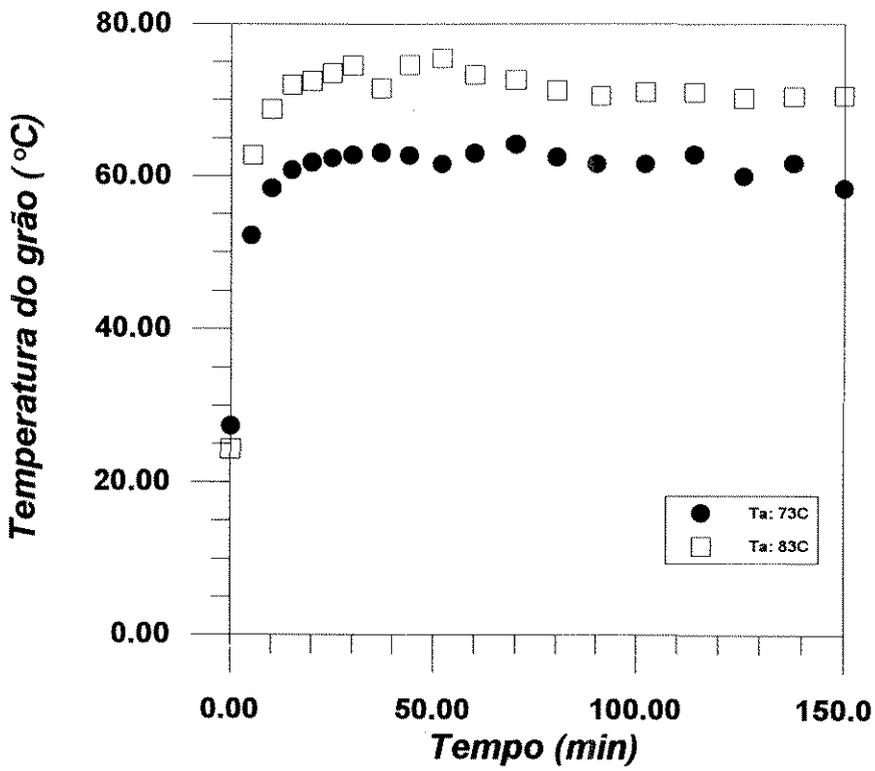
**Figura A1** - Ficha de avaliação utilizada na análise sensorial das amostras

## **APÊNDICE B**

**Neste apêndice são apresentadas as influências das variáveis do processo na secagem.**



(a)

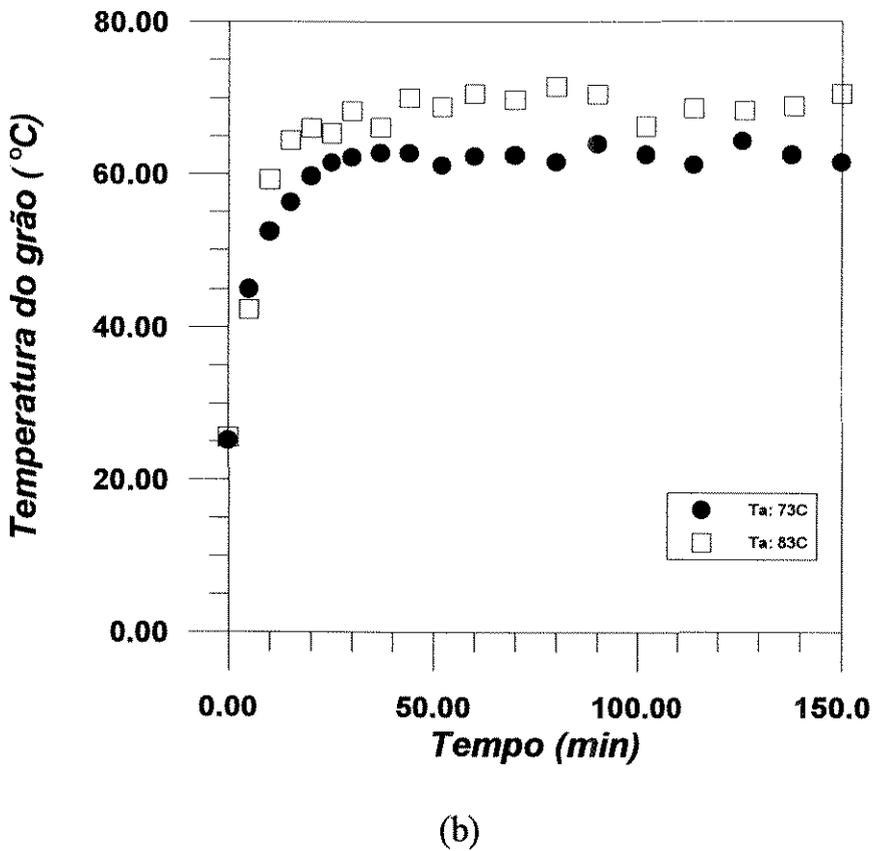
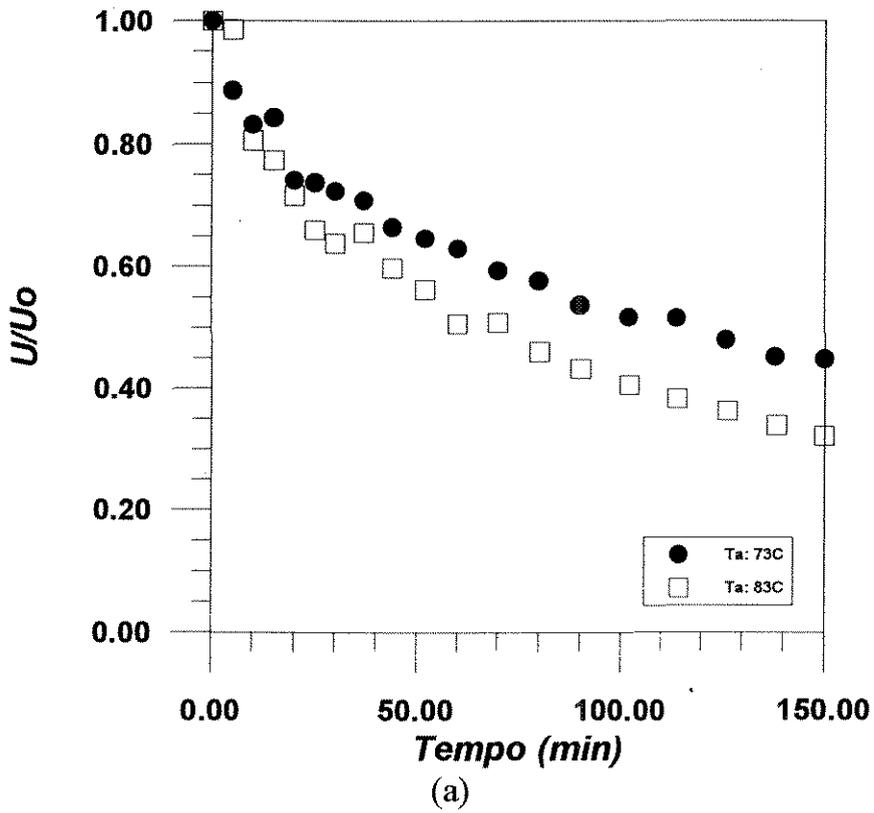


(b)

**Figura B1 - Influência da temperatura do ar**

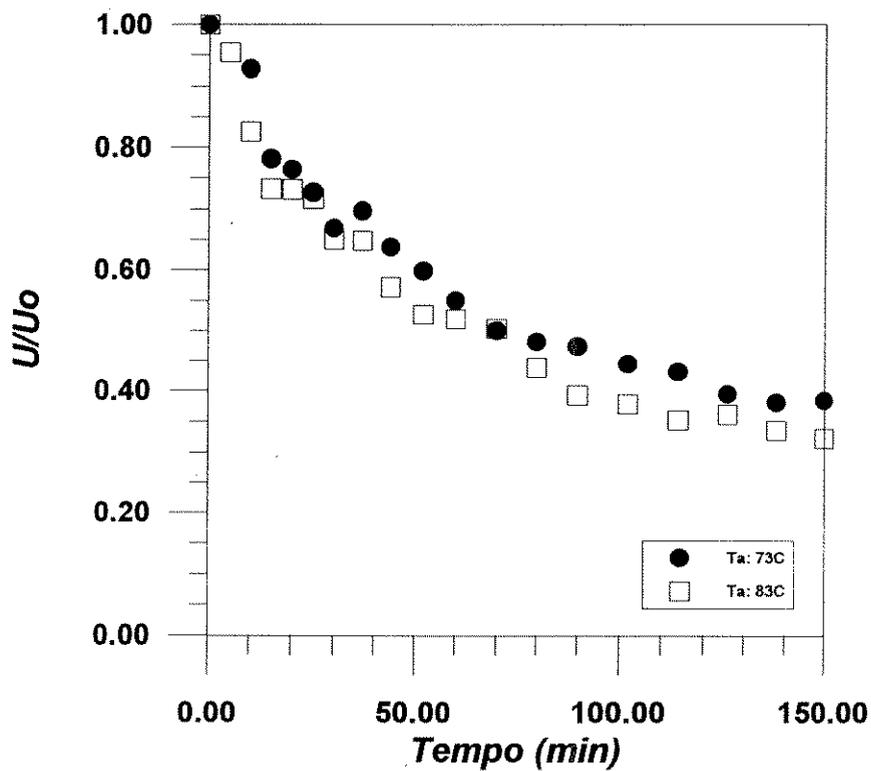
Leito Fixo - M: 1500 g  $U_o$ : 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

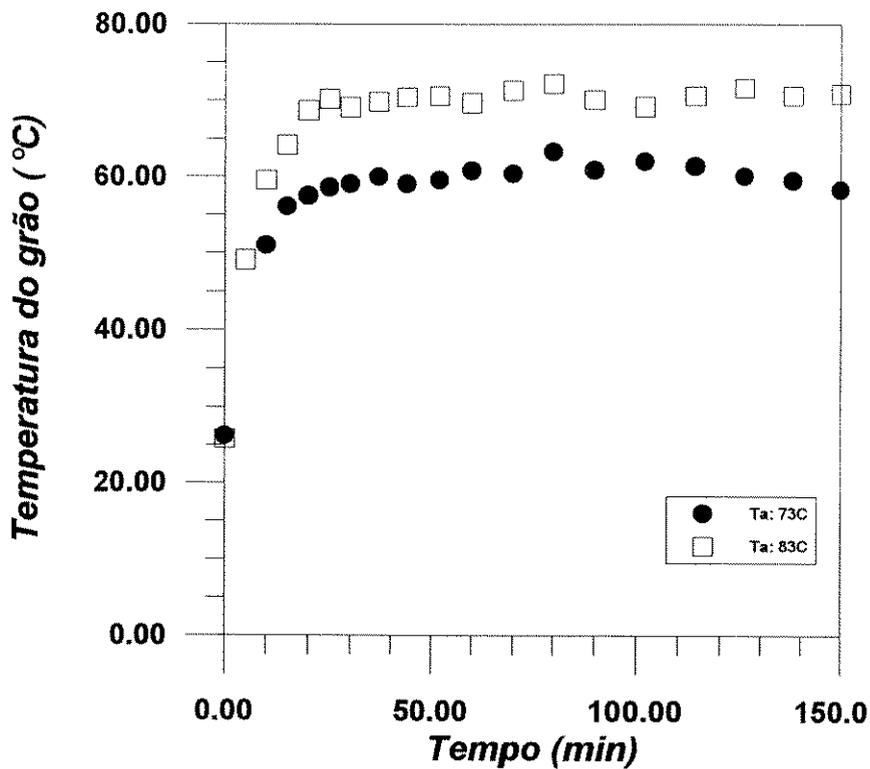


**Figura B2 - Influência da temperatura do ar**  
 Leito Fixo - M: 1500 g U<sub>o</sub>: 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)

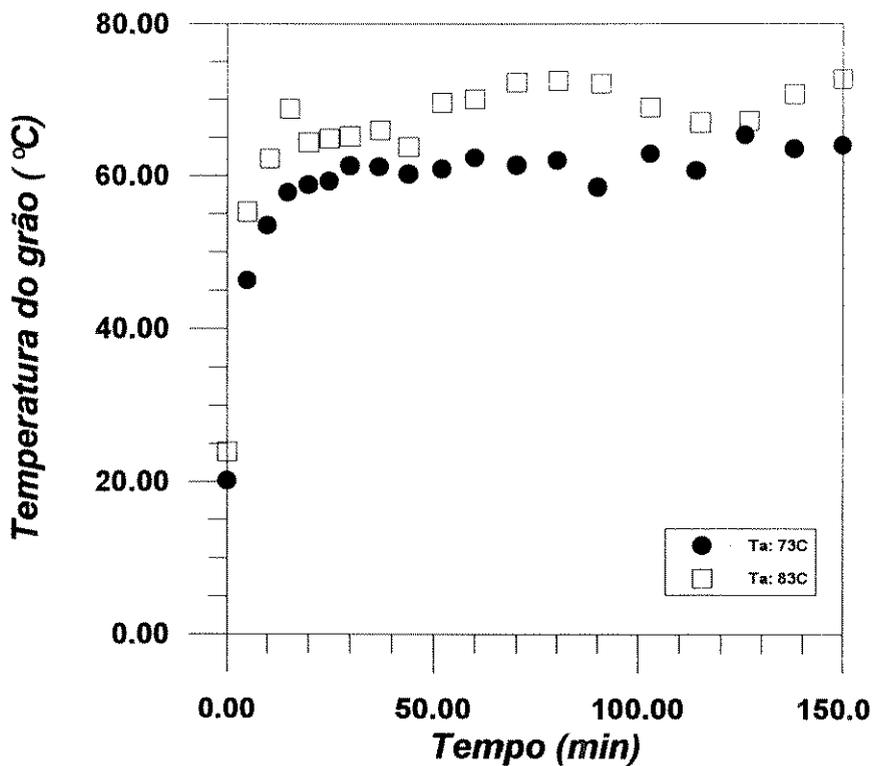
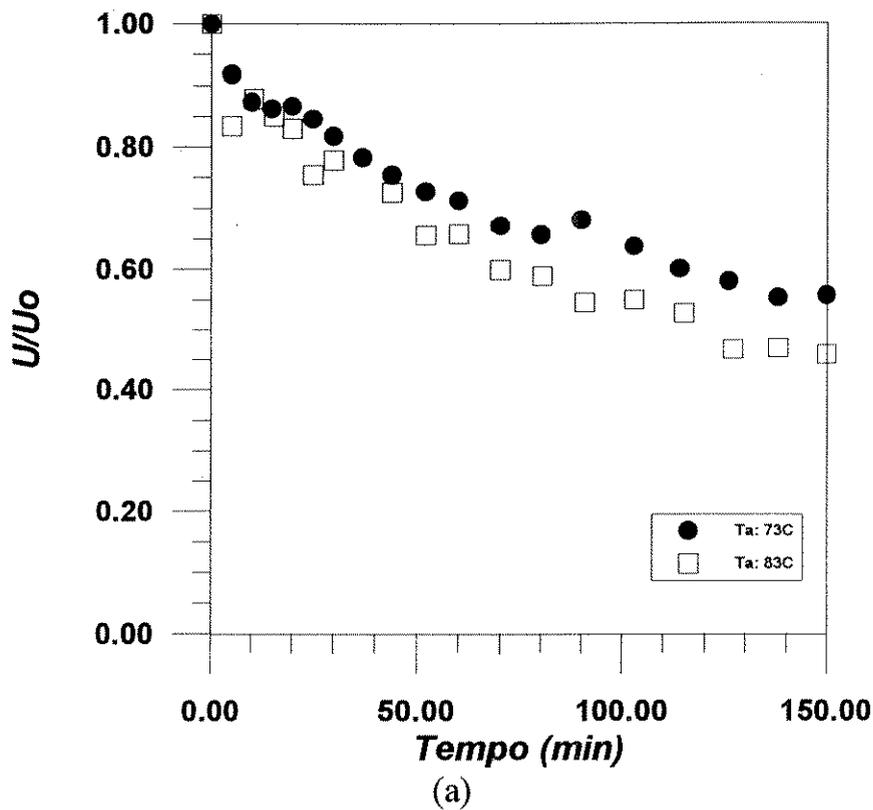


(b)

**Figura B3 - Influência da temperatura do ar**

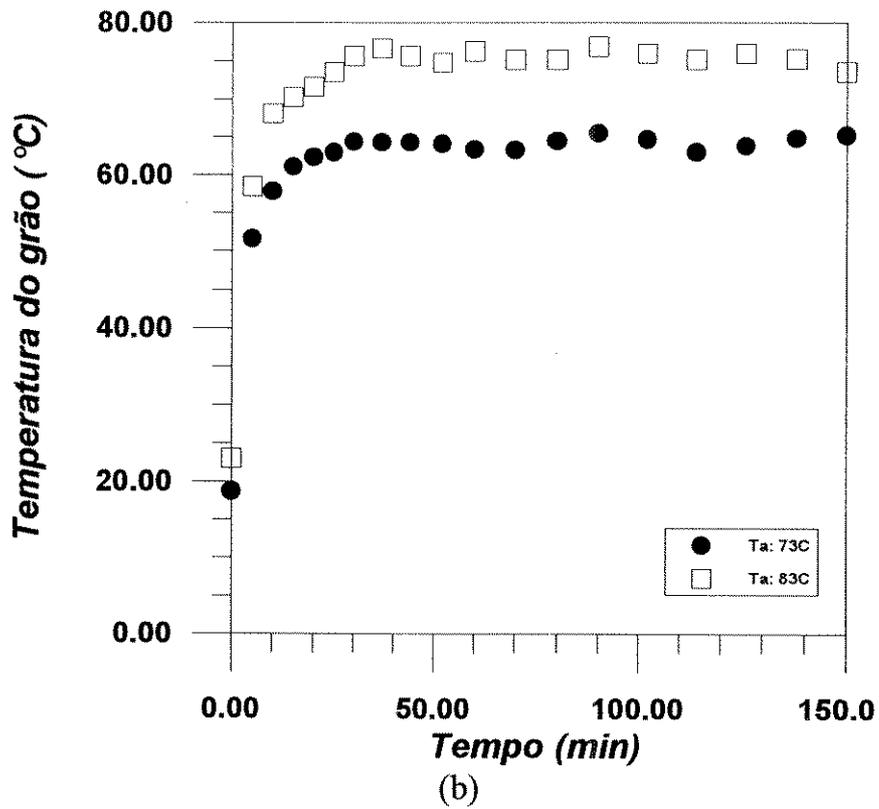
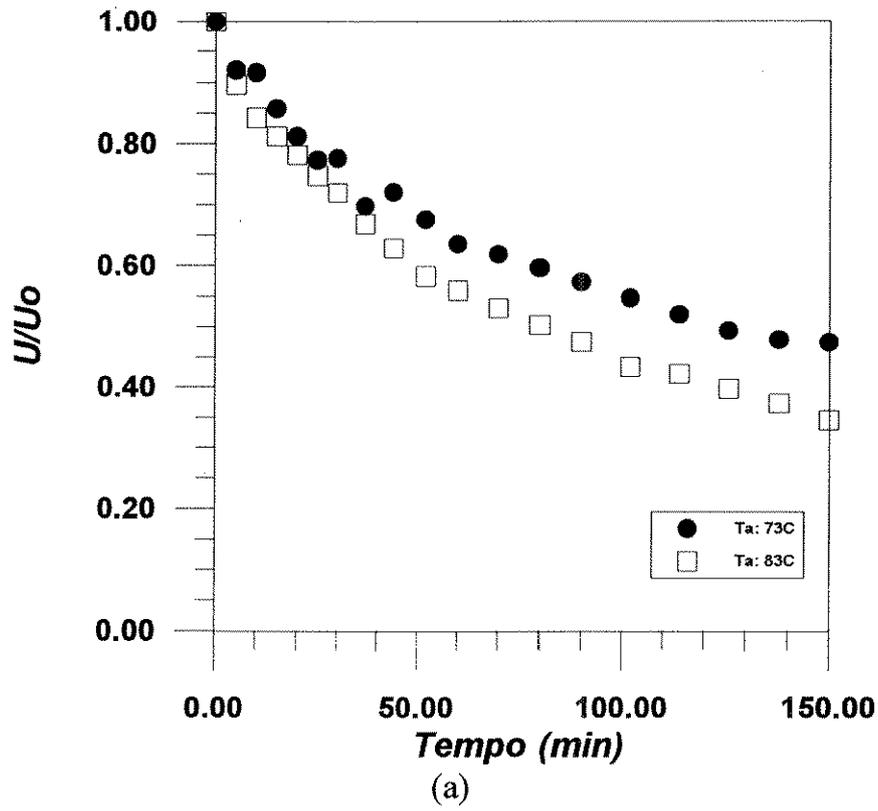
Leito Fixo - M: 3000 g  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



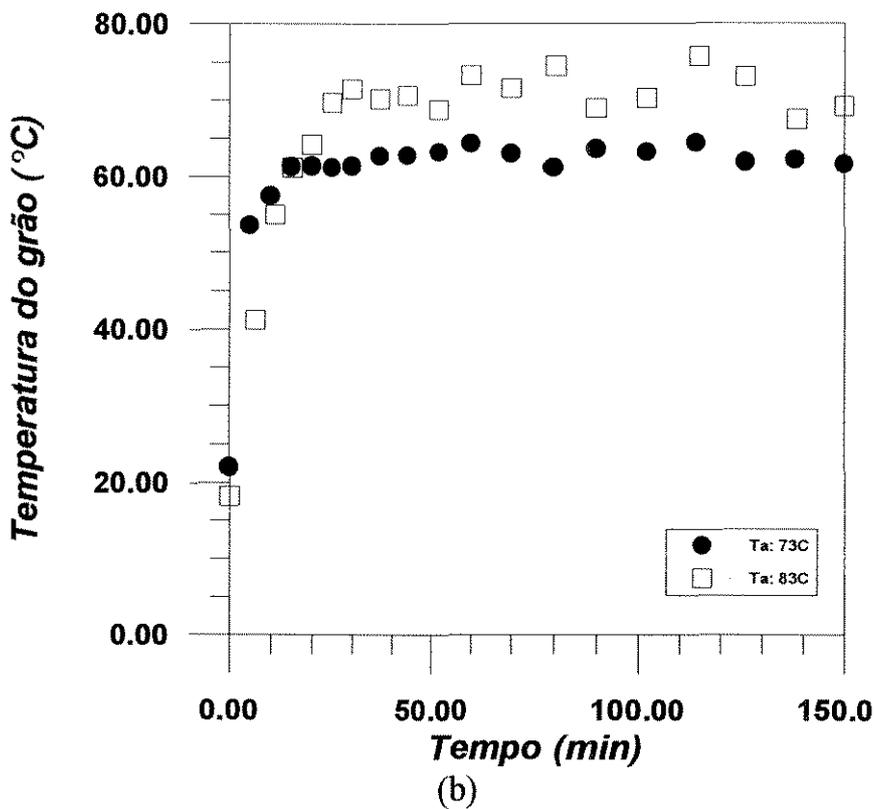
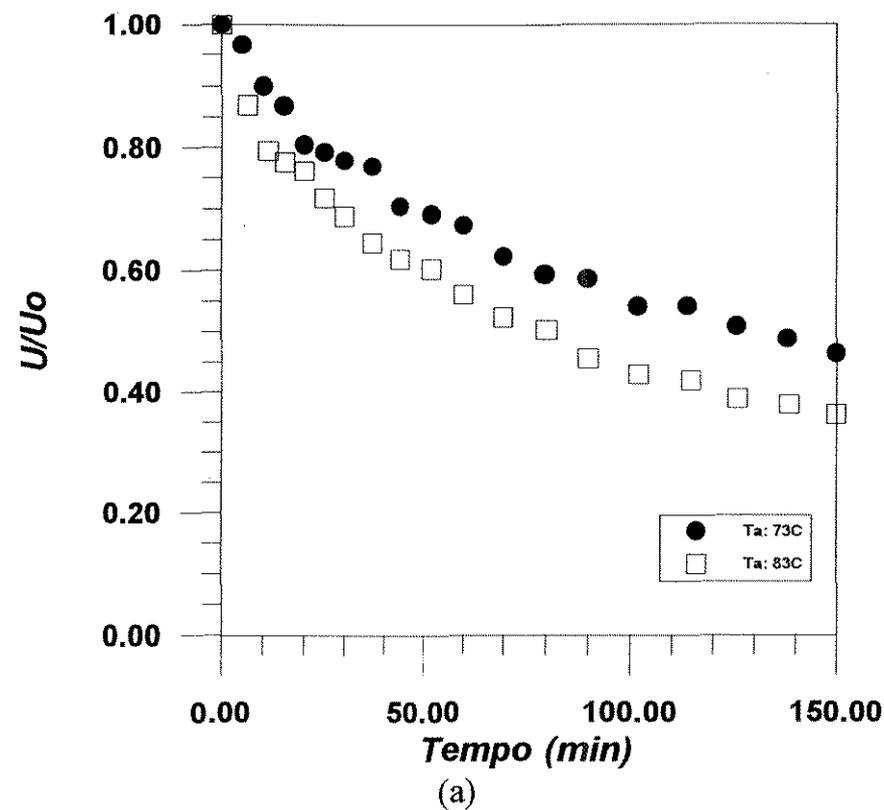
**Figura B4 - Influência da temperatura do ar**  
 Leito de Jorro - M: 1500 g U<sub>o</sub>: 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



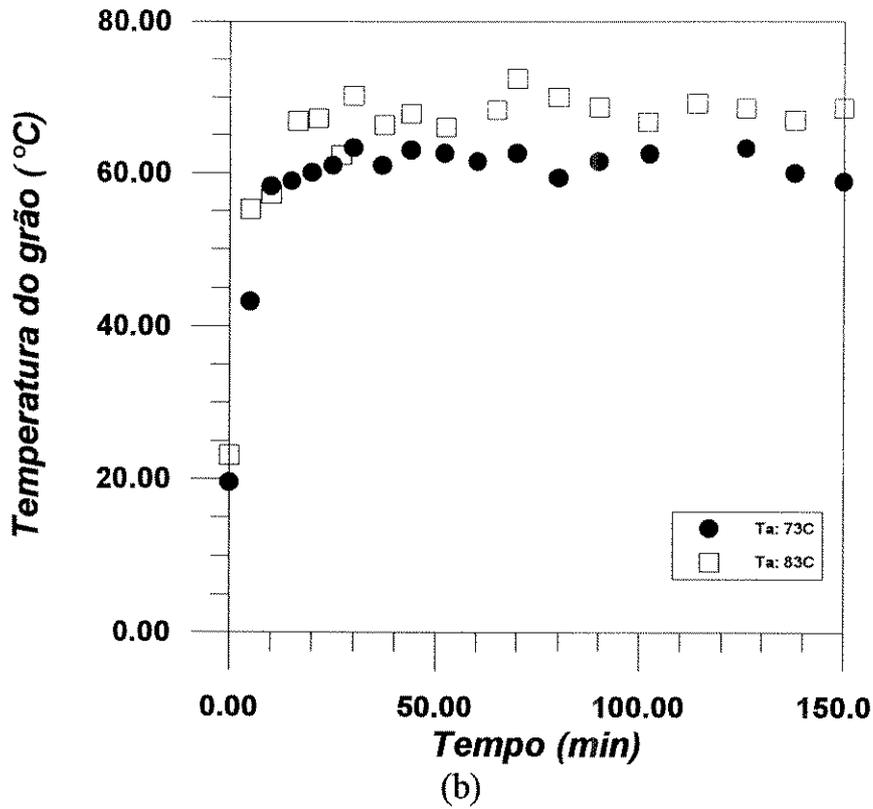
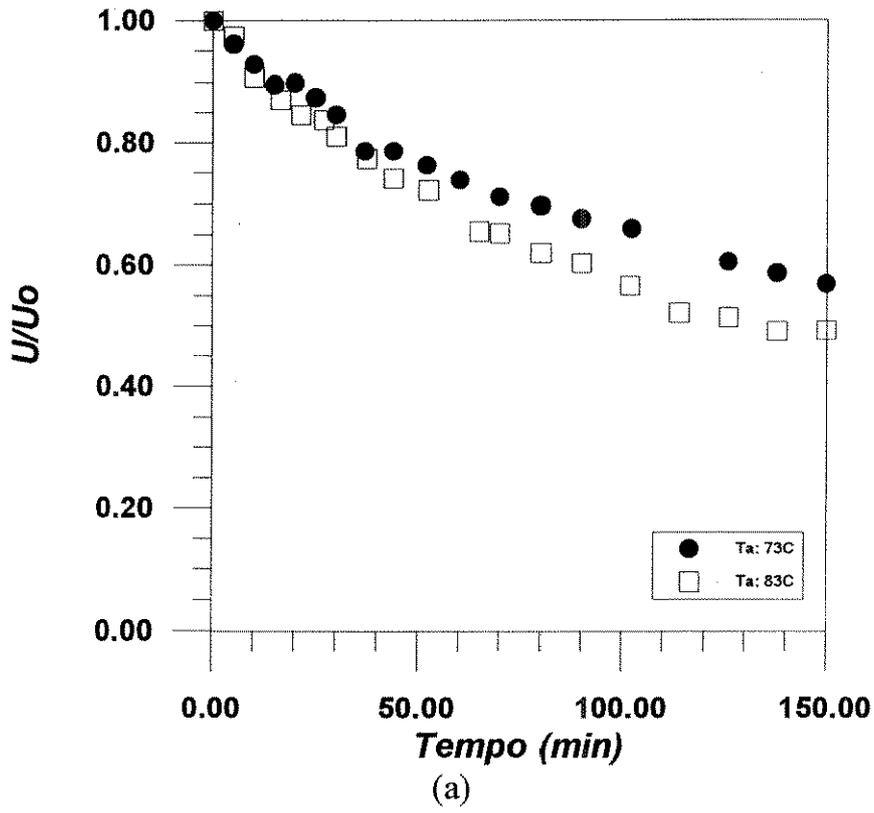
**Figura B5 - Influência da temperatura do ar**  
 Leito de Jorro - M: 1500 g U<sub>o</sub>: 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



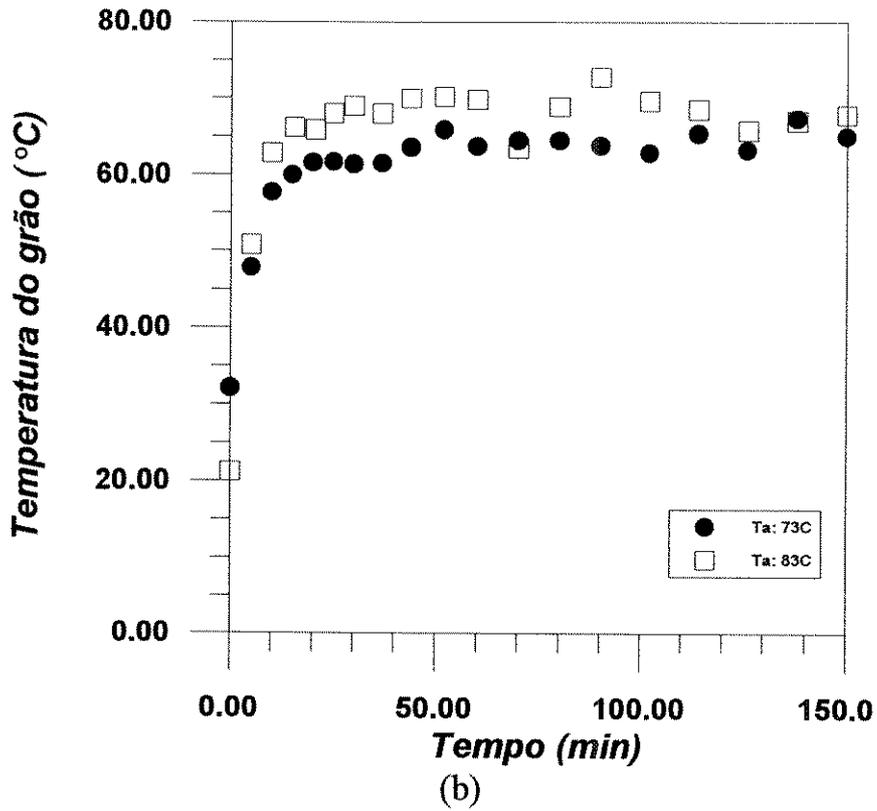
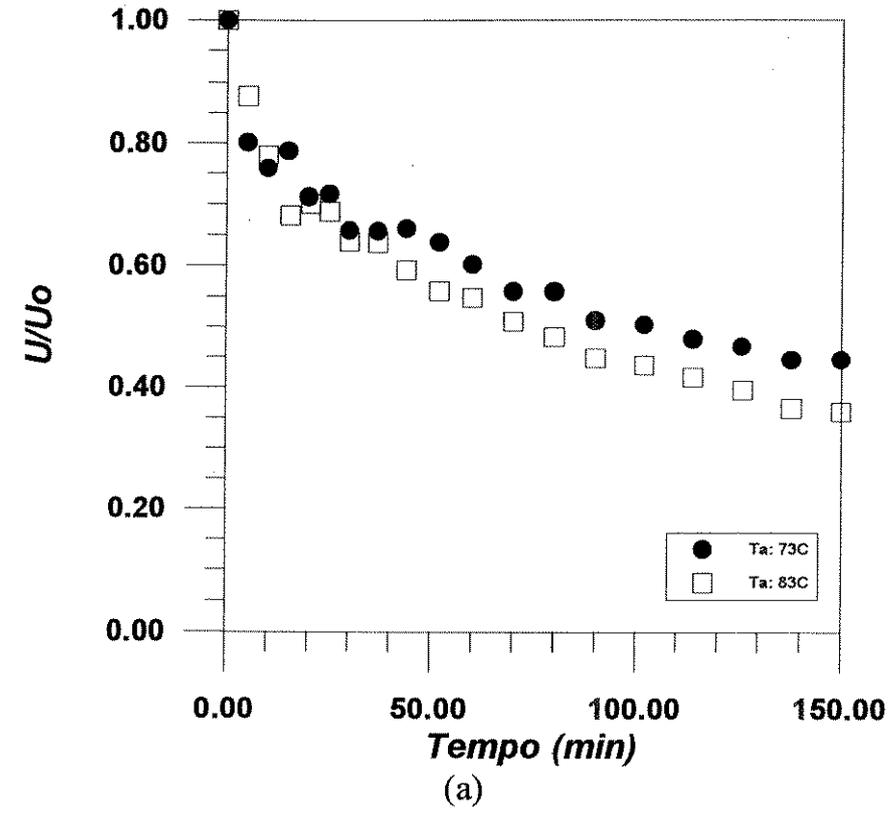
**Figura B6 - Influência da temperatura do ar**  
 Leito de Jorro - M: 3000 g U<sub>o</sub>: 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

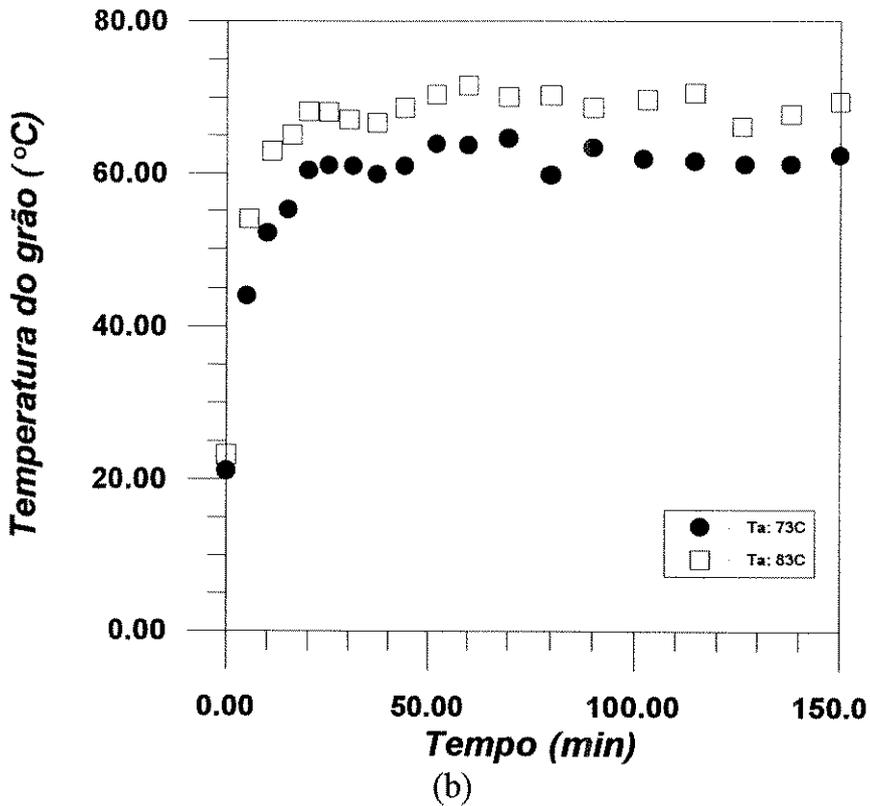
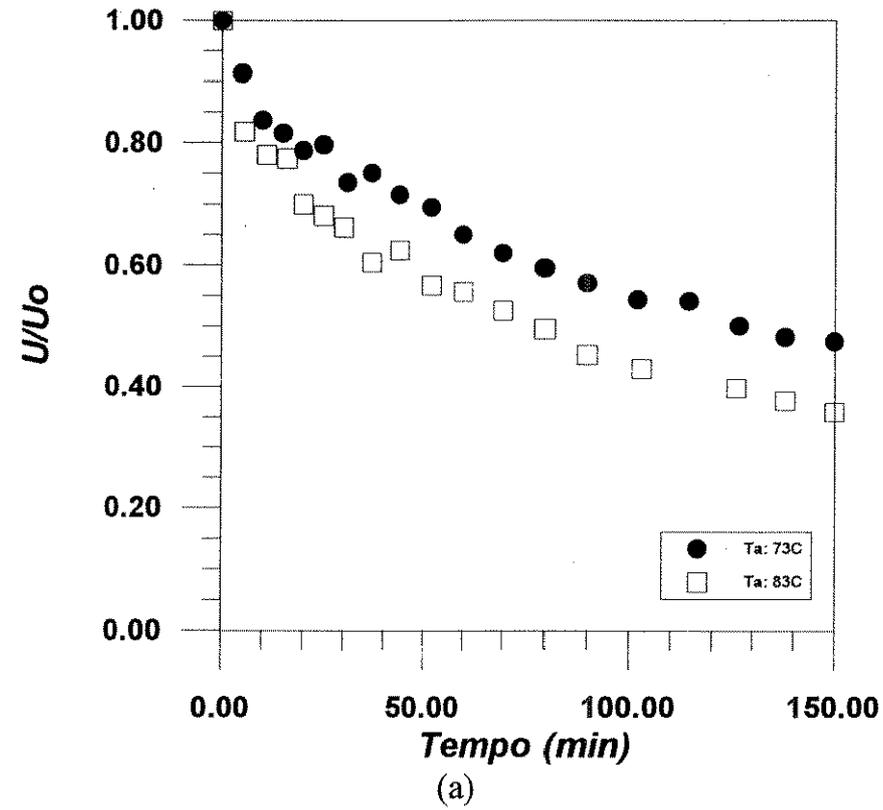


**Figura B7** - Influência da temperatura do ar  
 Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g U<sub>o</sub>: 20% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B8** - Influência da temperatura do ar  
Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g U<sub>o</sub>: 30% b.s.  
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B9** - Influência da temperatura do ar  
Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g U<sub>o</sub>: 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

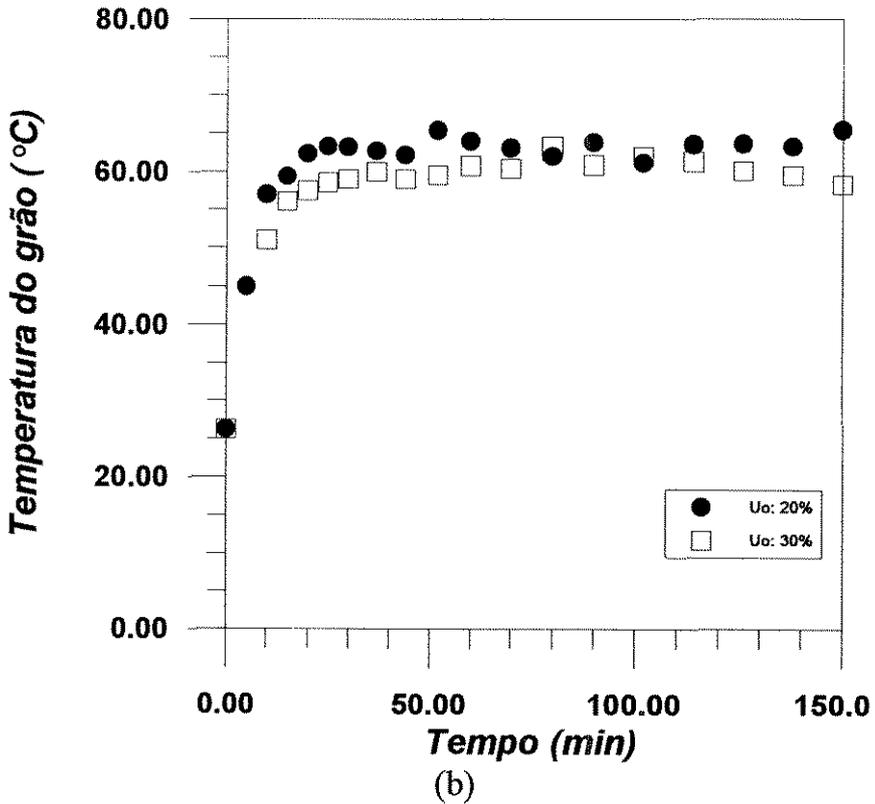
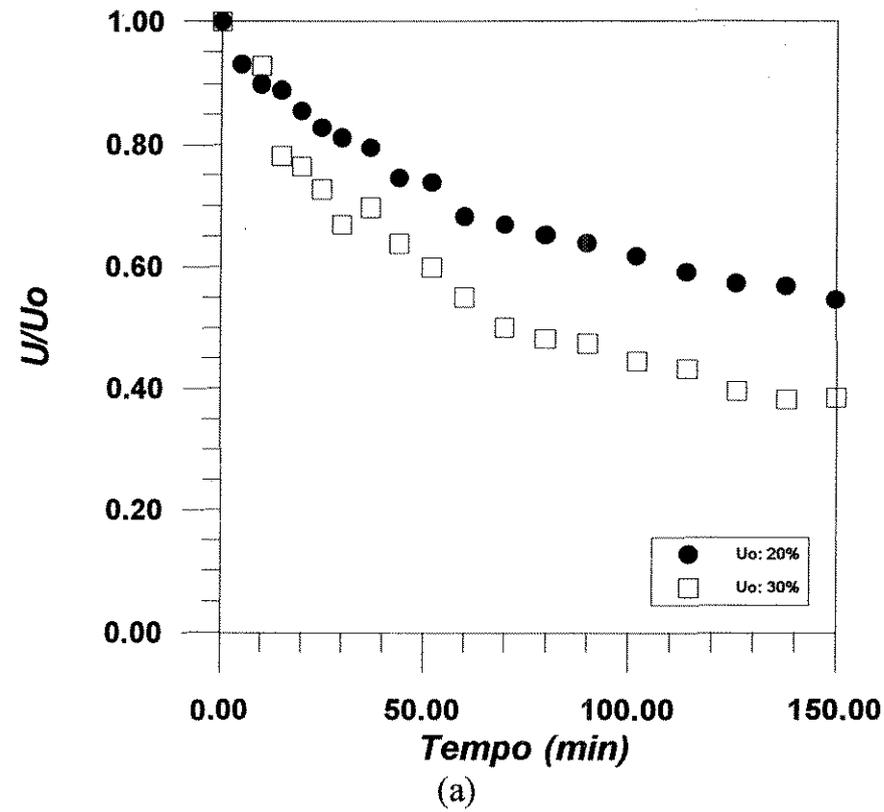
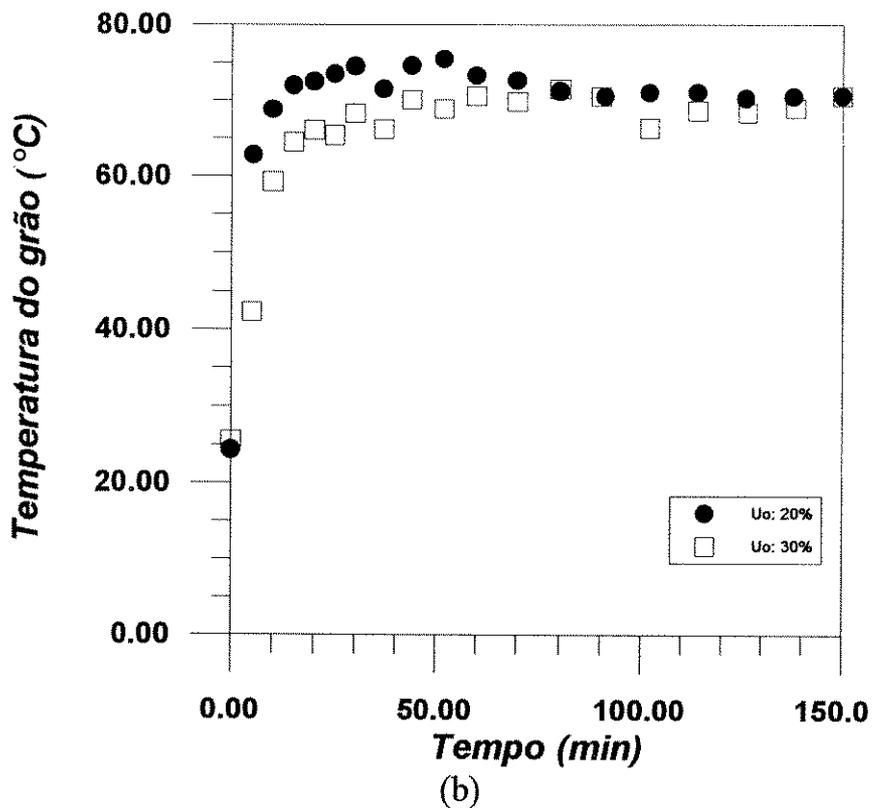
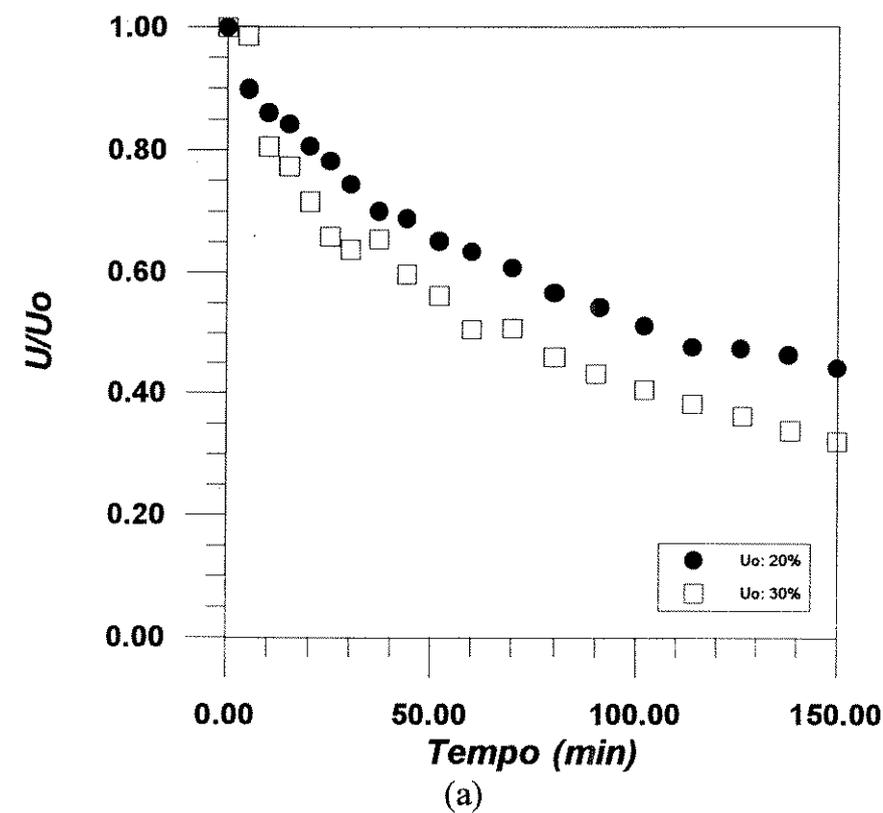


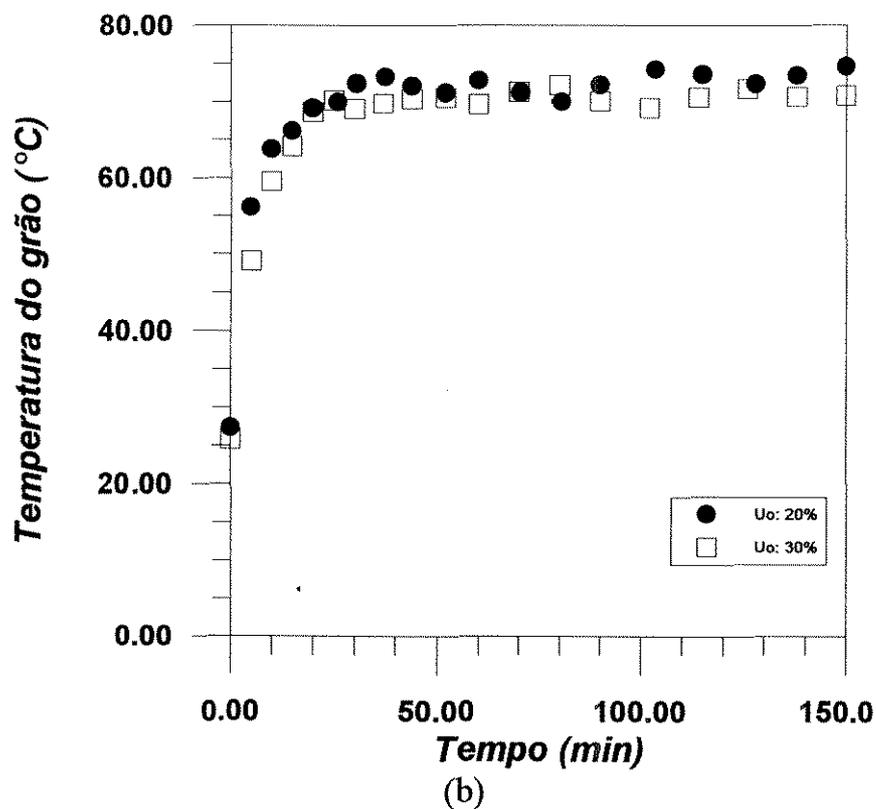
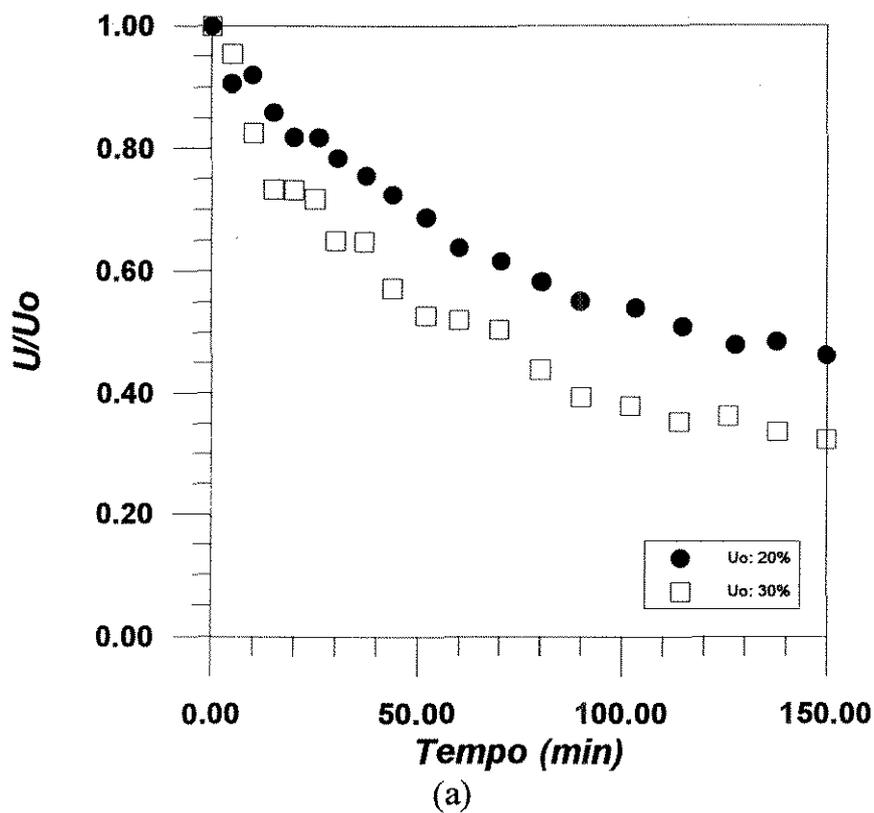
Figura B10 - Influência da umidade inicial do grão  
Leito Fixo - M: 3000 g T<sub>a</sub>: 73°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



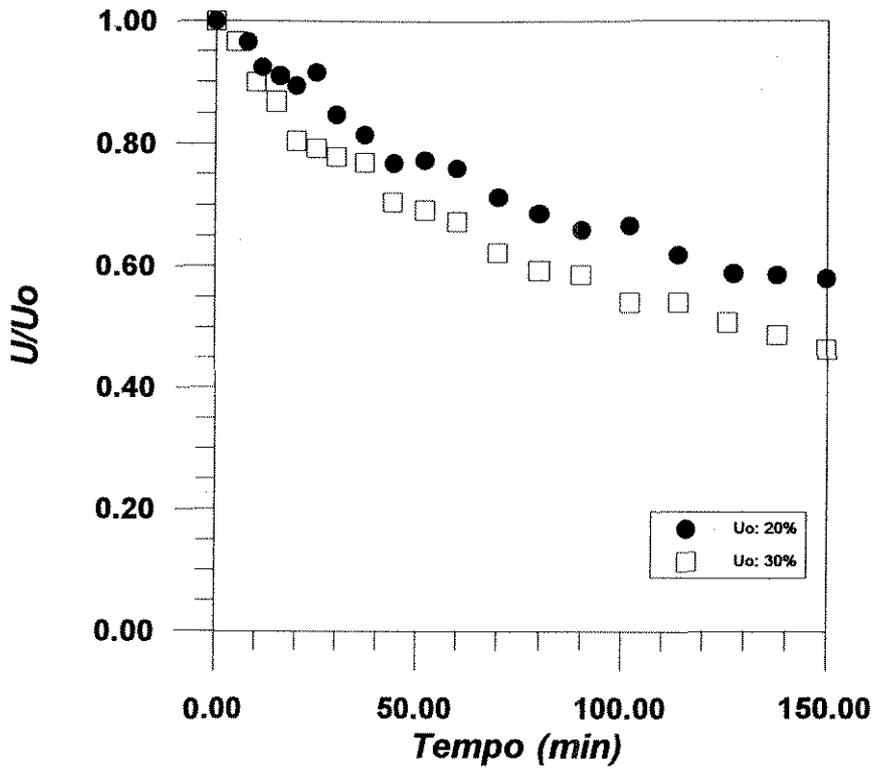
**Figura B11** - Influência da umidade inicial do grão  
 Leito Fixo - M: 1500 g  $T_a$ : 83°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

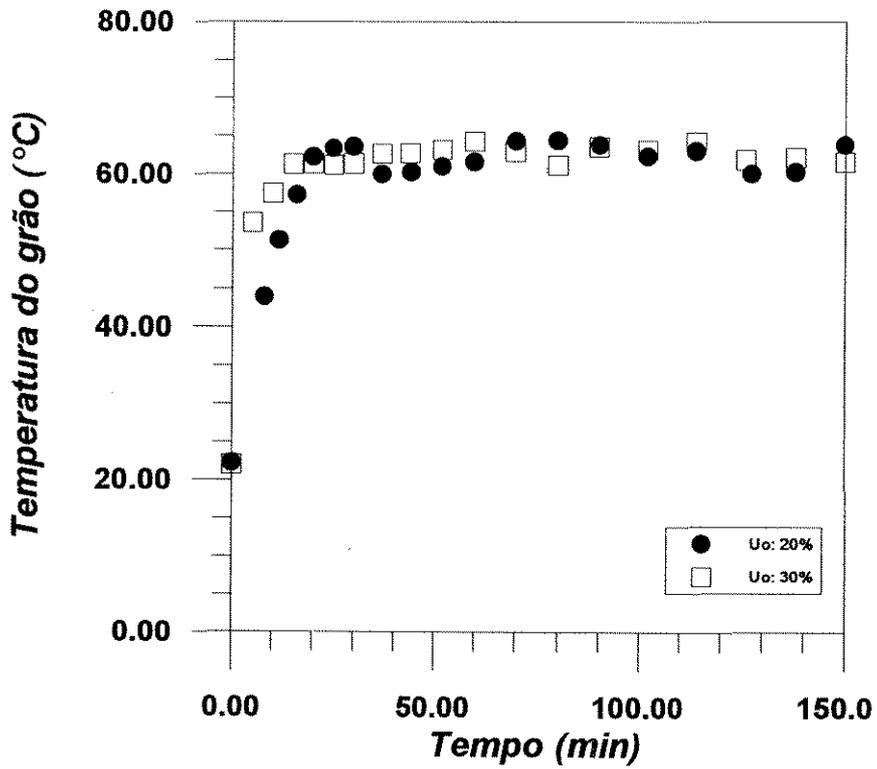


**Figura B12 - Influência da umidade inicial do grão**  
 Leito Fixo - M: 3000 g  $T_a$ : 83°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



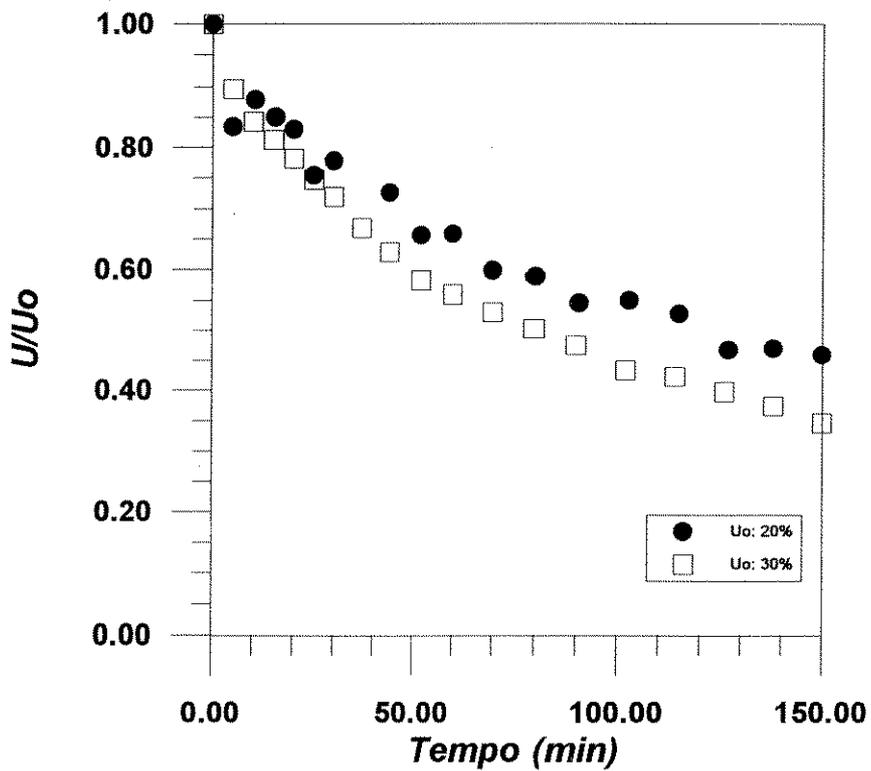
(a)



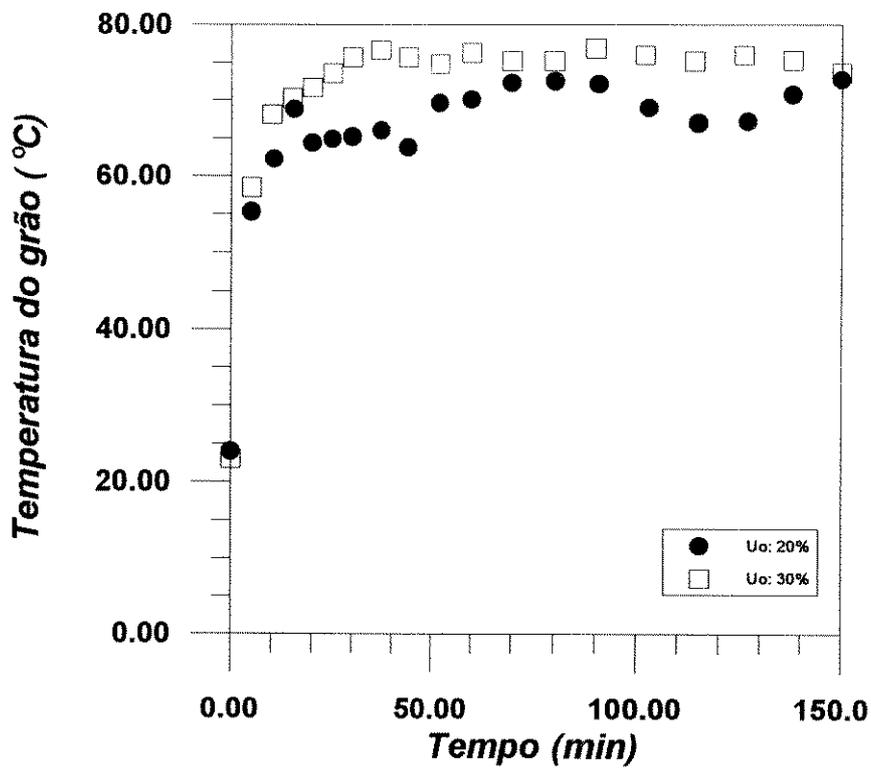
(b)

**Figura B13 - Influência da umidade inicial do grão**  
 Leito de Jorro - M: 3000 g  $T_a: 73^{\circ}\text{C}$

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



(b)

Figura B14 - Influência da umidade inicial do grão

Leito de Jorro - M: 1500 g  $T_a$ : 83°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

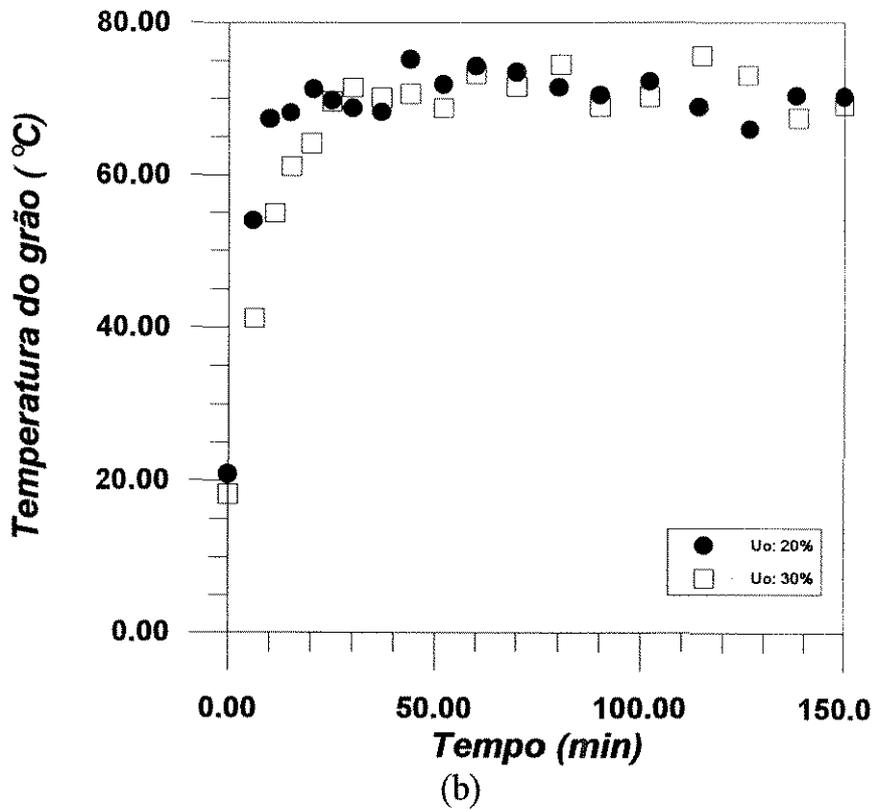
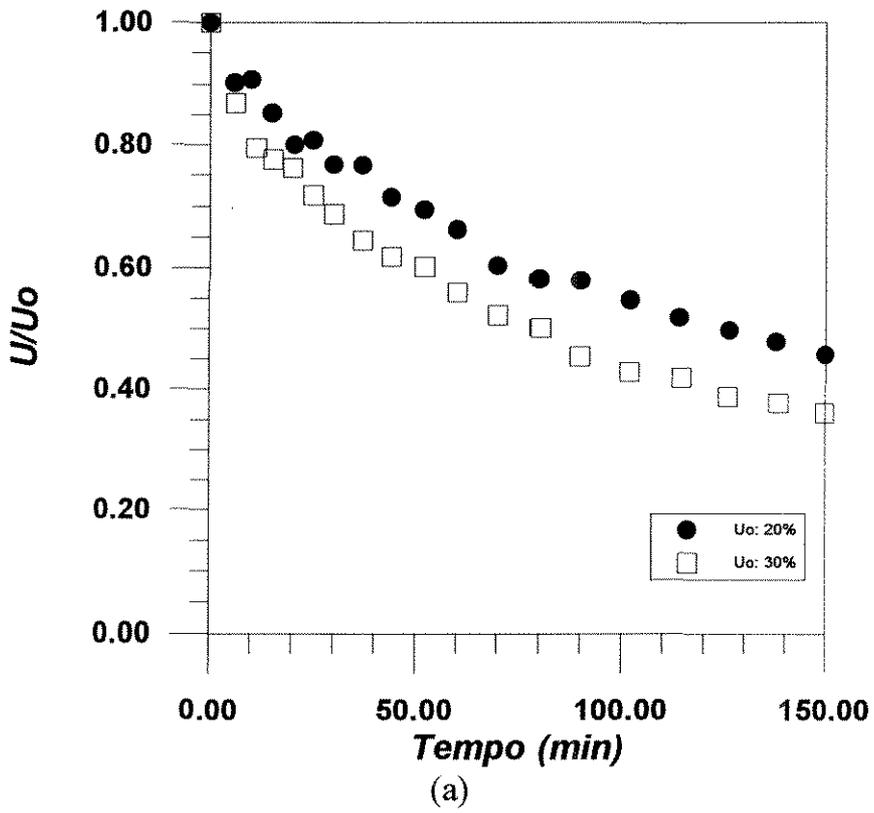
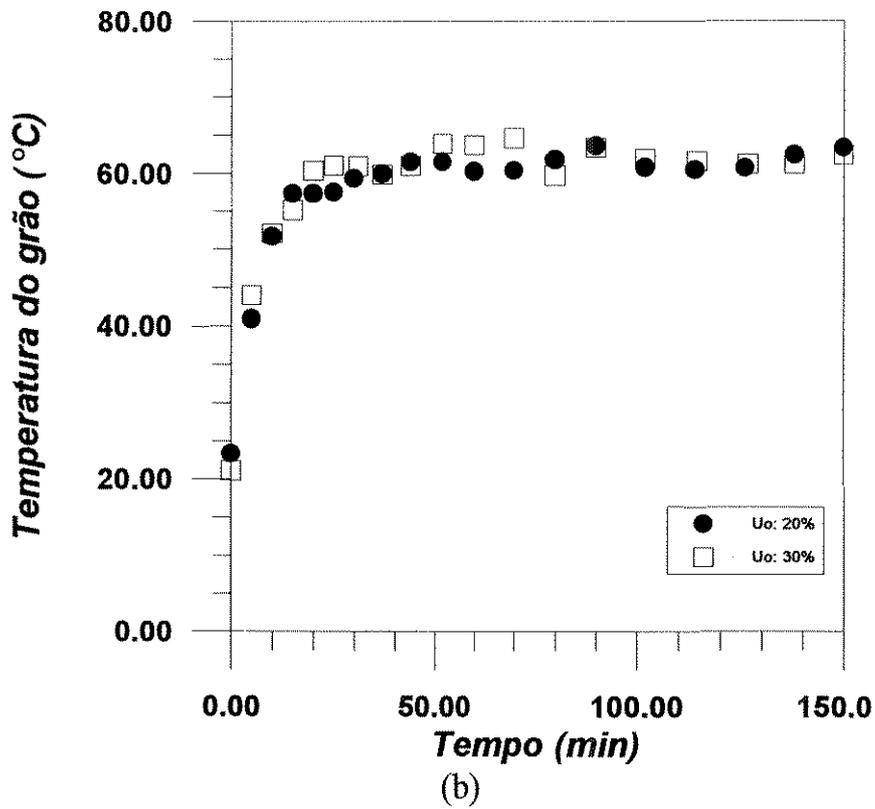
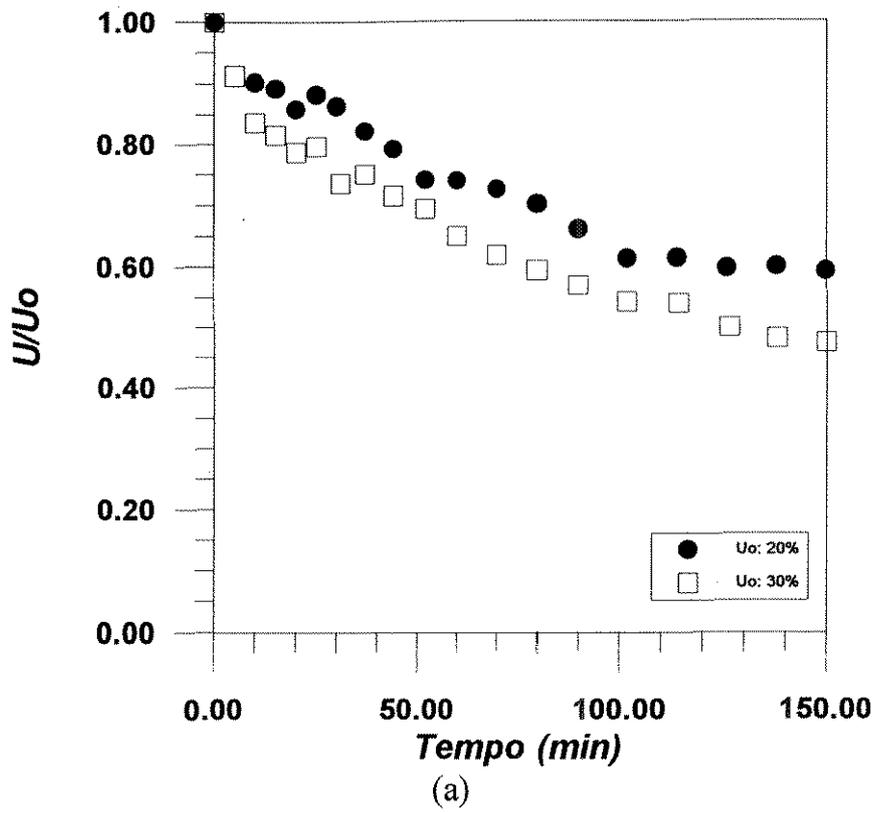


Figura B15 - Influência da umidade inicial do grão

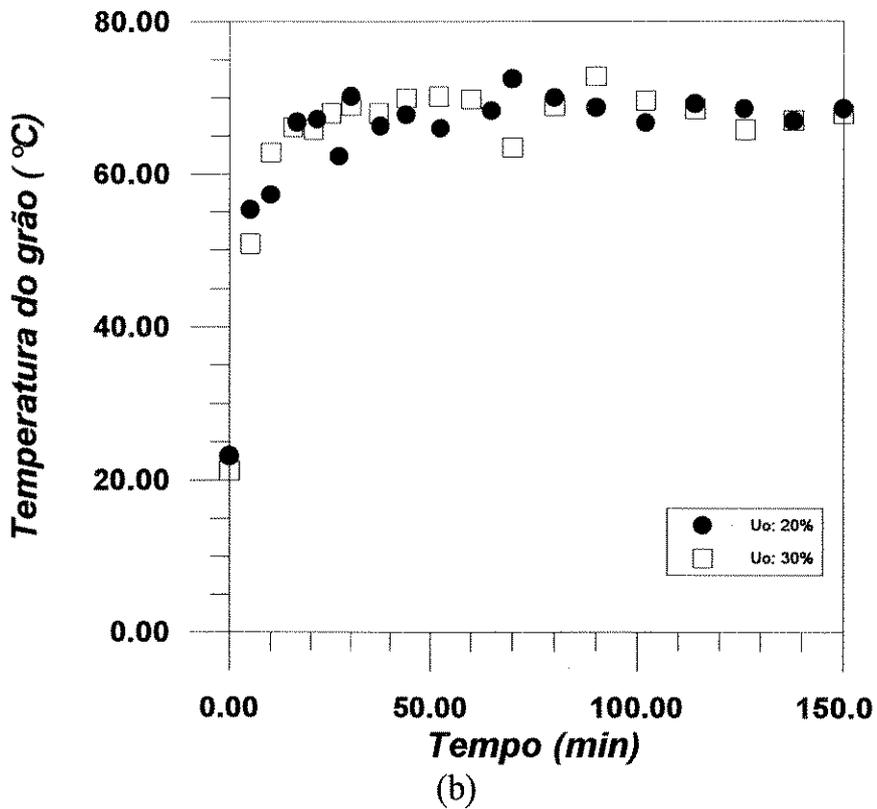
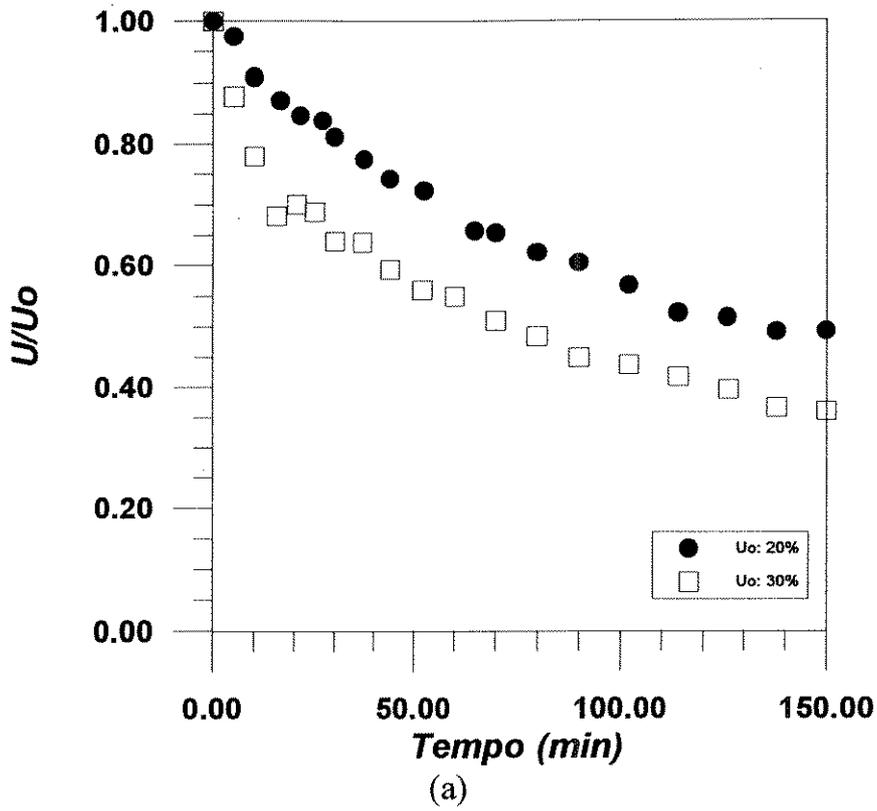
Leito de Jorro - M: 3000 g  $T_a$ : 83°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



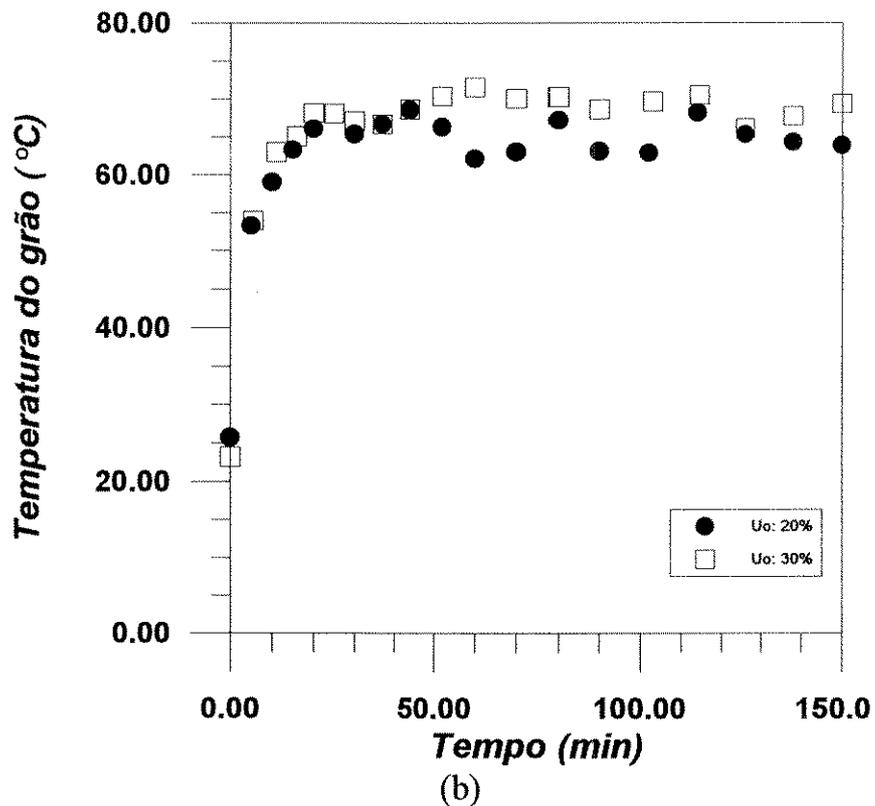
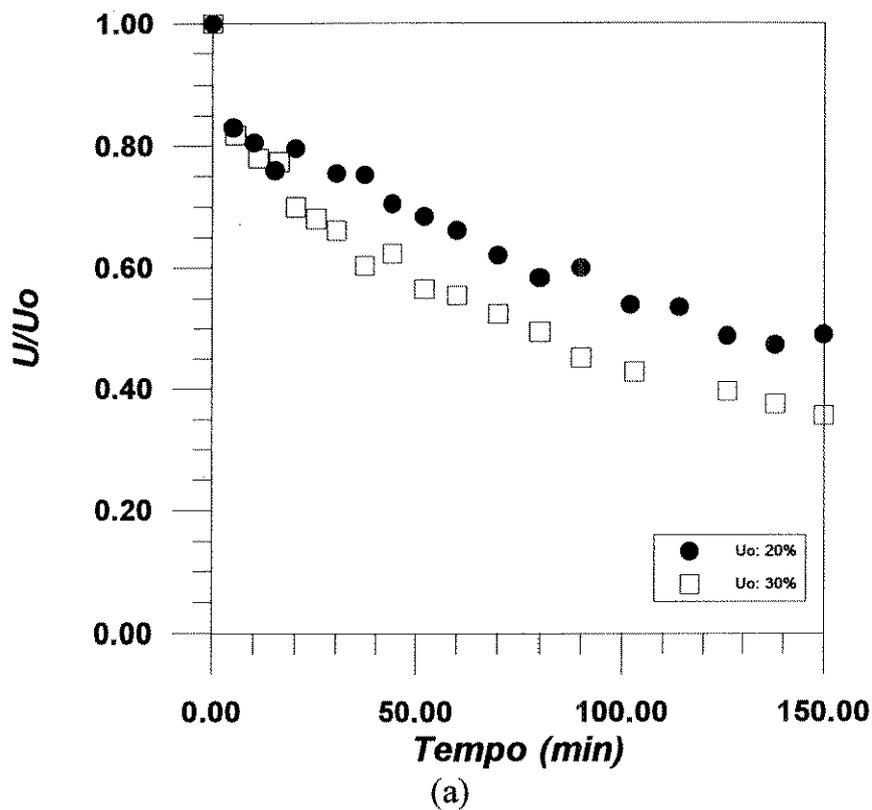
**Figura B16 - Influência da umidade inicial do grão**  
 Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g  $T_a$ : 73°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



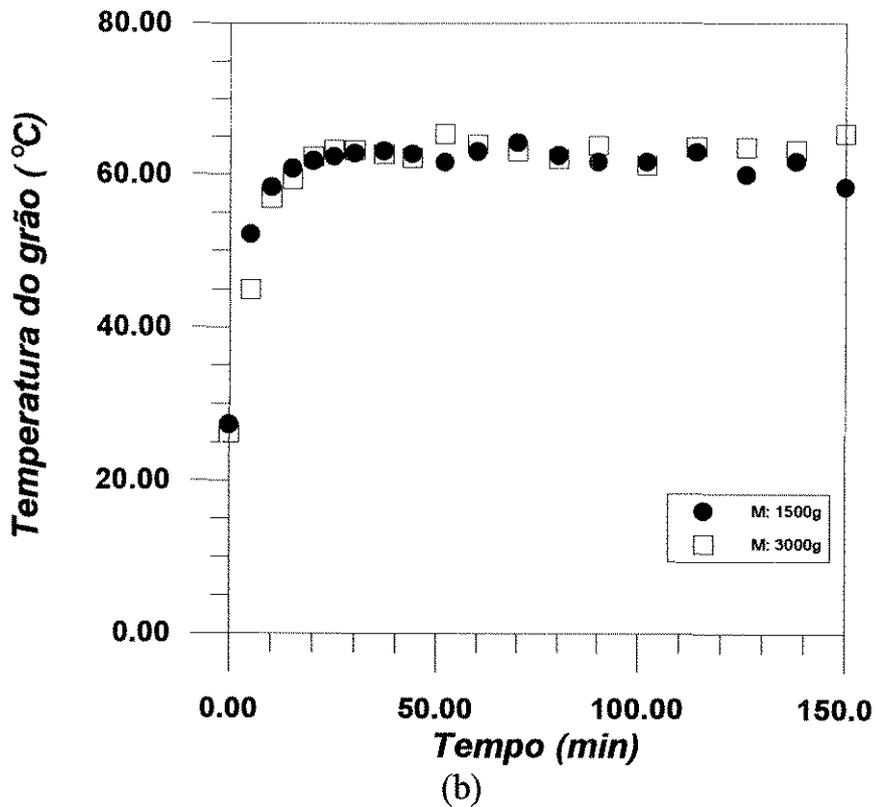
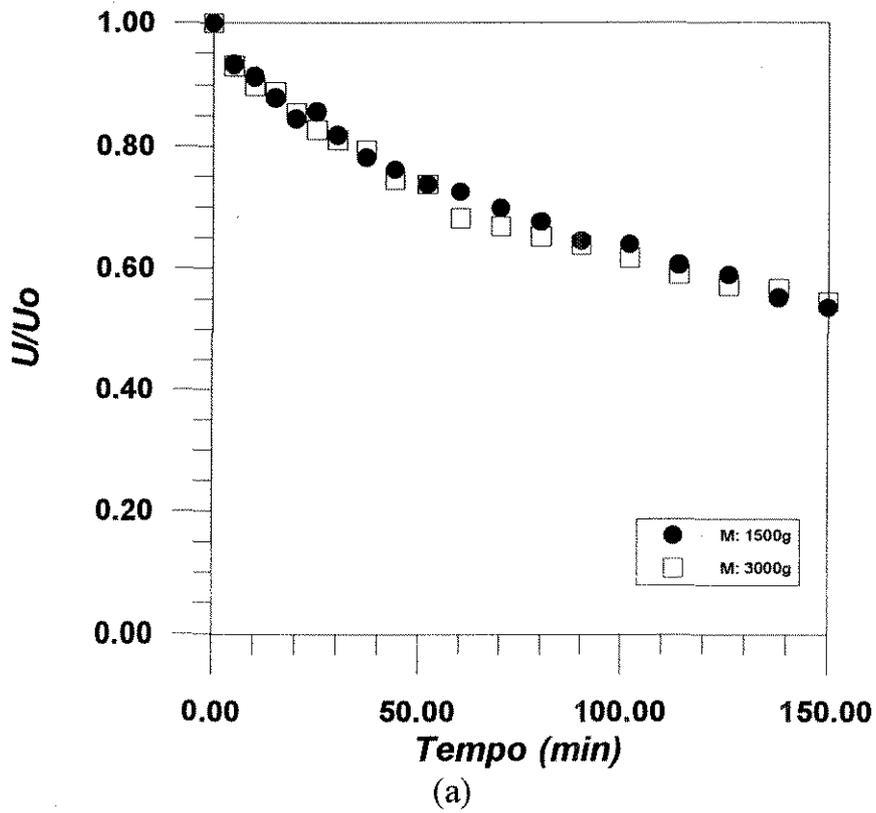
**Figura B17** - Influência da umidade inicial do grão  
 Leito de Jorro Fluidizado - M: 1500 g T<sub>a</sub>: 83°C

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B18 - Influência da umidade inicial do grão**  
 Leito de Jorro Fluidizado - M: 3000 g T<sub>a</sub>: 83°C

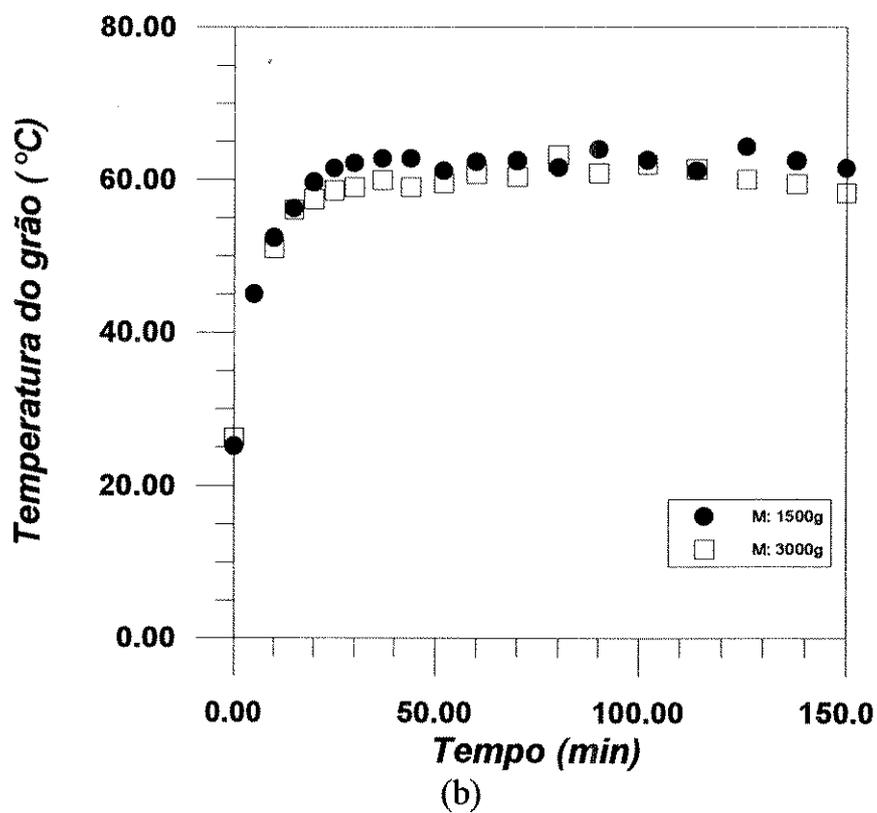
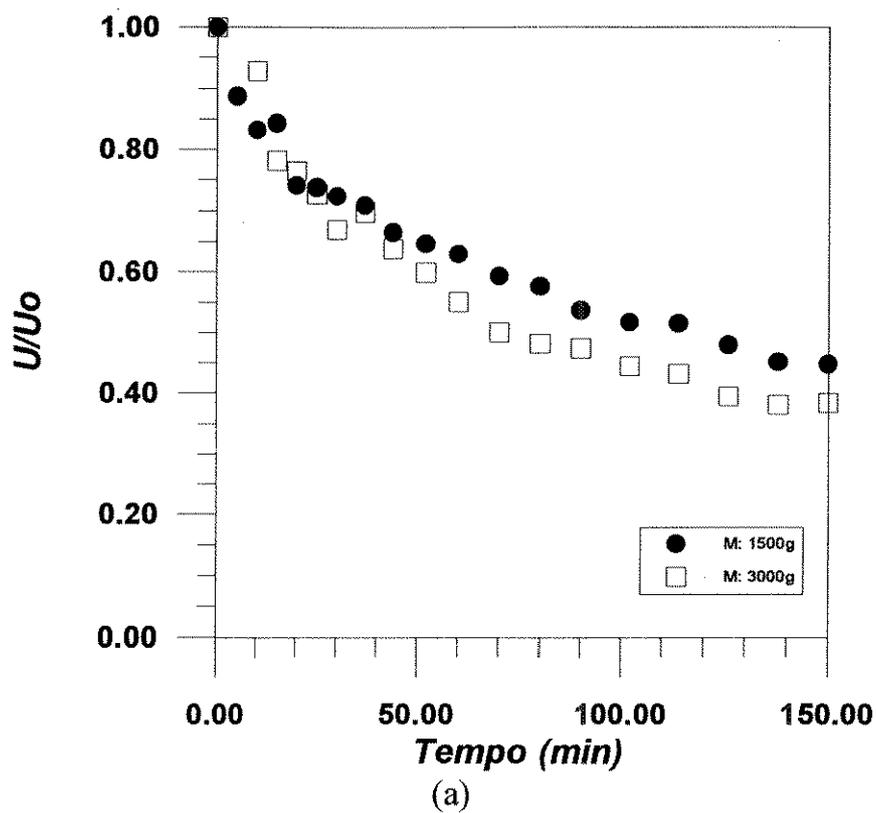
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B19 - Influência da carga de sólidos**

Leito Fixo -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s.

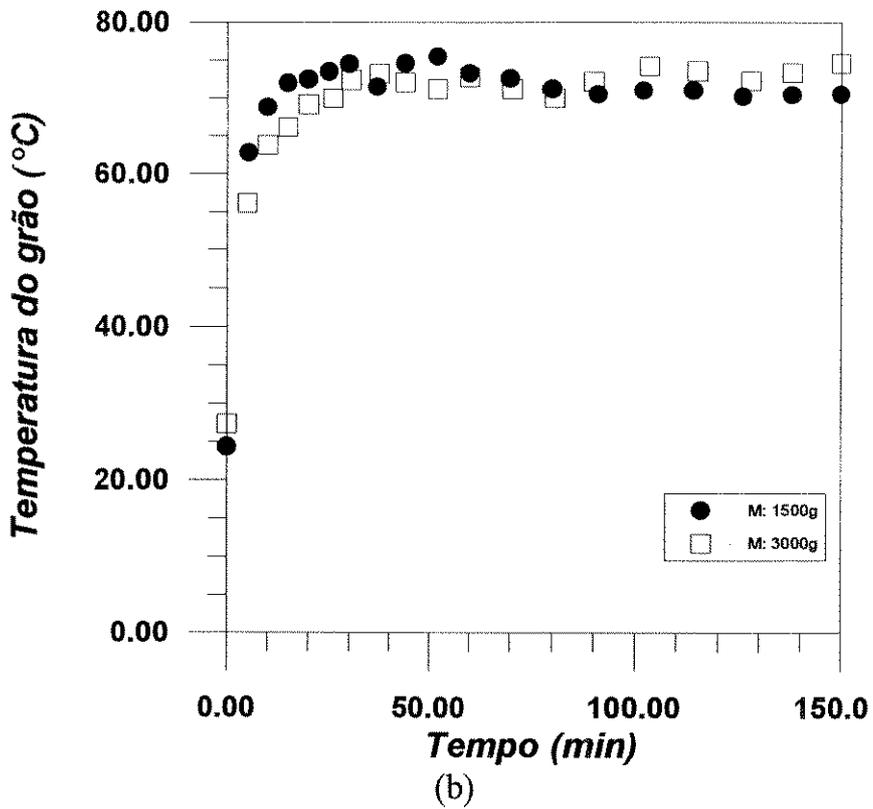
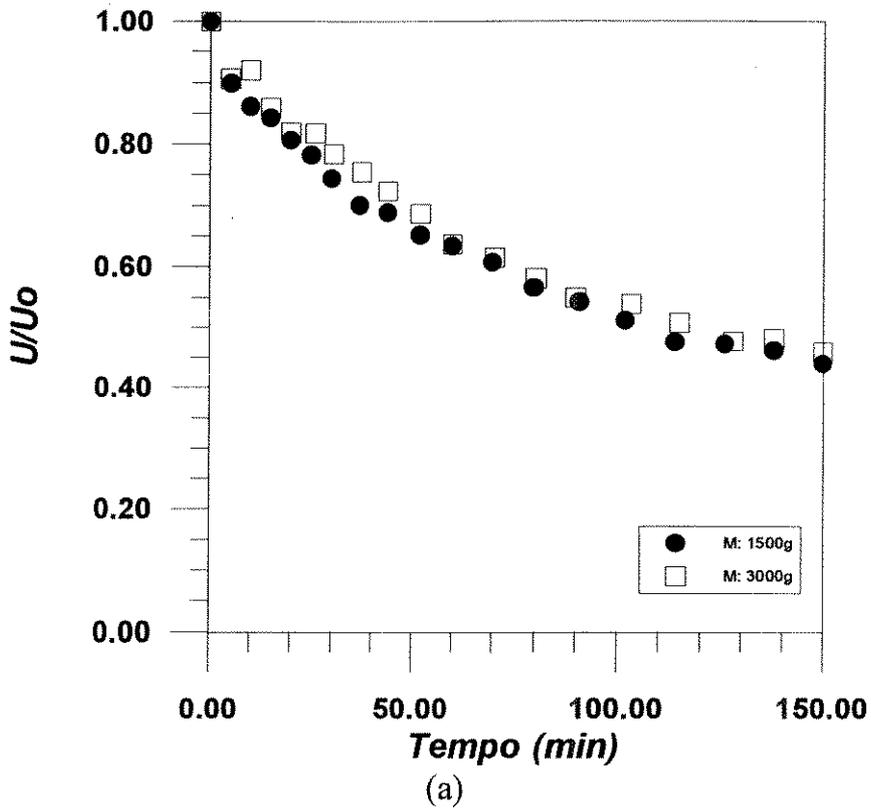
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B20 - Influência da carga de sólidos**

Leito Fixo -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 30% b.s.

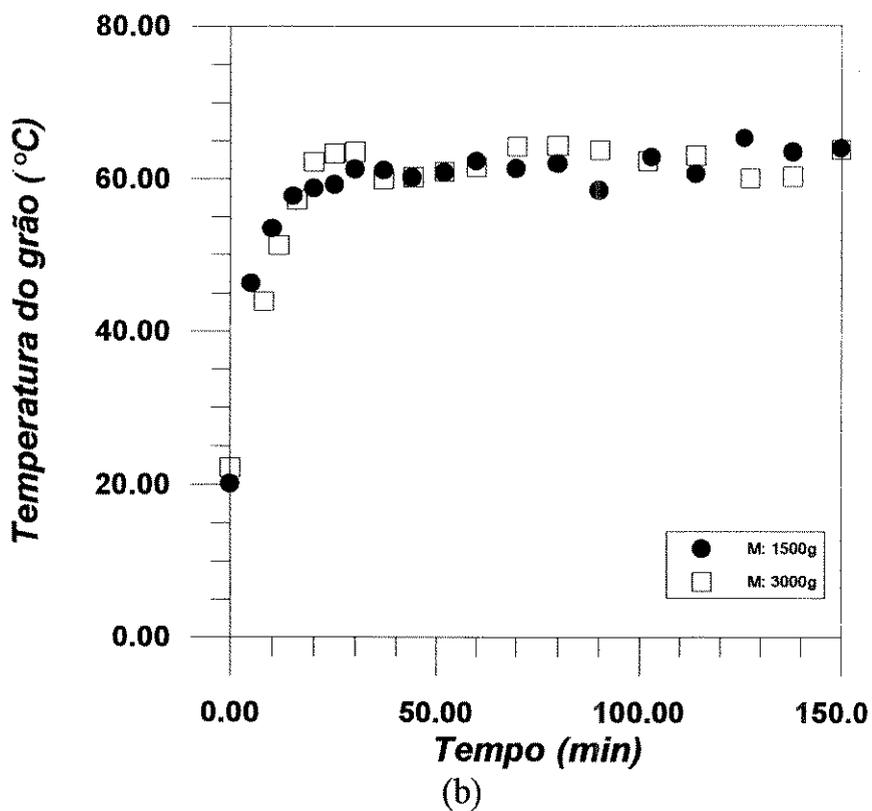
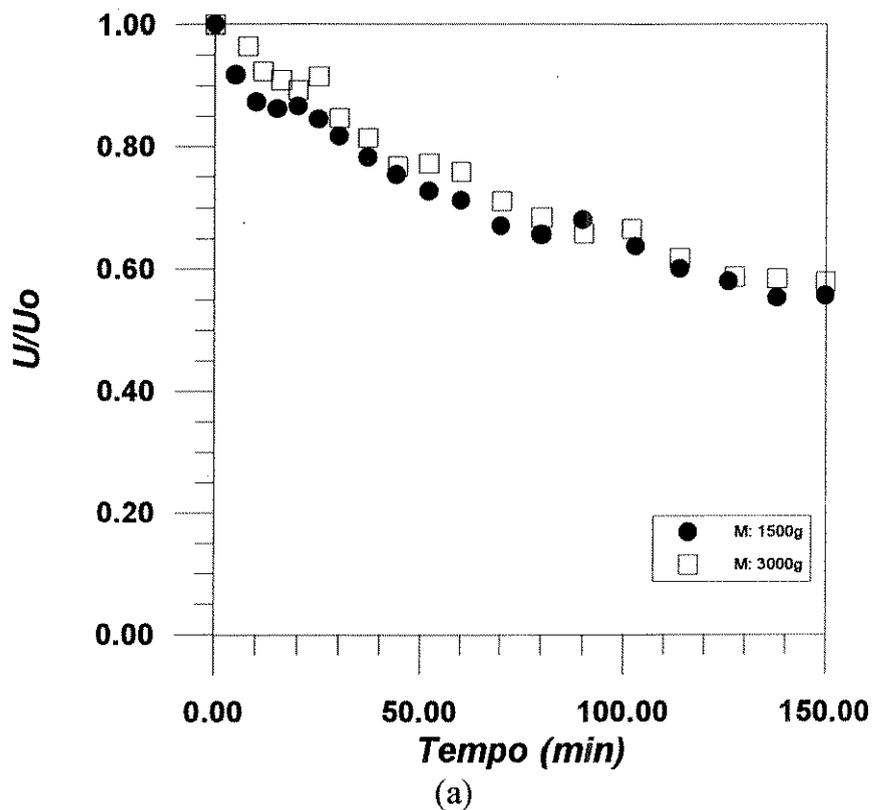
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B21 - Influência da carga de sólidos**

Leito Fixo -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s.

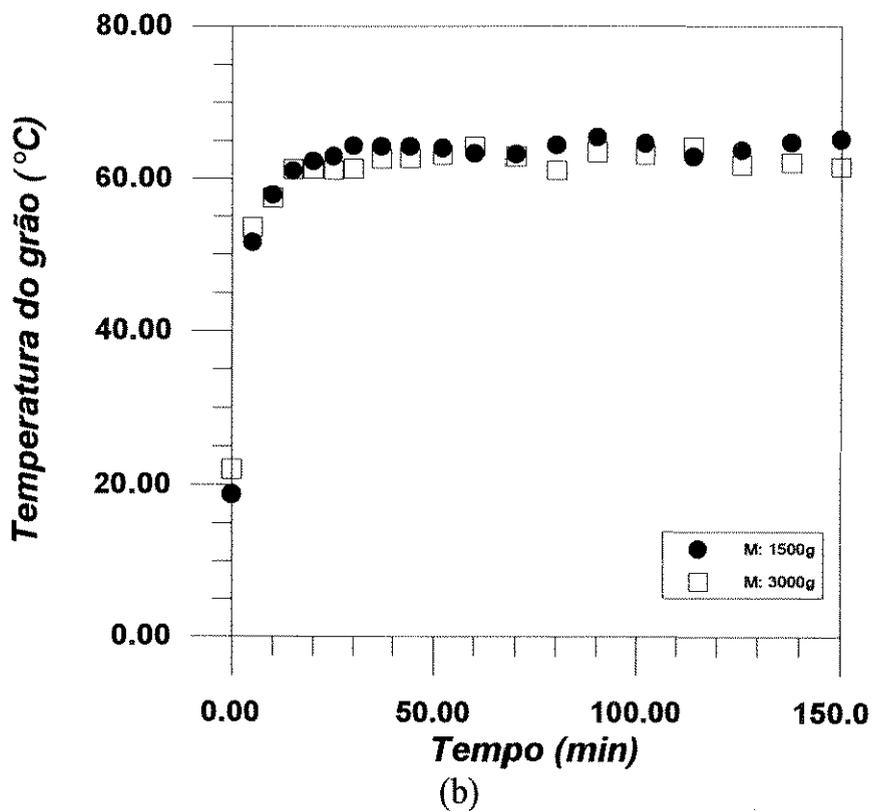
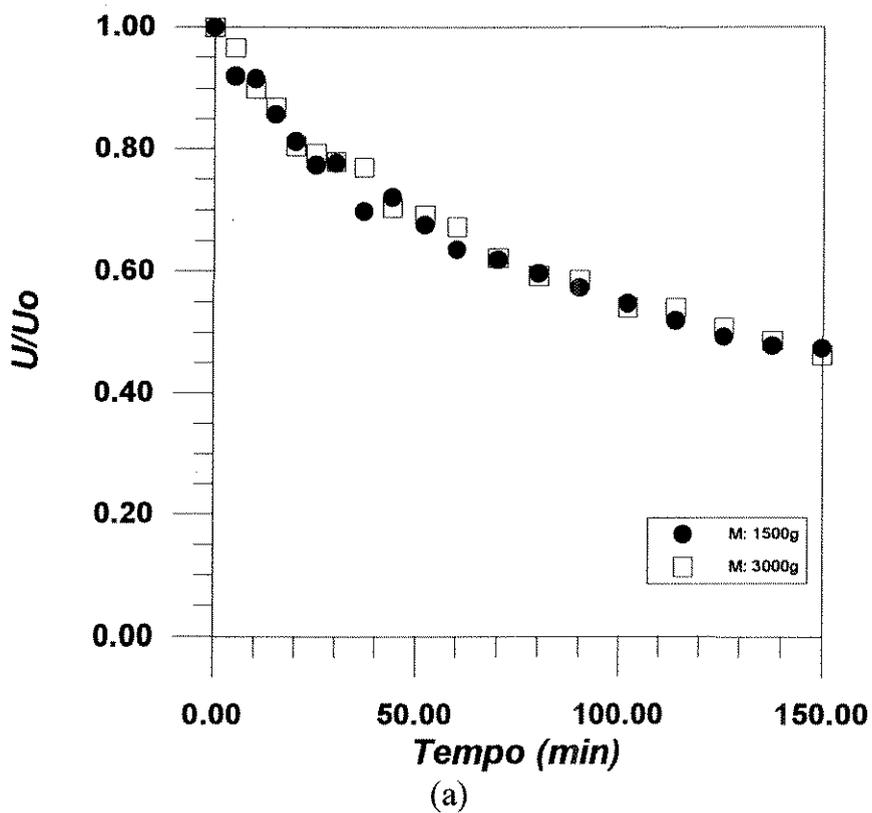
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B22 - Influência da carga de sólidos**

Leito de Jorro -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 20% b.s.

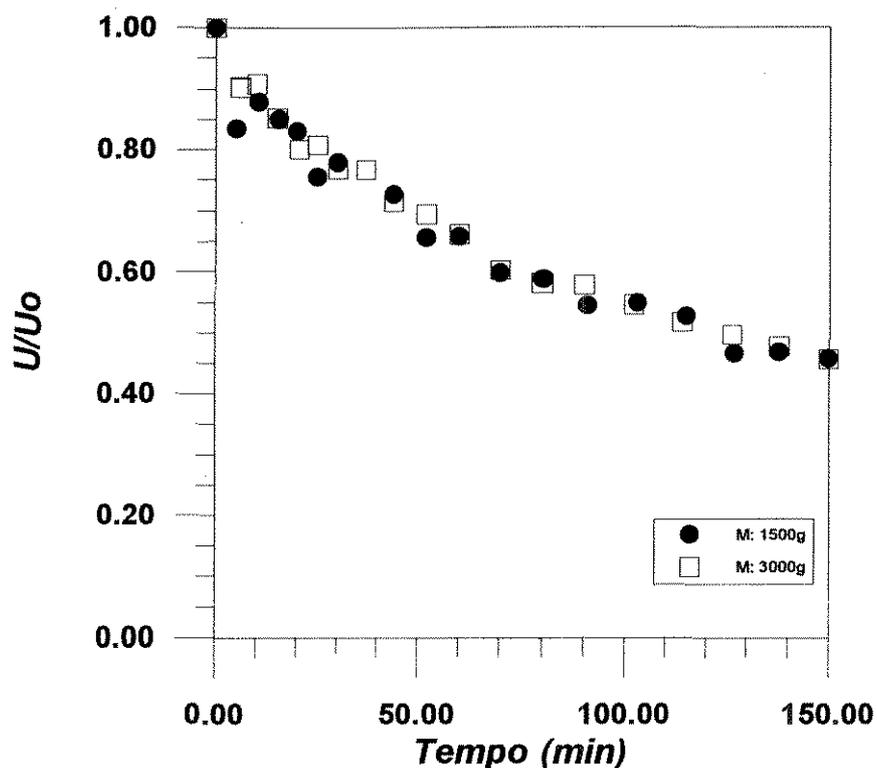
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



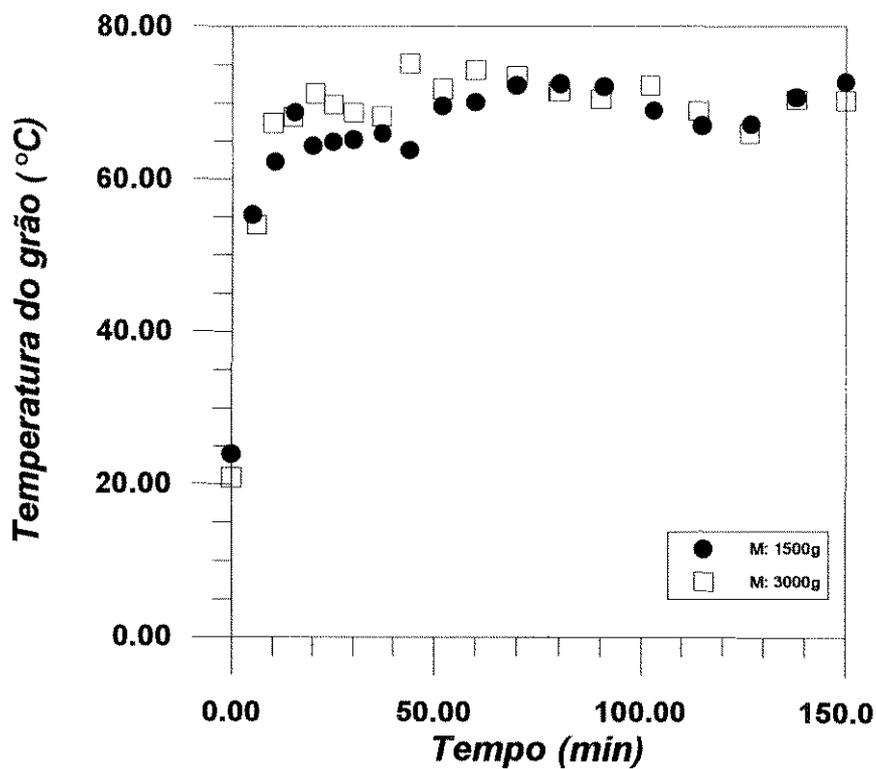
**Figura B23 - Influência da carga de sólidos**

Leito de Jorro -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)

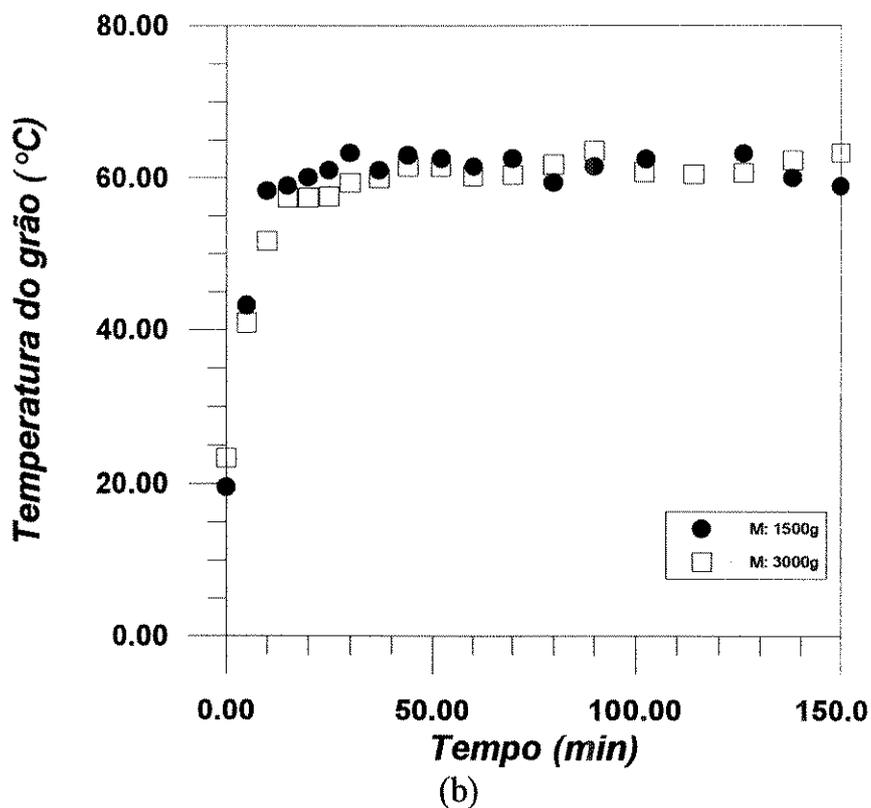
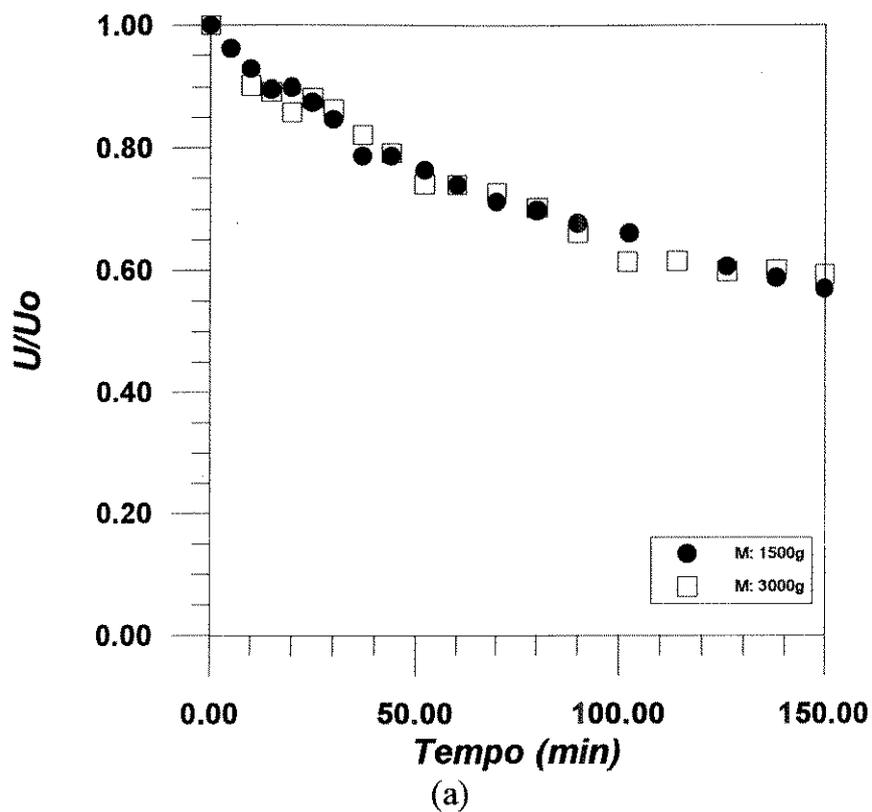


(b)

**Figura B24 - Influência da carga de sólidos**

Leito de Jorro -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s.

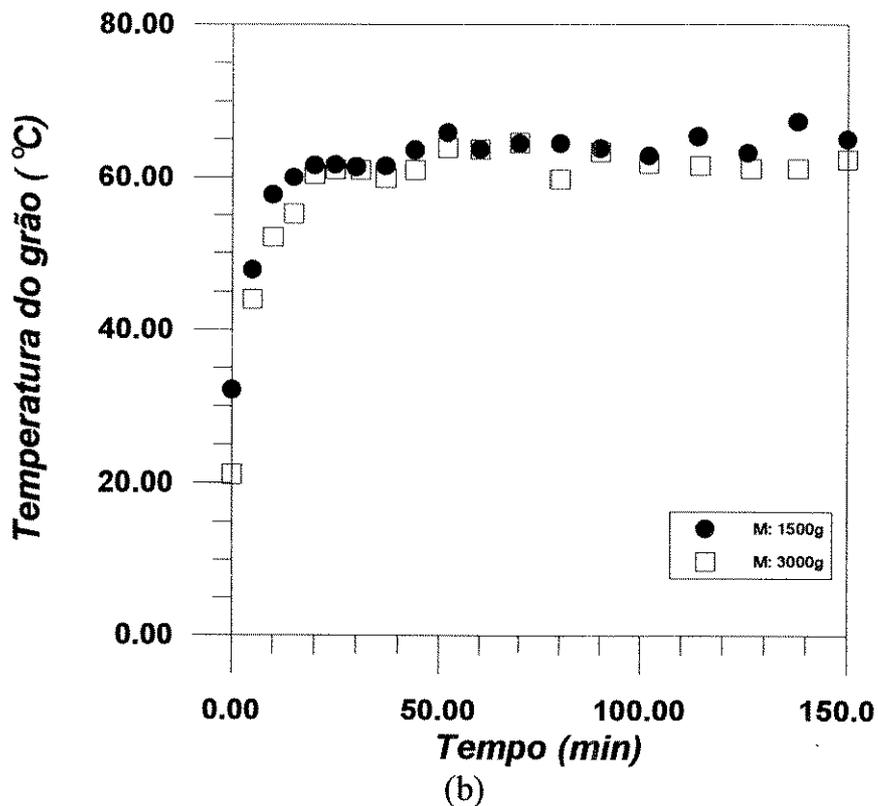
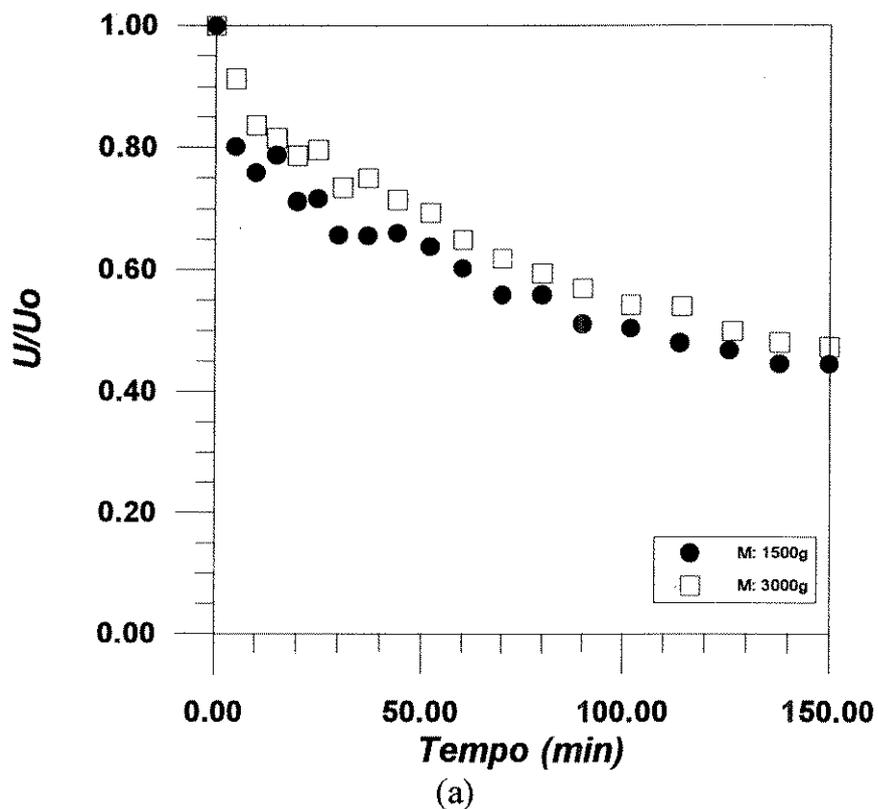
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B25 - Influência da carga de sólidos**

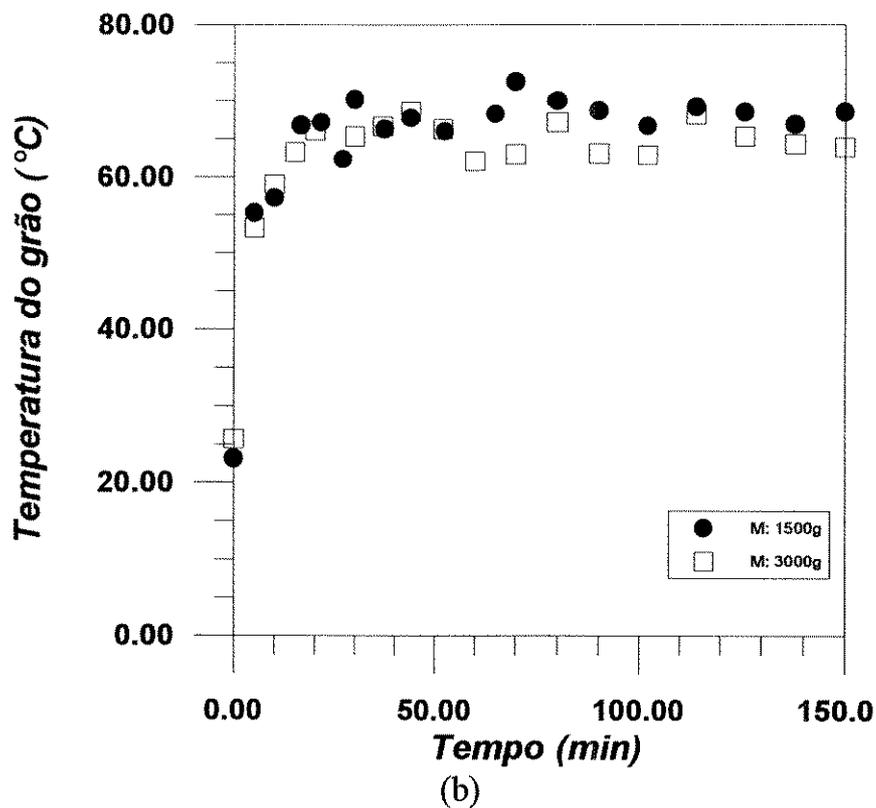
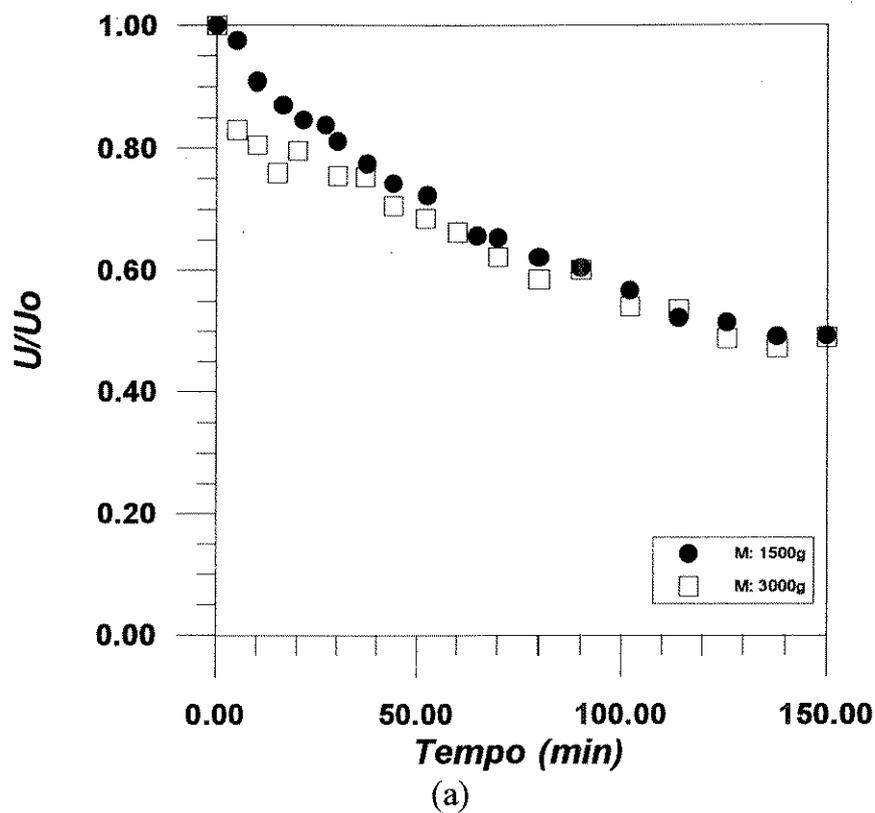
Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a: 73^\circ\text{C}$   $U_o: 20\%$  b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



**Figura B26 - Influência da carga de sólidos**  
 Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 73°C  $U_o$ : 30% b.s.

(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

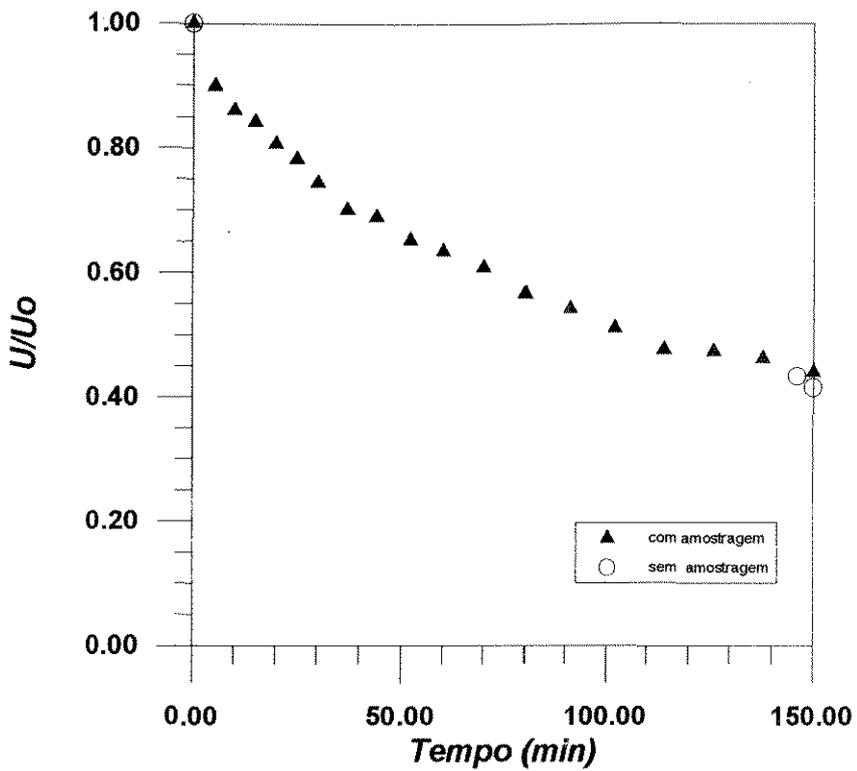


**Figura B27 - Influência da carga de sólidos**  
 Leito de Jorro Fluidizado -  $T_a$ : 83°C  $U_o$ : 20% b.s.

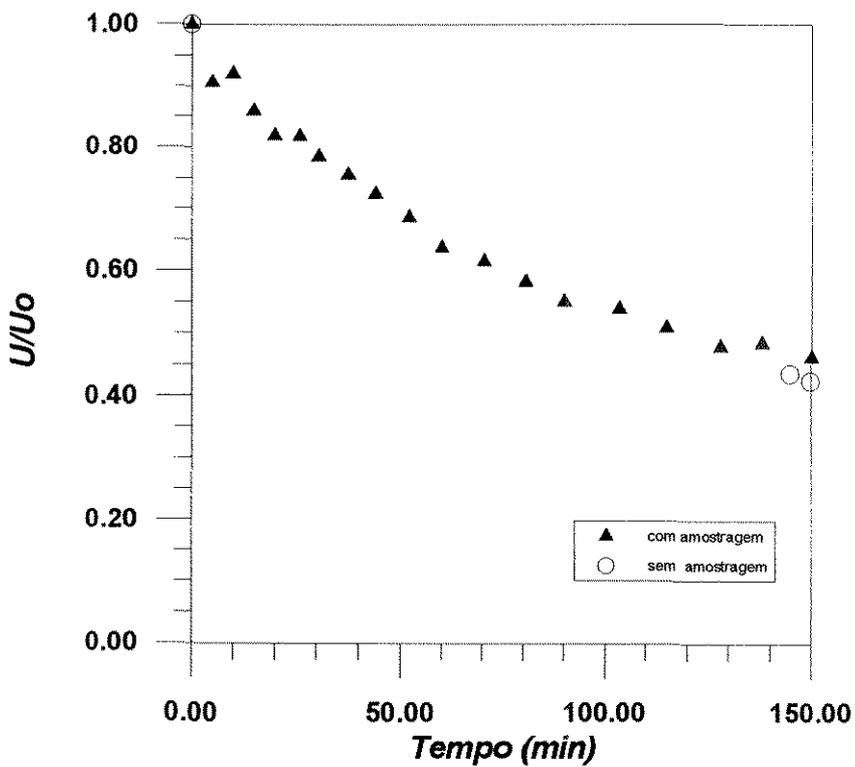
(a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

## **APÊNDICE C**

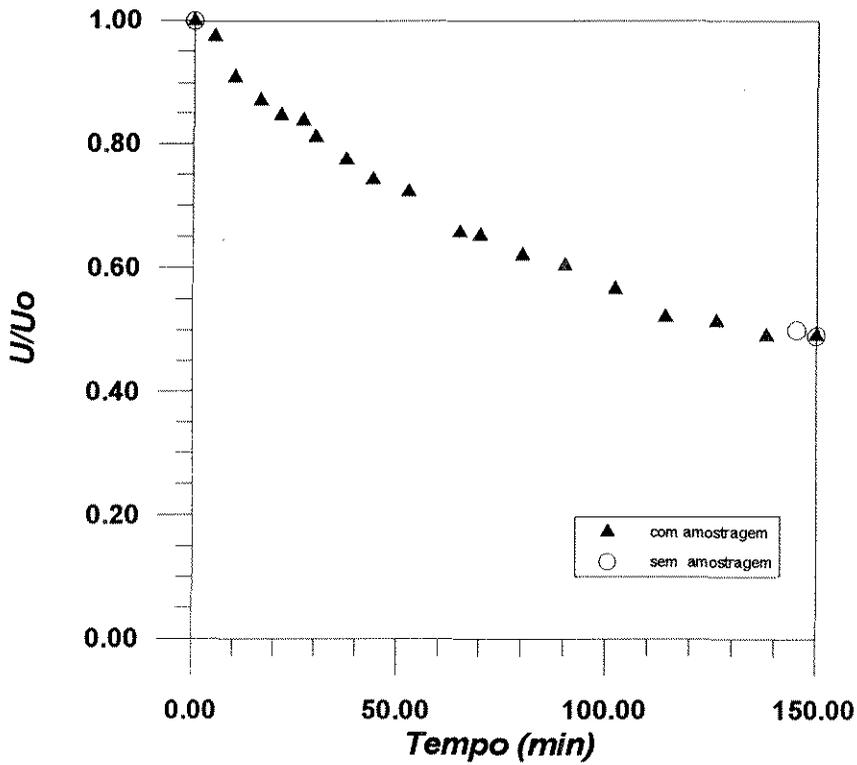
**Neste apêndice são apresentados os resultados dos experimentos realizados sem amostragem .**



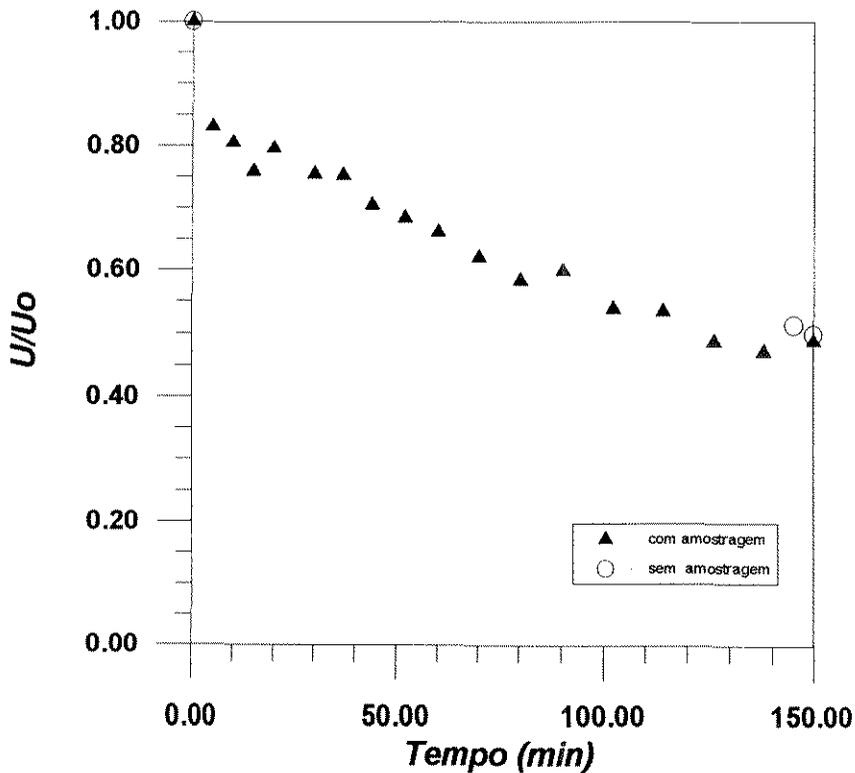
**Figura C1 - Influência da retirada de amostras - Leito Fixo**  
 M: 1500 g U<sub>o</sub>: 20% b.s. T<sub>a</sub>: 83°C  
 Umidade do grão em função do tempo



**Figura C2 - Influência da retirada de amostras - Leito Fixo**  
 M: 3000 g U<sub>o</sub>: 20% b.s. T<sub>a</sub>: 83°C  
 Umidade do grão em função do tempo



**Figura C3** - Influência da retirada de amostras - Leito de Jorro Fluidizado  
M: 1500 g U<sub>o</sub>: 20% b.s. T<sub>a</sub>: 83°C  
Umidade do grão em função do tempo



**Figura C4** - Influência da retirada de amostras - Leito de Jorro Fluidizado  
M: 3000 g U<sub>o</sub>: 20% b.s. T<sub>a</sub>: 83°C  
Umidade do grão em função do tempo