

**UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

CAMILA NICOLA BOERI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM
CAMADA FINA**

Ijuí

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CAMILA NICOLA BOERI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM
CAMADA FINA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Física Estatística e Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Oleg Khatchatourian

Co-orientadora: Prof. Dr^a Fabiane Avena de Oliveira

Ijuí

2007

**UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA

DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM
CAMADA FINA**

Elaborada por

CAMILA NICOLA BOERI

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Oleg Khatchatourian – UNIJUÍ (Orientador)

Prof. Dr^a. Fabiane Avena de Oliveira – UNIJUÍ (Co-orientadora)

Prof. Dr. Fernando Pedro Reis Brod – Kepler Weber

Prof. Dr. Jorge Luiz Berto – UNIJUÍ

Ijuí, RS, 27 de Fevereiro de 2007.

Aos meus pais, Jane e Wilson, pelo amor, carinho, dedicação e estímulo que sempre ofereceram, pelas angústias e preocupações passadas por minha causa, dedico-lhes essa conquista como gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela disposição, serenidade, coragem e saúde para enfrentar cada momento desta caminhada.

Aos meus pais, Wilson e Jane, pelos exemplos de vida, responsáveis por toda minha base pessoal e educacional, que com seu amor, carinho e compreensão estiveram sempre ao meu lado e proporcionaram as melhores oportunidades que uma filha pode desejar.

À minha irmã Cristina, pela amizade, alegria, companheirismo e bons momentos compartilhados.

Ao Fábio, que dividiu comigo cada dúvida, cada certeza e cada descoberta, estando sempre ao meu lado com carinho, amor, apoio e compreensão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oleg Khatchatourian, por acreditar em meu trabalho, pela atenção dispensada, pelos ensinamentos e pela oportunidade de realizar os estágios.

À minha co-orientadora Prof. Dr^a. Fabiane Avena de Oliveira, pela amizade, atenção e pela ajuda nos experimentos.

À Geni pelo carinho, incentivo, amizade, esforço e boa-vontade em solucionar todos os nossos problemas, sempre achando um jeito de resolver tudo da melhor maneira possível, mesmo quando parecia ser algo sem solução.

Aos colegas do curso pelos bons momentos vividos durante estes quase dois anos de convivência, em especial à minha amiga e colega Carise, que viveu esta etapa ao meu lado, dividindo sucessos, angústias, conquistas e fracassos.

A todos os professores do mestrado e funcionários do Departamento de Física, Estatística e Matemática pelo conhecimento e dedicação.

À CAPES pelo apoio a esta pesquisa, através da bolsa de estudos.

O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto.

Thomas Huxley

RESUMO

A produção de grãos ou sementes de soja requer que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microrganismos; desta maneira e devido ao teor de umidade elevado por ocasião da colheita, a secagem constitui uma das operações de primordial importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal. A secagem de produtos agrícolas pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido. Este trabalho tem como objetivo obter as curvas de secagem de soja em camada fina, através de experimentos, na faixa de temperatura do ar de secagem entre 45 e 90 °C, para os teores de umidade inicial entre 0,13 e 0,32 e velocidades do ar de secagem de 0; 0,5; 0,9; 1,5 e 2,5m/s determinando a influência destes parâmetros no processo. A etapa experimental foi realizada no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática da Unijuí, onde os testes de secagem foram realizados utilizando-se um secador experimental que consistiu de um tubo metálico com 0,15m de diâmetro, isolado em toda a sua superfície com lã de vidro e lona. O ar foi aquecido por meio de seis resistências elétricas com potência de 600 W, enquanto que a temperatura foi controlada com o auxílio de termopares conectados ao equipamento de secagem. Também foram realizadas simulações numéricas, onde o modelo matemático utilizado foi o proposto por Khatchatourian et al. (2003), sendo que nesta pesquisa modificou-se a equação que descreve o fluxo de massa, inserindo-se nela os parâmetros velocidade do ar e teor de umidade inicial, a fim de descrever de forma mais precisa as curvas de secagem, obtendo-se uma boa concordância entre os dados experimentais e os simulados. Observou-se que a velocidade do ar de secagem apresenta significativa influência no processo, verificando-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Verifica-se que a dinâmica de secagem dos grãos de soja mostra uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar, característica presente na maioria dos produtos agrícolas. Nota-se que a influência da temperatura do ar na taxa de secagem é maior no princípio do experimento, diminuindo com o tempo de processamento. Conclui-se que a velocidade de secagem depende da temperatura, umidade relativa e fluxo do ar, do tempo de exposição a estas condições, dos teores de água inicial e final, de características dos grãos e das propriedades da interface grão-ar. Quanto mais elevada a temperatura e o fluxo de ar, maior a taxa de secagem e menor o tempo total de exposição ao ar aquecido.

ABSTRACT

The production of grains or soy seeds with high quality request, among other recommendations, that the product is picked healthy and in advance, seeking to minimize the losses caused in the field by the attack of insects, diseases and microorganisms; of this it sorts things out and due to the high humidity tenor for occasion of the crop, the drying constitutes one of the operations of primordial importance among the techniques involved in the conservation of the desirable qualities of products of vegetable origin. The drying of agricultural products can be defined as a simultaneous process of transfer of heat and mass among the product and the drying air, that it consists of the removal of the excessive humidity contained inside the grain through evaporation, usually caused by forced convection of warm air. This work has as objective to obtain the curves of soy drying in fine layer, through experiments, in the strip of temperature of the drying air between 45 and 90 °C, for the tenors of initial humidity between 0,13 and 0,32 and speeds of the air of drying of 0; 0,5; 0,9; 1,5 and 2,5m/s determining the influence of these parameters in the process. The experimental stage was accomplished at the Laboratory of Physical Measures for Mathematical Modelling of Unijuí, where the drying tests were accomplished being used an experimental dryer that it consisted of a metallic tube with diameter 0,15m, isolated in all your surface with glass wool and canvas. The air was heated up through six electric resistances with potency of 600 W, while the temperature was controlled with the aid of connected thermocouple to the drying equipment. Numeric simulations were also accomplished, where the used mathematical model was it proposed by Khatchatourian et al. (2003), and in this research he/she modified the equation that describes the mass flow, inserting in her the parameters speed of the air and tenor of humidity of the drying air. The results of the experiments and the numeric simulations were compared, obtaining a coefficient of determination of 0,99, indicating a high correlation between the experimental and the numeric results. The results of the experiments and the numeric simulations were compared, obtaining a coefficient of determination of 0,99, indicating a high correlation between the experimental and the numeric results.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	21
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1 Características da soja	24
1.1.1 Origem e histórico	24
1.1.2 Descrição botânica.....	25
1.1.3 Composição química	26
1.1.4 Processamento do grão de soja.....	28
1.1.5 Importância econômica.....	28
1.2 Secagem.....	29
1.2.1 O processo de secagem.....	29
1.2.2 Fatores que influenciam o processo de secagem	32
1.2.3 Secagem Natural e Secagem Artificial	32
1.2.4 Sistemas de Secagem.....	34
1.2.5 Classificação dos Secadores	38
1.2.6 Divisões da Secagem Artificial	42
1.2.7 Fluxo de ar	43
1.2.8 Umidade relativa do ar	44
1.2.9 Umidade relativa do ar de secagem	45
1.3 Características dos grãos	46
1.3.1 Teor de Umidade	47
1.3.2 Umidade de Equilíbrio.....	52
1.3.3 Massa Específica Real e Massa Específica Global	55
1.3.4 Porosidade	57
1.3.5 Esfericidade	58
1.3.6 Área Superficial e Volume do Grão	59
1.3.7 Calor Específico	60
1.3.8 Calor Latente de Vaporização	61
1.3.9 Processo respiratório dos grãos	61
1.3.10 Temperatura.....	62
1.3.11 Coeficiente de Difusão	63
1.3.12 Difusividade Térmica	64
1.3.13 Condutividade térmica dos grãos	65
1.3.14 Isolamento térmico	66
1.3.15 Danos térmicos	66
1.4 Fenômenos físicos do processo de secagem.....	67
1.4.1 Fluxo de calor por condução	67
1.4.2 Fluxo de calor por convecção.....	68

1.5 Modelos Matemáticos de secagem de grãos	69
1.5.1 Modelos Matemáticos de Secagem em Camada Fina	69
1.6 A modelagem matemática	82
1.7 Colocação do problema e dos objetivos	83
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
2.1 Material.....	85
2.2 Descrição dos Experimentos	85
2.2.1 Determinação do teor de umidade inicial dos grãos.....	85
2.2.2 Determinação do teor de umidade a partir de um teor conhecido	86
2.2.3 Umedecimento dos grãos de soja	86
2.2.4 Equipamento utilizado.....	86
2.2.5 Condições Operacionais	90
2.2.6 Erros Prováveis de Medidas	90
2.2.7 Experimentos de Secagem.....	91
2.3 Modelo Matemático.....	92
2.3.1 Hipóteses do Modelo	93
2.3.2 Equações do Modelo Matemático Khatchatourian (2003)	93
2.3.3 Modificação do Modelo.....	98
2.3.4 Condições de Contorno	98
2.4 Solução Numérica do Modelo Matemático	99
2.4.1 Determinação dos coeficientes através do Método de Mínimos Quadrados.....	99
2.4.2 Método Numérico para Solução do Modelo Matemático	100
2.4.3 Classificação do Sistema de Equações Diferenciais Parciais	101
2.4.4 Linearidade do Sistema de Equações Diferenciais Parciais	102
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	104
3.1 Curvas de Secagem em Camada Fina.....	104
3.1.1 Influência da velocidade do ar no processo de secagem	111
3.1.2 Influência da temperatura do ar de secagem	125
3.1.3 Influência do teor de umidade inicial dos grãos	133
3.2 Curvas de Taxa de Secagem.....	137
CONCLUSÃO.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
APÊNDICE A – comparação com dados de soares	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotografia de grãos de soja	25
Figura 2: Representação esquemática da semente de soja (Fonte: Embrapa Soja, 2000)	26
Figura 3: Esquema do processamento dos grãos de soja (Fonte: The Solae Company, 2004)	28
Figura 4: Diagrama do processo de secagem (Fonte: Kepler Weber, 2006)	30
Figura 5: Curva típica de secagem (Fonte: Park, 1988 apud Carneiro, 2003)	31
Figura 6: Organograma das formas de secagem.....	33
Figura 7: Esquema de um silo secador (Fonte: Kepler Weber, 2005).....	35
Figura 8: Esquema de um secador com câmara de repouso (Fonte: Garcia, 2004)	36
Figura 9: Esquema da torre de secagem de um secador de cavalete e de coluna (Fonte: Kepler Weber, 2005)	37
Figura 10: Esquema dos secadores de fluxo contínuo (Fonte: Martins, 1997)	38
Figura 11: Secador de leito fixo horizontal e leito fixo vertical (Fonte: UFLA, 2006).....	39
Figura 12: Esquema de um secador de fluxo cruzado (Fonte: Mata, 1999).....	40
Figura 13: Esquema de um secador de fluxo contracorrente (Fonte: UFLA, 2006)	41
Figura 14: Esquema de um secador de fluxo concorrente (Fonte: UFLA, 2006)	41
Figura 15: Esquema de distribuição da água no grão (Fonte: Weber, 2005)	50
Figura 16: Representação das três dimensões do elipsóide (Fonte: Weber, 2001)	59
Figura 17: Grãos de soja com sintomas de danos (Fonte: Costa et al., 2005).....	67
Figura 18: Representação esquemática da secagem em camada fina (Fonte: Mata et al., 1999)	71
Figura 19: Representação do equipamento de secagem	87
Figura 20: Fotografia da câmara de secagem	89
Figura 21: Fotografia do equipamento de secagem.....	89
Figura 22: Fotografia do sistema de geração de fluxo de ar.....	90
Figura 23: Fotografia das amostras de soja hermeticamente fechadas e acondicionadas na geladeira a 4°C	91
Figura 24: Dinâmica de secagem para uma amostra e várias amostras de soja. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$ e $X_0 = 0,32$	104
Figura 25: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$, $X_0 = 0,13$	105
Figura 26: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$, $X_0 = 0,19$	106
Figura 27: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$, $X_0 = 0,22$	106
Figura 28: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$, $X_0 = 0,28$	107

Figura 29: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,32$	107
Figura 30: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares para diversos teores de umidade. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$	108
Figura 31: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares para diversos teores de umidade. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$	109
Figura 32: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares para diversos teores de umidade. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$	109
Figura 33: Comparação entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo de Page. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	110
Figura 34: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,32$	111
Figura 35: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	112
Figura 36: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	112
Figura 37: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$	113
Figura 38: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$	113
Figura 39: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	114
Figura 40: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	115
Figura 41: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	115
Figura 42: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$	116
Figura 43: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$	116
Figura 44: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,32$	117
Figura 45: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	117
Figura 46: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	118
Figura 47: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$	118
Figura 48: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$	119
Figura 49: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,32$	119
Figura 50: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	120
Figura 51: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	120
Figura 52: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$	121
Figura 53: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$	121

Figura 54: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,32$	122
Figura 55: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$	122
Figura 56: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	123
Figura 57: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$	123
Figura 58: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$	124
Figura 59: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,13$	125
Figura 60: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,19$	126
Figura 61: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,22$	126
Figura 62: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,28$	126
Figura 63: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,32$	127
Figura 64: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 2,5$ m/s, $X_0 = 0,32$	128
Figura 65: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9$ m/s, $X_0 = 0,32$	128
Figura 66: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5$ m/s, $X_0 = 0,28$	129
Figura 67: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9$ m/s, $X_0 = 0,28$	129
Figura 68: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5$ m/s, $X_0 = 0,22$	130
Figura 69: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9$ m/s, $X_0 = 0,22$	130
Figura 70: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5$ m/s, $X_0 = 0,19$	131
Figura 71: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9$ m/s, $X_0 = 0,19$	131
Figura 72: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,5$ m/s, $X_0 = 0,19$	132
Figura 73: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5$ m/s, $X_0 = 0,13$	132
Figura 74: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9$ m/s, $X_0 = 0,13$	133
Figura 75: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5$ m/s, $T_s = 90^\circ\text{C}$	134
Figura 76: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5$ m/s, $T_s = 70^\circ\text{C}$	134
Figura 77: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9$ m/s, $T_s = 70^\circ\text{C}$	135
Figura 78: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 2,5$ m/s, $T_s = 60^\circ\text{C}$	135

Figura 79: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5$ m/s, $T_s = 60^\circ\text{C}$	136
Figura 80: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9$ m/s, $T_s = 60^\circ\text{C}$	136
Figura 81: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9$ m/s, $T_s = 45^\circ\text{C}$	137
Figura 82: Taxa de secagem - $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$	138
Figura 83: Taxa de secagem - $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,32$	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição média da soja	27
Tabela 2: Composição química média de 100g de grãos de soja	27
Tabela 3: Parâmetros para secagem em secador de leito fixo	39
Tabela 4: Efeito do tipo de secador sobre o ar de secagem, máxima temperatura do grão e susceptibilidade a quebras em milho	42
Tabela 5: Redução da umidade relativa devido ao aumento da temperatura	45
Tabela 6: Umidade recomendada para a colheita de vários grãos.....	47
Tabela 7: Grau de umidade no armazenamento para a conservação de grãos	47
Tabela 8: Umidades recomendadas para a armazenagem e comercialização de vários grãos ..	48
Tabela 9: Conversão de umidade base úmida (%) em base seca (decimal)	51
Tabela 10: Teor de umidade de diferentes grãos em equilíbrio com diversos níveis de umidade relativa do ar à temperatura de 25°C	53
Tabela 11: Equações para determinação da umidade de equilíbrio.....	54
Tabela 12: Massa específica real para diversos teores de umidade do grão de soja	56
Tabela 13: Massa específica global para diversos teores de umidade do grão de soja	56
Tabela 14: Porosidade da massa de grãos de soja para diversos teores de umidade.....	57
Tabela 15: Valores médios da área superficial, do volume do grão de soja e da razão entre eles para diferentes teores de umidade	60
Tabela 16: Atividade respiratória dos grãos de soja.....	62
Tabela 17: Erros prováveis nas medidas	90

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Eixo maior da esfera	[m]
a_{sv}	Razão entre a área da superfície e o volume do grão	[m ⁻¹]
a_1	Parâmetro	[h ⁻¹]
a_2	Parâmetro	[h ⁻¹]
a_3	Parâmetro	[h ⁻¹]
a_i	Parâmetro	[h ⁻¹]
A	Parâmetro	[adimensional]
A_0	Área do orifício da placa	[m ²]
A_i	Parâmetro	[adimensional]
A_s	Área da seção através da qual o calor flui	[m ²]
b	Eixo médio da esfera	[m]
b_1	Parâmetro	[adimensional]
b_2	Parâmetro	[adimensional]
b_3	Parâmetro	[adimensional]
b_i	Parâmetro	[adimensional]
$b.s.$	Base seca	[-]
$b.u.$	Base úmida	[-]
B	Parâmetro	[adimensional]
B_i	Parâmetro	[h ⁻¹]
c	Eixo menor da esfera	[m]
c_1	Constante que depende do produto	[-]

C	Coeficiente da placa de orifício	[-]
C_p	Calor específico	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C_{pa}	Calor específico do ar à pressão constante	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C_{pg}	Calor específico do grão	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C_{pv}	Calor específico do vapor d'água à pressão constante	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C_{pw}	Calor específico da água à pressão constante	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
CO_2	Gás carbônico	[-]
d_1	Função da temperatura e teor de umidade	[-]
d_2	Função da temperatura e teor de umidade	[-]
D	Coeficiente de difusão	[m ² ·h ⁻¹]
D_c	Coeficiente de difusão constante a determinada temperatura	[m ² ·h ⁻¹]
D_m	Coeficiente de difusão de massa	[m ² ·h ⁻¹]
D_t	Coeficiente de difusão de calor	[m ² ·h ⁻¹]
D_p	Diâmetro da esfera de mesmo volume que o grão	[m]
D_l	Diâmetro linear máximo do grão	[m]
E	Energia de ativação	[J·kg ⁻¹]
f	Parâmetro	[adimensional]
FR	Força resistente	[N]
FRA	Força de empuxo	[N]
g	Função linear em relação à temperatura e teor de umidade	[-]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[J·s ⁻¹ ·m ² ·K ⁻¹]
H_v	Calor latente de vaporização	[J·kg ⁻¹]
H_2O	Água	[-]
j	Função linear em relação à temperatura e teor de umidade	[-]
$\bar{J}_l$	Fluxo capilar líquido	[J·kg ⁻¹ ·s ⁻¹]
k	Condutividade térmica	[W/m°C]
k_h	Condutividade hidráulica	[s ⁻¹]
k_1	Parâmetro	[adimensional]
k_2	Parâmetro	[adimensional]
K	Constante de secagem	[s ⁻¹]
L	Calor latente	[J·kg ⁻¹]
m_{as}	Massa de ar seco	[kg]
m_{aw}	Massa de água no ar	[kg]

m_f	Massa final dos grãos	[kg]
m_g	Massa total de grãos	[kg]
m_{gs}	Massa do grão	[kg]
m_i	Massa inicial dos grãos	[kg]
m_s	Massa de matéria seca	[kg]
m_u	Massa de matéria úmida	[kg]
m_w	Massa de água	[kg]
n	Constante que depende do produto	[-]
n_1	Parâmetro	[adimensional]
n_2	Parâmetro	[m ⁻³ kg ⁻¹]
P	Massa específica do fluido	[kg·m ⁻³]
P_a	Pressão parcial do ar	[N/m ²]
P_{ar}	Pressão de vapor no ar	[N/m ²]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[mmHg]
P_f	Potencial de filtração	[adimensional]
P_{sat}	Pressão por profundidade do leito de grãos	[Pa·m ⁻¹]
P_v	Pressão parcial de vapor	[N/m ²]
P_{vg}	Pressão de vapor na superfície do grão	[N/m ²]
P_{vs}	Pressão de vapor saturado	[N/m ²]
PH	Peso do Hectolitro	[Kg/Hl]
q	Parâmetro	[adimensional]
$\dot{q}$	Fluxo de calor	[kcal/h]
R	Constante do vapor de água	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
RU	Razão de umidade	[adimensional]
S	Área superficial do grão	[m ²]
t	Tempo	[h, s]
T	Temperatura ambiente	[°C]
T_a	Temperatura do ar	[°C]
T_e	Temperatura de equilíbrio do ar	[°C]
T_g	Temperatura do grão	[°C]
T_p	Temperatura do produto	[°C]
T_s	Temperatura do ar de secagem	[°C]
UR	Umidade relativa do ar	[%]

UR_s	Umidade relativa do ar de secagem	[%]
v_a	Velocidade do ar de secagem	[m/s]
v_g	Velocidade de descida dos grãos	[m/s]
V	Volume do grão	[m ³]
V_g	Volume aparente	[m ³]
V_I	Volume intersticial	[m ³]
V_T	Volume total	[m ³]
W	Força gravitacional	[m/s ²]
X	Teor de umidade (b.s.)	[adimensional]
$\bar{X}$	Teor de umidade médio (b.s.)	[adimensional]
X_0	Teor de umidade inicial	[adimensional]
X_I	Teor de umidade de transição do produto (b.s.)	[adimensional]
X_2	Teor de umidade de transição do produto (b.s.)	[adimensional]
$X_{b.s.}$	Teor de umidade em base seca	[adimensional]
$X_{b.u.}$	Teor de umidade em base úmida	[adimensional]
X_{crit}	Teor de umidade crítico	[adimensional]
X_e	Teor de umidade de equilíbrio	[adimensional]
X_u	Teor de umidade (b.u.)	[adimensional]
Y	Teor de umidade do ar	[adimensional]
z	Constante que depende do produto	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

α	Coefficiente de transferência de calor	[m ² /s]
β_p	Coefficiente de transferência de massa	[m ² /s]
ε	Porosidade	[adimensional]
ϕ	Esfericidade	[adimensional]
ρ_a	Massa específica do ar	[kg.m ⁻³]
ρ_{ap}	Massa específica aparente	[kg.m ⁻³]

ρ_{ap0}	Massa específica aparente inicial	[kg.m ⁻³]
ρ_g	Massa específica do grão	[kg.m ⁻³]
ρ_s	Massa específica do sólido seco	[kg.m ⁻³]
ρ_T	Massa específica global ou total	[kg.m ⁻³]
χ	Parâmetro	[m ² .h ⁻¹]
ω	Parâmetro	[K]
ω_l	Razão entre o volume de ar e o volume do sólido seco	[adimensional]
Ψ	Potencial hidráulico capilar	[J.kg ⁻¹]
Φ_h	Densidade do fluxo de calor	[W.m ²]
Φ_m	Densidade do fluxo de massa	[kg.m ² .s ⁻¹]
Δm	Variação de massa	[kg]
Δp_l	Variação de pressão	[N/m ²]
ΔT	Variação de temperatura	[°C]
∇X	Gradiente de concentração de água	[adimensional]

INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max L.*) é considerada como uma das mais importantes no Brasil, principalmente pela extensão da área cultivada com essa leguminosa, o que o torna o segundo maior produtor mundial deste tipo de grão. No Rio Grande do Sul, em especial na região Noroeste do estado, o cultivo da soja é uma das principais atividades econômicas e movimenta vários setores, tais como a indústria, o comércio e a prestação de serviços dependem da produção deste cereal.

A produção de grãos ou sementes com elevada qualidade requer que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microrganismos. Isso determina a colheita do grão com teor de umidade elevado, o que faz do procedimento de secagem uma das operações de primordial importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal.

No sistema agroindustrial da soja se tem dado grande ênfase às pesquisas sobre secagem de grãos, pois esse processo representa em torno de 12% da energia total gasta nos sistemas de beneficiamento pós-colheita. Além disso, a secagem é um processo de fundamental importância na manutenção da qualidade do grão durante o período de conservação, porque o baixo teor de umidade diminui a atividade físico-química do produto e inibe as atividades microbianas associadas.

A secagem pode ser realizada de duas formas: natural e artificial. A natural consiste na exposição do grão úmido ao sol ou a permanência num ambiente seco, permitindo ao produto ceder ao ar uma parte da água em excesso. Cuidados especiais devem ser tomados para que as sementes não sofram aquecimento excessivo e que a secagem ocorra do modo mais uniforme possível. É um método que depende das condições do ar ambiente, que muitas vezes não são adequadas para a secagem dos grãos. A secagem artificial, que se faz por meio de secadores, consiste em fazer circular o ar aquecido por uma camada de grãos dentro de uma câmara de secagem.

A secagem consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida nos grãos, a um nível máximo de umidade no qual possam ser armazenados em condições ambientais durante longos períodos. A secagem de produtos agrícolas pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do grão por meio de

evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido. Portanto, o ar de secagem deve possuir uma quantidade de calor a ceder aos grãos e possuir condições de reter e transportar uma quantidade de massa de água na forma de vapor.

Vários fatores têm influência no tempo necessário para reduzir a umidade das sementes ao nível seguro para armazenamento. Os principais fatores a considerar são: temperatura, umidade relativa e vazão do ar, umidade inicial e final e tipo de grão. Pode-se afirmar que quanto maior a temperatura e vazão e menor a umidade relativa do ar de secagem, menor será o tempo necessário para secar o produto. Quanto maior a umidade inicial e mais baixa a umidade final do produto, maior será o tempo de secagem.

O desenvolvimento e otimização de secadores e de sistemas de secagem requerem o estudo das propriedades físicas de cada produto, incluindo as curvas de secagem em camada fina. A secagem em camada fina é definida como aquela com a espessura de apenas um grão. A equação de secagem em camada fina somada a equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em estudo forma um conjunto de relações matemáticas que auxiliam nos cálculos e entendimento dos processos de secagem em camada espessa. Considera-se que uma camada espessa de grãos está constituída de uma sucessão de camadas delgadas superpostas. Segundo Chittenden e Hustuld (1966), a teoria utilizada para descrever o fenômeno de secagem pode ser baseada no princípio de que a resistência ao transporte de umidade se concentra na superfície do grão.

A determinação da viabilidade da aplicação comercial dos sistemas de secagem e seu dimensionamento podem ser feitos por simulação matemática. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem.

Visando contribuir com estudos neste sentido, a linha de pesquisa de Fenômenos de Transporte dentro do Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí, vem desenvolvendo trabalhos nos últimos anos envolvendo a secagem de grãos, especialmente os de soja, pela importância acima discriminada.

De acordo com o exposto, objetivou-se com este trabalho obter as curvas de secagem de soja, em camada fina, na faixa de temperatura do ar de secagem entre 45°C e 90 °C, para os teores de umidade inicial de 0,13; 0,19; 0,22; 0,28 e 0,32 (base seca) e velocidades do ar de

experimentos e realizar simulações numéricas através do modelo matemático proposto, comparando os resultados simulados com os dados experimentais.

No primeiro capítulo é apresentada a revisão de literatura, onde é abordada inicialmente as características da soja, enfocando a sua origem e histórico, descrição botânica, composição química, o seu processamento, importância econômica e por fim as pragas que a atingem. A seguir, volta-se para o estudo sobre a secagem de grãos, onde enfatiza as formas deste processo, os tipos de secadores e os fatores que influenciam a secagem. Prosseguindo, enfoca as características dos grãos, onde é feita a agregação de informações necessárias para o entendimento do processo de secagem. Por fim, a revisão de literatura é então direcionada para os modelos matemáticos existentes para a secagem de grãos, priorizando aqueles que dizem respeito à secagem em camada fina.

O segundo capítulo traz a apresentação dos materiais utilizados na parte experimental, a descrição do equipamento, a metodologia usada para a realização dos experimentos de secagem de soja em camada fina bem como o processo de aquecimento dos grãos. Também é feita a descrição do modelo matemático utilizado para a realização das simulações numéricas e dos métodos numéricos usados para a sua resolução.

Os resultados e discussões obtidos através da metodologia empregada nesta pesquisa são apresentados no terceiro capítulo. Num primeiro momento, é feita uma comparação entre os dados experimentais desta pesquisa com os obtidos por Soares (1986). A seguir, enfocam-se os resultados obtidos com o processo de secagem, mostrando as simulações numéricas comparando-as aos resultados experimentais, descrevendo a influência dos parâmetros velocidade do ar, temperatura do ar e teor de umidade inicial do grão. Por fim, são mostrados os dados referentes às curvas de taxa de secagem, perda de massa de água na estufa e aquecimento dos grãos.

A conclusão da pesquisa é apresentada no último capítulo.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão a ser apresentada aborda inicialmente as características da soja, enfocando a sua origem e histórico, descrição botânica, composição química, processamento e por fim a sua importância econômica. A seguir, volta-se para o estudo sobre a secagem de grãos, onde enfatiza as formas deste processo, os tipos de secadores e os fatores que influenciam a secagem. Prosseguindo, enfoca as características dos grãos, onde é feita a agregação de informações necessárias para o entendimento do processo de secagem. Por fim, a revisão de literatura é então direcionada para os modelos matemáticos existentes para a secagem de grãos, priorizando aqueles que dizem respeito à secagem em camada fina.

1.1 CARACTERÍSTICAS DA SOJA

1.1.1 Origem e histórico

A soja é uma planta oleaginosa, originária da China, onde já era conhecida por volta de 2000/1500 a.C. No entanto, aceita-se oficialmente o século XI como sendo a época em que a cultura da soja surgiu. Ela se expandiu para fora do Oriente somente no início do século XVII, do Japão para a Europa, onde teve sua importância aumentada no mundo.

No final do século XIX, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos se interessou pelo vegetal e levou algumas variedades de soja para aquele país, despertando o interesse das indústrias de óleo vegetal. Mas, foi somente em torno de 1930 que foram desenvolvidas variedades melhoradas de soja, intensificando-se o cultivo nos Estados Unidos, tornando-o o maior produtor mundial (CARUSO, s.d.).

O primeiro registro de cultivo de soja no Brasil refere-se à Bahia, em 1882. Depois de décadas, a medida que começavam a antever-se grandes possibilidades para esta cultura, verificou-se a necessidade de desenvolver variedades adaptadas às condições do Brasil. Dessa forma, em 1961, de um total de trinta e um experimentos do Ministério da Agricultura envolvendo soja, vinte e três destinavam-se ao estudo do comportamento das variedades.

Na década de 50, a produção de soja aumentou consideravelmente. O seu destaque, porém, teve início na década de 60, quando começou a ser cultivada na região sul. Constam informações de plantio relativas aos anos de 1891, na Estação Agronômica de Campinas; 1901, no Estado de São Paulo e em Dom Pedrito – RS; 1914 através da Universidade Técnica do RS; 1921 em Santa Rosa e 1930 em Guarani das Missões.

A soja começou a ser cultivada em larga escala no RS, principalmente em Santa Rosa, de onde expandiu-se para a região das Missões. Atualmente, a soja é cultivada em praticamente todas as regiões gaúchas. Do RS, a soja se espalhou para outros estados brasileiros, sendo que a partir de 1968 a expansão da lavoura registrou-se em níveis significativos em Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso, Minas Gerais e Goiás.

1.1.2 Descrição botânica

A soja é uma planta herbácea pertencente à família *Leguminosae* e ao gênero *Glycine*, subfamília das Papilionáceas, tribo das Faseoláceas, ramo das fanerógamas, divisão das angiospermas, classe das dicotiledônias, ordem das rosales e espécie *Glycine max* (L) Merrill. Acredita-se que sua antecessora selvagem tenha sido a *Glycine ussuriensis*, uma planta errante nativa, oriunda do nordeste asiático, que através dos séculos sofreu e acumulou mutações genéticas (CARUSO, s.d.).

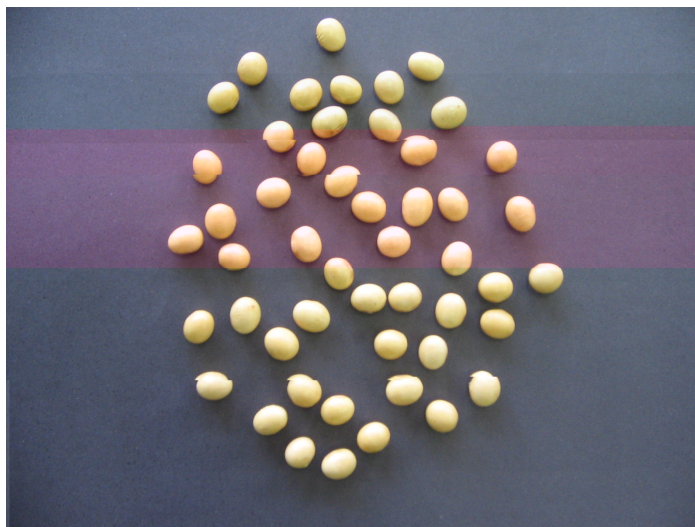


Figura 1: Fotografia de grãos de soja

A soja apresenta seu caule ereto, medindo cerca de 30 a 150 cm de altura. As folhas são longopecioladas, com três folíolos cordiformes, muito desenvolvidos e peludos na parte inferior. As flores, reunidas em cachos curtos, são axilares, sésseis, brancas, violáceas ou amarelas, conforme a variedade. As vagens da soja, levemente arqueadas, subcomprimidas, peludas, têm 1 a 5 sementes (GOMES, 1975). As sementes apresentam coloração creme, palha ou de azeitona a negra.

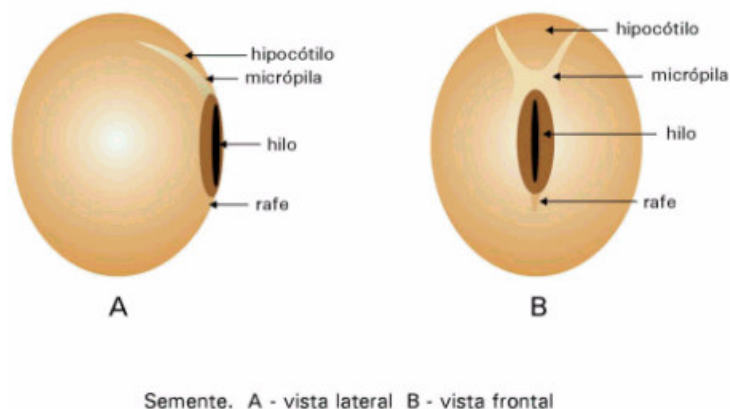


Figura 2: Representação esquemática da semente de soja (Fonte: Embrapa Soja, 2000)

Conforme Petry (2000), os estágios do desenvolvimento da fase reprodutiva da soja podem ser assim descritos:

- a) R1: início do florescimento – uma flor aberta em qualquer nó do caule;
- b) R2: florescimento completo – uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule com folhas desenvolvidas. Florescimento: Flores nos quatro últimos nós do caule com folhas desenvolvidas;
- c) R3: início da formação de legumes – um legume com 5mm num dos quatro últimos nós do caule com folhas desenvolvidas;
- d) R4: formação de legumes – um legume com 2cm num dos quatro últimos nós do caule com folhas desenvolvidas;
- e) R5: início do enchimento de grãos – grão com 3mm num legume dos quatro últimos nós do caule com folhas desenvolvidas;
- f) R6: máximo volume de grãos – legume contendo, ao menos um grão verde que ocupa toda a sua cavidade, num dos quatro últimos nós do caule com folhas desenvolvidas;
- g) R7: maturação fisiológica – um legume normal no caule, que atingiu a cor de legume maduro;
- h) R8: maturação – noventa e cinco por cento dos legumes atingiram a cor de legume maduro.

1.1.3 Composição química

O grão de soja possui uma grande quantidade de gordura e um alto valor protéico. Contém substâncias que podem ser empregadas na fabricação de doces, pães, remédios, tintas,

sabão, adesivos, fertilizantes, inseticidas e mais uma série de produtos.

De acordo com Puzzi (1986), a composição da soja é definida da seguinte forma:

Tabela 1: Composição média da soja

Componentes	Porcentagem
Matérias protéicas	35
Carboidratos	26
Matérias graxas	19
Água	10
Celuloses	5
Cinzas	5

Fonte: Puzzi (1986)

Já o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1975) detalha mais a constituição química da soja, em cima de 100 g deste grão:

Tabela 2: Composição química média de 100g de grãos de soja

Constituinte	Participação na composição química (mg)
Água	8540,0
Proteína	36490,0
Carboidratos	30160,0
Vitaminas	10,537
Lipídios	19940,0
Cálcio	277,0
Fósforo	704,0
Ferro	15,7
Potássio	1797,0
Cobre	1658,0
Manganês	2517,0
Magnésio	280,0
Sódio	2,0
Zinco	4,89

Fonte: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURES USDA (1975)

1.1.4 Processamento do grão de soja

Durante o processamento dos grãos de soja, primeiro eles são limpos, depois condicionados, descascados e transformados em flocos. O passo seguinte é remover o óleo de soja dos flocos. Estes são então secados, criando-se os “flocos de soja desengordurados”. O material desengordurado é a base para as três categorias principais de produtos de proteína de soja: farinhas, proteínas concentradas e proteínas isoladas de soja.

A Figura 3 descreve o processamento dos grãos de soja.



Figura 3: Esquema do processamento dos grãos de soja (Fonte: The Solae Company, 2004)

1.1.5 Importância econômica

A soja é a mais importante oleaginosa cultivada no mundo. Cada vez mais presente na alimentação da população, ela é um dos grãos mais produzidos mundialmente. É um alimento de preço acessível às diversas camadas sociais e ao mesmo tempo detentor de enorme potencial de gerar riquezas e transformar a economia de um país. Para os Estados Unidos, o Brasil e a Argentina, os três maiores produtores mundiais, a soja tem peso considerável na atividade econômica (CARUSO, s.d.). Nestes países, a produção de soja na safra 2005/2006 foi de 80.7, 60 e 42 milhões de toneladas, respectivamente (ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA, 2005).

Em termos mundiais, o plantio de soja atingiu 92,4 milhões de hectares na safra 2004/05. Para 2005/06, há indicativos de que o mundo todo cultivará 91,8 milhões de

hectares, que poderão resultar em produção global de 220,9 milhões de toneladas (ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA, 2005).

Mesmo sendo o principal produto agrícola da exportação brasileira, a soja não se limita apenas a isso. No seu rastro, instalaram-se dezenas de indústrias de processamento, que produzem óleos e farelos de soja, assegurando emprego para milhares de trabalhadores dos campos, das fábricas e dos transportes.

1.2 SECAGEM

1.2.1 O processo de secagem

No sistema produtivo agrícola, ainda, tem-se dado grande ênfase às pesquisas sobre secagem de grãos, pois este processo representa em torno de 12% da energia total gasta nos sistemas de beneficiamento pós-colheita. A secagem, além de representar um custo equivalente a este percentual, é um processo de fundamental importância, pois prepara o produto para a armazenagem e exerce uma forte influência na manutenção da sua qualidade durante o período de conservação, porque o baixo teor de umidade diminui a atividade físico-química do produto e inibe as atividades microbianas associadas.

O processo de secagem consiste em retirar a água dos grãos até o nível que permita realizar o armazenamento por períodos mais ou menos longos. O teor de água adequado para a conservação dos grãos situa-se na faixa de 10% a 13%.

Para Portella e Eichelberger (2001), a secagem é uma operação crítica quando a colheita é antecipada e os grãos ainda têm elevada umidade. A secagem inadequada, ou sua ausência, é a principal causa da deterioração qualitativa dos grãos durante o armazenamento.

Segundo Cassini (2004), quando um sólido úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente: transferência de energia (na maioria das vezes sob a forma de calor) do meio ambiente para evaporar a umidade presente na superfície do produto e transferência da umidade interna até a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devido ao processo anterior.

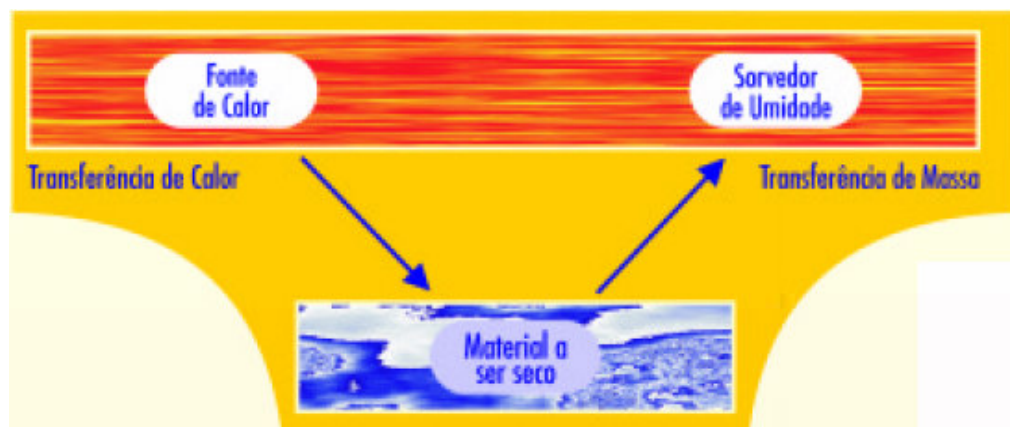


Figura 4: Diagrama do processo de secagem (Fonte: Kepler Weber, 2006)

Como resultado da secagem, tem-se a separação parcial entre a matéria sólida e água contidas no grão. É um processo que usa o ar como meio para conduzir o calor e transferir o excesso de água dos grãos para a atmosfera. Ela baseia-se na propriedade pela qual o aumento da temperatura do ar diminui a sua umidade e o torna capaz de absorver a umidade disponível no grão. O teor de umidade dos grãos acompanhará a diminuição de umidade do ar quando os submetemos a uma corrente de ar quente. Assim, na secagem ocorre uma perda de massa, que é o resultado da evaporação de parte da água existente no grão. O calor fornecido aos grãos possibilita a migração da água à superfície carregada pelo fluxo de ar que flui pelos grãos. Portanto, o ar de secagem deve possuir uma quantidade de calor a ceder aos grãos e possuir condições de reter e transportar uma quantidade de massa de água na forma de vapor.

O primeiro processo pode ocorrer por convecção, condução, radiação ou, em alguns casos, por combinação de dois ou mais destes mecanismos. Além disso, esta etapa é dependente das condições externas – como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem – da área da superfície exposta e da pressão do sistema. O segundo processo, por sua vez, é função da natureza física do sólido, da temperatura deste e de seu conteúdo de umidade.

A condição necessária e suficiente para que o grão seja submetido ao fenômeno de secagem é que a pressão parcial de vapor de água da superfície do grão seja maior que a pressão parcial de vapor do ar. Durante a secagem, para que haja a evaporação para o ambiente, a água deve ser transportada do interior até a superfície do grão.

O processo de secagem pode ser dividido em etapas, de acordo com a figura 5:

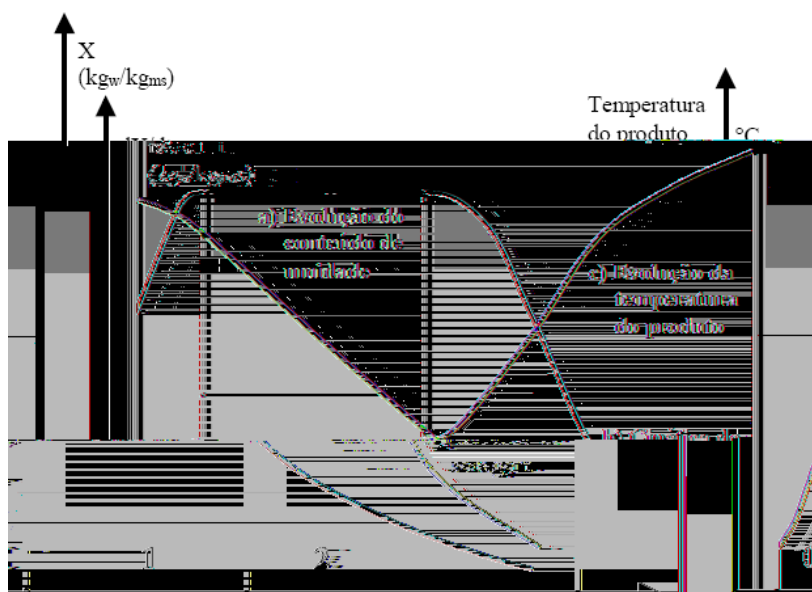


Figura 5: Curva típica de secagem (Fonte: Park, 1988 apud Carneiro, 2003)

Segundo Carneiro (2003), a curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (teor de umidade do produto, $X = X_{bs}$, em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, a curva obtida medindo-se a massa do produto durante o processo numa determinada condição de secagem).

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do teor de umidade do produto por tempo, dX/dt , em relação à evolução do tempo (t), que corresponde à curva obtida diferenciando a curva (a)).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto (T_p) em relação à evolução do tempo (t), isto é, a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem.

O período 0 representa o início da secagem, com elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor d'água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

No período 1 a taxa de secagem é constante. A água evaporada corresponde à água livre. A transferência de massa e de calor são equivalentes e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No período 2 a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. O fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem.

Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

1.2.2 Fatores que influenciam o processo de secagem

De acordo com Heldman e Hartel (2000), a secagem é influenciada por diversos fatores, que podem estar relacionados às condições do processo ou à natureza do produto.

Em relação às condições do processo, os fatores mais importantes são a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar de secagem e a pressão do sistema:

- a) Temperatura: quanto a maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido ocorre o processo, e também faz com que a umidade relativa do ar de secagem diminua, aumentando o gradiente de umidade entre a superfície do grão e o ar. Além disso, a temperatura influi diretamente na migração da umidade interna, pois quanto mais quente o ar, maior é a migração das moléculas de água do interior do grão;
- b) Velocidade do ar: um acréscimo na velocidade de escoamento do ar ocasiona um aumento na taxa de transferência de massa por convecção, ou seja, ela influencia na primeira etapa do processo de secagem, quando se dá a transferência da umidade da superfície do grão para o ar de secagem. Já na segunda etapa do processo de secagem, quando ocorre a migração interna de umidade, a velocidade do ar, por ser um fator externo, não tem influência significativa;
- c) Umidade relativa: na secagem como um todo, este parâmetro é fator determinante na umidade de equilíbrio, ou seja, no teor de umidade atingido pelo grão ao final do processo;
- d) Pressão: influencia a relação de equilíbrio da água.

No que diz respeito à natureza do produto, os fatores que afetam a secagem estão relacionados à área superficial, ou seja, quanto maior a razão entre a área superficial do grão e seu volume, mais rapidamente se dará a secagem, pois maior é a área que entra em contato com o ar.

1.2.3 Secagem Natural e Secagem Artificial

A secagem pode ser dividida em duas formas: secagem natural e secagem artificial.

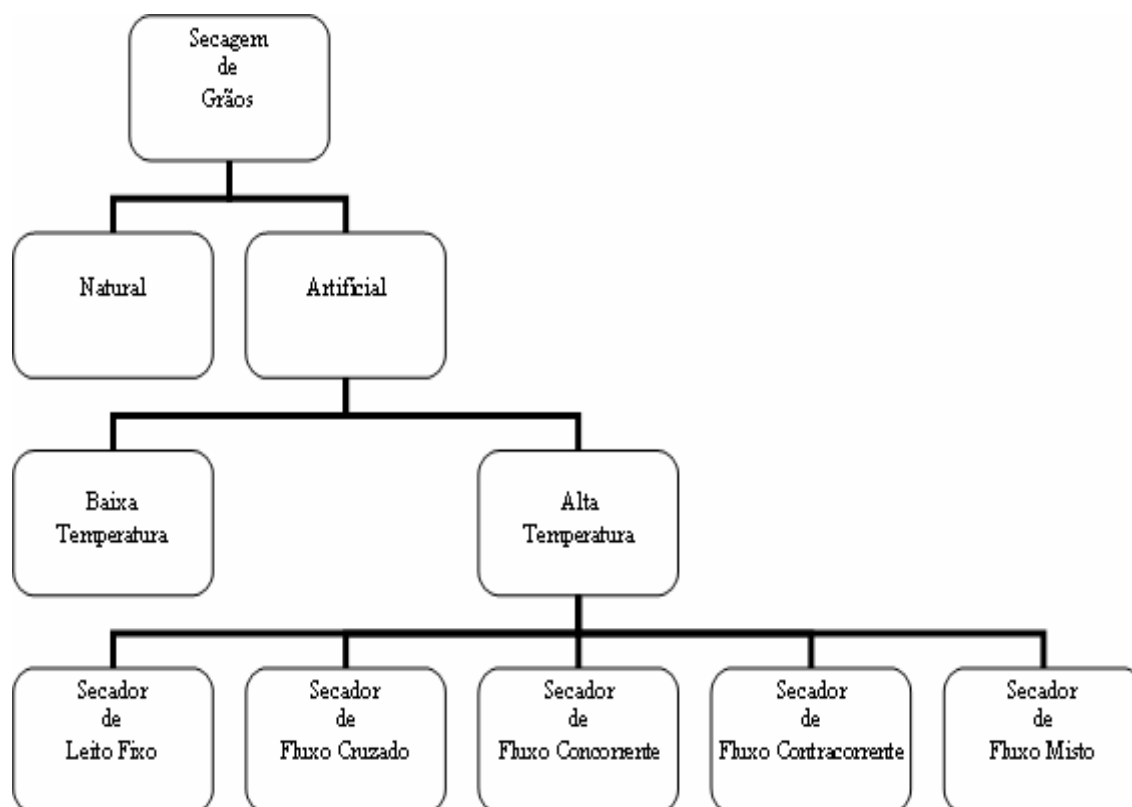


Figura 6: Organograma das formas de secagem

A secagem natural é o processo que consiste na exposição do grão úmido ao sol e ao vento, ou a permanência num ambiente seco, permitindo ao produto ceder ao ar uma parte da água em excesso. Apesar de possuir um baixo custo, não expor o grão a temperatura muito alta e não causar a este danos mecânicos, este tipo de secagem é muito limitada pelas condições do ar, tornando-se um processo muito lento, permanecendo os grãos por muito tempo com umidade elevada.

A secagem artificial consiste em fazer circular o ar por uma camada de grãos dentro de uma câmara de secagem. Esse ar é aquecido antes de entrar em contato com o grão. Este tipo de secagem é caracterizado pelo controle das características do ar de secagem – temperatura e movimentação –.

Quando o ar utilizado é aquecido, atinge duas finalidades:

- a) a pressão do vapor da água existente nos grãos é aumentada pelo aquecimento do produto, facilitando assim a saída da umidade. Parte do calor do ar secante proporciona um aumento da temperatura do produto (calor sensível), e parte fornece o calor necessário para a vaporização da água contida nos grãos (calor latente);

- b) a umidade relativa do ambiente diminui e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta. Segundo o equilíbrio higroscópico, a umidade relativa dos grãos acompanha a diminuição da umidade relativa do ar secante, havendo então a secagem.

1.2.4 Sistemas de Secagem

A escolha do sistema de secagem leva em conta diversos fatores, entre os quais capacidade de secagem, qualidade dos grãos, custos iniciais e temperatura dos silos. Levando-se em conta isso, a secagem pode ocorrer por diferentes métodos:

1.2.4.1 Secagem em silos

Os grãos são carregados limpos e úmidos num silo com aeração onde são ventilados até estarem secos. Os silos utilizados devem ser baixos com no máximo nove anéis com altas vazões de ar, de modo que a secagem ocorra em tempo suficientemente curto para evitar problemas de qualidade e deterioração do grão. Este ar pode ser aquecido ou não.

As vantagens deste método são o baixo investimento inicial, a facilidade de operação e a melhor qualidade do produto. As desvantagens é que é um método extremamente dependente das condições climáticas, limitado à umidade inicial do produto (máximo 18%), possui um custo elevado de energia elétrica, ocorrem perdas elevadas de matéria seca, há uma desuniformidade na distribuição da umidade do produto (grãos da camada inferior versus camada superior) e tem a restrição da altura do silo.

1.2.4.2 Secagem com secadores

Secagem em silo secador:

É um equipamento dotado de uma superfície perfurada sob o teto do mesmo, onde camadas seqüenciais de grãos são secas em camada fixa. Os grãos quando secos, ainda quentes, são descarregados no silo onde passam a ser resfriados. Este ar de resfriamento adicionado de ar aquecido é utilizado para secagem da camada fixa seguinte. A secagem na camada fixa é feita até algo ao redor de 15%, onde o produto ainda está mais plástico e menos sensível a tensões de secagem. A retirada da umidade final se dá no resfriamento que acontece

na parte inferior do silo, resfriamento este feito de forma lenta sem que se incorra em choques e outras agressões térmicas.

As vantagens são a elevada qualidade do grão, fácil operação, bom rendimento térmico e fora da época de secagem, o equipamento serve como silo de armazenagem com aeração. As desvantagens são a necessidade de plantas dedicadas e sistemas automatizados, não possibilita secagem contínua, apenas por bateladas e exige mão-de-obra especializada (KEPLER WEBER, 2005).



Figura 7: Esquema de um silo secador (Fonte: Kepler Weber, 2005)

Secagem em secadores intermitentes com câmara de repouso:

Uma grande quantidade de umidade dos grãos é retirada em períodos descontínuos. Essa retirada de umidade, que afeta mais intensamente a casca, gera gradientes térmicos e de umidade no interior dos grãos. Um período de repouso se segue para equalizar os gradientes, reduzir tensões e disponibilizar umidade na casca para a próxima etapa de secagem. Esses equipamentos são dotados de uma pequena câmara de secagem na parte inferior e uma grande câmara de repouso na parte superior. A proporção entre os volumes destes dois setores é geralmente em torno de dez. O grão fica circulando no secador e recebendo ventilação com ar aquecido a temperaturas relativamente altas (de 90 a 100°C) na câmara de secagem e “repousando” por períodos mais longos na câmara de repouso.

As vantagens apresentadas são: apropriado para produtos com altos teores de umidade, sistema de secagem seguro com somente uma pequena parcela do volume de grãos sofrendo secagem e é apropriado para pequenas produções ou onde haja descontinuidade de produção.

As desvantagens são que ele possui um baixo rendimento de secagem, sendo um sistema exclusivo para pequenos volumes de recebimento com elevado consumo energético.

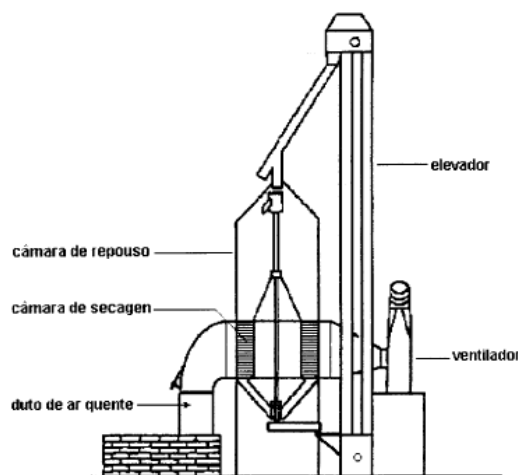


Figura 8: Esquema de um secador com câmara de repouso (Fonte: Garcia, 2004)

Secagem intermitente ou contínua em secadores convencionais:

Segundo dados da Kepler Weber (2005), um secador intermitente convencional é carregado com produto úmido e recircula o mesmo até que a umidade desejada seja alcançada. É mais utilizado para remoção de grandes quantidades de umidade como no caso do milho e do arroz. No secador contínuo o produto permanece por um determinado tempo no seu interior e sai seco, de forma contínua, pronto para os processos subsequentes. Entende-se por secadores convencionais, secadores de cavalete ou de coluna, com as seguintes características:

a) Secadores de Cavaletes:

Possui como vantagens o bom rendimento térmico, a segurança durante a operação, o baixo tempo para o produto estar pronto para a comercialização e a agilidade no recebimento de produto. As desvantagens são o investimento inicial elevado, o rodízio durante a secagem, o fluxo de recebimento limitado e o maior custo por tonelada seca.

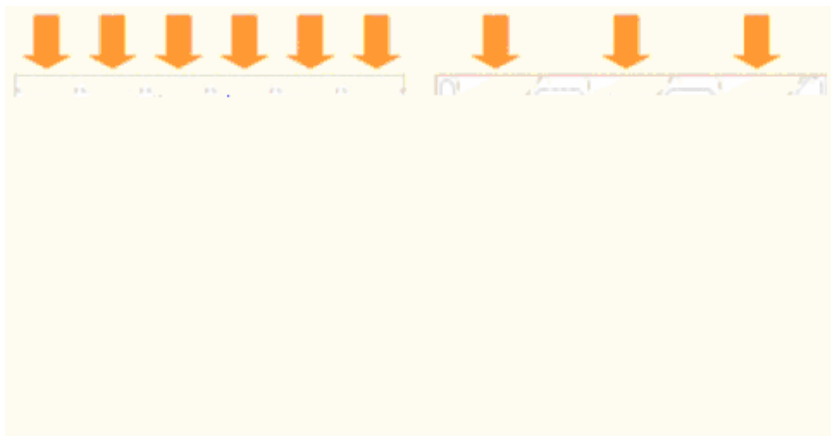


Figura 9: Esquema da torre de secagem de um secador de cavalete e de coluna (Fonte: Kepler Weber, 2005)

Sistemas combinados: secagem convencional com término no silo:

Neste sistema, utiliza-se um secador convencional para reduzir a umidade até 16%, finalizando o processo no silo. Devem-se utilizar silos com sistema de aeração com vazão específica mais elevada que a utilizada para realizar a conservação. A umidade relativa e temperatura ambiente são fatores que influenciam no processo.

Apresenta como vantagens a maior qualidade do grão, menor custo por tonelada seca, menor investimento inicial, temperatura final do grão menor e aumento da capacidade de recebimento. As desvantagens são o aumento da potência instalada no silo, aumento do tempo para o produto estar em condições de comercialização e o maior risco operacional (KEPLER WEBER, 2005).

Sistemas combinados: secagem convencional com repouso no silo:

Este tipo de secagem também utiliza um período de repouso, mas por um tempo maior (oito a doze horas). A secagem em secador é realizada até 18%, após este processo, há um período de repouso em silo com sistema de aeração, em seguida, secagem novamente em secador e posterior resfriamento em silo. É um processo complexo que se aplica para instalações maiores e exige alto investimento em equipamentos (KEPLER WEBER, 2005).

1.2.5 Classificação dos Secadores

Os secadores podem ser classificados quanto ao sentido do fluxo e quanto à forma de funcionamento:

1.2.5.1 Quanto ao sentido do fluxo

Em relação ao fluxo do produto no secador, estes podem ser categorizados em dois tipos: *secadores estacionários*, que consiste em se forçar o ar através de uma massa de grãos que está em repouso e *secadores de fluxo contínuo*, onde os grãos fluem continuamente através do secador, enquanto são submetidos a uma corrente de ar.

Os secadores de fluxo contínuo estão divididos em quatro grupos principais, conforme Hall (1980), Bakker-Arkema (1984), Lasseran (1988), Villela (1991), Biagi et al. (1992), Brooker et al. (1992), Arnosti Junior (1993), Bakker-Arkema (1994).

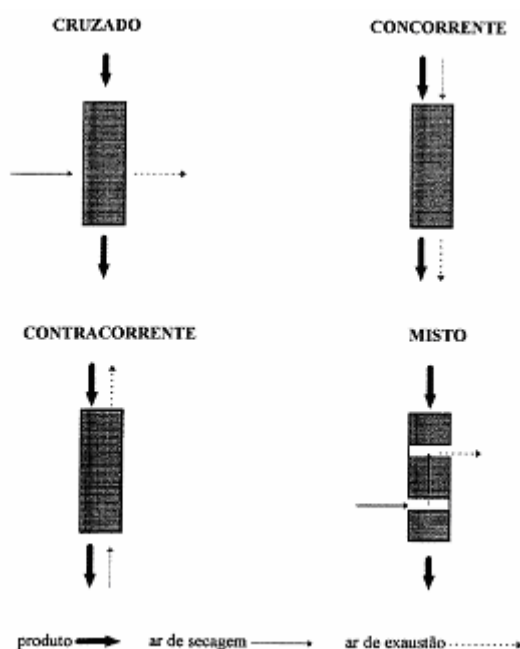


Figura 10: Esquema dos secadores de fluxo contínuo (Fonte: Martins, 1997)

Secador de Leito Fixo:

Conforme Silva (2005), a camada de grãos nestes secadores permanece estática durante a secagem. Como o produto fica parado, recomenda-se o revolvimento a cada três horas, para que a secagem ocorra uniformemente. Existem secadores equipados com sistemas mecânicos para revolver os grãos, o que dispensa a interrupção do processo.

Este tipo de secador vem sendo utilizado na secagem de milho em espiga, feijão em ramas, café e arroz. O formato da câmara de secagem varia, podendo ter o fundo inclinado para favorecer a descarga por gravidade.

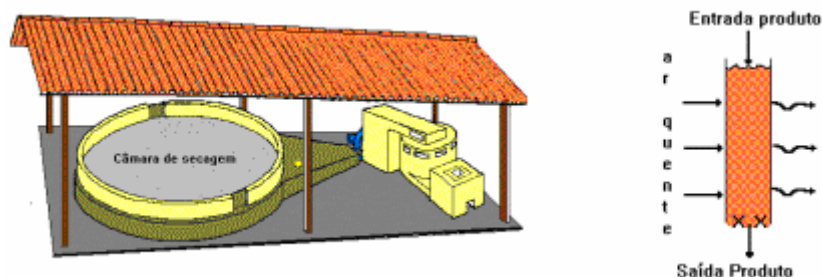


Figura 11: Secador de leito fixo horizontal e leito fixo vertical (Fonte: UFLA, 2006)

A tabela abaixo mostra os parâmetros para secagem de produtos em secadores de leito fixo:

Tabela 3: Parâmetros para secagem em secador de leito fixo

Produto	Finalidade	Temperatura (°C)	Forma	Camada (cm)	Revolvimento (min)
Milho	semente	40	espiga	100	-
	consumo	60	granel	40	120
Feijão	semente	40	rama	60	30
	semente	40	granel	40	60
	consumo	40	granel	40	120
Arroz	semente	40	granel	40	60
	consumo	45	granel	30	90
Soja	semente	40	granel	50	60
	consumo	45	granel	60	120
Café	consumo	50	cereja	50	180
	consumo	50	meio secar	40	180
Feno	ração	50	picado	50	120
Mandioca	ração	40	raspa	30	180
Cebola	consumo	35	cabeça	40	-
Alho	consumo	35	cabeça	40	-

Fonte: Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (2005)

Secador de Fluxo Cruzado:

Num secador de fluxo cruzado, o produto úmido é colocado em uma moega superior e por gravidade vai descendo pelo secador, onde é secado até um determinado teor de umidade, resfriado e descarregado na parte inferior. A secagem e o resfriamento são realizados por meio de fluxo de ar perpendicular ao fluxo de grãos.

O secador possui um plenum envolvido por colunas de grãos de 30 a 40 cm de espessura e são conhecidos como secadores de lote ou coluna. O fluxo de grãos é regulado por um mecanismo localizado no fim da coluna de secagem.

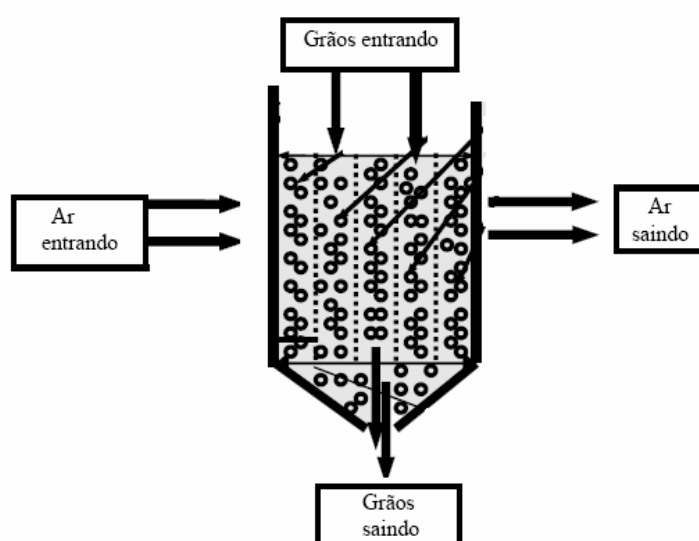


Figura 12: Esquema de um secador de fluxo cruzado (Fonte: Mata, 1999)

Secador de Fluxo Contracorrente:

Neste tipo de secador, o ar aquecido é forçado a passar pela massa de grãos em sentido contrário ao fluxo de grãos. Assim, à medida que o produto vai descendo pela coluna de secagem sua temperatura vai sendo aumentada gradualmente, atingindo o valor máximo no final da coluna de secagem que coincide com o ponto de entrada do ar aquecido. É conveniente no secador de fluxo contracorrente trabalhar no sistema seca-aeração, pois o grão apresenta elevada quantidade de energia armazenada na forma de calor sensível.

A figura abaixo mostra a representação esquemática de um secador de fluxo contracorrente.

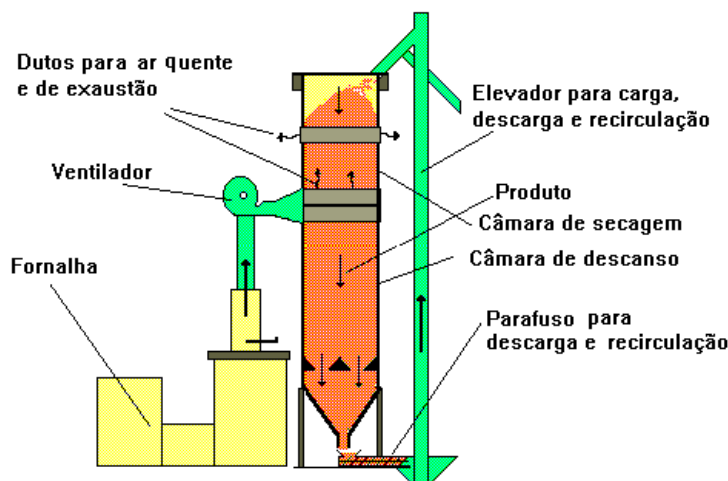


Figura 13: Esquema de um secador de fluxo contracorrente (Fonte: UFLA, 2006)

Secador de Fluxo Concorrente:

Nesses secadores, ar e grão fluem no mesmo sentido. O ar mais quente encontra o grão mais úmido, e a alta taxa de evaporação causa rápido resfriamento desse ar. Isso possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as utilizadas em secadores de fluxos cruzados. O produto final é homogêneo quanto à temperatura e umidade. O secador de fluxo concorrente se caracteriza pela alta eficiência energética de secagem e pela excelente qualidade final do produto. Porém, sua capacidade de secagem é superior, e o custo de implantação ainda inferior aos secadores convencionais de mesma capacidade.

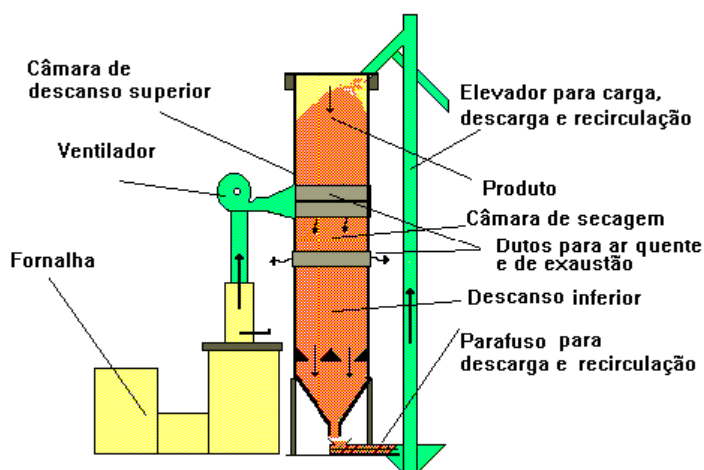


Figura 14: Esquema de um secador de fluxo concorrente (Fonte: UFLA, 2006)

Secador de Fluxo Misto:

Este tipo de secador caracteriza-se pela mistura de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes. No Brasil, os secadores de fluxo misto são conhecidos como tipo cascata e

são amplamente utilizados em unidades armazenadoras de grande porte, em virtude da sua capacidade de secagem, para redução do teor de umidade de grãos de 18 para 13%. As câmaras de secagem e resfriamento são constituídas por uma série de calhas em forma de “V” invertido, dispostas em linhas alternadas ou cruzadas dentro do corpo do secador. Os grãos movem-se para baixo, sob a ação da gravidade e sobre as calhas invertidas. O ar de secagem entra numa linha de calhas e sai nas outras imediatamente adjacentes (superior ou inferior).

A tabela abaixo mostra uma comparação entre os três principais tipos de secadores, feita por Bakker-Arkema (1994), com relação à temperatura do ar de secagem, à máxima temperatura alcançada pelos grãos e à expectativa de aumento da susceptibilidade às quebras na secagem do milho.

Tabela 4: Efeito do tipo de secador sobre o ar de secagem, máxima temperatura do grão e susceptibilidade a quebras em milho

Tipo de secador	Temperatura do ar de secagem (°C)	Máxima temperatura do grão (°C)	Susceptibilidade às quebras (%)
Fluxo cruzado	80-110	80-100	20
Fluxo misto	100-130	70-100	10
Fluxo concorrente	175-285	60-80	5

Fonte: Bakker-Arkema (1994)

1.2.5.2 Quanto à forma de funcionamento

Conforme Silva (2005), quanto ao funcionamento, os secadores são classificados em contínuos e intermitentes. Contínuos quando o produto necessita passar uma só vez pelo secador para atingir o teor de umidade desejado. Já nos intermitentes, o produto necessita recircular por várias vezes.

Essa classificação não determina uma característica fixa do equipamento, pois um mesmo secador, dependendo do teor de umidade da carga, poderá funcionar de forma intermitente ou contínua. A descrição destes secadores já foi feita anteriormente.

1.2.6 Divisões da Secagem Artificial

Em função da temperatura do ar de secagem, a secagem artificial é subdividida em secagem a baixa temperatura e secagem a alta temperatura.

1.2.6.1 Secagem a baixa temperatura

Conforme Silva (2005), nesta modalidade, o ar de secagem é aquecido em no máximo 10°C acima da temperatura ambiente. Estruturalmente, os secadores dessa modalidade configuram como silos, que possuem as seguintes características: (i) fundo perfurado; (ii) capacidade estática máxima de 300 toneladas (5.000 sacas) e (iii) altura de cilindro máxima de seis metros. Quanto aos parâmetros de secagem: (i) o fluxo de ar deve estar sempre entre 1,0 e 10 m³/min por tonelada de produto, (ii) o silo deve possuir área de suspiros equivalente a 1,0 m² para cada 300 m³/min de ar insuflado e (iii) o enchimento do silo pode ser feito por etapas ou em uma única vez.

A secagem a baixa temperatura pode durar de 15 a 30 dias e depende da temperatura, umidade relativa e vazão do ar de secagem. O importante é que estes três parâmetros sejam definidos corretamente, para que a secagem seja completada, sem a ocorrência de deterioração do produto.

Esta modalidade é altamente recomendada para a secagem de arroz, tendo em vista a alta susceptibilidade deste produto a trincas devido aos choques térmicos.

1.2.6.2 Secagem a alta temperatura

Os secadores desta modalidade operam com temperaturas do ar de secagem superiores em mais 10°C a temperatura ambiente. Segundo Weber (2005), a secagem a altas temperaturas provoca um choque térmico que gera estresse e trincas nos grãos. Outro problema é que a primeira camada interna do grão perde umidade de forma rápida, criando uma capa impermeável, mas o núcleo ainda frio mantém toda a umidade interna.

1.2.7 Fluxo de ar

Carvalho (1994) apud Sartori (2001), coloca que a água evaporada dos grãos é retirada pelo fluxo de ar em movimento de modo que se modificam sua temperatura e sua umidade relativa. Assim, à medida que se afasta do ponto de entrada na massa de grãos, o ar fica cada vez mais úmido e cada vez mais frio. A partir de um determinado ponto, em função da temperatura e da umidade relativa que o ar adquiriu em sua passagem pela massa de grãos,

interrompe-se o processo de secagem, isto é, o ar, ainda que continue em movimento, não mais tem a capacidade de provocar a evaporação da água contida nesses grãos.

Como o ar quente continua a ser insuflado pelo ventilador, essa linha que separa os grãos que estão secando dos que estão na área de ar saturado, avança constantemente, até que toda massa de grãos seja atravessada por ela e, conseqüentemente, o processo de secagem se complete. Essa linha é uma camada de espessura variável e que, na prática, recebe o nome “frente de secagem”.

O deslocamento da frente de secagem é determinado, essencialmente, pelo fluxo de ar que atravessa a massa de semente. Quanto maior for o fluxo de ar, mais rápido é o deslocamento da frente de secagem (CARVALHO, 1994).

Em relação a uma massa de grão, Athié et al. (1998) colocam que o fluxo de ar é estabelecido mecanicamente, pela ação de ventiladores, distinguindo-se do processo da ventilação natural, que ocorre pela ação dos ventos ou pela convecção térmica do ar.

Quando o ar é forçado através de um circuito, ele perde pressão estática devido ao atrito com as paredes das tubulações e à resistência oferecida pela passagem por obstáculos. Essa perda de pressão, também conhecida como perda de carga, deve ser compensada pelo ventilador com aumento do fluxo de ar, para que não haja redução da vazão (ATHIÉ et al., 1998).

1.2.8 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar é um dos elementos fundamentais dentro do processo de secagem. Ela informa qual é a porcentagem de umidade contida numa determinada temperatura, já que depende desta última a quantidade de vapor d'água que uma massa de ar pode possuir.

A Tabela 5 mostra a redução da umidade relativa devido ao aumento da temperatura, para diversas umidades relativas do ar de secagem:

Tabela 5: Redução da umidade relativa devido ao aumento da temperatura

Temperatura °C	Aumento da Temperatura °C									
	0	6	11	17	22	28	33	39	45	50
	UR %									
43	95	72	55	42	33	26	21	-	-	-
38	95	71	53	40	31	24	19	15	-	-
32	95	70	52	40	30	23	18	14	12	-
27	95	70	50	38	29	22	17	13	10	8
21	95	69	49	36	27	21	16	12	9	7
15	95	67	49	36	26	19	14	11	9	7
10	95	66	47	32	24	18	13	10	8	6
4	95	64	45	31	22	16	12	9	7	5

Fonte: Puzzi (1986)

Segundo Puzzi (1986), para determinada temperatura, o ar só pode conter uma quantidade de vapor d'água. Quando esse valor é atingido, diz-se que o ar está saturado e sua umidade relativa é de 100%. A umidade relativa (*UR*) é a relação entre o vapor d'água que o volume de ar contém e o que conteria se estivesse saturado. Ela pode ser expressa em porcentagem de acordo com a fórmula (1.1):

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

onde:

P_v é a pressão parcial de vapor;

P_{vs} é a pressão de vapor saturado;

1.2.9 Umidade relativa do ar de secagem

Luykov (1956) propôs um esquema para calcular a umidade relativa do ar de secagem, dado pela equação (1.2) :

$$UR_s = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_a} \quad (1.2)$$

onde:

0,622 é a razão entre a massa molar da água e do ar;

P_v é a pressão parcial de vapor;

P_a é a pressão parcial do ar;

sendo:

$$P_a = P_{atm} - P_v$$

A pressão parcial de vapor é determinada a partir da equação (1.3):

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (1.3)$$

Enquanto que para determinar a pressão de vapor saturado é proposta a relação abaixo:

$$\log P_{vs} = 0,622 + \frac{7,5 \cdot T_a}{238 + T_a} \quad (1.4)$$

1.3 CARACTERÍSTICAS DOS GRÃOS

O conhecimento das características dos grãos que serão armazenados e beneficiados é de suma importância, já que estas duas situações envolvem a execução de diversos processos da engenharia. Essas características, segundo Silva (2004), podem ser classificadas em: *físicas*, que são associadas a elaborações de projetos de máquinas e estruturas e a análises de características de produtos submetidos a um determinado processo, *mecânicas*, que estudam efeitos da compressão, impacto e cisalhamento sobre os materiais, o que é aplicável aos processos de moagem e na adoção de medidas para evitar o danos mecânicos a grãos e sementes, *térmicas*, que definem parâmetros associados as trocas de calor e massa em processos como aquecimento, refrigeração e secagem, *elétricas*, que especificam características dos produtos agrícolas como condutividade elétrica, capacitância, propriedade dielétrica e reações ao eletromagnetismo e a radiação, sendo estas utilizadas no desenvolvimento de equipamentos de medição e seleção, e *ópticas*, que estudam a transmitância e reflectância para diferentes comprimentos de ondas, o que tem sido aplicado no desenvolvimento de selecionadores eletrônicos e equipamentos de tratamento térmico.

Silva (2004) cita como exemplos de características dos grãos teor de umidade, umidade de equilíbrio, porosidade, massa específica, peso hectolítrico, ângulo de repouso, coeficiente de atrito, velocidade terminal, esfericidade, área superficial, calor latente de vaporização e calor específico.

1.3.1 Teor de Umidade

A relação percentual existente entre a massa de água presente no grão e a sua massa total corresponde ao teor de umidade. No Brasil, o teor de umidade ideal para realizar a armazenagem dos grãos é de 13%, evitando, principalmente, o desenvolvimento de fungos e bactérias.

Atividade aquosa é um índice utilizado para expressar a disponibilidade de água na camada delgada de ar junto à superfície de produtos de origem animal ou vegetal. Este índice varia de 0 a 1. Quanto maior o teor de umidade do produto maior é o índice de atividade aquosa (SILVA, 2005).

O Ministério da Agricultura e a CONAB possuem informações com a umidade adequada para a colheita e para a armazenagem dos principais grãos e estão indicadas nas Tabelas 6, 7 e 8:

Tabela 6: Umidade recomendada para a colheita de vários grãos

Produtos	Teor de Umidade recomendado para a colheita
Soja	18%
Milho	26%
Trigo	20%
Arroz	24%
Sorgo	20%

Fonte: Weber (2005)

Tabela 7: Grau de umidade no armazenamento para a conservação de grãos

Espécie	Período de Conservação	
	Até 1 ano	Mais de 1 ano
Milho	12-13	10-11
Arroz	13-14	11-12

Soja	11	9-10
Sorgo	12	10-11
Algodão	11	9-10
Feijão	12	10-11
Trigo	12-13	11
Aveia	13-14	12
Cevada	13	11
Amendoim	9	7-8
Girassol	9	8
Café	12	11
Canol	9	8

Fonte: Portella e Eichelberger (2001)

Tabela 8: Umidades recomendadas para a armazenagem e comercialização de vários grãos

Produtos	CONAB		Ministério da Agricultura (% b.u.)
	Faixa Ideal (% b.u.)	Tolerância Máxima (% b.u.)	
Amendoim	07-08	9	12
Arroz em casca	12-13	14	13
Arroz polido	12-13	14	14
Soja	11-12	13	14
Sorgo	12-13	14	14

Fonte: Weber (2005)

Para Harrington (1972), o elevado teor de umidade é o fator isolado mais importante da perda de viabilidade e vigor do grão durante o armazenamento.

1.3.1.1 A umidade no grão

A umidade no grão é a quantidade de moléculas de água que se encontra ligada às diversas partes dele. O teor de umidade que pode ser removido é chamado de teor de água livre.

De acordo com Borges (2002), a água está presente no grão de várias formas:

- a) água líquida ou de constituição: são moléculas individuais de água ligadas a grupos moleculares da matéria biológica. Só pode ser removida mediante rigorosas condições de temperatura e longo período de tempo;
- b) água adsorvida: são grupos de moléculas de água que aderem sobre as camadas de água precedentes. É a água não solvente, fortemente adsorvida;
- c) água líquida sob pressão osmótica: é a água que atua como solvente e retém várias substâncias dissolvidas. É retirada do grão com certa dificuldade;
- d) água absorvida: é a água livre mantida fracamente por capilaridade nos poros do grão. Evapora-se facilmente.

Segundo Cassini (2004), em uma mistura de ar seco e vapor d'água, cada um dos componentes exerce certa pressão sobre o outro, denominada de pressão parcial. A diferença entre as pressões parciais de vapor de água no ar e no grão é a força motriz para o processo de secagem. Na secagem, remove-se a umidade e, por consequência, aumenta-se a concentração de sólidos, o que provoca uma queda na pressão de vapor devido às forças osmóticas. Se o produto continua exposto ao ar de secagem, sua superfície torna-se seca e a água passa a existir apenas no interior de capilares muito pequenos, entre pequenas partículas, entre moléculas e/ou ligadas a elas.

Para Borges (2002), as transferências de água entre o material e o meio são explicadas analisando como se dá a absorção (processo em que a água do meio ambiente entra no grão) e a desorção (processo em que a água do grão passa para o meio ambiente).

Os mecanismos mais importantes de transporte de água são:

- a) difusão líquida: ocorre devido a existência do gradiente de concentração;
- b) difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- c) escoamento de líquido e vapor: ocorrem devido a diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura.

Já Weber (2005), apresenta três formas e locais distintos em que a água se encontra nos grãos:

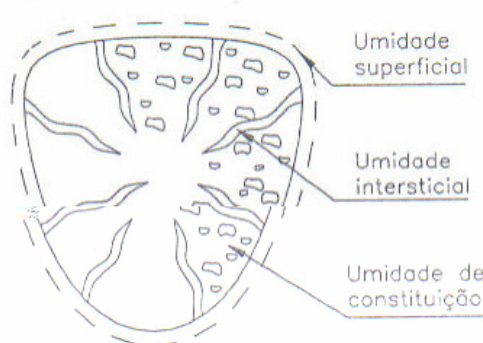


Figura 15: Esquema de distribuição da água no grão (Fonte: Weber, 2005)

- a) Umidade Superficial: A água está no estado líquido e encontra-se na parte externa do grão. É uma umidade de fácil remoção, que pode deixar o grão com qualquer tipo de ventilação e com temperatura mínima. A evaporação desta água é rápida e econômica;
- b) Umidade Intersticial: É a umidade que está livre no interior do grão, nos chamados espaços intersticiais, que são como poros e onde a água é removida de forma relativamente fácil. Com o aquecimento do grão e, conseqüentemente da água, forma-se um gradiente de pressão osmótica entre a parte interior e exterior do grão, o que força a umidade a sair de dentro para fora;
- c) Umidade de Constituição: Relacionada aos componentes dos grãos, esta umidade localiza-se nas células, representando entre 8% e 10% do total de umidade do grão. Quando é realizada a secagem, a umidade de constituição não é removida, apenas a superficial e a intersticial.

1.3.1.2 Umidade Base Úmida (b.u.) e Umidade Base Seca (b.s.)

O teor de umidade do grão é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca, já que esta permanece constante durante todo o processo de secagem, ao contrário do volume do grão úmido, que pode variar e o qual não é indicado para expressar o teor de umidade.

Desta maneira, o teor de umidade em base seca, X_{bs} , é expresso como sendo a razão entre a massa de água (m_w) presente no grão e a massa de matéria seca (m_s):

$$X_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (1.5)$$

O teor de umidade em base úmida, X_{bu} , é determinado através da razão entre a massa de água e a massa de matéria úmida (m_u) presente no grão:

$$X_{bu} = \frac{m_w}{m_u} \cdot 100 \quad (1.6)$$

A tabela abaixo apresenta a conversão da umidade em base úmida para base seca:

Tabela 9: Conversão de umidade base úmida (%) em base seca (decimal)

b.u. (%)	b.s.	b.u. (%)	b.s.	b.u. (%)	b.s.
8	0,087	15	0,176	22	0,282
9	0,099	16	0,190	23	0,299
10	0,111	17	0,200	24	0,316
11	0,123	18	0,220	25	0,333
12	0,136	19	0,234	26	0,351
13	0,150	20	0,250	27	0,370
14	0,163	21	0,265	28	0,389

Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS (2006)

1.3.1.3 Métodos para determinação do teor de umidade

Os métodos que determinam o teor de umidade existente nos grão podem ser classificados em diretos, ou primários, e indiretos, ou secundários.

Métodos Diretos:

Nesses métodos, a água contida no grão é removida e quantificada (pela massa ou volume). Os principais métodos são: Secagem em estufa e cálculo da massa perdida; remoção da água por destilação e medida do volume representado pela água; extração da água com um solvente, como o metanol, por exemplo, e determinação da quantidade através de processos titrimétricos, cromatográficos ou espectrofotométricos (Carvalho, 1994).

O método considerado padrão para a maioria dos grãos é a estufa. De acordo com o Ministério da Agricultura (BRASIL, 1992), as normas para determinação do teor de umidade é $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, sem trituração da amostra, independente do teor de umidade.

Haward Hunt e Pixton (1974) citando a AACC – American Association of Cereal Chemists, recomendam a estufa com ventilação forçada a $130^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas, para grãos de soja e milho.

Já os métodos de destilação podem ser feitos por meio da destilação com tolueno (um dos métodos oficiais da American Association of Cereal Chemists), método de Brown-Duwel (método oficial de inspeção de grãos nos Estados Unidos da América), método de extração por solventes (com o uso de metanol) e método de Karl-Fischer. O detalhamento de cada um dos métodos de destilação pode ser encontrado em Carvalho (1994).

Métodos Indiretos:

Conforme Carvalho (1994), são métodos pelos quais se mede alguma característica do grão que, de alguma forma, se relaciona com o seu teor de água. Todos esses métodos são calibrados pelos métodos primários. Os métodos indiretos mais comuns são aqueles baseados em propriedades elétricas de sementes.

Os métodos elétricos se tornaram conhecidos por serem rápidos e fáceis de operar, porém não são muito precisos. São muito utilizados para cereais e oleaginosas e medem a capacitância (propriedades dielétricas) ou a condutividade (resistência) das sementes de uma amostra.

Outros secundários são os seguintes: higrometria, espectroscopia de luz infravermelha, ressonância nuclear magnética, espectroscopia de microondas e reações químicas. Como são calibrados pelos métodos diretos, os indiretos jamais serão mais precisos que aqueles.

1.3.2 Umidade de Equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio corresponde ao equilíbrio entre as pressões de vapor de água no grão e na vizinhança, quando este é submetido a uma determinada temperatura e pressão. Este teor é que determina o teor de umidade mínimo que o grão pode atingir durante uma certa atividade, já que ele não pode perder uma quantidade de água maior que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem, isto é, não pode ter um teor de umidade menor que o de equilíbrio.

A tabela 18 mostra os teores de umidade de equilíbrio para diferentes grãos que estão a uma temperatura de 25°C sujeitos a diversas umidades relativas do ar:

Tabela 10: Teor de umidade de diferentes grãos em equilíbrio com diversos níveis de umidade relativa do ar à temperatura de 25°C

Umidade Relativa do Ar (%)	15	30	45	60	75	90	100
Milho	6,4	8,4	10,5	12,9	14,8	19,1	23,9
Milho pipoca	6,8	8,5	9,8	12,2	13,6	18,3	23,0
Aveia	5,7	8,0	9,6	11,8	13,8	18,5	24,1
Centeio	7,0	8,7	10,5	12,2	14,8	14,8	26,7
Sorgo	6,4	8,6	10,5	12,0	15,2	18,8	21,9
Trigo	6,6	8,5	10,0	11,5	14,1	19,3	26,6
Amendoim	2,6	4,2	5,6	7,2	9,8	13,0	-
Soja	4,3	6,5	7,4	9,3	13,1	18,8	-
Feijão	5,6	7,7	9,2	11,1	14,5	-	-
Linho	4,4	5,6	6,3	7,9	10,0	15,2	21,4

Fonte: Weber (2001)

Existem duas formas para o grão chegar à umidade de equilíbrio: uma quando ele absorve água do meio ambiente e a outra quando perde água para o meio ambiente. O teor de umidade de equilíbrio do produto que absorve água é menor que a do produto que perde água. Esse fenômeno é chamado de histerese.

Barrozo (1995) apud Oliveira Júnior (2003), coloca que existem dois métodos clássicos na determinação do teor de umidade de equilíbrio: o método estático e o método dinâmico. No método estático, a umidade de equilíbrio entre o material e a atmosfera é atingida sem a movimentação do ar ou do material; no método dinâmico, o ar, ou o material, é movimentado mecanicamente até que o equilíbrio seja atingido. A vantagem do método estático se deve à maior facilidade de se obter as condições termodinâmicas constantes.

O incremento de relações empíricas e semi-empíricas para a determinação da umidade de equilíbrio vem sendo desenvolvidas, entre elas, as efetuadas por Henderson (1952), Day e Nelson (1964), Chung e Pfost (1967) e Halsey modificada (1989).

Henderson (1952) utilizou a equação abaixo para descrever as curvas de teor de umidade de equilíbrio:

$$1 - UR_s = e^{-zT_s X_e^n} \quad (1.7)$$

onde:

UR_s = umidade relativa do ar de secagem, decimal;

T_s = temperatura do ar de secagem, Rankine;

X_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca, %;

z e n = constantes que dependem do produto.

Para a soja, encontrou os seguintes valores, respectivamente, para as constantes z e n : $3,20 \cdot 10^{-5}$ e 1,52 .

Jorge (1977) sugeriu a equação abaixo para descrever as curvas de umidade de equilíbrio para condições de armazenamento:

$$X_e = a_1 UR_s + a_2 UR_s^2 + a_3 UR_s^3 \quad (1.8)$$

onde:

X_e é o teor de umidade de equilíbrio, base seca, %;

UR_s é a umidade relativa do ar de secagem, decimal;

a_1 , a_2 e a_3 são constantes a determinar.

A Tabela 11 mostra as principais equações para determinação da umidade de equilíbrio:

Tabela 11: Equações para determinação da umidade de equilíbrio

Nome	Equação
Henderson (1952)	$X_e = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a_1 T_s} \right]^{1/b_1} \quad (1.9)$
Henderson-Thompson (1968)	$X_e = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a_1 (T_s + c_1)} \right]^{1/b_1} \quad (1.10)$
Chung-Pfost (1967)	$X_e = \frac{-1}{b_1} \ln \left[\frac{(T_s + c_1) \ln(UR)}{-a_1} \right] \quad (1.11)$
Clen-Clayton (1971)	$X_e = \frac{-1}{c_1 T_s^{d_1}} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-a_1 T_s^{b_1}} \right] \quad (1.12)$

Halsey Modificada (1989)	$X_e = \left[\frac{\exp(a_1 T_s + c_1)}{\ln(UR)} \right]^{1/b_1} \quad (1.13)$
Sabbah (2001)	$X_e = \left[\frac{a_1 (UR)^{b_1}}{(T_s)^{c_1}} \right] \quad (1.14)$
Fonte: Oliveira Júnior (2003)	

Segundo Silva (2004), os produtos agrícolas são materiais higroscópios, deste modo, entre estes e o ar estabelecem-se fluxos de vapor de água. O sentido e intensidade destes fluxos irão depender do gradiente imposto pela diferença dos valores da pressão de vapor na superfície dos grãos (P_{vg}) e a pressão de vapor no ar (P_{var}). Desta forma, dependendo das condições do produto e do ar pode-se ter a ocorrência de três situações:

- a) Se $P_{vg} > P_{var}$, tem-se a secagem do produto;
- b) Se $P_{vg} < P_{var}$, tem-se o umedecimento do produto;
- c) Se $P_{vg} = P_{var}$, tem-se o Equilíbrio Higroscópio - nesta situação não há fluxo.

1.3.3 Massa Específica Real e Massa Específica Global

A massa específica real é a razão entre a massa total de grãos e o seu volume real (volume ocupado somente pelos grãos):

$$\rho_{ap} = \frac{m_g}{V_g} \quad (1.15)$$

em que:

ρ_{ap} é a massa específica real, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

m_g é a massa total de grãos, kg;

V_g é o volume real, m^3

A massa específica global ou total é a razão entre a massa de grãos e o volume total ou global (grãos e espaço vazio) ocupado por essa massa:

$$\rho_T = \frac{m_g}{V_T} \quad (1.16)$$

onde:

ρ_T é a massa específica global, kg.m⁻³;

V_T é o volume total

De acordo com Benedetti (1987), ocorre diminuição na massa específica de grãos de soja e amendoim quando se aumenta o teor de umidade dos mesmos.

Soares (1986) determinou os valores das massas específicas, real e global, para cinco teores de umidade do grão de soja, conforme Tabela 12 e Tabela 13:

Tabela 12: Massa específica real para diversos teores de umidade do grão de soja

Teor de Umidade (base seca)	Massa Específica Real (g.cm ⁻³)
0,13	1,20
0,17	1,21
0,21	1,20
0,25	1,20
0,31	1,19
Média	1,20

Fonte: Soares (1986)

Tabela 13: Massa específica global para diversos teores de umidade do grão de soja

Teor de Umidade (base seca)	Massa Específica Global (g.cm ⁻³)
0,13	0,714
0,17	0,712
0,21	0,688
0,25	0,670
0,31	0,662

Fonte: Soares (1986)

Já Andrade et al. (2001) utilizaram os dados encontrados por Mohsenin (1980) para a massa específica global da soja, cujo valor é 706 kg.m^{-3} .

1.3.4 Porosidade

Conforme Benedetti (1987), a porosidade é a relação entre o volume intersticial e o volume total da massa de grãos (ou volume global). O mesmo autor relata que a porosidade aumenta com o aumento da umidade dos grãos.

A porosidade pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{V_I}{V_T} \quad (1.17)$$

sendo:

V_I o volume intersticial;

V_T o volume total

Após manipulações algébricas, a porosidade pode ser representada em função de suas massas específicas:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_T}{\rho_{ap}} \quad (1.18)$$

onde:

ρ_T é a massa específica global, kg.m^{-3} ;

ρ_{ap} é a massa específica aparente, kg.m^{-3} .

Soares (1986) determinou a porosidade da massa de grãos de soja para cinco teores de umidade do produto, conforme a tabela abaixo:

Tabela 14: Porosidade da massa de grãos de soja para diversos teores de umidade

Teor de Umidade	Porosidade
(base seca)	(adimensional)

0,13	0,406
0,17	0,406
0,21	0,427
0,25	0,442
0,31	0,448

Fonte: Soares (1986)

1.3.5 Esfericidade

Pavani (1992) coloca o grau de esfericidade como sendo a relação entre a área da superfície de uma esfera que tenha o mesmo volume da partícula e a área da superfície exterior da mesma. Para uma esfera esse valor é igual a 1.

Mohsenin (1970) definiu a esfericidade como sendo a razão do diâmetro de uma esfera, com o mesmo volume do objeto, pelo diâmetro da menor esfera circunscrita. Assim, a esfericidade foi calculada, baseando-se na média geométrica dos três eixos perpendiculares ao corpo em relação ao maior eixo, conforme a equação:

$$\phi = \frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a} \quad (1.19)$$

em que:

ϕ é a esfericidade, adimensional;

a é o eixo maior, m;

b é o eixo médio, m;

c é o eixo menor, m.

Já Sartori (1986), utilizou picnometria para determinar a esfericidade de grãos de soja, milho e arroz, através da seguinte equação:

$$\phi = \frac{D_e}{D_1} \quad (1.20)$$

onde:

D_p é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula;

D_l é o diâmetro linear máximo da partícula.

Deshpande et al. (1993) verificaram que a esfericidade de sementes de soja aumenta linearmente com o teor de umidade até 25% b.u.

1.3.6 Área Superficial e Volume do Grão

Carnaham et al. (1969) consideraram o grão de soja como um elipsóide perfeito a fim de calcular a sua área superficial. As três dimensões do elipsóide foram representadas pelos semi-eixos a , b e c , conforme a Figura 16 e a equação que determina a área superficial é dada pela equação (1.21). Sua resolução numérica foi feita aplicando-se a quadratura de Gauss-Chebyshev na solução da integral interna e quadratura de Gauss-Legendre para a solução da integral externa.

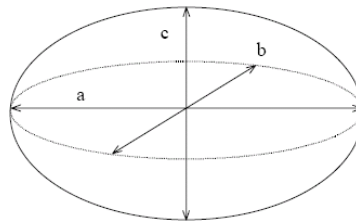


Figura 16: Representação das três dimensões do elipsóide (Fonte: Weber, 2001)

$$S = 2 \cdot a \cdot b \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1 - A_b \cdot X^2 - A_c \cdot u^2 \cdot (1 - X^2)}}{\sqrt{1 - u^2}} du dX \quad (1.21)$$

onde:

$$u = \frac{Y}{1 - X^2}; \quad Y = \frac{y}{b}; \quad X = \frac{x}{a}; \quad A_b = 1 - \frac{c^2}{a^2}; \quad A_c = 1 - \frac{c^2}{b^2}. \quad (1.22)$$

Ainda levando-se em conta o grão de soja como um elipsóide perfeito, pode-se determinar o seu volume aproximado, através da equação dada por:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c \quad (1.23)$$

Em Weber (2001), encontram-se a relação média entre os valores da área superficial, o volume do grão de soja e a razão entre os dois parâmetros para diferentes teores de umidade dos grãos (base seca), conforme a Tabela 15:

Tabela 15: Valores médios da área superficial, do volume do grão de soja e da razão entre eles para diferentes teores de umidade

Teor de umidade (Base Seca)	Área superficial (cm ²)	Volume do grão (cm ³)	Razão entre a área e o volume
0,12	1,17	0,117	10,00
0,17	1,21	0,123	9,84
0,22	1,25	0,128	9,77
0,27	1,28	0,133	9,62
0,32	1,35	0,143	9,44

Fonte: Weber (2001)

1.3.7 Calor Específico

O calor específico faz parte das equações dos balanços de energia criados para verificar o comportamento de secagem de diversos produtos, como grãos e sementes. A determinação do calor específico pode ser feita pelos métodos a seguir, propostos por Almeida (1979) apud Prado (2004):

- a) relação entre a condutividade térmica, massa específica e difusividade térmica;
- b) processos das misturas;
- c) calorimetria de varredura diferencial (DSC);
- d) calorimetria de gelo;
- e) bomba calorimétrica.

Segundo Sweat (1986), existe uma correlação linear entre o calor específico e o teor de umidade do produto, o mesmo verificado por Arnosti Jr. (1997). A determinação desta propriedade foi feita por Murata et al (1987), para oito tipos de grãos para uma faixa de temperatura entre 10 e 70°C, com teores de umidade variando de 0 a 35%, onde o calor específico relacionou-se de forma linear ao teor de umidade e de forma quadrática em relação à temperatura.

Trabalhando com secagem de grãos de soja, Mata et al. (1999) usaram a expressão abaixo para determinação do calor específico:

$$C_p = 0,391 + 0,461 \cdot (X / (100 + X)) \quad (1.24)$$

1.3.8 Calor Latente de Vaporização

Conforme Carron e Guimarães (2001), calor latente é a quantidade de calor cedida ou absorvida por um corpo, e que acarreta, exclusivamente, uma mudança no estado físico (mudança de fase) do corpo. Quando ocorre a vaporização, tem-se o *calor latente de vaporização*.

Mata et al. (1999) utilizaram a seguinte relação para determinar o calor latente de vaporização da soja:

$$H_v = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 0,7001 \cdot e^{(-0,1497 \cdot m)}) \quad (1.25)$$

1.3.9 Processo respiratório dos grãos

Após a colheita, os grãos continuam respirando, ou seja, continuam vivos e, desta forma, ficam sujeitos a pequenas e contínuas transformações ocasionadas por este processo.

Conforme Puzzi (1986), a respiração, sob condições aeróbias (em presença de oxigênio livre) é o processo pelo qual as células vivas do vegetal, através do oxigênio atmosférico, oxidam os açúcares e gorduras, produzindo gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e liberam energia na forma de calor.

Quando é interrompido o acesso de oxigênio em uma massa de grãos, estes passam a respirar de forma anaeróbia (sem a presença de oxigênio livre). Sob estas condições, os produtos finais da respiração compõem-se de gás carbônico e alguns compostos orgânicos simples como o álcool etílico. Na respiração anaeróbia, também, o oxigênio toma parte ativa nas reações de oxigênio, entretanto, as células não recebem o oxigênio do exterior, mas sim, é obtido em seu próprio organismo. As fermentações são processos de respiração anaeróbia. Na respiração anaeróbia a quantidade de energia liberada, sob a forma de calor, por unidade de substrato consumido, é consideravelmente menor que no processo aeróbio.

O processo respiratório é acompanhado de um desgaste das substâncias nutritivas do produto. Os grãos armazenados se deterioram lentamente e mais depressa quando a temperatura se eleva. Milner e Geddes, apud Puzzi (1986), estudaram a influência da temperatura (entre 25 a 45°C), sobre a respiração da soja com alto teor de umidade (18,5%) e

sob condições de aeração. A atividade respiratória foi calculada em miligramas de CO₂ produzidas por 100g de matéria seca, durante 24 horas e apresentou os seguintes dados:

Tabela 16: Atividade respiratória dos grãos de soja

Temperatura °C	Respiração mg CO ₂
25	33,6
30	39,7
35	71,8
40	154,7
45	13,1

Fonte: Puzzi (1986)

Verifica-se que a respiração aumentou rapidamente quando a temperatura foi aumentando de 30° para 40°C, acima da qual ouve um acentuado declínio, menos de 14 mg no nível de 45°C. Regra geral, uma elevação de temperatura pode acelerar a respiração de duas a três vezes, até certo limite. Acima do qual, a aceleração diminui até que, em temperaturas muito elevadas, a respiração cessa como resultado dos efeitos destruidores que o calor elevado tem sobre as enzimas.

1.3.10 Temperatura

Muir e Viravanichal (1972) afirmam que a temperatura é um dos principais fatores que influenciam as propriedades dos grãos, sendo de fundamental importância no controle da taxa de deterioração de grãos armazenados.

Da mesma forma como ocorre no corpo humano, a existência de alguma anormalidade, geralmente é acompanhada de uma elevação da temperatura que nos alerta e permite o tratamento. Através dos dispositivos da termometria, pode-se fazer o tratamento necessário nas regiões afetadas dos grãos armazenados, principalmente para prevenção, imediatamente ao se observar o menor movimento da elevação da temperatura.

O tratamento preventivo dos produtos armazenados é executado através da aeração, que permite a redução e a manutenção da temperatura dos grãos em níveis baixos. Se possível, os grãos deverão ficar entre 16 °C e 18 °C e a uma umidade entre 12% e 13%, que permite boa conservação por períodos prolongados. O tratamento curativo também é feito na quase totalidade das vezes através da aeração, e, em casos em que se tenha uma concentração

de insetos e fungos, a solução será a do combate através do expurgo com uso de produtos químicos, além da aeração.

Os grãos possuem baixo coeficiente de condutibilidade térmica, devido às suas características orgânicas e à porosidade. Estas características e mais o ar intergranular, ajudam a manter eventuais focos de aquecimentos isolados, com propagação lenta, que permite o resfriamento da massa antes de comprometer qualquer volume expressivo do produto.

1.3.11 Coeficiente de Difusão

Os estudos realizados consideram algumas hipóteses, que levam em conta a geometria do grão a ser secado, fazendo geralmente simplificações. De acordo com Petry (2000), as principais hipóteses são:

- a) o processo é isotérmico;
- b) o sólido é isotrópico, tendo geometria definida;
- c) a distribuição inicial de umidade no sólido a ser secado é uniforme;
- d) a concentração de água na camada superficial externa do sólido corresponde ao valor em equilíbrio com o ar desde os instantes iniciais de secagem;
- e) a difusividade é constante;
- f) a evaporação da água se processa na superfície externa do sólido, considerando-se desprezível a resistência externa à difusão do vapor de água;
- g) a contração do sólido é desprezível.

O coeficiente de difusão de umidade, considerado pela segunda lei de Fick, aplicado à secagem de grãos agrícolas, expressa o produto algébrico entre a profundidade radial no interior do grão, m , em que ocorre o fenômeno, e o volume da umidade, m^3 , transferido por unidade de área da seção considerada, m^2 , num determinado tempo, h .

Alguns autores consideram o coeficiente de difusão uma variável, outros, como uma constante, geralmente em função do teor de umidade. Conforme Soares (1986), Misra e Young (1980) trabalhando com a soja consideraram o efeito da temperatura deste grão, da concentração de umidade no produto e da massa específica aparente e chegaram à seguinte equação:

$$D = D_c \left(\frac{\rho_{ap0}}{\rho_{ap}} \right)^{n_1} \exp[n_2 (X - X_0)] \quad (1.26)$$

onde:

D_c é o coeficiente de difusão constante a determinada temperatura do produto, m^2h^{-1} ;

ρ_{ap0} é a massa específica aparente inicial do produto, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

X_0 é o teor inicial de umidade, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_{ap} é a massa específica aparente instantânea do produto, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

n_1 é um parâmetro, adimensional;

n_2 é um parâmetro, $\text{m}^{-3}\text{kg}^{-1}$.

O coeficiente D_c é expresso através do modelo de Arrhenius:

$$D_c = \chi \exp(-\omega T_g^{-1}) \quad (1.27)$$

onde:

T_g é a temperatura do grão, K;

χ é um parâmetro, m^2h^{-1} ;

ω é um parâmetro, K.

Chu e Hustrulid (1968) apud Soares (1986), expressaram o coeficiente de difusão em função do teor de umidade e da temperatura do produto, obtendo a seguinte equação para a faixa de temperatura entre 322,15 K e 344,15 K:

$$D = 1,513 \cdot 10^{-4} \exp \left[(0,045 \cdot \theta - 5,485) \bar{X} - 2,513 \cdot T_g^{-1} \right] \quad (1.28)$$

onde:

$\bar{X}$ é o teor de umidade médio do produto, base seca.

1.3.12 Difusividade Térmica

Conforme Magee e Bransburg (1995), no projeto e otimização de processos térmicos, aonde o calor transferido ocorre em regime transiente, é importante conhecer a taxa com que o calor se difunde através do material. Portanto, a difusividade térmica é uma propriedade importante e é afetada pela composição e homogeneidade do produto.

Segundo Kostaropoulos e Saravacos (1997), a difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte dos grãos, sendo utilizada para a simulação e controle de diversas operações básicas de produtos submetidos a processos de transferência de calor em regime transiente e é fortemente afetada pela estrutura física dos materiais.

O valor da difusividade térmica de grãos de soja foi determinado por Watts e Bilanski (1973), obtendo uma média de $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ após noventa testes, sendo que não verificaram nenhuma mudança significativa nela em relação às mudanças de temperatura e umidade. Entretanto, os autores compreendem que a difusividade térmica deve aumentar com a elevação da umidade.

Já para Tavman e Tavman e Evcin (1998), o valor da difusividade térmica do material é afetada pela umidade, temperatura, porosidade e composição, sendo que esse valor determina com que velocidade o calor se propaga e como ele se difunde através do material. Esses autores determinaram o valor da difusividade térmica de duas variedades de trigo, comprovando que essa propriedade térmica foi influenciada pelo conteúdo de umidade.

1.3.13 Condutividade térmica dos grãos

De acordo com Ito (2003), a condutividade térmica é uma propriedade termofísica do material a qual descreve a taxa do fluxo de calor através deste sob influência de um gradiente térmico. A condutividade térmica é um parâmetro físico importante para o estudo da transferência de calor, como por exemplo, a distribuição da temperatura em grãos, (CHANDRA e MUIR, 1971). A importância da condutividade térmica de grãos está presente em quase todas as áreas de processamento de alimentos, como a secagem, aeração e resfriamento de grãos.

Mandhyan e Prasad (1994) estudaram o efeito do tamanho da partícula e do teor de umidade sobre as propriedades térmicas de grãos de soja. A condutividade térmica foi determinada para diversos teores de umidade, temperatura e tamanho da partícula. Eles observaram que essa propriedade aumenta com a elevação do tamanho do grão, reduzindo os espaços porosos, e também eleva com o aumento do teor de umidade.

Também em relação à soja, Jasansky e Bilansky (1973) verificaram que a condutividade térmica do material seco é pouco influenciada quando ocorrem alterações da temperatura, mas por outro lado, ela aumenta com a elevação do teor de umidade.

Estudando a condutividade térmica para grãos de milho, Kusterman, Scherer e Kutzbach (1981), verificaram que o seu valor varia de acordo com a porosidade do material.

Já Goedecken, Shah e Tong (1998) verificaram que a condutividade térmica é função da porosidade, teor de umidade e temperatura.

1.3.14 Isolamento térmico

De acordo com Incropera e DeWitt (2003), os isolamentos térmicos são compostos de materiais de baixa condutividade térmica combinados para se atingir uma condutividade térmica do sistema ainda menor. Nos isolamentos com fibras, pó ou flocos, o material sólido encontra-se finamente disperso em um espaço contendo ar.

Ainda segundo estes autores, tais sistemas caracterizam-se por uma condutividade térmica efetiva que depende da condutividade térmica e das propriedades radiantes da superfície do material sólido, bem como da natureza e da fração volumétrica de ar ou do espaço entre as partículas. Dessa forma, sua massa específica aparente depende da forma na qual o material sólido está interconectado.

1.3.15 Danos térmicos

Garcia (2004) citando Villela (1991) coloca que durante o processo de secagem, os grãos sofrem mudanças físicas, provocadas por gradientes de temperatura e umidade, que ocasionam expansão, contração e alterações na densidade e porosidade. O processo de secagem não aumenta o percentual de sementes quebradas, mas pode provocar fissuras internas ou superficiais, tornando as sementes mais suscetíveis à quebra durante o beneficiamento.

Cavariani (1996) destaca que a temperatura excessivamente alta pode provocar a desnaturação de proteínas bem como a desintegração das membranas celulares, possivelmente, por alterações nos lipídios que constituem os tecidos vegetais.

A reação do grão ao dano térmico depende da espécie, genótipo, teor de água, temperatura, tempo de exposição e velocidade de secagem. Estes danos podem gerar fissuras, capazes de tornar as sementes facilmente quebradiças nas operações de beneficiamento, aumentando a predisposição à invasão de microorganismos e insetos, interferindo também nos processos de trocas gasosas e hídricas. Além disso, os danos fisiológicos provocados pela secagem podem se refletir em alterações nos sistemas subcelulares, incluindo cromossomas e mitocôndrias, na redução do número de grãos de amido no eixo embrionário, em aumentos de

lixiviação de eletrólitos e açúcares e de produção de pigmentos carotenóides, redução de permeabilidade de membranas celulares e taxa respiratória (MOTTA, 1997).



Figura 17: Grãos de soja com sintomas de danos (Fonte: Costa et al., 2005)

De acordo com Popinigis (1985), os danos térmicos podem não trazer efeitos imediatos na germinação, entretanto, após um período de armazenamento, o vigor das sementes pode sofrer reduções consideráveis.

1.4 FENÔMENOS FÍSICOS DO PROCESSO DE SECAGEM

O fenômeno de transferência de calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura, ocorrendo sempre que dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato direto. A transferência de calor ocorrerá sempre do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura até que haja equivalência de temperatura entre eles, o chamado equilíbrio térmico.

No processo de secagem, dois mecanismos de transferência de calor ocorrem: fluxo de calor por condução e fluxo de calor por convecção.

1.4.1 Fluxo de calor por condução

A transferência de calor por condução, em virtude de um gradiente de temperatura, ocorre quando se tem um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido. Ela é dada pela lei de Fourier e foi desenvolvida a partir da observação dos fenômenos da natureza em experimentos.

A Lei de Fourier pode ser enunciada assim: A quantidade de calor transferida por condução, por unidade de tempo, em um material, é igual ao produto das seguintes quantidades:

$$\dot{q} = -k \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.29)$$

onde:

$\dot{q}$ é o fluxo de calor por condução, kcal/h;

k é a condutividade térmica do material, W/m°C;

A é área da seção através da qual o calor flui, medida perpendicularmente à direção do fluxo (m²);

$\frac{dT}{dx}$ é a razão de variação da temperatura T com a distância, na direção x do fluxo de calor (°C/h).

A direção do aumento da distância x deve ser a direção do fluxo de calor positivo, por isso o sinal menos na equação de Fourier. Como o calor flui do ponto de temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa (gradiente negativo), o fluxo só será positivo quando o gradiente for positivo. A condutividade térmica, que surge da equação de Fourier, é uma propriedade de cada material e vem exprimir maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor. Os valores numéricos de k variam em extensa faixa dependendo da constituição química, estado físico e temperatura dos materiais.

1.4.2 Fluxo de calor por convecção

O termo transferência de calor por convecção é utilizado quando a transferência de energia ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles. O calor transferido por convecção, na unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido, pode ser calculado através da relação proposta por Isaac Newton:

$$\dot{q} = h \cdot A_s \cdot \Delta T \quad (1.30)$$

onde:

$\dot{q}$ é o fluxo de calor por convecção, kcal/h;

A é área de transferência de calor, m²;

ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície (T_s) e a do fluido em um local longe da superfície (T_∞), °C;

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película, $\text{J.s}^{-1}.\text{m}^2.\text{K}^{-1}$.

1.5 MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM DE GRÃOS

Os modelos matemáticos que descrevem o processo de secagem podem ser divididos em *camada fina* e *leito profundo (camada espessa)*. O segundo leva em consideração a variável espacial, que não está presente no primeiro, e ambos têm a variável temporal. Os

1.5.1.1 Empíricos

Modelos empíricos são obtidos por ajustes estatísticos e investigados por experimentos no laboratório, fundamentam-se nas condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem e negligenciam a resistência interna à transferência de massa e de calor, o que permite considerar a umidade e a temperatura constantes para todo o grão. Relacionam o teor de umidade e o tempo de secagem com dados obtidos experimentalmente para várias temperaturas, mas não podem dar uma visão clara e exata dos importantes processos que ocorrem durante a secagem.

Modelo de Roa e Macedo:

Em 1976, estes autores apresentaram um modelo matemático empírico, que se fundamenta na diferença de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ar de secagem em camada fina. Testado na Universidade de Campinas, o modelo apresentou boa concordância com resultados experimentais para uma série de produtos agrícolas. A equação é expressa por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -f \cdot q (X - X_e) \cdot (P_{vg} - P_{ar})^n t^{q-1} \quad (1.31)$$

sendo:

f, n, q parâmetros, adimensionais;

X o teor de umidade (b.s.);

X_e o teor de umidade de equilíbrio (b.s.);

P_{vg} a pressão de vapor na superfície do produto (N/m^2);

P_{ar} a pressão de vapor do ar (N/m^2);

t o tempo (s).

1.5.1.2 Semi-empíricos

Modelos semi-empíricos oferecem um compromisso entre a teoria e a aplicação, porém não consideram toda a complexidade do fenômeno. São conhecidos como leis exponenciais de secagem. Baseiam-se, de modo geral, na analogia com a lei de resfriamento de Newton.

Modelo de Thompson:

Conforme Mata et al. (1999), Thompson et al. (1968) propuseram um modelo que simula a influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto no processo de secagem, considerando-o como vários pequenos processos. Segundo Queiroz et al. (1982), os autores utilizaram o procedimento de dividir o processo contínuo de secagem em vários pequenos processos, simulando-os mediante cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. A figura abaixo mostra, esquematicamente, um desses processos. Durante um intervalo de tempo Δt uma quantidade de umidade ΔX é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta sua razão de umidade RU para $RU + \Delta RU$. Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor ΔT proporcional ao aumento de temperatura do grão, ΔT_g , e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de umidade.

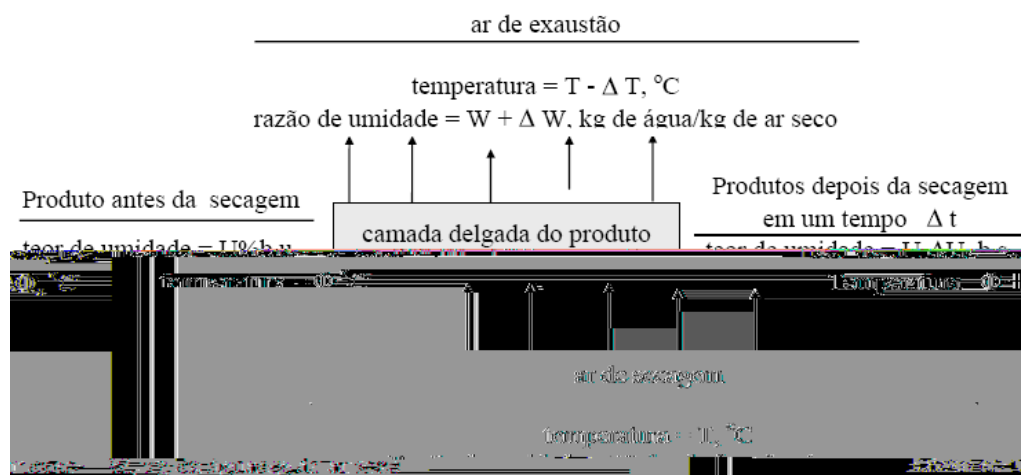


Figura 18: Representação esquemática da secagem em camada fina (Fonte: Mata et al., 1999)

Thompson et al. (1968) desenvolveram um modelo matemático semi-empírico para secagem de milho, mas que pode ser usado para simular a secagem de qualquer grão. Eles utilizaram as seguintes suposições e relações:

- a) A secagem em uma camada fina é representada pela equação (1.32):

$$t = A \cdot \ln(RU) + B \cdot [\ln(RU)]^2 \quad (1.32)$$

onde:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \text{ é razão de umidade;}$$

$$A = -1,706 + 0,0088T;$$

$$B = 148,7e^{-0,059T};$$

t é o tempo para secar, (s);

X_0 é o teor de umidade inicial, (b.s.);

X_e é o teor de umidade de equilíbrio, (b.s.).

b) Assume-se que a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve.

c) O conteúdo de umidade de equilíbrio do milho para um dado estado do ar é representado por:

$$X_e = 120,6 \left[-\frac{\ln(1-UR)}{T_e + 45,6} \right]^{1/2} \quad (1.33)$$

onde:

UR é a umidade relativa do ar;

T_e é temperatura de equilíbrio do ar, °C.

d) O calor latente de vaporização da água do grão, L , é representado pela equação:

$$L = (606 - 0,570T) \left[1 + 4,35 \exp(-28,25X) \right] \quad (1.34)$$

e) O calor específico do produto é dado pela seguinte equação:

$$C_p = 0,35 + 0,00851 X_u \quad (1.35)$$

onde:

X_u é teor de umidade do produto (*b. u.*).

Dessa forma, conhecendo-se as condições de entrada do ar de secagem logo na primeira camada do silo, as condições iniciais de temperatura e umidade do produto a ser seco e as propriedades físicas e higroscópicas do produto e do ar, como função das condições de operação, pode-se prever, matematicamente, a secagem do produto, em qualquer posição do silo e em qualquer tempo.

Modelo de Lewis:

Lewis sugeriu que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade fosse proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material e o teor de umidade do material, quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, ou seja:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -K(X - X_e) \quad (1.36)$$

onde:

X é o teor de umidade, decimal, base seca;

t é o tempo, s.

K é a constante de secagem, s^{-1} .

X_e é o teor de umidade de equilíbrio, decimal, base seca

Assumindo K como uma constante e integrando a equação(1.36) para incrementos de tempo de 0 a t , e para teores de umidade decrescentes (X) a partir do teor de umidade inicial (X_0), tem-se que:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = RU = \exp(-K \cdot t) \quad (1.37)$$

Modelo de Chen e Johnson:

Chen e Johnson modificaram a equação diferencial inicial de Lewis, considerando três períodos distintos de secagem, e acrescentaram um expoente na diferença entre o teor de umidade do grão e teor de umidade de equilíbrio:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -K (X - X_e)^a \quad (1.38)$$

onde:

K e a são os parâmetros de ajuste que dependem de cada período de secagem.

Modelo de Page:

A teoria utilizada para descrever o fenômeno de secagem, de acordo com Chittenden e Hustuld (1966), pode ser baseada no princípio de que a resistência ao transporte de umidade se concentra na superfície do grão, conforme a seguinte equação diferencial:

$$\frac{dX}{dt} = -K (X - X_e) \quad (1.39)$$

onde:

X é o teor de umidade no tempo t , (base seca);

X_e é o teor de umidade de equilíbrio, (base seca);

K é a constante de secagem, (h^{-1});

t é o tempo de secagem, (h).

Integrando esta equação entre os limites X_0 , no início do processo e X num tempo qualquer de secagem, t , tem-se:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = RU = \exp(-K \cdot t) \quad (1.40)$$

sendo:

RU a razão de umidade, (adimensional);

X_0 o teor de umidade inicial, (base seca).

De acordo com Parry (1985), apesar de a equação (1.40) haver sido deduzida a partir da teoria da difusão, considerou-se que a resistência à transferência de massa ocorresse principalmente numa camada fina superficial do produto, o que nem sempre ocorre. Brooker

et al. (1992) afirmam que o modelo exponencial representa de forma pouco satisfatória a curva de secagem; que o modelo prediz valores muito reduzidos para a taxa inicial de secagem e que o valor limite, ou seja, o teor de água de equilíbrio é alcançado muito rapidamente, o que não condiz com as observações experimentais (CARLESSO, 2005).

Page, baseando-se neste modelo, propôs um outro modelo empírico para descrever o processo de secagem em camada fina, na seguinte forma:

$$RU = \exp(-K \cdot t^n) \quad (1.41)$$

Em que “n” é um parâmetro que depende do produto e das condições de secagem.

Modelo de Troeger e Hukill:

Estes autores estudaram a secagem do grão de milho em camada fina, propondo a seguinte equação:

$$\frac{dX}{dt} = -a_i (X - X_e)^{b_i} \quad (1.42)$$

em que:

a_i é parâmetro, h^{-1} ;

b_i é parâmetro, adimensional.

Eles observaram que o modelo torna-se mais eficiente em predizer os resultados experimentais se a curva de secagem for dividida em três períodos distintos, ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= -a_1 (X - X_e)^{b_1}, X_0 \geq X \geq X_1 \\ \frac{dX}{dt} &= -a_2 (X - X_e)^{b_2}, X_1 \geq X \geq X_2 \\ \frac{dX}{dt} &= -a_3 (X - X_e)^{b_3}, X_2 \geq X \geq X_e \end{aligned} \quad (1.43)$$

onde:

a_1, a_2, a_3 são parâmetros, h^{-1} ;

b_1, b_2, b_3 são parâmetros, adimensionais;

X_1 , X_2 são os teores de umidade de transição do produto, base seca.

Modelo de Nellist e O'Callaghan:

Em 1971, estes pesquisadores propuseram os coeficientes para uma equação de dois termos exponenciais, a fim de determinar o teor de umidade dos grãos (X):

$$X = X_e + A \exp(-K_1 t) + B \exp(-K_2 t) \quad (1.44)$$

onde A e B são parâmetros a determinar.

Modelo de Henderson:

Segundo Parry (1985), Henderson usou uma equação de dois termos exponenciais para calcular a razão de umidade, calculando empiricamente, para dados experimentais, X_e , a_i , b_i , K_1 e K_2 .

$$RU = a_i \exp(-K_1 t) + (1 - b_i) \exp(-K_2 t) \quad (1.45)$$

Modelo de Sharaf-Eldeen ou Resíduos Sucessivos:

Em 1978, estes autores usaram a equação conhecida como modelo de resíduos sucessivos para calcular a razão de umidade, para espigas de milho, girassol e mandioca.

Segundo Soares (1986), este método tem sido usado para expressar as propriedades reológicas de grãos agrícolas, cujas equações descrevem curvas de comportamento semelhantes às de secagem, tornando-se possível adaptar o seguinte modelo:

$$RU = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-B_i t) \quad (1.46)$$

em que:

A_i é parâmetro, adimensional;

B_i é parâmetro, h^{-1} .

Em 1979, eles concluíram que o modelo era adequado para descrever a secagem de outros grãos.

Modelo de Wang et al.:

De acordo com Parry (1985), estes autores realizaram uma análise regressiva em quatro modelos para a média de grãos ásperos de arroz. Estes modelos foram uma solução em série para uma esfera tomando-se:

$$\begin{aligned} D_m &= d_1 \cdot \exp\left(\frac{-d_2}{T}\right) \\ RU &= d_1 \cdot \exp(-k \cdot t) \\ RU &= \exp(j \cdot t^g) \end{aligned} \quad (1.47)$$

onde:

$$\begin{aligned} j &= j(T, X) \\ g &= g(T, X) \end{aligned}$$

são lineares em relação a temperatura (T) e teor de umidade do grão (X).

$$UR = 1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 \quad (1.48)$$

onde d_1 e d_2 são funções da temperatura (T) e do teor de umidade (X).

Modelo de Soares:

Em 1986, este autor realizou um estudo experimental envolvendo secagem de grãos de soja em camada fina, trabalhando com temperaturas entre 30°C e 70°C. Com seus resultados, sugeriu os modelos de Page e dos Resíduos Sucessivos como aqueles que melhor descreviam os processos de secagem, ajustando os valores médios dos parâmetros n e K dos métodos citados, obtendo:

$$\begin{aligned} n &= 0,5459; \\ K &= 0,1149 \cdot 10^{-3} X_0^{0,5423} \exp(0,0208T_s) \end{aligned} \quad (1.49)$$

Desta forma, o modelo de Page ajustado ficou sendo:

$$RU = \exp\left[-0,1149 \cdot 10^{-3} X_0^{0,5423} \exp(0,0208T_s) t^{0,5459}\right] \quad (1.50)$$

Já o modelo de resíduos sucessivos para um termo foi expresso por:

$$RU = 0,8365 \exp(-Bt) \quad (1.51)$$

onde:

$$B = 0,1077 \cdot 10^{-5} X_0^{0,5576} \exp(0,0395T_s) \quad (1.52)$$

E para dois termos:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,1647 + 2,4117X_0 - 2,6551X_0^2 \\ A_2 &= 1,1231 + 2,1591X_0 + 1,9982X_0^2 \\ B_1 &= 0,1550 \cdot 10^{-4} \exp\left[0,0364T_s + 4,486\left(T_s X_0^2\right)^{-1}\right] \\ B_2 &= 10,6655 - 0,0709T_s + 0,1185 \cdot 10^{-3}T_s \end{aligned} \quad (1.53)$$

1.5.1.3 Teóricos

Consideram o transporte de massa e calor dentro do grão e consistem em sistemas de equações diferenciais que relacionam a umidade e temperatura do grão.

O fenômeno de transporte de água nos grãos é explicado por diferentes teorias de secagem, conforme consta na literatura.

Teoria capilar

Esta teoria baseia-se no conceito de potencial capilar, que é definido como sendo a diferença de pressão entre o ar e a água na interface ar-água presente no capilar. A equação que representa o fluxo capilar líquido é expressa por:

$$\bar{J}_l = k_h \nabla \Psi \quad (1.54)$$

onde:

$\bar{J}_l$ é o fluxo capilar líquido;

Ψ é o potencial hidráulico capilar, Jkg^{-1} ;
 k_h é a condutividade hidráulica, s^{-1} .

Para os casos em que há temperatura constante – condições isotérmicas – o potencial capilar é considerado proporcional ao gradiente de concentração de água. Assim, a equação é expressa, conforme Philip e De Vries (1957), como sendo:

$$\bar{J}_l = k_h \rho_s \nabla X \quad (1.55)$$

onde:

ρ_s é a massa específica do sólido seco, kg.m^3 .

Nas equações acima, os índices l , h e s correspondem, respectivamente, a líquido, hidráulico e sólido superficial.

Para Miller e Miller (1975), o fato de na secagem de sólidos granulares o fluxo de água ser inteiramente comandado por forças capilares, ou seja, ser independente da concentração de água, é explicado pela força que induz o evento ser um gradiente de tensão.

Teoria da difusão líquida

Considerada por alguns pesquisadores como o principal mecanismo de secagem de grãos, a teoria da difusão líquida parte da segunda lei de Fick, que estabelece a difusão da umidade em função do gradiente de concentração e gradiente do teor de umidade em base seca:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(D \frac{\partial X}{\partial t} \right) \quad (1.56)$$

onde:

X é o teor de umidade (b.s.);

D é o coeficiente de difusão líquida (m^2/s);

t é o tempo (s).

O coeficiente de difusão pode ser considerado de diferentes maneiras: constante, linearmente dependente da temperatura e/ou concentração ou ainda de acordo com uma equação do tipo Arrhenius, em que ele é dependente da temperatura:

$$D = D_0 e^{-E/RT_s} \quad (1.57)$$

onde:

D_0 é o coeficiente de difusão para $E=0$ (m^2/s);

E é a energia de ativação (J.kg^{-1});

R é a constante do vapor de água ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$);

T_s é a temperatura de secagem (K).

Teoria da vaporização-condensação

Nesta teoria são consideradas algumas hipóteses:

- a) durante a fase gasosa, a água migra do interior do grão nos espaços porosos;
- b) há difusão simultânea de massa e calor;
- c) dentro do sólido os poros formam uma rede contínua;
- d) no sólido o vapor varia de forma linear com a concentração de água e a temperatura;
- e) o coeficiente de difusão é constante.

Para esta teoria as equações são:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial X}{\partial t} &= k' \nabla^2 X_v - \frac{\partial X_v}{\partial t} \\ \vartheta \frac{\partial X}{\partial t} &= k'' \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.58)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{1 - \omega_l}{\omega_l} \rho_s \\
 k' &= \vartheta k_v \\
 \vartheta &= \frac{H_{V_v}}{\rho_s c_{p_s}} \\
 k'' &= \frac{kT}{\omega_l \rho_s c_{p_s}} \\
 k &= \frac{\pi^2 D}{R^2}
 \end{aligned} \tag{1.59}$$

em que:

ω_l é a razão entre o volume de ar e o volume do sólido seco (adimensional);

c_{p_s} é o calor específico do sólido ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

H_{V_v} é o calor latente de vaporização (Jkg^{-1}).

Os índices v e s correspondem a vapor de água e sólido superficial.

Modelo de Luikov e Mikhailov:

Segundo Borges (2002), os modelos mais completos para descrever o processo de secagem consideram um sistema de equações de transporte de calor, massa e quantidade de movimento, onde a forma mais generalizada deste tipo de modelo foi apresentada por Luikov e Mikhailov (1961), na seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial X}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11} X + \nabla^2 K_{12} T_s + \nabla^2 K_{13} P_f \\
 \frac{\partial T_s}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21} X + \nabla^2 K_{22} T_s + \nabla^2 K_{23} P_f \\
 \frac{\partial P_f}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31} X + \nabla^2 K_{32} T_s + \nabla^2 K_{33} P_f
 \end{aligned} \tag{1.60}$$

onde:

X é o teor de umidade;

T_s é a temperatura de secagem;

P_f é o potencial de filtração (pressão);

K_{ij} para $i = j$ representam os coeficientes termo-físicos de transporte;
 K_{ij} para $i \neq j$ representam os coeficientes de acoplamento.

Pela dificuldade de se obter os dados experimentais necessários no modelo acima, este tem sido usado desconsiderando o efeito do gradiente de pressão, termo-difusão e evaporação interna, tornando-se um sistema de duas equações diferenciais parciais:

$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial t} &= D_m \nabla^2 X \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} &= D_t \nabla^2 T_g\end{aligned}\tag{1.61}$$

onde:

T_g é a temperatura do grão;
 D_m é o coeficiente de difusão de massa;
 D_t é o coeficiente de difusão de massa.

1.6 A MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme Prado (2004), o estudo do comportamento de secagem utilizando uma abordagem estritamente experimental constitui um enorme desafio devido ao grande número de variáveis que devem ser consideradas. Levando-se em conta isto, a utilização de modelos matemáticos tem se tornado um importante e útil instrumento para o entendimento dos processos simultâneos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem.

Ainda segundo Prado (2004), a conveniente modelagem e simulação computacional dos perfis de umidade e temperatura no secador permite que se interprete e analise a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de recorrer a um extensivo conjunto de testes experimentais. Para López et al. (1998), compreender melhor como ocorre a transferência de massa e de calor entre o fluido e o sólido contribui para projetos e controles de novos secadores e também para a otimização dos já existentes, de forma a obter um produto final em condições satisfatórias de beneficiamento e armazenamento.

Entretanto, é preciso ressaltar a relevância dos experimentos dentro das pesquisas sobre o procedimento de secagem, já que contribui para o entendimento da física do processo

ajudando no desenvolvimento de modelos mais realísticos e no conhecimento das características do meio poroso, validando e dando credibilidade às simulações.

Segundo Borges (2002), o domínio e o aperfeiçoamento da tecnologia envolvida nos projetos e monitoramento de secadores, justificam a pesquisa em modelagem matemática dos processos de secagem. O funcionamento ótimo dos secadores é gerenciado por um software, que recebe informações calculadas por um modelo matemático. Para que possa ser utilizado, esse modelo precisa ter, pelo menos, duas qualidades: simplicidade e precisão. Como a secagem precisa ser feita em um período de tempo limitado (para otimizar o tempo de uso do secador em época de colheita) é necessário otimizar a velocidade do grão e a temperatura do ar em cada instante. Para que o sistema de controle do secador possa fazer os devidos ajustes é necessário que o software produza as informações necessárias em tempo hábil. A concordância entre os resultados calculados e os dados reais (principalmente com relação ao teor de umidade e temperatura dos grãos) garantirá a eficiência do sistema.

1.7 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA E DOS OBJETIVOS

No curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI/RS, o processo de secagem de grãos também vem sendo estudado sob diversos aspectos, tanto experimental como teóricos. Observando-se estes trabalhos, acredita-se ser de grande importância dar continuidade a estes estudos, buscando-se aprimorar modelos já existentes a cerca do assunto. Além disto, pretende-se comparar os dados experimentais e resultados obtidos através do modelo teórico com os apresentados por Soares (1986).

O presente trabalho sobre secagem de soja consistirá de uma fase experimental e de uma fase de realização de simulações numéricas, onde será analisada neste processo a dinâmica da secagem de grãos de soja em camada fina, para diversos teores de umidade iniciais, temperaturas e velocidades do ar de secagem.

O modelo matemático utilizado é o proposto por Khatchatourian et al. (2003), sendo que nesta pesquisa este modelo será modificado a fim de levar em consideração a influência da velocidade do ar de secagem e o teor de umidade inicial do grão na equação que descreve o fluxo de massa.

Dessa forma, considerando a importância do processo de secagem para a conservação dos grãos, esta pesquisa terá os seguintes objetivos:

- a) Determinar a influência da temperatura, da velocidade do ar e do teor de umidade inicial sobre a secagem de soja em camada fina através de experimentos;
- b) Modificar um modelo matemático que descreva o processo de secagem da soja em secador de leito fixo, levando em conta a influência da velocidade do ar e do teor de umidade inicial na equação que descreve o fluxo de massa.
- c) Realizar simulações numéricas e comparar os dados experimentais com os obtidos através do modelo matemático, determinando a influência dos diversos parâmetros que envolvem o processo de secagem da soja.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, a descrição do equipamento, a metodologia usada para a realização dos experimentos de secagem de soja em camada fina bem como o processo de aquecimento dos grãos. Também é feita a descrição do modelo matemático utilizado para a realização das simulações numéricas e dos métodos numéricos usados para a sua resolução.

O desenvolvimento da etapa experimental foi realizado no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática, do Departamento de Física, Estatística e Matemática na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, no período de janeiro a junho de 2006.

2.1 MATERIAL

Nesta pesquisa foram utilizados como material de estudo grãos de soja e ar atmosférico aquecido como fluido de secagem. A escolha deste tipo de grão deve-se a sua importância econômica para a região, conforme descrito anteriormente.

Foram usados aproximadamente 80 kg de grãos de soja plantados no município de Ijuí, RS. Depois de colhidos, foi feita a limpeza manual a fim de retirar as impurezas e grãos trincados. A soja foi espalhada sobre uma lona e umedecida com água da chuva a fim de se obter os cinco teores de umidade necessários para a realização dos experimentos.

2.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

2.2.1 Determinação do teor de umidade inicial dos grãos

A determinação do teor de umidade dos grãos foi feita através do método direto seguindo-se as normas determinadas pelo Ministério da Agricultura, submetendo-se uma massa de 15 g de grãos em uma estufa a uma temperatura de 105 °C, durante 24 horas.

Assim, a diferença entre a massa inicial e a massa final dos grãos depois de decorrido esse processo será a massa de água contida nos grãos, já que esse método considera que ocorre somente evaporação de água, desprezando a massa de outros gases que eventualmente possa sair juntamente com a água. As medidas de massa foram feitas usando-se uma balança analítica digital com precisão 10^{-3} g.

2.2.2 Determinação do teor de umidade a partir de um teor conhecido

Quando era necessário chegar num teor de umidade abaixo do que havia sido medido, ou seja, menor do que aquele que o grão apresentava, foi utilizado o método de variação da massa de grãos.

O procedimento era separar uma amostra de 200g de soja e conhecendo-se o teor de umidade desta e também sabendo em qual teor queria-se chegar, foi utilizada a seguinte expressão, a qual determina o total de massa que deve ser variada:

$$\Delta m = [X_0 - X] \cdot m_{gs} \quad (2.1)$$

Onde X_0 é o teor de umidade inicial, X é o teor de umidade que se quer chegar, Δm é a variação de massa e m_{gs} é a massa do grão.

2.2.3 Umedecimento dos grãos de soja

Para obter os cinco teores de umidade necessários para a realização dos experimentos, foi preciso realizar o umedecimento dos grãos de soja. Para tanto, a soja foi espalhada sobre uma lona e umedecida com a água da chuva, previamente armazenada. Após serem molhados, os grãos foram cobertos pela lona, a qual também foi umedecida. Eles ficaram sob estas condições durante 24 horas, onde após este período era feita a medição do teor de umidade conforme descrito anteriormente. A quantidade de água era proporcional ao teor de umidade desejado.

2.2.4 Equipamento utilizado

Para a realização dos experimentos de secagem de soja em camada fina, foi utilizado um protótipo de um secador, que consistiu de um tubo metálico com 0,15m de diâmetro, isolado em toda a sua superfície com lã de vidro e lona.

Este equipamento pode ser dividido em dois sistemas: um que gera o fluxo de ar e o outro que realiza a secagem. O primeiro é constituído por um ventilador centrífugo, dutos e uma placa de orifício para medir a vazão do ar. O segundo, é composto pelo aquecedor do ar, cilindro de secagem e equipamentos para medir a temperatura do ar.

A Figura 22 representa o equipamento:

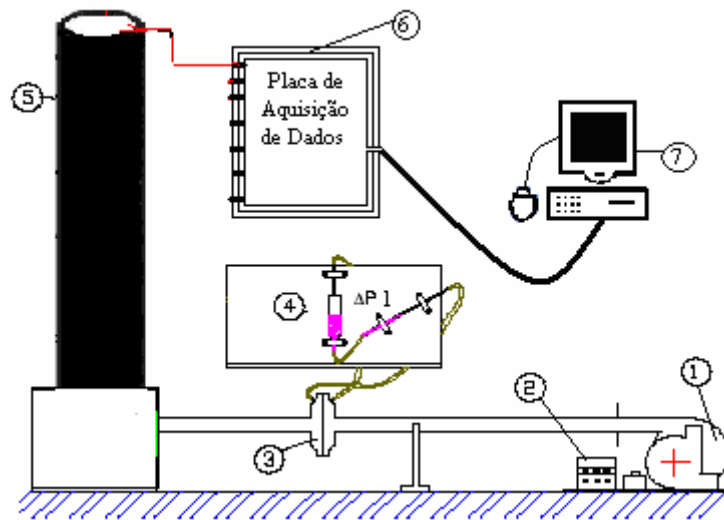


Figura 19: Representação do equipamento de secagem

onde:

- 1- Ventilador centrífugo;
- 2- Inversor de frequência, instrumento que permite controlar a frequência de rotação do motor do sistema de ventilação, permitindo a utilização e controle de várias velocidades de saída do ar do ventilador;
- 3- A velocidade do ar que passa pela tubulação é medida com um medidor de vazão do tipo placa de orifício, colocado no duto de PVC;
- 4- A placa de orifício é acoplada a um manômetro do tipo U, que utiliza água, inclinado 30° em relação à base, que permite medir pressões até 100 mm ca. (A medida da diferença de pressão exercida sobre a coluna de água $\Delta p1$, permite calcular a velocidade média do fluxo de ar).

$$v_a = C \cdot A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p1}{P}} \quad (2.2)$$

sendo:

A_0 a área do orifício da placa (0,001017m²);

$\Delta p1$ a variação de pressão mostrada no manômetro;

P a massa específica do fluido (1,1614/m⁻³);

C o coeficiente da placa de orifício.

O valor do coeficiente C, determinado experimentalmente, varia conforme a velocidade. Para o intervalo de velocidades utilizadas neste trabalho considerou-se $C=0,72$.

- 5- Tubo metálico, isolado com lã de vidro e lona, onde na parte superior foi posta a cesta de secagem e nela um termopar. O equipamento de medida de temperatura é composto pelos termopares, placas de aquisição de dados e o programa de gerenciamento dos dados medidos;
- 6- A placa de aquisição de dados é do tipo LR 7018, 16 bits, dispõe de 8 canais de leitura de dados e realiza até 10 leituras por segundo. Os termopares são do modelo MTK - Tipo K– Universal para uma faixa de temperatura: -40°C a 204°C com precisão de $\pm 0,75\%$ da leitura.
- 7- A placa de aquisição de dados é ligada ao computador através de um cabo que transmite os dados que são gerados na interface do programa da placa.

Para aquecer o ar, foram utilizados seis resistores elétricos com potência de 600W. Para controlar a temperatura do ar de secagem, foi instalado um termopar dentro da câmara de secagem que continha a massa de grãos de soja. Esta câmara era metálica e cilíndrica, com diâmetro de 0,15m, acoplada ao sistema de ventilação/aquecimento do ar, e continha uma tela, sobre a qual era disposta a massa de grãos para ser submetida ao fluxo de ar (Figura 21). A espessura da camada fina de grãos era em torno de 7 mm ou dois grãos.

Através da Figura 20 é possível observar a câmara de secagem utilizada:



Figura 20: Fotografia da câmara de secagem



Figura 21: Fotografia do equipamento de secagem

Um ventilador centrífugo, com motor elétrico de $\frac{3}{4}$ de HP com 3450 rpm foi usado para impulsionar o ar pela tubulação (duto de PVC, diâmetro de 50mm).

A Figura 22 mostra o sistema de geração de fluxo de ar:



Figura 22: Fotografia do sistema de geração de fluxo de ar

2.2.5 Condições Operacionais

Os experimentos realizados no secador de leito fixo para a caracterização do comportamento da secagem em camada fina de sementes de soja, compreenderam velocidades do ar de secagem de 0, 0.5, 0.9, 1.5 e 2.5 m/s, temperaturas do ar de 45, 60, 70, 80 e 90°C para os teores de umidade de 0.13, 0.19, 0.22, 0.28 e 0.32 (base seca). Todos os experimentos foram realizados com réplicas para garantir os dados obtidos.

2.2.6 Erros Prováveis de Medidas

Os erros prováveis nas medidas de temperatura, teor de umidade dos grãos e velocidade do ar de secagem são mostradas pela Tabela 17.

Tabela 17: Erros prováveis nas medidas

Medida	Erro Provável
Temperatura do ar de secagem	$\pm 0,75\%$
Teor de umidade dos grãos	$\pm 1\%$
Velocidade do ar de secagem	$\pm 4\%$

2.2.7 Experimentos de Secagem

Após a medida do teor de umidade, a soja foi colocada em embalagens plásticas, fechadas hermeticamente, contendo uma massa de 200g de grãos em cada amostra. O lacre era feito com o auxílio de uma máquina lacradora.

Depois de lacradas, as amostras eram postas na geladeira a uma temperatura de 4°C, a fim de se conservar o seu teor de umidade (Figura 23).



Figura 23: Fotografia das amostras de soja hermeticamente fechadas e acondicionadas na geladeira a 4°C

Vinte e quatro horas antes de iniciar o processo de secagem, a amostra era retirada da geladeira e deixada em contato com o ar ambiente. Após este tempo, era realizado um pré-aquecimento de cinco minutos na estufa, com a mesma temperatura em que seria realizada a secagem. Ao ser retirada da estufa, a massa de grãos era novamente medida.

Em seguida, a amostra era colocada na câmara de secagem e acionada a contagem do tempo. Passado o tempo de secagem desejado, a massa era novamente medida e recolocada no secador, repetindo-se este procedimento para todos os tempos desejados. Para este procedimento, a massa de grãos ficava em torno de 20s fora do secador, tempo necessário para retirar a amostra, colocá-la na balança, anotar a medida e retorná-la ao secador.

O intervalo de secagem era incrementado de 10 minutos na primeira hora, 20 minutos na segunda hora e a partir da terceira hora, 30 minutos. O experimento era encerrado quando o teor de umidade atingia em torno de 8% (base seca).

Para cada experimento realizado, eram anotadas a temperatura do ar ambiente, a pressão atmosférica e também a umidade relativa do ar. A temperatura e a umidade relativa do ar foram obtidas por meio de um termômetro e de um higrômetro, respectivamente.

O teor de umidade de equilíbrio da soja era calculado para cada condição de umidade relativa do ar e de temperatura de secagem, de acordo com Dalpasquale (1981):

$$X_e = \frac{3,962 \cdot UR_s^{0,4919}}{100 \cdot \ln(T_s)} \quad (2.3)$$

onde:

UR_s é a umidade relativa do ar de secagem, porcentagem;

T_s é a temperatura do ar de secagem, °C.

Tendo-se os teores de umidade inicial, de equilíbrio e os de umidade instantânea da massa de grãos de soja, obteve-se os valores da razão de umidade para cada processo de secagem, dados pela expressão abaixo:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2.4)$$

onde:

X é o teor de umidade do produto;

X_e é o teor de umidade de equilíbrio;

X_0 é o teor de umidade inicial;

Estes experimentos de secagem de grãos de soja em camada fina foram realizados a fim de se obter as variações do teor de umidade em função do tempo, para cada temperatura e velocidade do ar acima citados, verificando-se a influência destas neste processo.

2.3 MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção é apresentado o modelo matemático a ser utilizado nesta pesquisa. Ele é baseado no modelo proposto por Khatchatourian et al. (2003), onde analisaram as trocas de massa e energia entre o ar e os grãos num secador de leito fixo.

Este modelo foi adaptado para descrever o processo de secagem de grãos de soja num secador de leito fixo e é composto por um sistema de quatro equações diferenciais

parciais, hiperbólicas, quase-lineares, acopladas, onde estas equações contemplam as trocas de calor e de massa entre o ar e o grão. Entretanto, apesar de descrever satisfatoriamente as curvas de secagem em relação a influência da temperatura do ar, este modelo não leva em consideração a influência da velocidade do ar e do teor de umidade inicial do grão no processo.

Desta forma, a fim de considerar a influência da velocidade do ar de secagem e do teor de umidade inicial dos grãos, será feito um ajuste do coeficiente de transferência de massa durante o processo de secagem, modificando-o em relação ao modelo proposto por Khatchatourian (2003).

Pelos grãos que estão no secador de leito fixo passa um fluxo de ar ambiente aquecido. O aumento da temperatura faz com que aumente o limite máximo de teor de vapor de água na mistura ar-vapor de água. Ao passar pela camada de grãos úmidos, o ar seco baixa o teor de umidade de equilíbrio, provocando um fluxo de vapor de água, do grão para o ar. Esta água é transportada pelo ar para fora do secador.

Visto que a largura do leito é muito maior do que o comprimento das camadas limite dinâmica e térmica nas paredes, o modelo foi considerado unidimensional bem como foram consideradas constantes a porosidade e a velocidade do escoamento de ar.

2.3.1 Hipóteses do Modelo

Para a formulação matemática do processo investigado foram adotadas as seguintes hipóteses:

- a) as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- b) transporte unidimensional de calor e massa;
- c) a contração volumétrica dos grãos é negligenciável, bem como os gradientes de temperatura dentro dos grãos.
- d) transferência de calor predominantemente convectiva;
- e) distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador.

2.3.2 Equações do Modelo Matemático Khatchatourian (2003)

Levando-se em conta as considerações feitas na formulação do problema de secagem de soja num secador de leito fixo, o modelo matemático composto pelo sistema de equações

diferenciais parciais (EDP) obtido dos balanços de energia e massa, é formado pelas seguintes equações: Equação de conservação da massa de água em relação ao ar, Equação de conservação de energia em relação ao ar, Equação de conservação da massa de água em relação ao grão e Equação de conservação de energia em relação ao grão. Para a determinação destas equações, considera-se um volume de controle na massa de grãos que está no secador, composto pelos grãos e pelos espaços intersticiais através do qual há o escoamento de ar.

2.3.2.1 Equação de conservação da massa de água no ar

Esta equação determina a variação do teor de umidade do ar em diferentes pontos internos do secador.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{a_{sv} \Phi_m (1 - \varepsilon)}{\varepsilon \rho_a} \quad (2.5)$$

Onde Y é o teor de umidade do ar, v_a é velocidade do ar, a_{sv} é a razão entre a área da superfície e o volume do grão, ε é a porosidade, ρ_a é a massa específica do ar e Φ_m é a densidade do fluxo de massa.

2.3.2.2 Equação de conservação de energia para o ar

Esta equação determina a energia transferida pelo ar para os grãos.

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a_{sv} (1 - \varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (C_{pa} + Y C_{pv})} [\Phi_m C_{pv} (T_g - T_a) + \Phi_h] \quad (2.6)$$

Onde T_a é a temperatura do ar, C_{pa} é o calor específico do ar à pressão constante, C_{pv} é o calor específico do vapor de água à pressão constante, T_g é a temperatura do grão, Φ_h é a densidade do fluxo de calor.

2.3.2.3 Equação de conservação da massa de água no grão

Esta equação determina a variação do teor de umidade dentro do grão.

Considerando-se o caso unidimensional, a equação é dada por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + v_g \frac{\partial X}{\partial z} = - \frac{a_{sv} \Phi_m}{\rho_g} \quad (2.7)$$

Para o secador de leito fixo, a velocidade dos grãos (v_g) é nula. Dessa forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{a_{sv} \Phi_m}{\rho_g} \quad (2.8)$$

2.3.2.4 Equação de conservação de energia no grão

Esta equação determina a energia para aquecer o grão e fazer evaporar a sua água.

Tem-se:

$$\frac{dT_g}{dt} + \frac{C_{pw} T_g}{(C_{pg} + C_{pw} X)} \left(- \frac{a_{sv} \Phi_m}{\rho_g} \right) = - \frac{a_{sv} [\Phi_h + \Phi_m (H_v + C_{pv} T_g)]}{\rho_g (C_{pg} + C_{pw} X)} \quad (2.9)$$

Levando-se em conta que o problema é unidimensional e em leito fixo, e usando-se a definição da derivada substantiva, a equação é apresentada na forma:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = - \frac{a_{sv} \cdot \{ \Phi_h + \Phi_m \cdot [H_v + T_g (C_{pv} - C_{pw})] \}}{\rho_g (C_{pg} + X C_{pw})} \quad (2.10)$$

onde T_g é a temperatura do grão, H_v é o calor latente de vaporização, C_{pw} é o calor específico da água à pressão constante, C_{pg} é o calor específico do grão.

O modelo matemático possui ainda as seguintes equações: Teor de umidade do grão (base seca), Umidade do ar que passa por entre os grãos, Densidade do fluxo de massa, Densidade do fluxo de calor,

2.3.2.5 Teor de umidade do grão (base seca)

Supondo o esquema de um grão de soja, onde fosse possível separar a massa de água da massa de matéria seca, o teor de umidade é determinado pela razão entre elas:

$$X = \frac{m_w}{m_{gs}} \quad (2.11)$$

onde:

m_w é massa de água no grão

m_{gs} é massa de matéria seca do grão

2.3.2.6 Umidade do ar que passa por entre os grãos

Considerando o esquema de um determinado volume de ar, a umidade do ar que passa por entre os grãos (umidade do ar existente nos espaços intersticiais) num determinado período de tempo de secagem ou mesmo antes de iniciá-la, pode ser expressa por:

$$Y = \frac{m_{aw}}{m_{as}} \quad (2.12)$$

onde:

Y é umidade do ar;

m_{aw} é massa de água no ar;

m_{as} é massa de ar seco.

2.3.2.7 Densidade do fluxo de massa

Com o aquecimento do grão, e o conseqüente aumento da pressão no seu interior, ele rompe o equilíbrio higroscópico e a água, em forma de vapor, tende a sair. A quantidade de massa de água em forma de vapor, que atravessa a superfície do grão por unidade de área e por unidade de tempo é o que determina a densidade do fluxo de massa.

Khatchatourian (2003), usando as relações de Chilton-Colburn (SISSON, 1988), ajustou a equação do fluxo de massa, levando em consideração a influência da velocidade do ar de secagem, obtendo a seguinte relação:

$$\Phi_m = \sqrt{\frac{v_a}{v_0}} M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T)+M_3(T) \cdot \ln(X-X_e)}} \quad (2.13)$$

onde:

Φ_m é a densidade do fluxo de massa;

$M_1(T) = K_1(X_0 - X_e)$;

$M_2(T) = K_2 - K_3 \cdot \ln(X_0 - X_e)$;

$M_3(T) = K_3$.

em que:

K_1 , K_2 e K_3 são funções temperatura.

2.3.2.8 Densidade do fluxo de calor

É a quantidade de calor que passa na superfície do grão por unidade de tempo e por unidade de área. A transferência de calor no processo de secagem ocorre, predominantemente, por convecção forçada entre o ar de secagem e a superfície dos grãos. Segundo a lei de Newton-Richmann para transferência de calor convectiva, o fluxo de calor é proporcional à diferença de temperatura entre o ar e o grão, dada por:

$$\Phi_h = h(T_g - T_a) \quad (2.14)$$

onde:

Φ_h é a densidade do fluxo de calor;

h é o coeficiente de transmissão de calor;

T_g é a temperatura do grão;

T_a é a temperatura do ar.

Khatchatourian (2003) a partir do coeficiente de transferência de calor proposto por Loncin, utilizado por Courtois e Lasseran (1993) e usando a mesma analogia feita para a transferência de massa, encontrou a seguinte equação para o valor de h :

$$h = \sqrt{\frac{v_a}{v_0}} (-19,718 + 0,2576T_g + 379,41Y) \quad (2.15)$$

2.3.3 Modificação do Modelo

O modelo acima descrito foi modificado a fim de ajustar a influência da velocidade do ar de secagem e do teor de umidade inicial dos grãos. A modificação deu-se na equação referente ao fluxo de massa dada por (2.13), já que o fator $\sqrt{\frac{v_a}{v_0}}$ presente nesta equação não permitiu descrever satisfatoriamente a influência da velocidade nas curvas de secagem. Outro aspecto modificado na equação (2.13) diz respeito à influência do teor de umidade inicial (X_0), onde este não era levado em consideração no modelo anterior, o que também fazia com que a dinâmica de secagem não fosse descrita de forma satisfatória.

Assim, o fluxo de massa passa a ser descrito por:

$$\Phi_{me} = (a \cdot v + b) \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right)^c \cdot \left(M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T) + M_3(T) \cdot \ln(X - X_e)}} \right) \quad (2.16)$$

onde os coeficientes a , b e c foram obtidos através do método de mínimos quadrados utilizando-se os dados experimentais na minimização do funcional.

Dessa forma, a equação pode ser escrita como:

$$\Phi_{me} = (0,85 \cdot v + 0,15) \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right)^{0,856} \cdot \left(M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T) + M_3(T) \cdot \ln(X - X_e)}} \right) \quad (2.17)$$

2.3.4 Condições de Contorno

As equações do modelo estão sujeitas às seguintes condições de contorno (condições iniciais e de fronteira):

Condições iniciais:

$$\begin{aligned} X(0, z) &= X_0; \\ T_g(0, z) &= T_{amb}; \\ Y(0, z) &= Y_{amb}; \\ T_a(0, z) &= T_{amb}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

onde:

X_0 é o teor de umidade inicial do grão;

T_{amb} é a temperatura ambiente.

Condições de fronteira:

$$\begin{aligned} Y(t, 0) &= Y_0 \\ T_a(t, 0) &= T_s \end{aligned} \quad (2.19)$$

sendo :

Y_0 o teor de umidade do ar, aquecido na temperatura de secagem;

T_s a temperatura do ar de secagem.

2.4 SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO MATEMÁTICO

2.4.1 Determinação dos coeficientes através do Método de Mínimos Quadrados

A determinação dos coeficientes a , b e c da equação (2.16) que descreve o fluxo de massa foi feita através do Método de Mínimos Quadrados, minimizando-se a funcional dada por:

$$S = \min_{a,b,c} \sum_{i=1}^N \left(\Phi_{me_i}(a, b, c) - \Phi_{exp_i} \right)^2 \quad (2.20)$$

sendo N o número de pontos obtidos experimentalmente ao longo das medidas efetuadas.

Encontraram-se os seguintes valores para os parâmetros desejados:

$$a = 0,85$$

$$b = 0,15$$

$$c = 0,856$$

2.4.2 Método Numérico para Solução do Modelo Matemático

A equação que determina o fluxo de massa durante o processo de secagem do modelo matemático desta pesquisa é resolvida numericamente através do Método de Newton, dado por:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \text{inv}(J) \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

onde:

$$X = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{\partial F}{\partial X_1} = \frac{\partial F}{\partial a} = 0 \\ f_2 &= \frac{\partial F}{\partial X_2} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \\ f_3 &= \frac{\partial F}{\partial X_3} = \frac{\partial F}{\partial c} = 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$F = (a, b, c) \quad (2.24)$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} & \frac{\partial f_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} & \frac{\partial f_2}{\partial X_2} & \frac{\partial f_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X_1} & \frac{\partial f_3}{\partial X_2} & \frac{\partial f_3}{\partial X_3} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

em que J é chamada de *Matriz de Jacobi*.

2.4.3 Classificação do Sistema de Equações Diferenciais Parciais

Uma equação diferencial parcial (EDP) pode ser escrita na forma geral:

$$a \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \phi}{\partial x} + e \frac{\partial \phi}{\partial y} + f \phi + g = 0 \quad (2.26)$$

onde a, b, c, d, e, f e g podem ser funções das variáveis independentes x e y e da variável dependente ϕ , em uma região no plano $\mathbb{R}^2$, em coordenadas cartesianas.

As EDPs podem ser classificadas em elípticas, parabólicas ou hiperbólicas, dependendo do valor de $b^2 - 4ac$ ser negativo, zero ou positivo, respectivamente.

Para o modelo matemático apresentado nesta pesquisa, o sistema que o compõe pode ser reescrito na forma matricial:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + q \frac{\partial U}{\partial \psi} = F(\psi, t, U) \quad (2.27)$$

onde:

$$U = (X, T_g, Y, T_a)^T \quad (2.28)$$

$$\psi = x \text{ ou } y \quad (2.29)$$

A fim de poder classificar a equação diferencial parcial do modelo, considera-se a equação homogênea correspondente a (2.27):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + q \frac{\partial U}{\partial \psi} = 0 \quad (2.30)$$

Derivando-se (2.30) em relação ao tempo (t) e em relação à ψ , obtém-se:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -q \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial \psi} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \psi \partial t} = -q \frac{\partial^2 U}{\partial \psi^2} \quad (2.32)$$

Levando-se (2.32) em (2.31), tem-se:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = q^2 \frac{\partial^2 U}{\partial \psi^2} \quad (2.33)$$

Dessa forma, a solução da equação (2.33) é também solução da equação (2.30) e (2.33) tem a forma geral:

$$a \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + b \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial \psi} + c \frac{\partial^2 U}{\partial \psi^2} + f\left(\psi, t, U, \frac{\partial U}{\partial t}, \frac{\partial U}{\partial \psi}\right) = 0$$

De acordo com Farlow (1937), quanto a sua linearidade, um sistema de n equações diferenciais parciais pode ser classificado em linear, quase-linear e não-linear. Assim, ele será:

- linear se cada $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ e c_i for independente de $U_1, U_2, \dots, U_n$.
- quase-linear se apenas c_i for dependente de $U_1, U_2, \dots, U_n$.
- não-linear se, pelo menos, $a_{i,j}$ e/ou $b_{i,j}$ for dependente de $U_1, U_2, \dots, U_n$.

Assim, o sistema de EDPs utilizado nesta pesquisa é quase-linear, já que cada função do lado direito das equações é dependente das funções incógnitas, ou seja, acopladas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados através da metodologia empregada nesta pesquisa.

Num primeiro momento, é feita uma comparação entre os dados experimentais deste trabalho com os atingidos por Soares (1986). A seguir, enfocam-se os resultados obtidos com o processo de secagem, mostrando as simulações numéricas juntamente com os resultados experimentais, através das comparações entre velocidade do ar, temperatura e teor de umidade. Por fim, são apresentadas as curvas de taxa de secagem.

3.1 CURVAS DE SECAGEM EM CAMADA FINA

Inicialmente o experimento foi realizado de duas formas distintas, a fim de se verificar a concordância entre os resultados obtidos. A primeira maneira foi utilizando várias amostras de soja no processo de secagem; a segunda, usando-se apenas uma amostra. A Figura 24 mostra a coincidência entre os dados, onde justifica-se a escolha pela realização dos experimentos com apenas uma amostra.

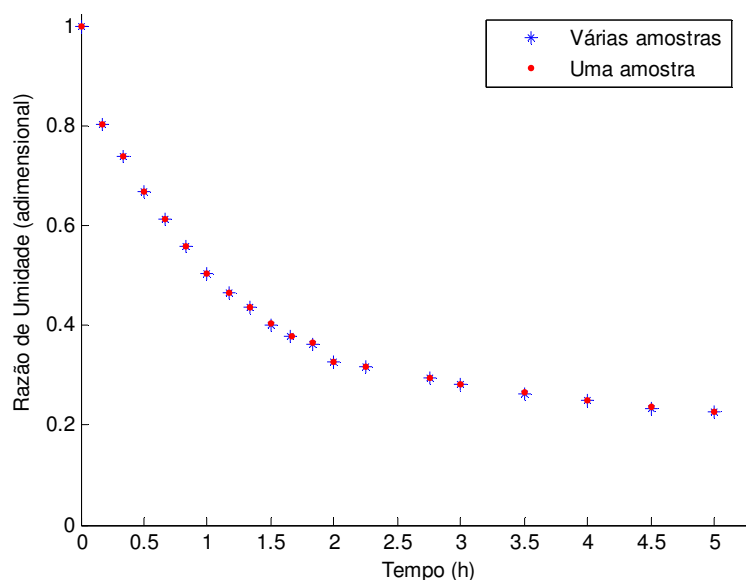


Figura 24: Dinâmica de secagem para uma amostra e várias amostras de soja. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$ e $X_0 = 0,32$.

Nas Figuras 25 a 32 são apresentados os dados experimentais da dinâmica da secagem de soja em camada fina para as temperaturas de 45°C , 60°C e 70°C , com teores de umidade de 0.13, 0.19, 0.22, 0.28 e 0.32 para a velocidade de 0,9 m/s, juntamente com a comparação com os dados obtidos por Soares (1986), para os mesmos parâmetros. A

comparação com os resultados obtidos por este autor se dá pelo fato de que foram os que mais se adaptaram a situação desta pesquisa, dentre os dados oferecidos pela literatura.

Pode-se observar uma boa concordância entre os dados obtidos neste trabalho e os de Soares (1986), mostrando a confiabilidade dos resultados aqui apresentados. A diferença existente ocorre no final das curvas, onde as realizadas neste trabalho são mais lentas que as descritas por Soares (1986), em decorrência da forma como o experimento foi conduzido, que acabava deixando as amostras mais tempo fora do contato com o ar aquecido.

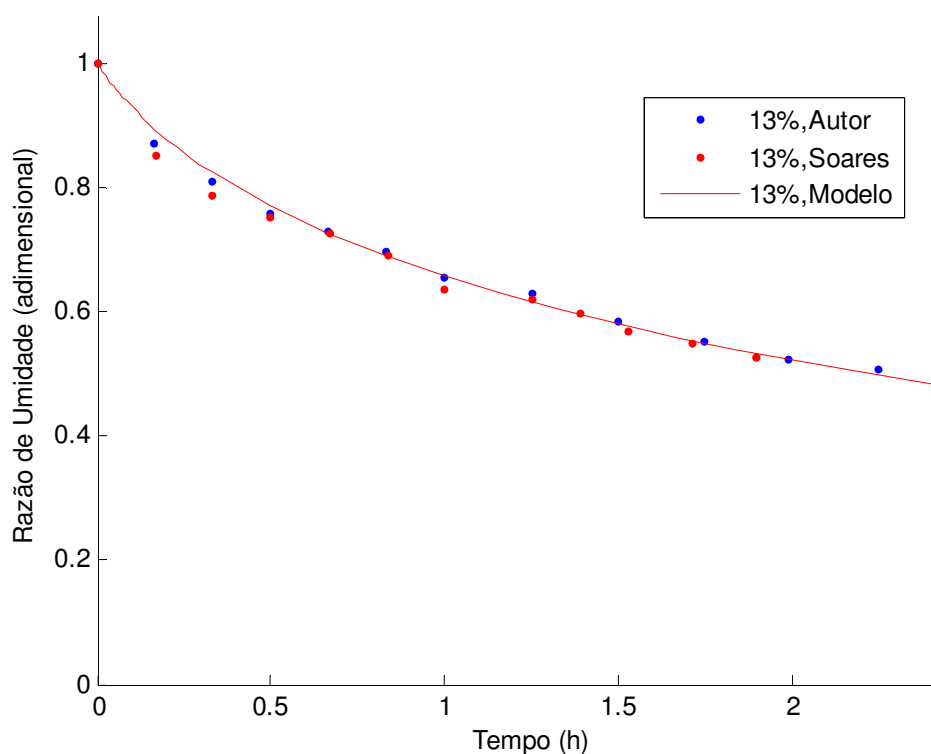


Figura 25: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,13$.

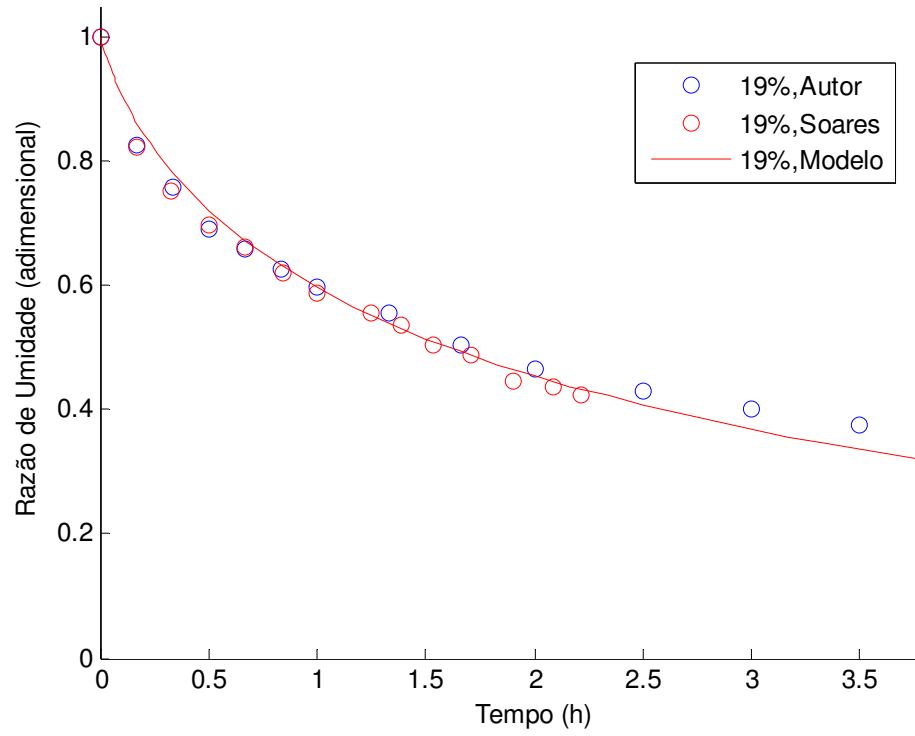


Figura 26: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,19$.

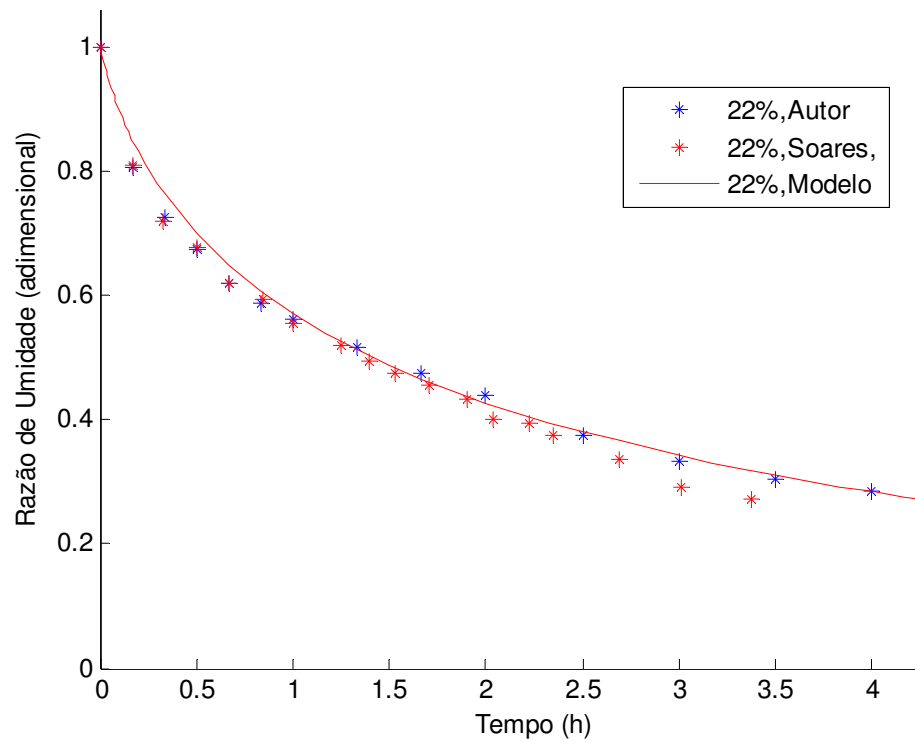


Figura 27: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,22$.

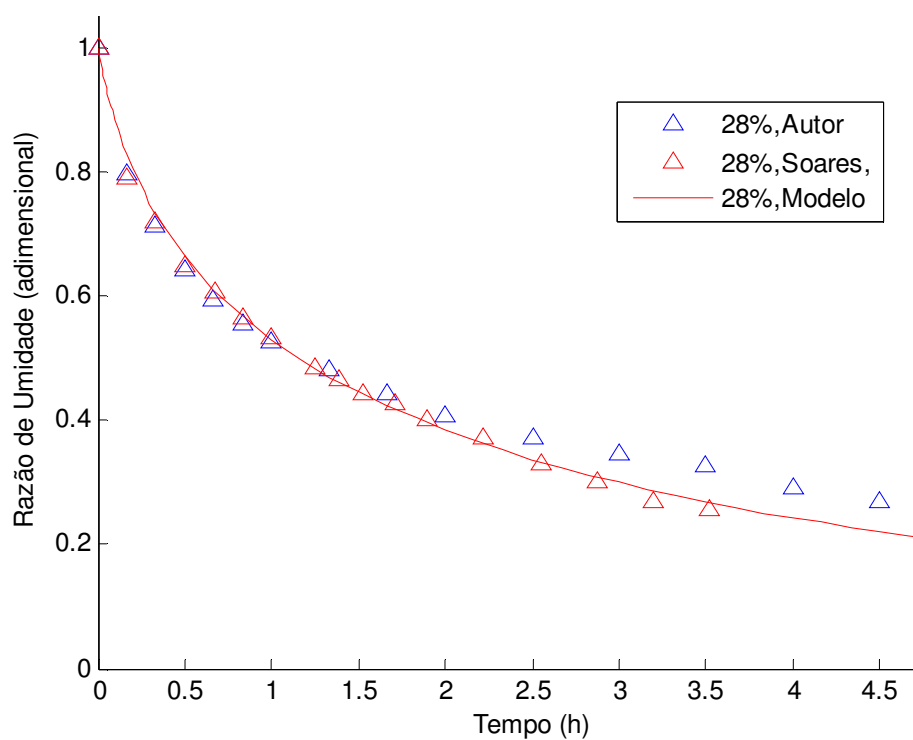


Figura 28: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,28$.

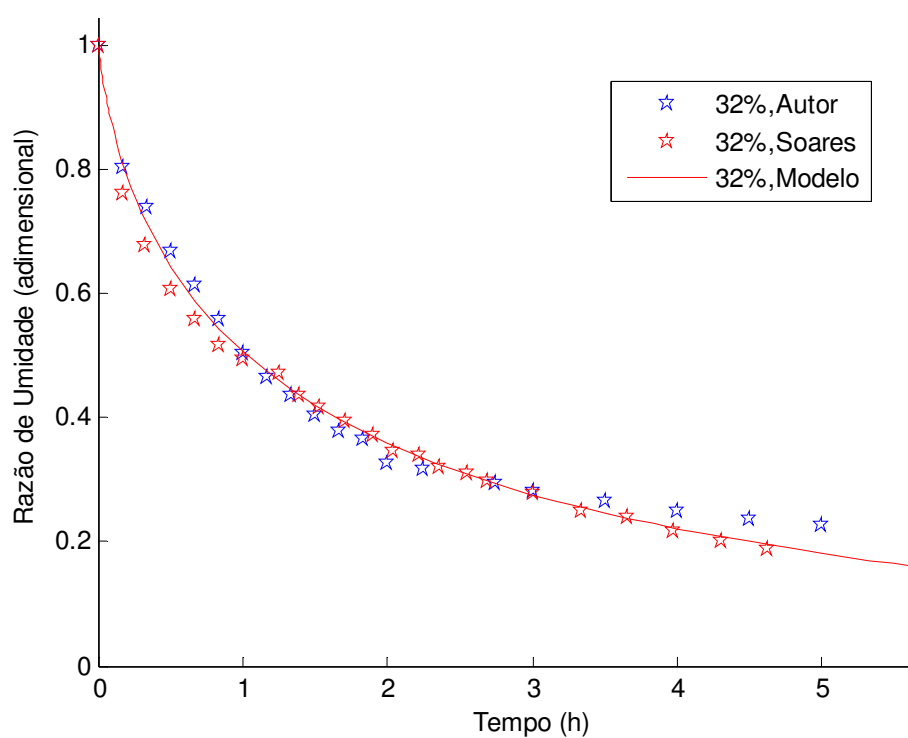
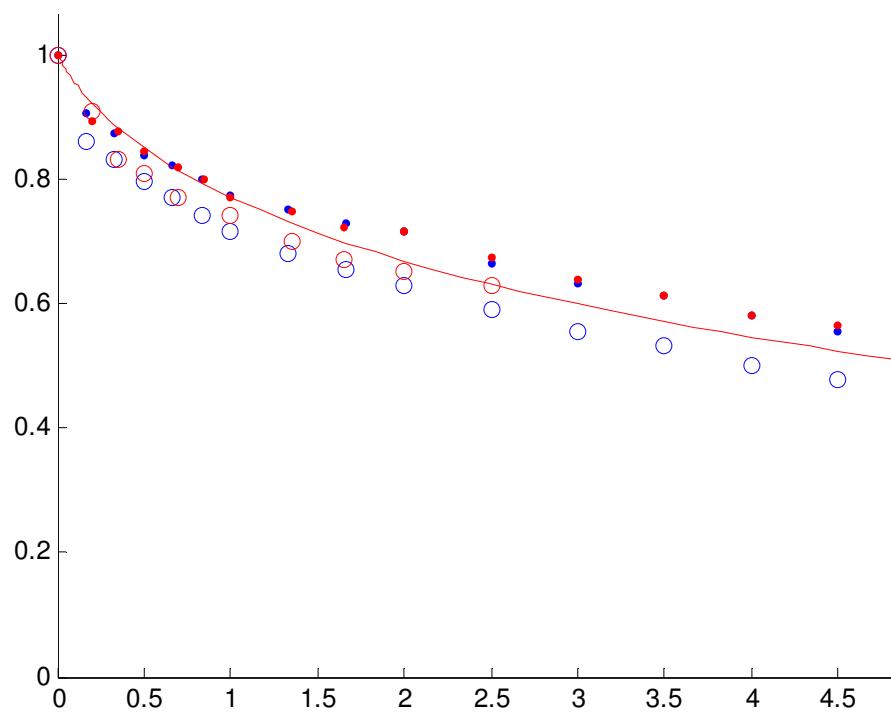


Figura 29: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares. $T_s=70^\circ\text{C}$, $v=0,9\text{m/s}$, $X_0=0,32$.

As demais comparações com os dados de Soares, separadas por teor de umidade,

encontram-se no anexo desta pesquisa.

Abaixo, os gráficos com a influência do teor de umidade para as temperaturas de 45°C, 60°C e 70°C, juntamente com os dados de Soares e os simulados pelo modelo matemático.



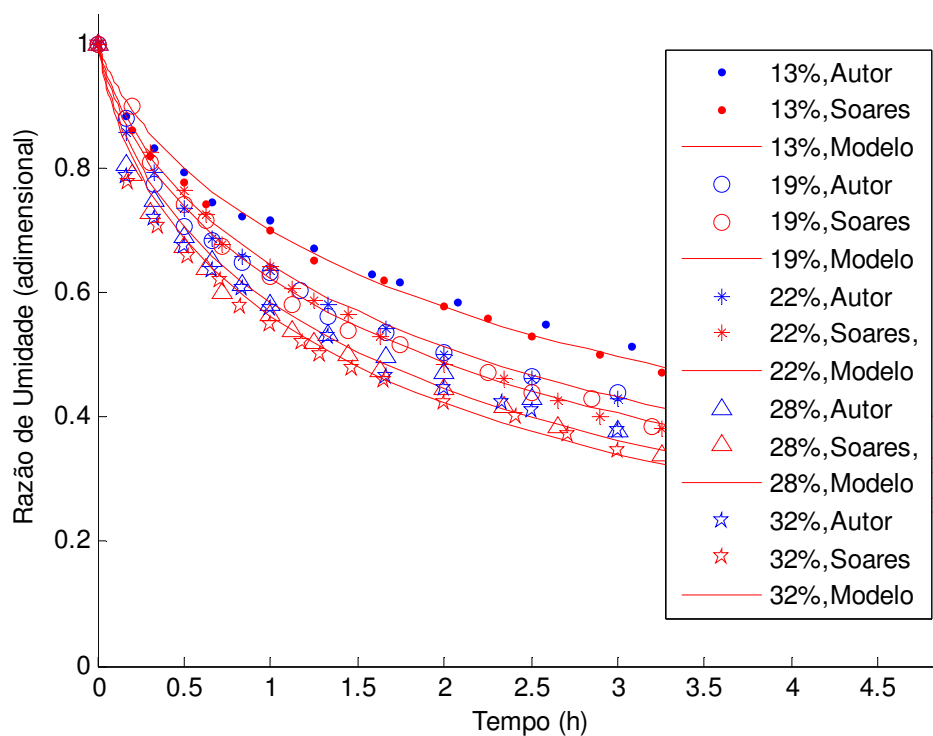


Figura 31: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares para diversos teores de umidade. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$.

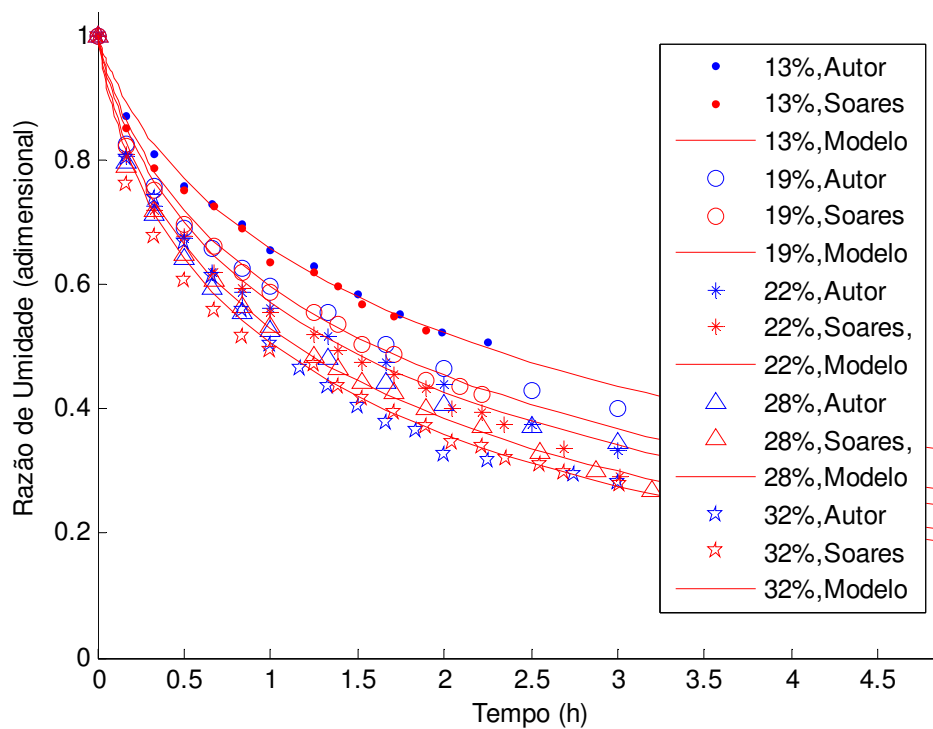


Figura 32: Comparação entre os dados experimentais deste trabalho e os de Soares para diversos teores de umidade. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $v = 0,9\text{m/s}$.

A fim de justificar a escolha pelo modelo utilizado neste trabalho, foram feitas também simulações com o modelo de Page, com a equação ajustada por Soares (1986), onde verifica-se que o primeiro descreve de forma mais satisfatória as curvas de secagem.

O modelo de Page usado é dado pela seguinte equação:

$$RU = \exp\left[-0,1149 \cdot 10^{-3} X_0^{0,5423} \exp(0,0208T_s) t^{0,5459}\right] \quad (3.1)$$

As curvas de secagem são apresentadas na Figura 33 para o modelo acima citado, juntamente com os dados experimentais.

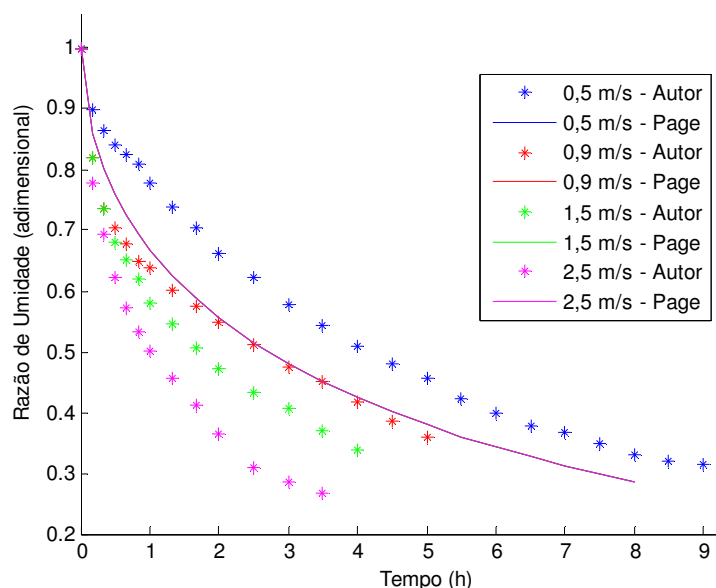


Figura 33: Comparação entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo de Page. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$

O problema do modelo de Page ajustado por Soares é que ele não leva em conta na sua equação a influência da velocidade, por isso é que há apenas uma curva contínua, o que acaba por não descrever satisfatoriamente o processo de secagem, conforme observado acima. Dessa forma, é necessário um modelo que possua este parâmetro na sua equação.

As curvas de secagem em camada fina, representando a razão de umidade dos grãos de soja em função do tempo de secagem, para cada temperatura do ar, velocidade e teor de umidade são apresentadas nas figuras a seguir. Nelas, têm-se os resultados experimentais juntamente com os obtidos através da simulação numérica pelo modelo matemático proposto.

3.1.1 Influência da velocidade do ar no processo de secagem

Nas Figuras 34 a 38 estão apresentadas as curvas de secagem em função da velocidade do ar, mantida a temperatura constante em 45°C para diversos teores de umidade, onde as curvas discretas representam os dados experimentais e as contínuas são os resultados simulados.

Observa-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Conforme Hall (1980), após as primeiras horas, a secagem apresentou velocidade decrescente, devido ao transporte interno da água ser menor do que a taxa de evaporação; assim, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e, portanto, há aumento da temperatura do produto.

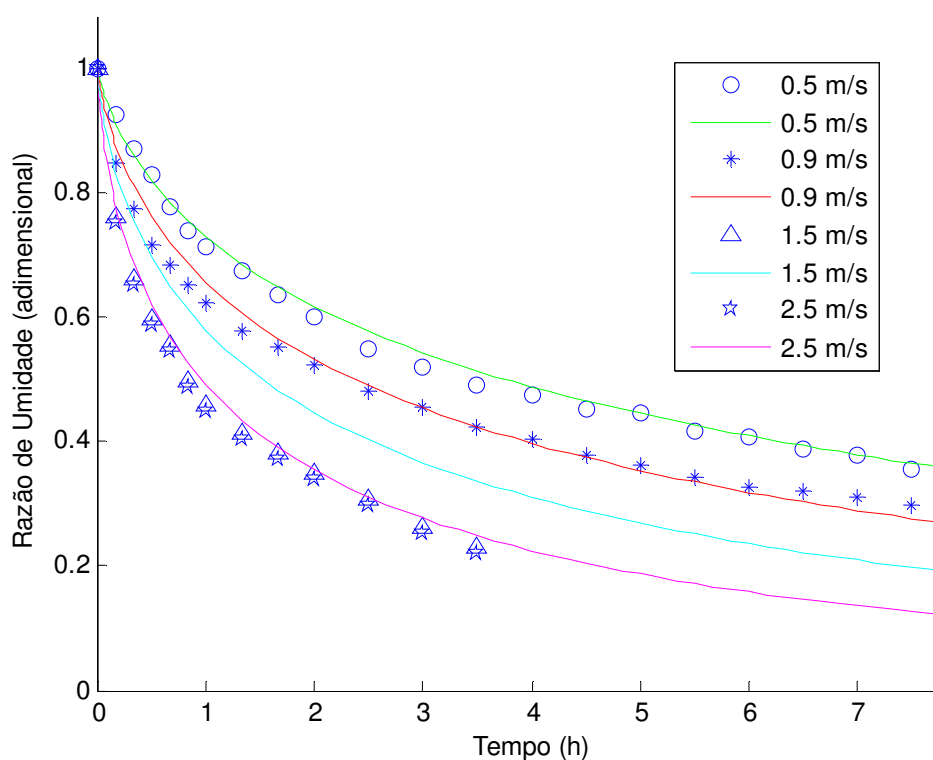


Figura 34: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^{\circ}\text{C}$, $X_0 = 0,32$

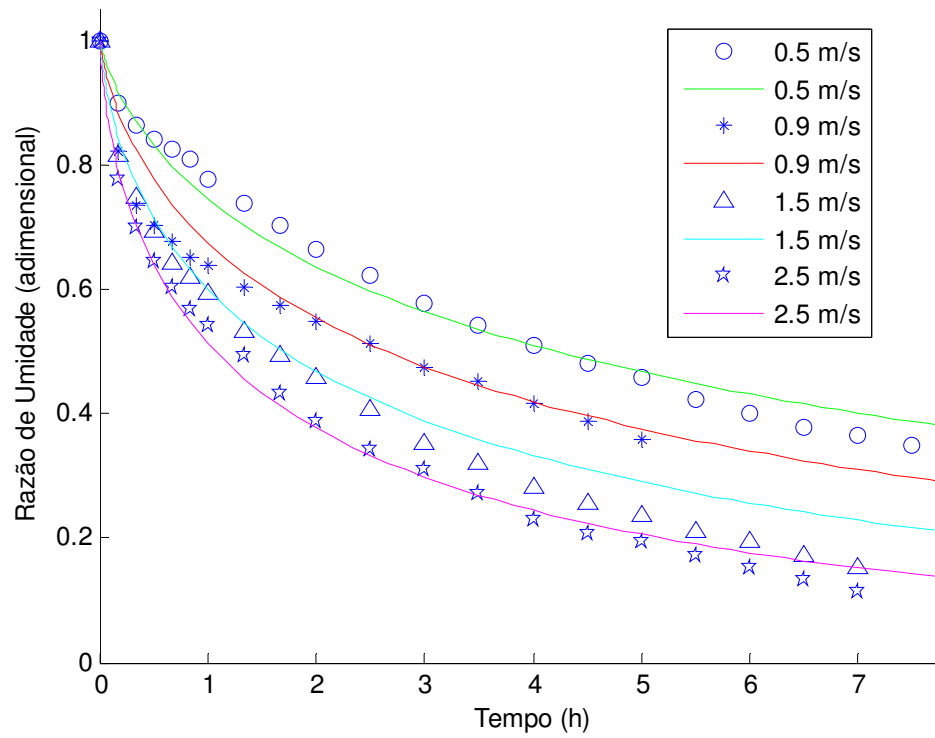


Figura 35: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$

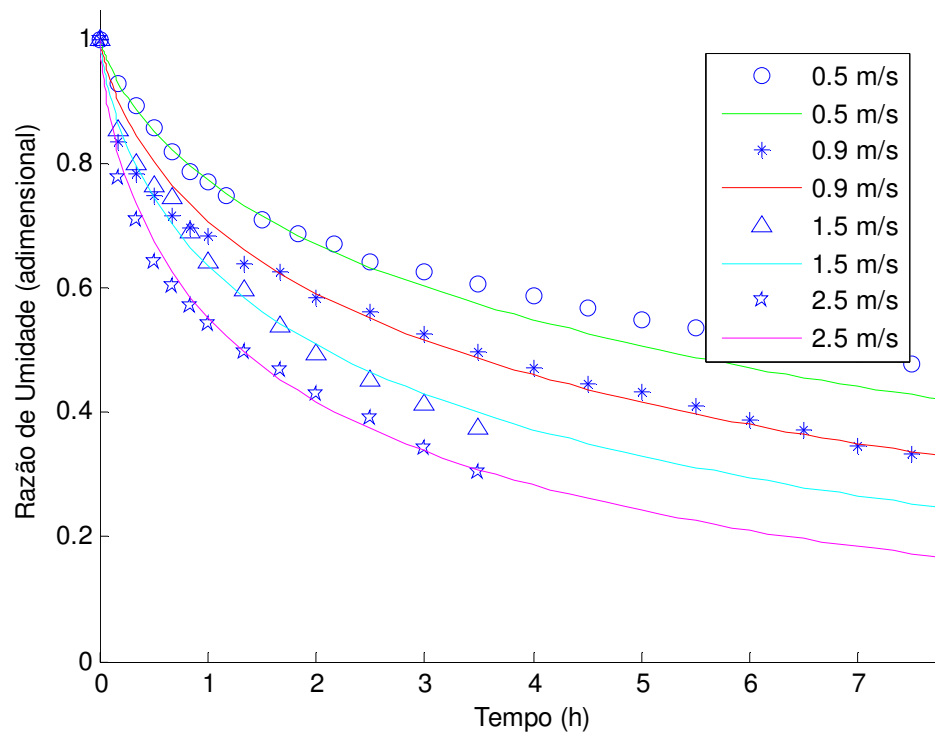


Figura 36: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$

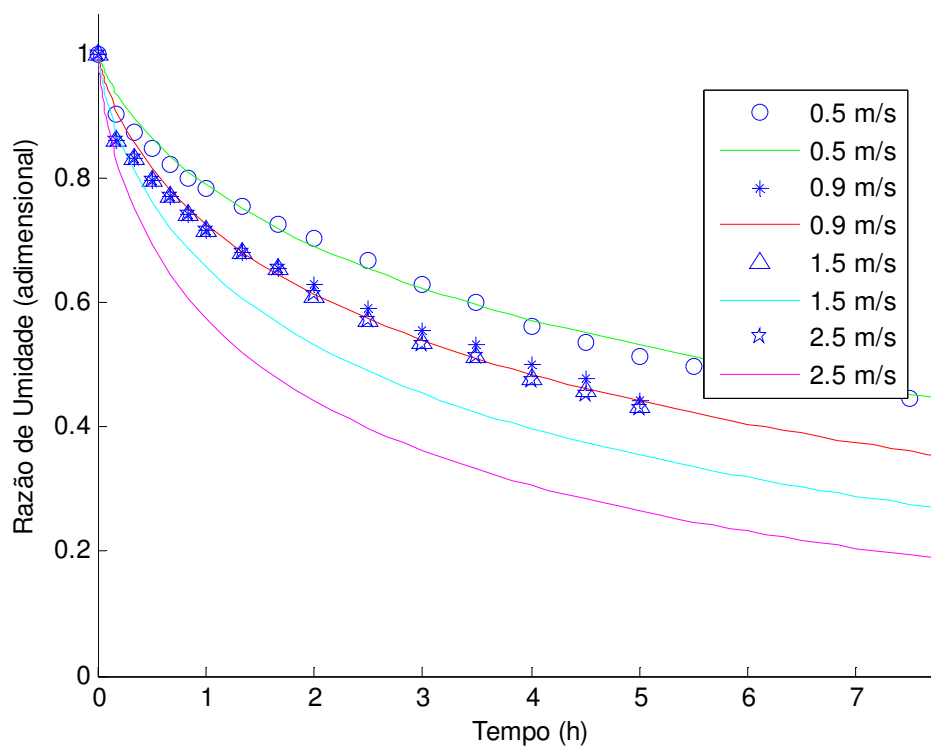


Figura 37: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$

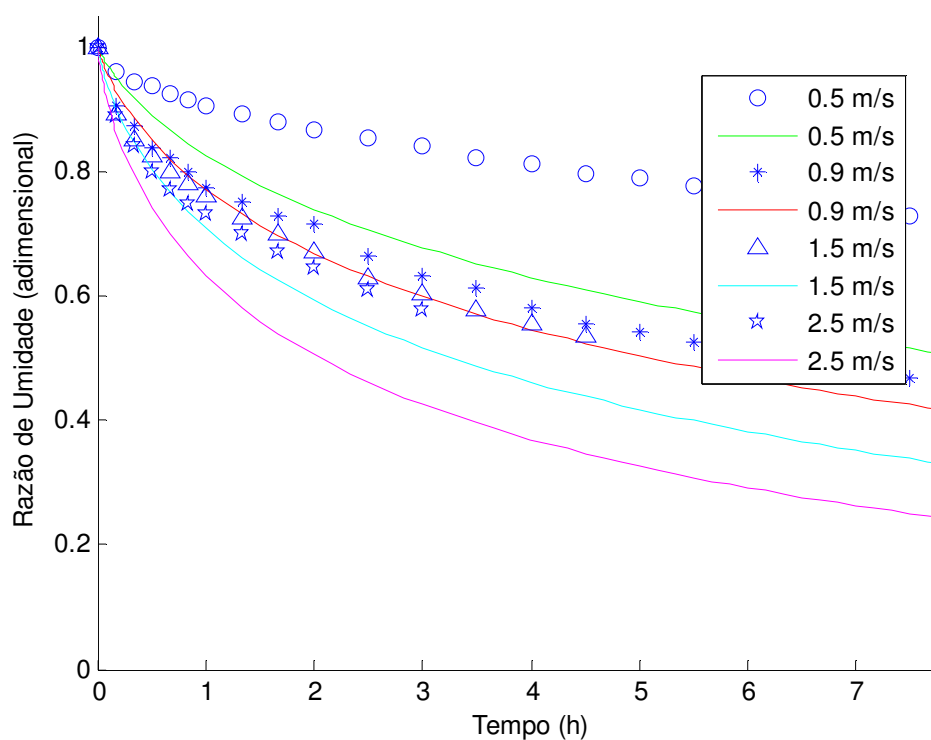
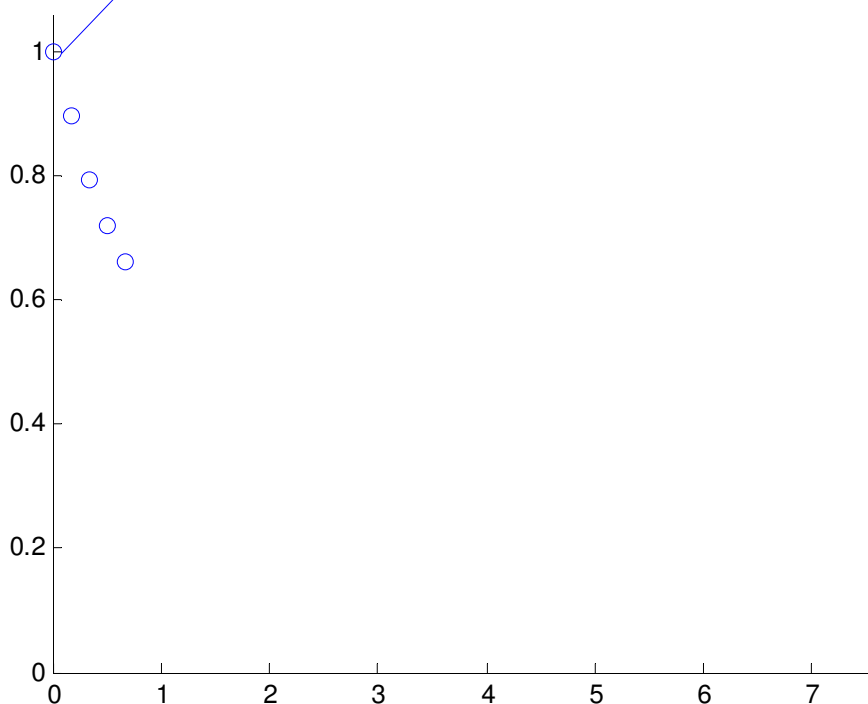


Figura 38: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$

Observa-se na Figura 34 que o modelo não descreveu satisfatoriamente a curva de secagem referente a influência da velocidade de 1,5m/s, havendo uma grande discordância

entre dados experimentais e simulados. O mesmo verifica-se nas Figuras 37 e 38, para as velocidades de 1,5 e 2,5m/s, em que estas ocorrem mais lentamente nos experimentos e de forma mais rápida na simulação. Ainda na Figura 38, existe uma discordância muito acentuada entre simulação e experimentos no que tange à curva de 0,5m/s e também para as maiores velocidades do ar (1,5 e 2,5m/s). Dessa maneira, há necessidade de melhorar o modelo matemático ou rever os experimentos, verificando se não houve erro na coleta dos dados.

As Figuras 39 a 58 apresentam as demais curvas de secagem em função da velocidade do ar para os restantes níveis de temperaturas avaliados – 60°C, 70°C, 80° e 90°C, onde pode ser observado um comportamento semelhante em todos os casos, conforme descrito anteriormente.



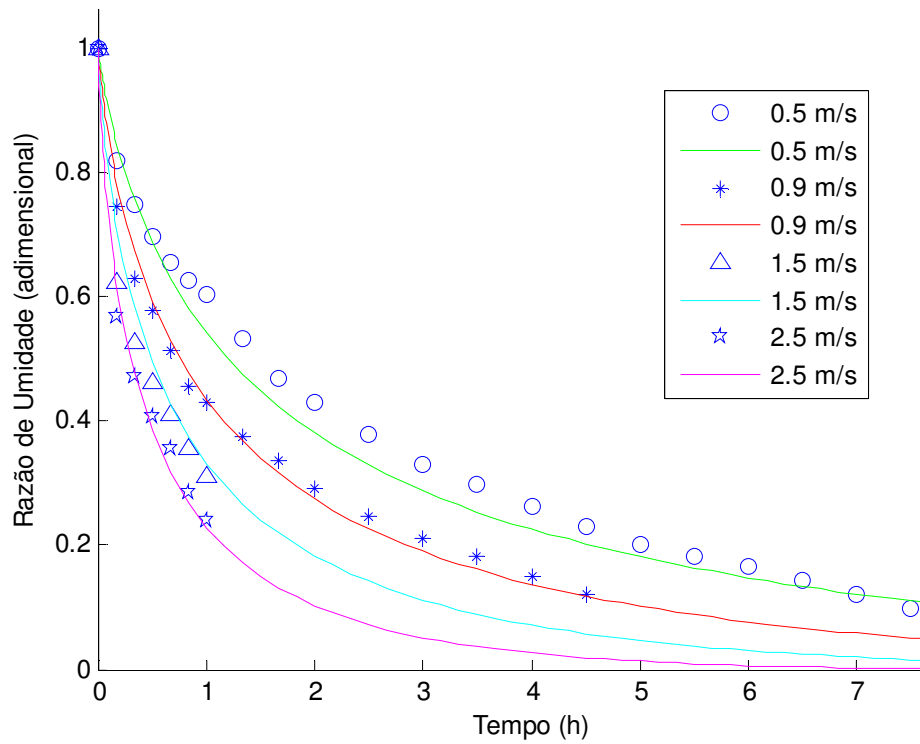


Figura 40: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$

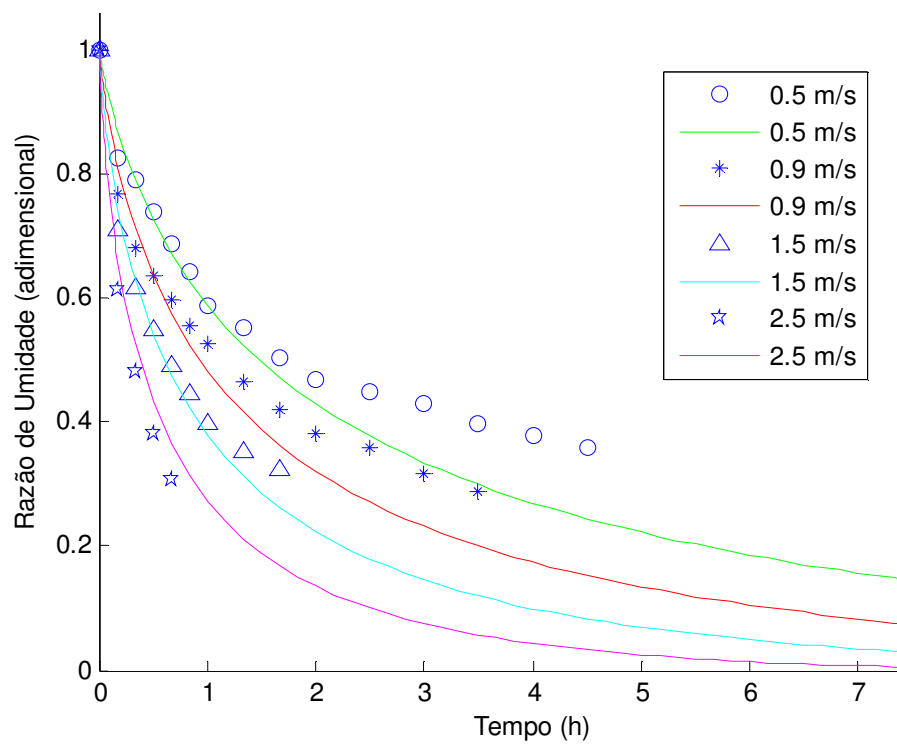


Figura 41: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$

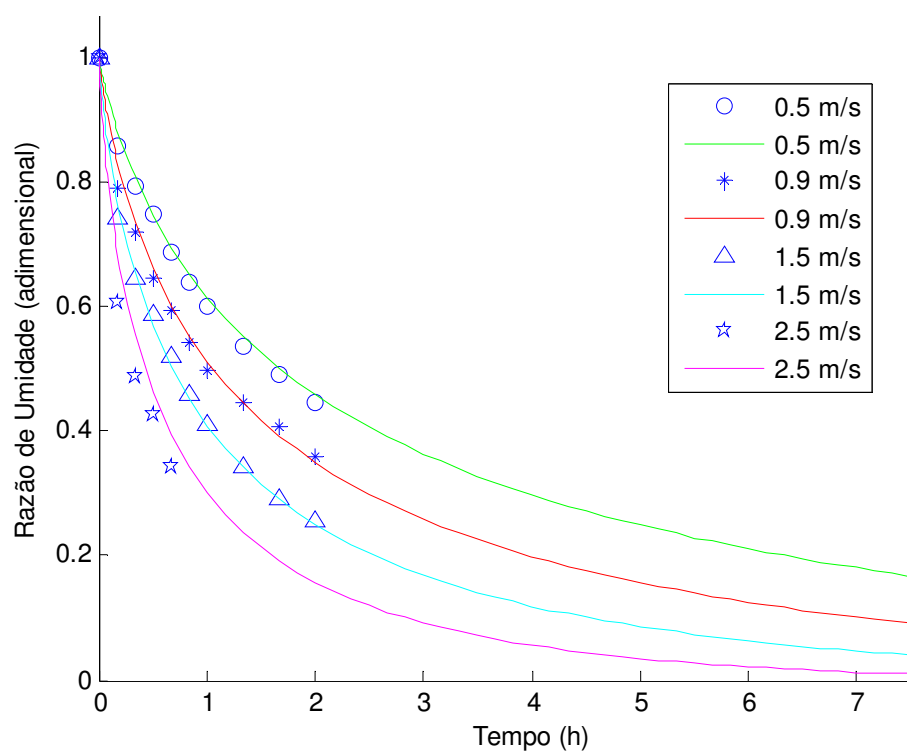


Figura 42: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$

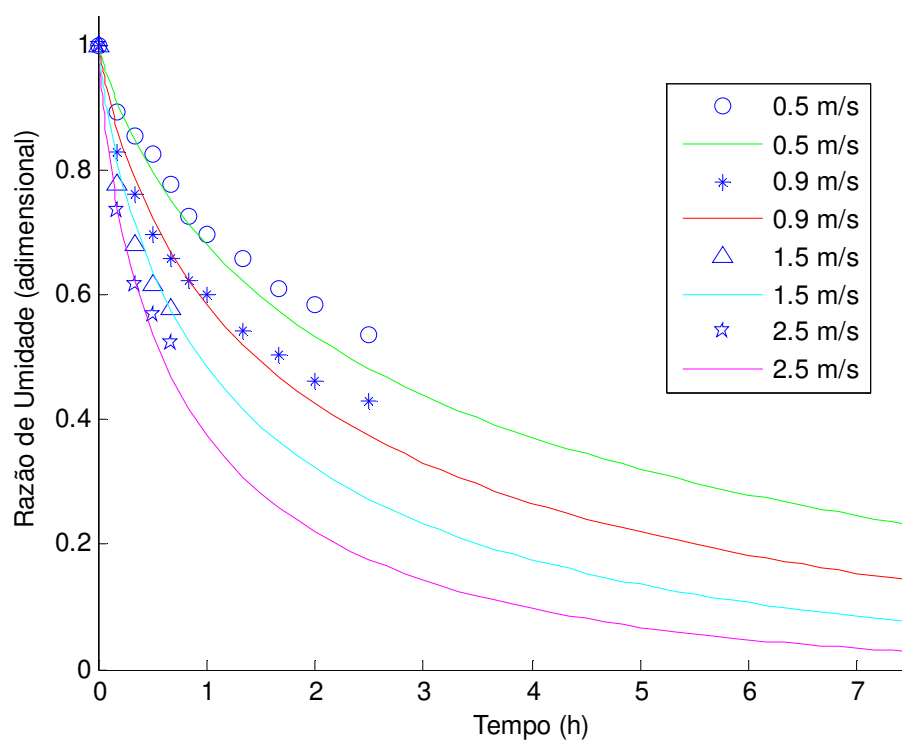


Figura 43: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 90^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$

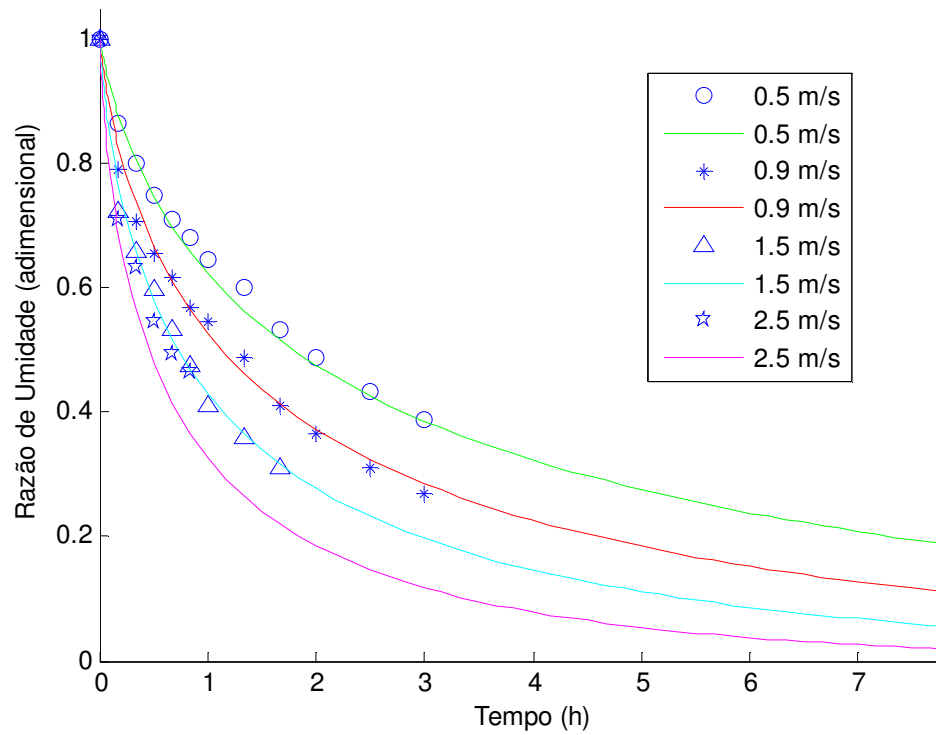


Figura 46: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$

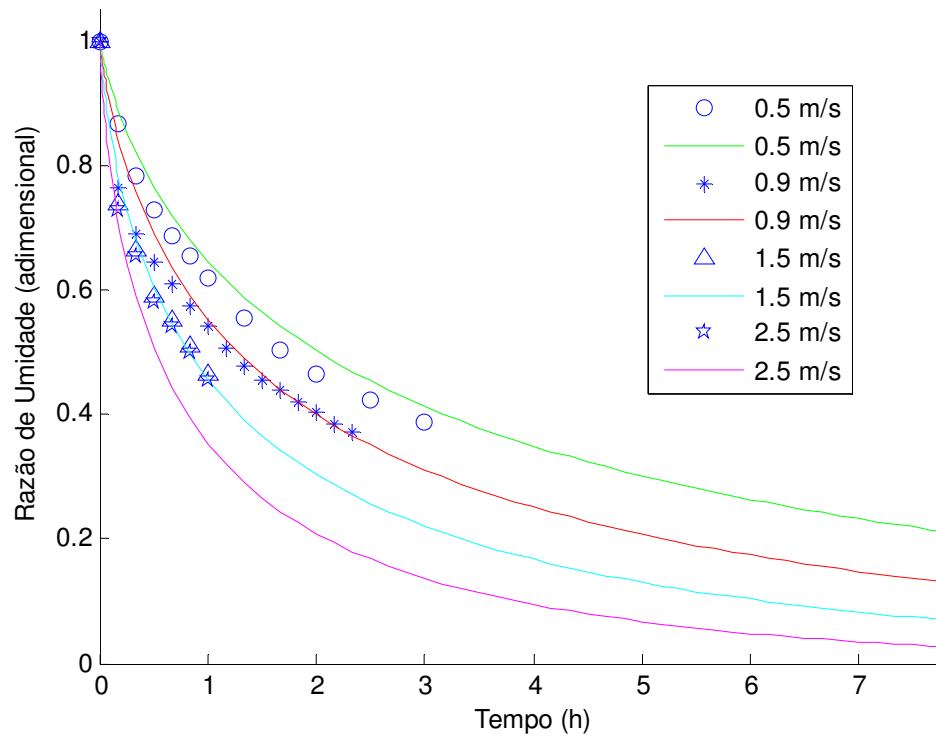
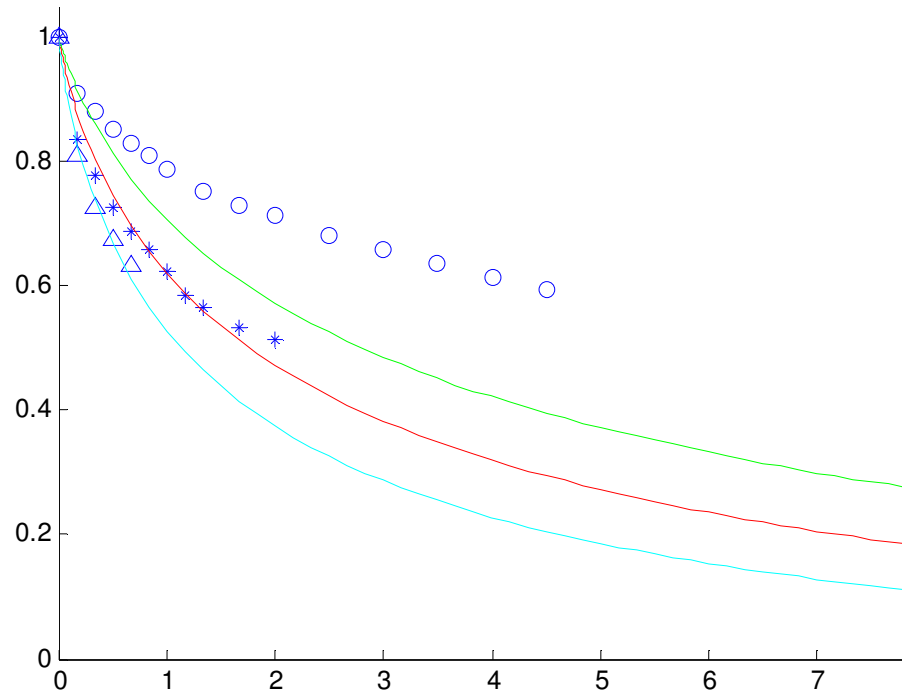


Figura 47: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 80^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$



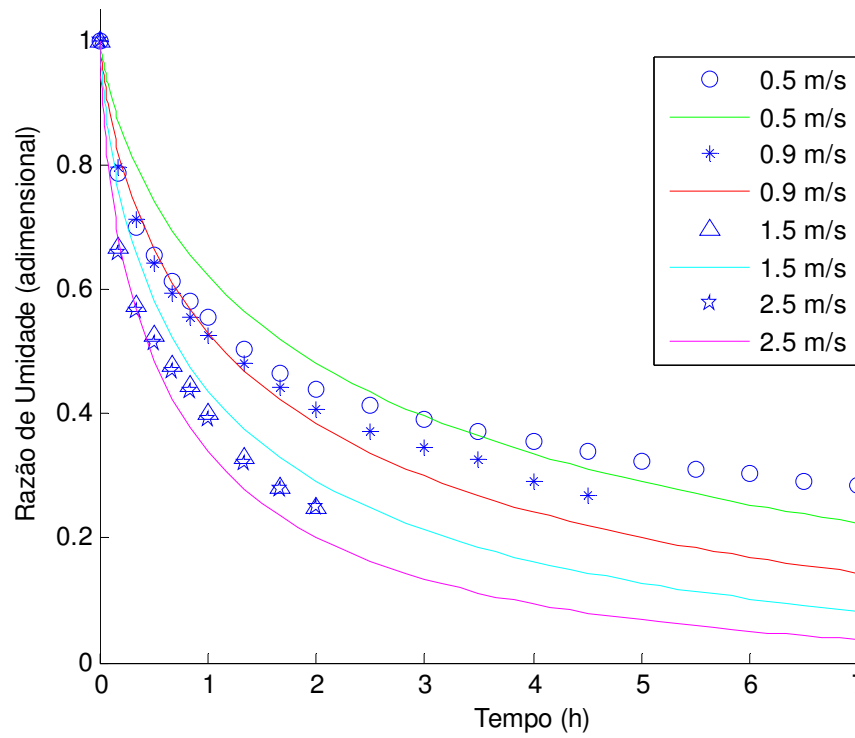


Figura 50: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,28$

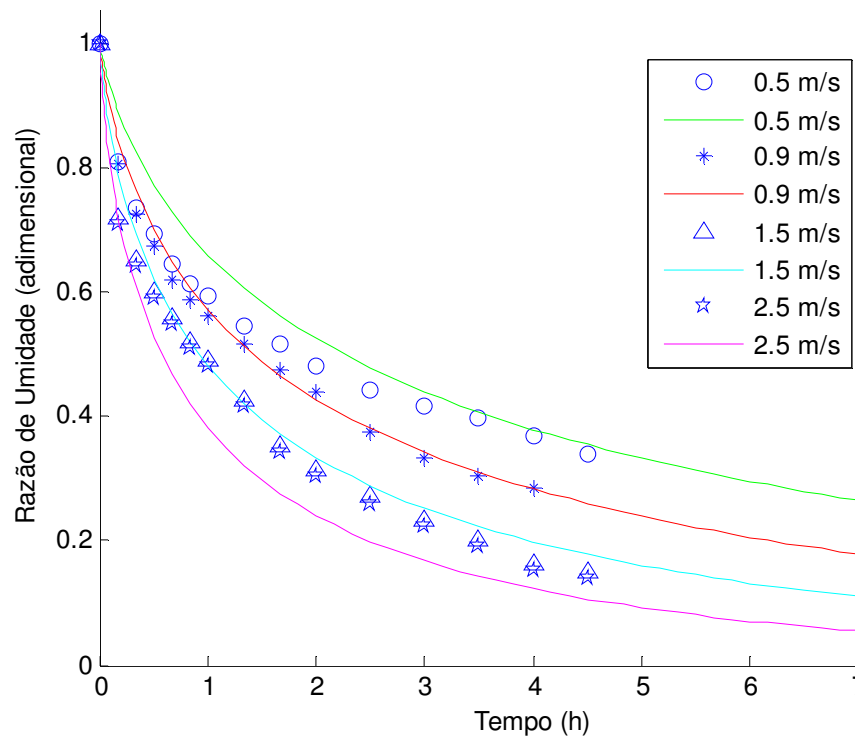


Figura 51: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$

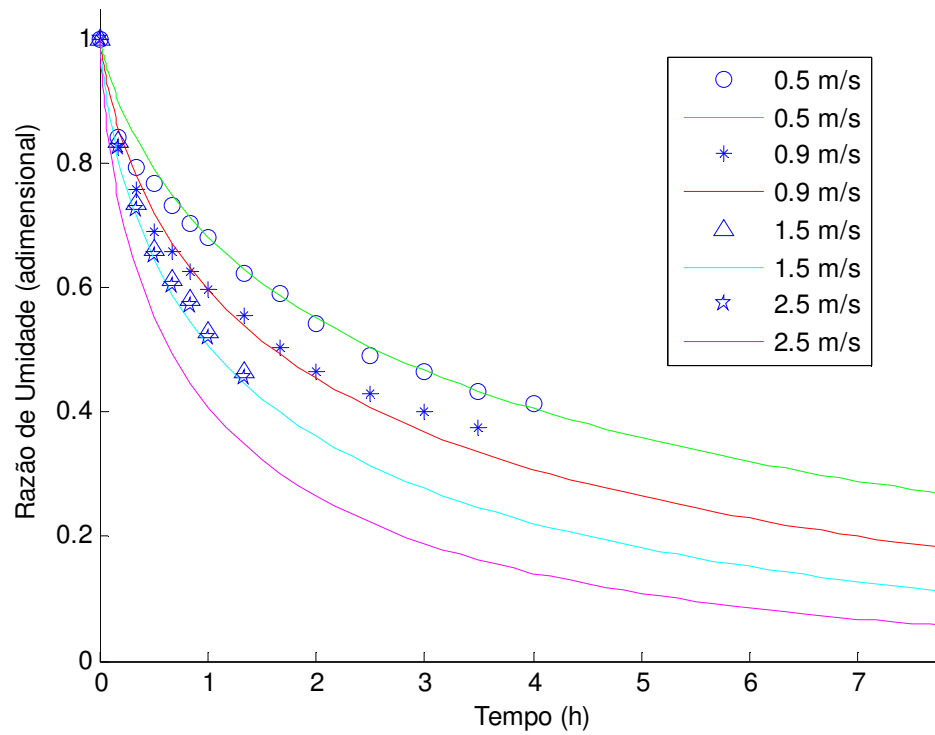


Figura 52: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,19$

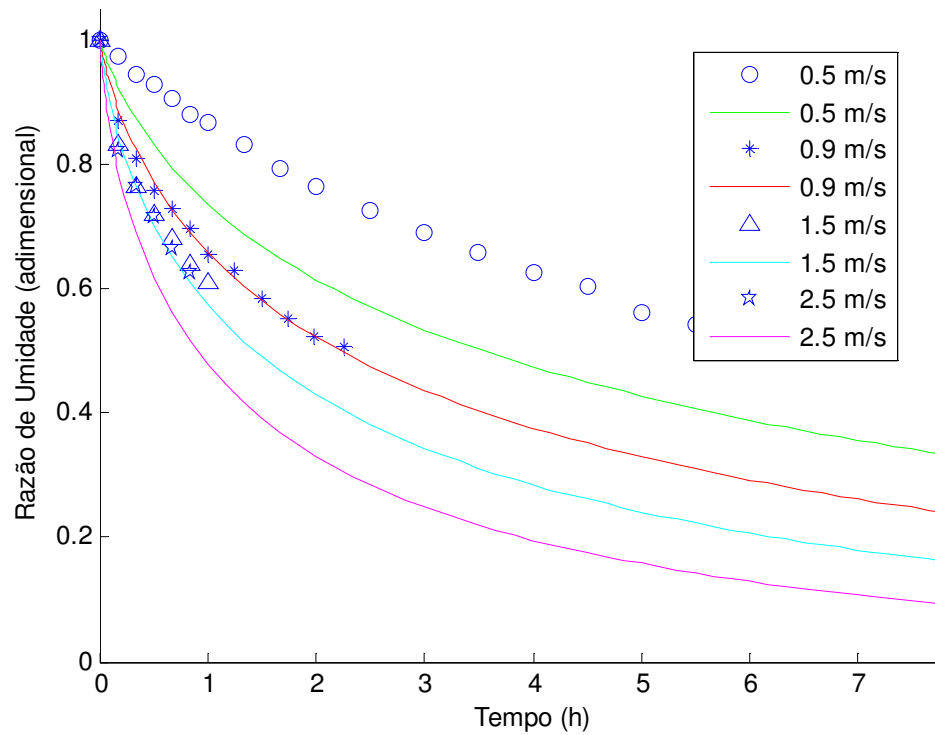
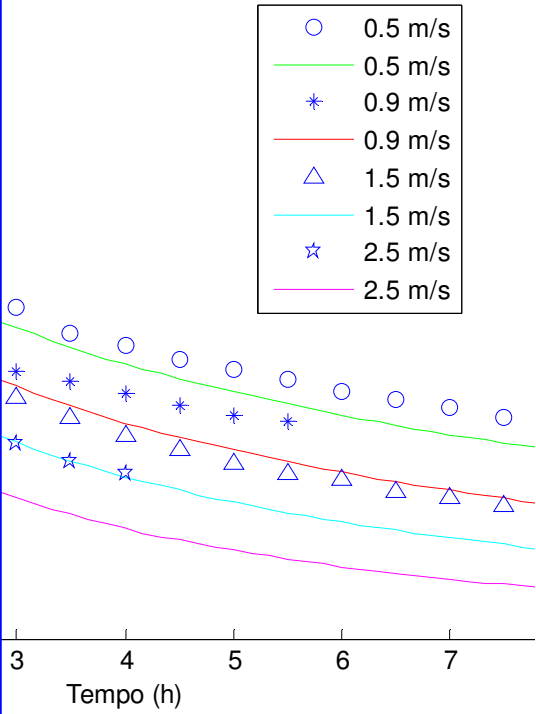
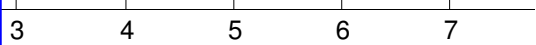


Figura 53: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 70^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$



Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$



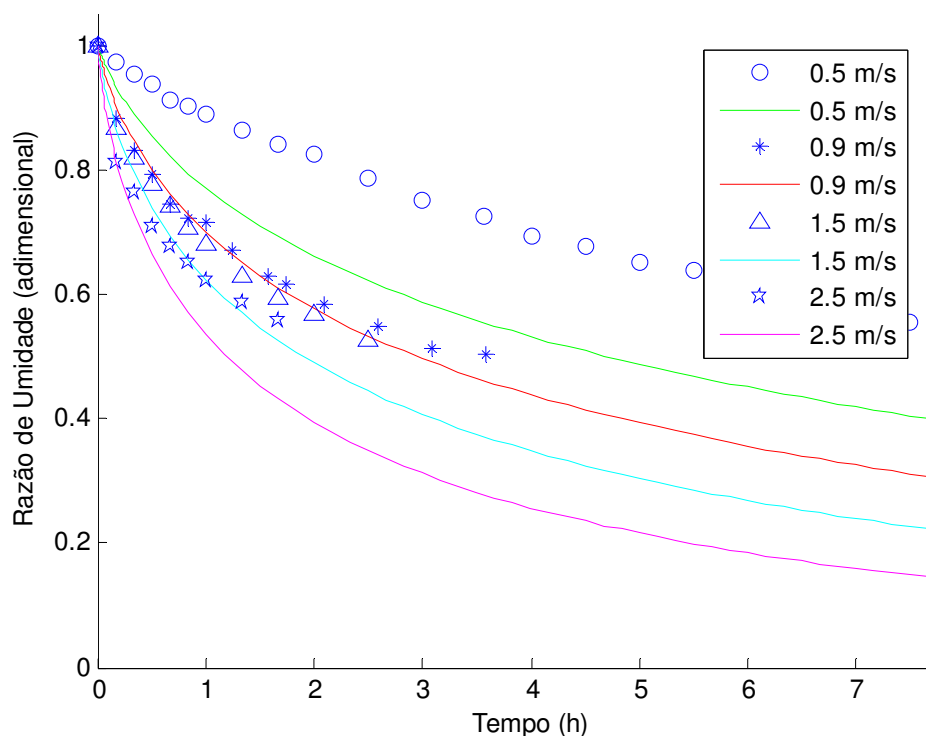


Figura 58: Dinâmica da secagem de soja - Influência da velocidade do ar. $T_s = 60^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,13$

Pôde-se verificar que na Figura 49 após duas horas de secagem o comportamento da curva experimental ficou mais lento que a curva dada pelo modelo matemático. Já nas figuras 46, 47, 48, 51, 52 e 53 a simulação não descreveu satisfatoriamente as curvas referentes às velocidades de 1,5 e 2,5m/s, o que mostra a necessidade de ajustar o modelo para que ele melhor represente os dados experimentais, já que os dados obtidos indicam uma secagem mais lenta do que aquela mostrada através da simulação numérica.

Em relação à influência da velocidade de 0,5m/s, observou-se que nas Figuras 48, 50, 53 e 58, ela não apresentou boa concordância entre dados experimentais e simulados, o que fornece o indicativo de que o modelo precisa ser melhorado, principalmente pelo fato da secagem pela simulação ocorrer mais rapidamente do que mostra os experimentos.

Na análise dos gráficos acima, fica evidenciada a influência que a velocidade do ar possui no processo de secagem, onde observa-se que este ocorre mais rapidamente para velocidades mais elevadas, comportamento observado para todos os teores de umidade iniciais e temperaturas do ar.

Outro fator importante em relação ao fluxo de ar é que quanto maior a quantidade de ar forçado que passar pela massa de grãos, mais rapidamente à frente de secagem se desloca, diminuindo o tempo de secagem e tornando o processo mais seguro (QUEIROZ et al., 1985). Isso ocorre pelo aumento do coeficiente de transferência de massa, ou seja, a elevação da

velocidade do ar acelera o processo de transferência de massa entre a superfície do grão e o ambiente.

3.1.2 Influência da temperatura do ar de secagem

As Figuras 59 a 63 mostram a influência da temperatura no processo de secagem dos grãos de soja, para a velocidade de secagem nula, ou seja, com convecção natural do ar secante, para diversos teores de umidade.

Nota-se que a influência da temperatura do ar de secagem é bem acentuada na diminuição do teor de umidade para as condições constantes de velocidade do ar de secagem. Verifica-se também que a influência da temperatura no processo de secagem também é considerável: quanto mais elevada a temperatura, mais velozmente se dá o processo de secagem. Outro fator observado é que para velocidade nula a saída de água do grão é muito lenta.

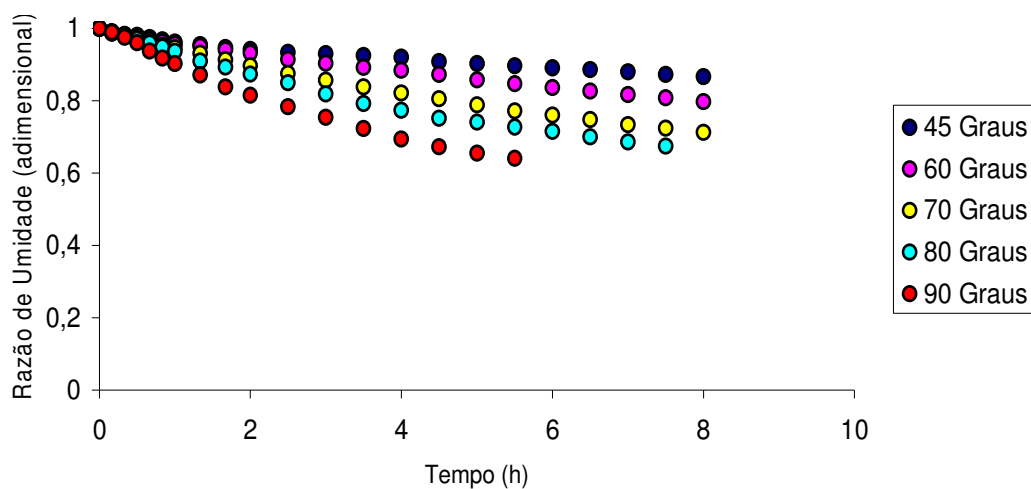


Figura 59: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,13$

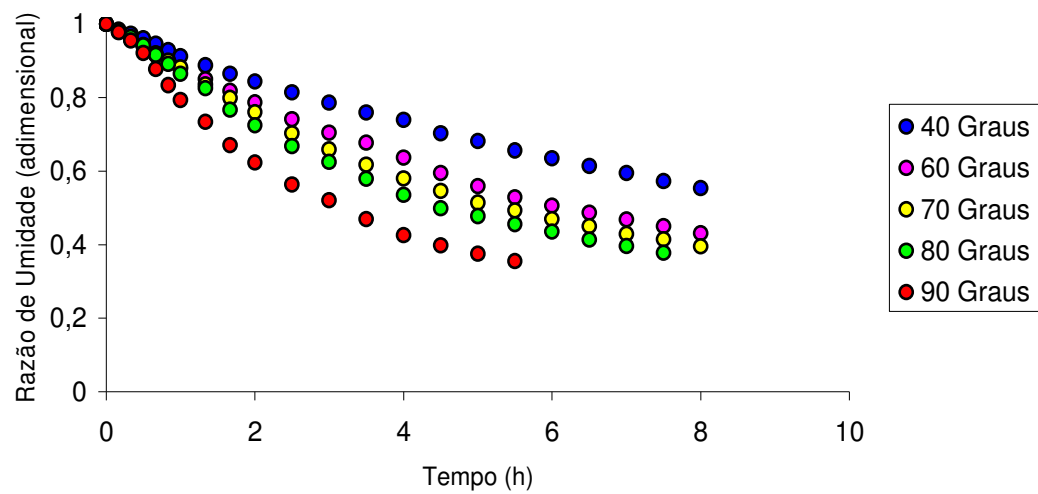


Figura 60: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,19$

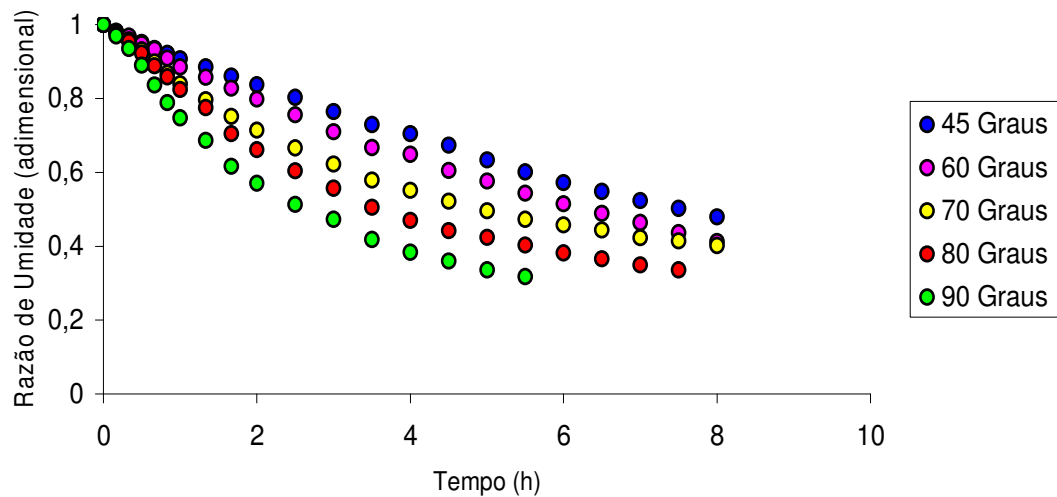


Figura 61: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,22$

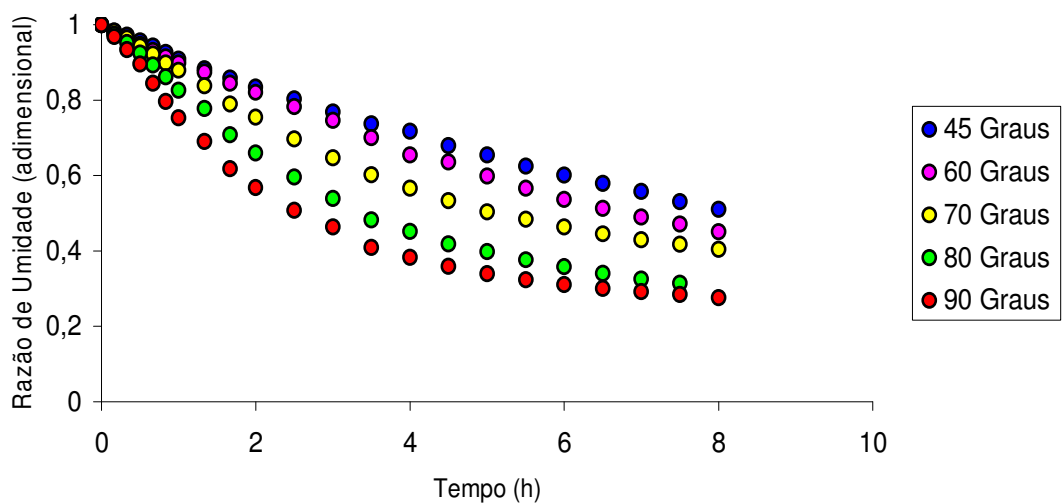


Figura 62: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0$ m/s, $X_0 = 0,28$

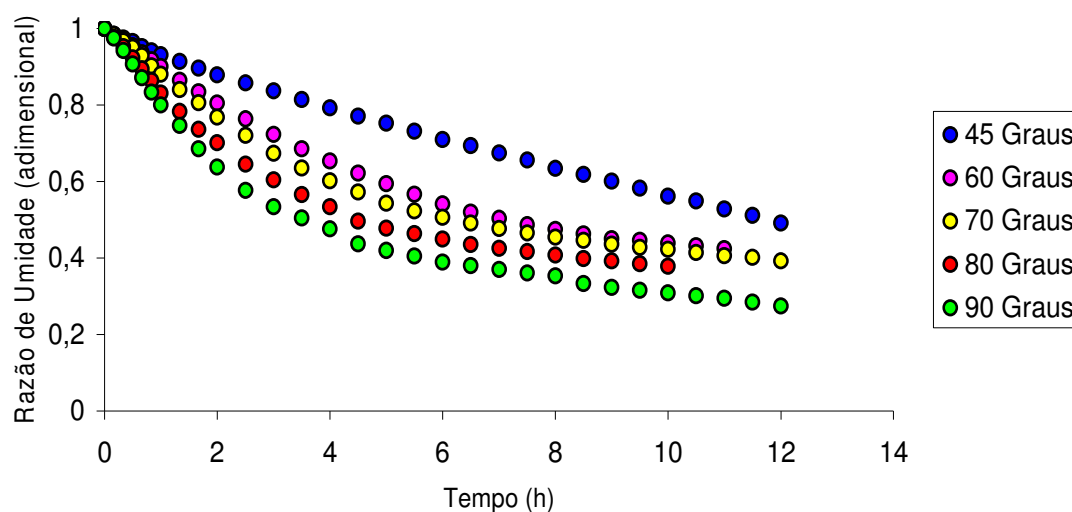
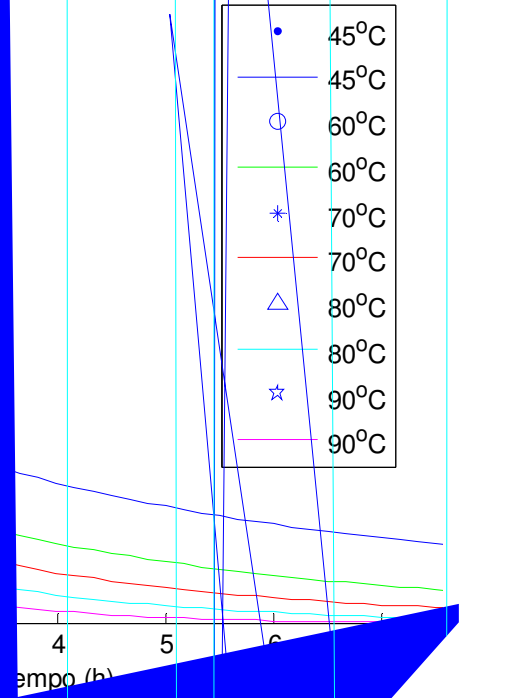


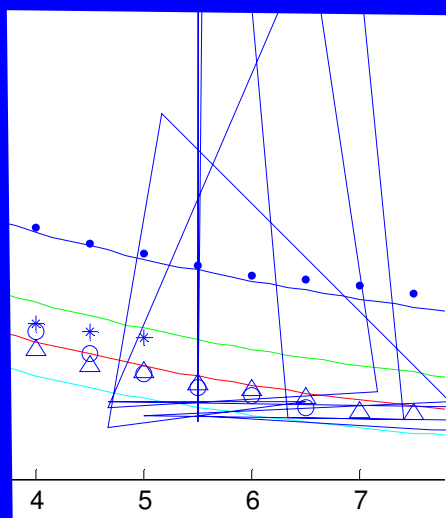
Figura 63: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,32$

As Figuras 64 a 74 apresentam as curvas de secagem com a influência da temperatura para as demais velocidades do ar de secagem. Observa-se que a velocidade de secagem aumentou com a elevação da temperatura, ou seja, foi necessário um menor tempo de exposição dos grãos de soja ao ar aquecido para atingir o teor de umidade desejado, devido a maior disponibilidade de energia para a vaporização da água. Isso acontece porque a elevação da temperatura aumenta o coeficiente de difusão de massa.

Nota-se também que no início da secagem, a evaporação de água é mais pronunciada, diminuindo ao longo do tempo, tornando-se nula ao final desta. Neste momento, os efeitos de transferência de massa tornam-se desprezíveis, quando os grãos tendem a alcançar os teores de umidade de equilíbrio.



m/s, $X_0 = 0,32$



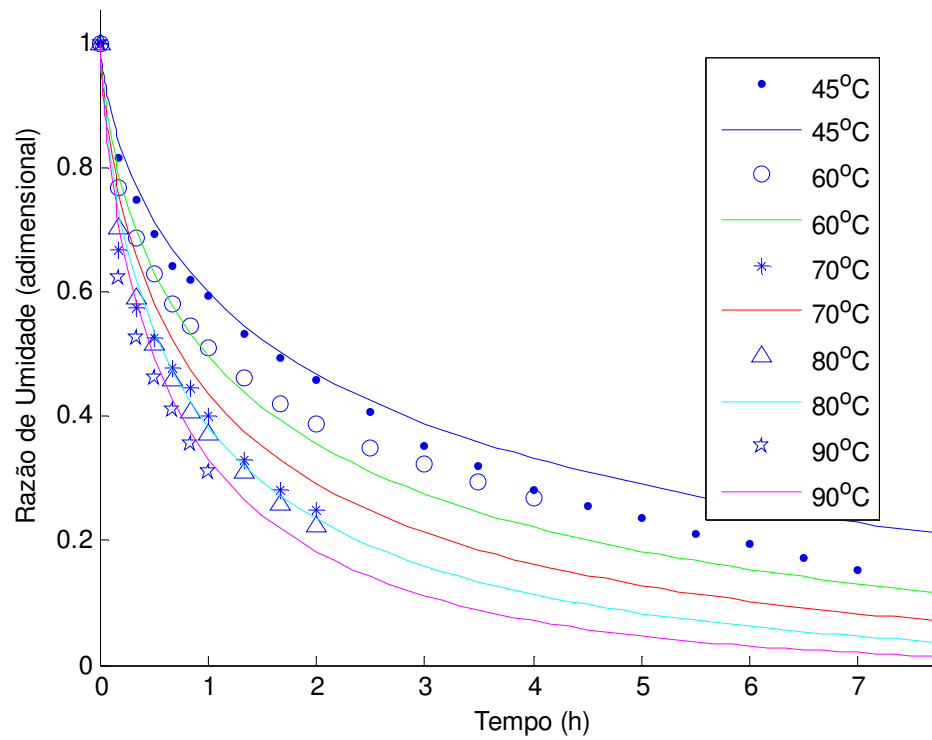


Figura 66: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,28$

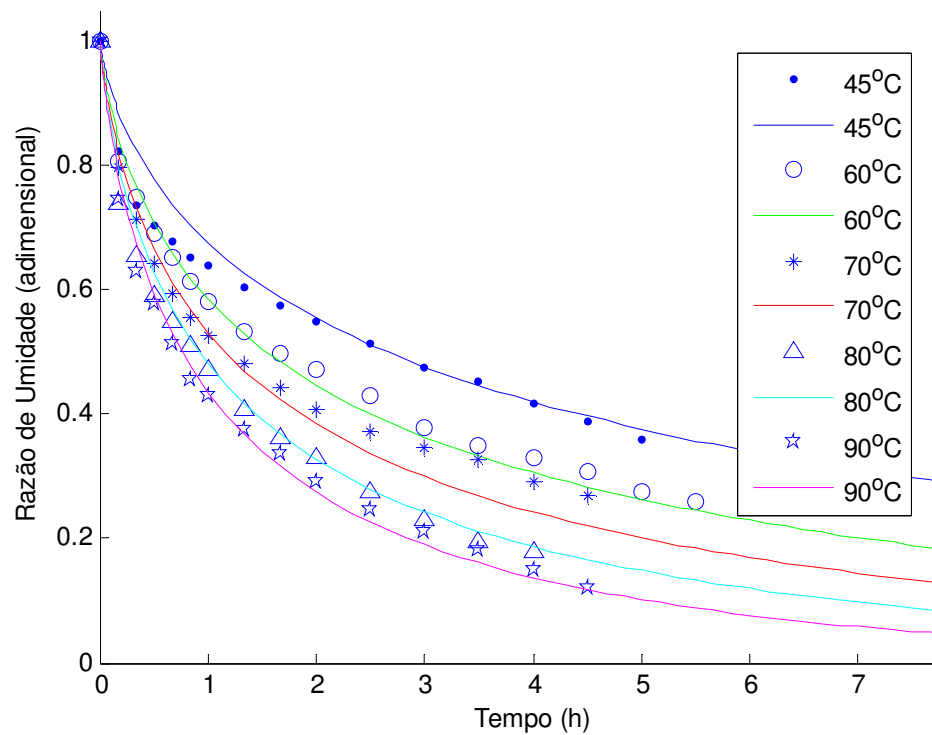


Figura 67: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,28$

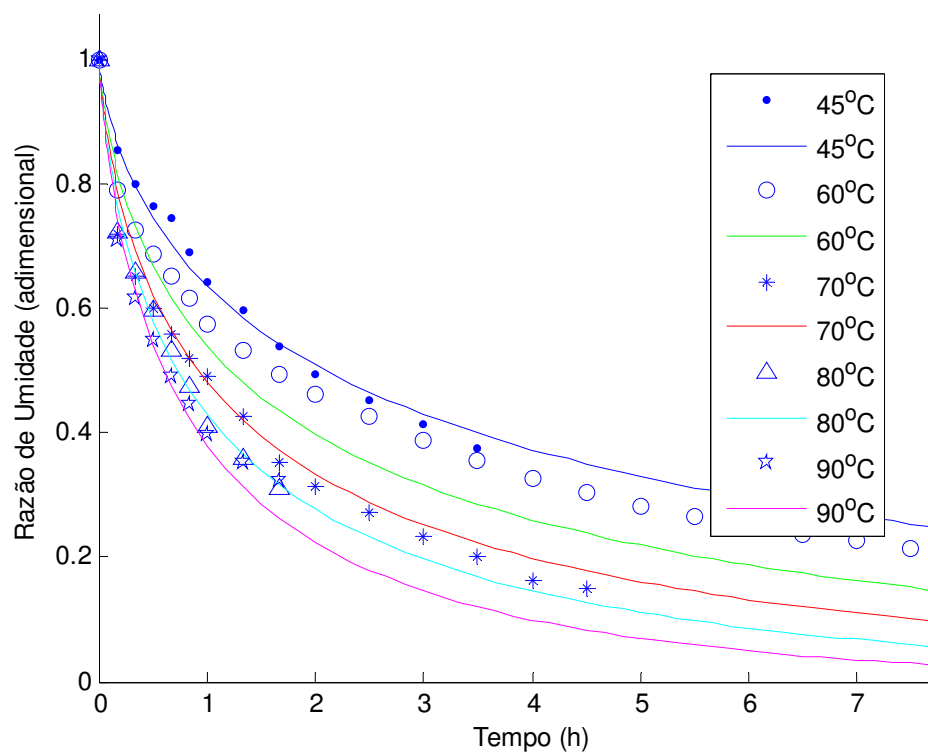


Figura 68: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,22$

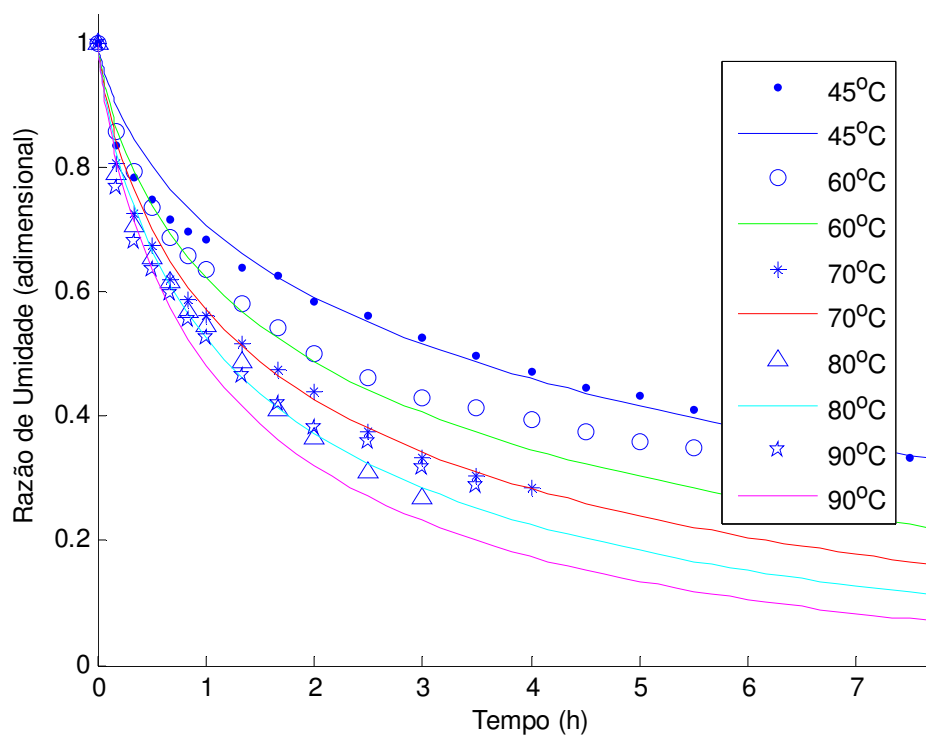


Figura 69: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,22$

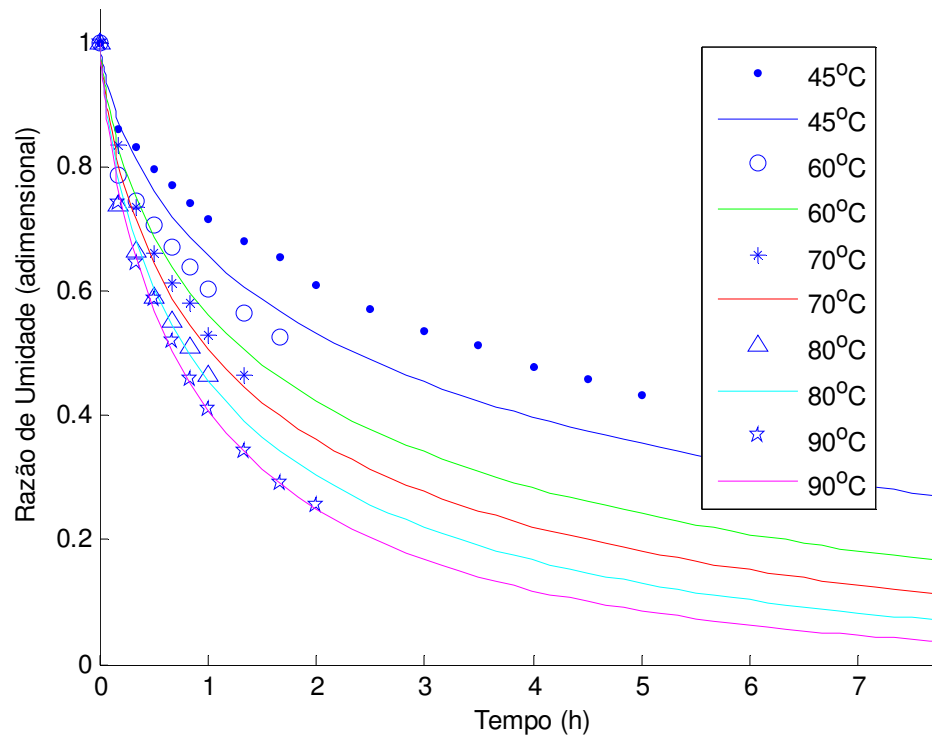


Figura 70: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,19$

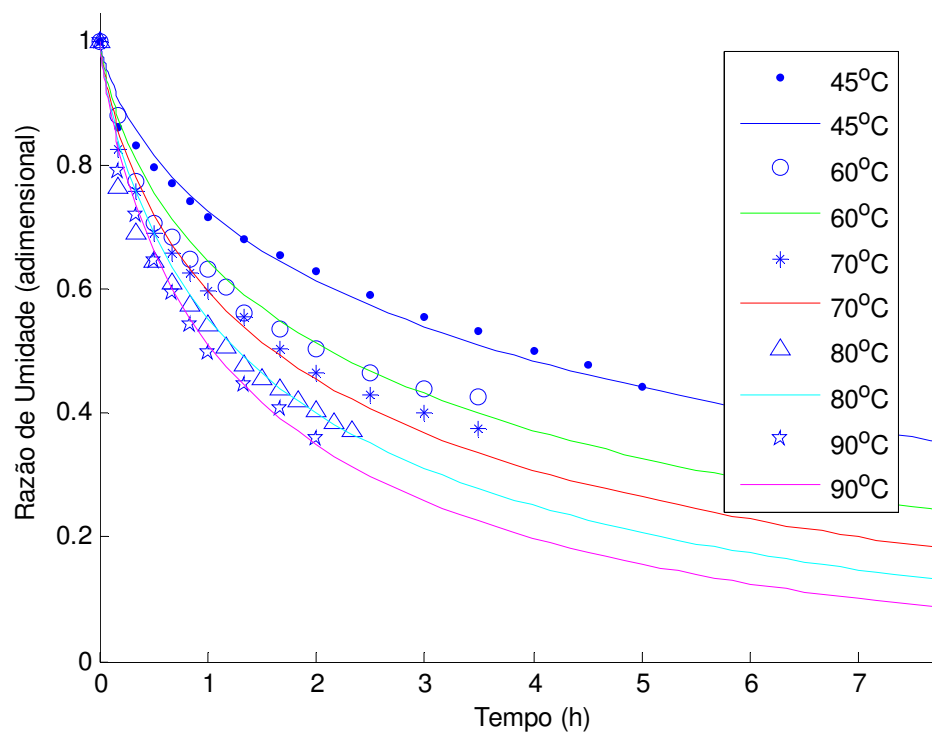


Figura 71: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,19$

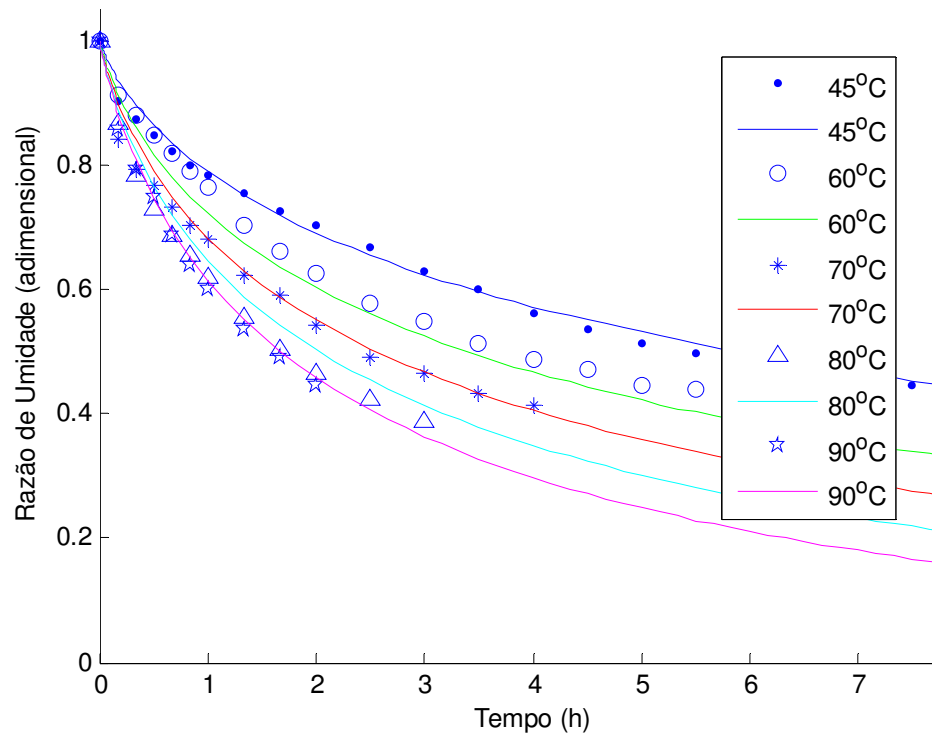


Figura 72: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 0,5 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,19$

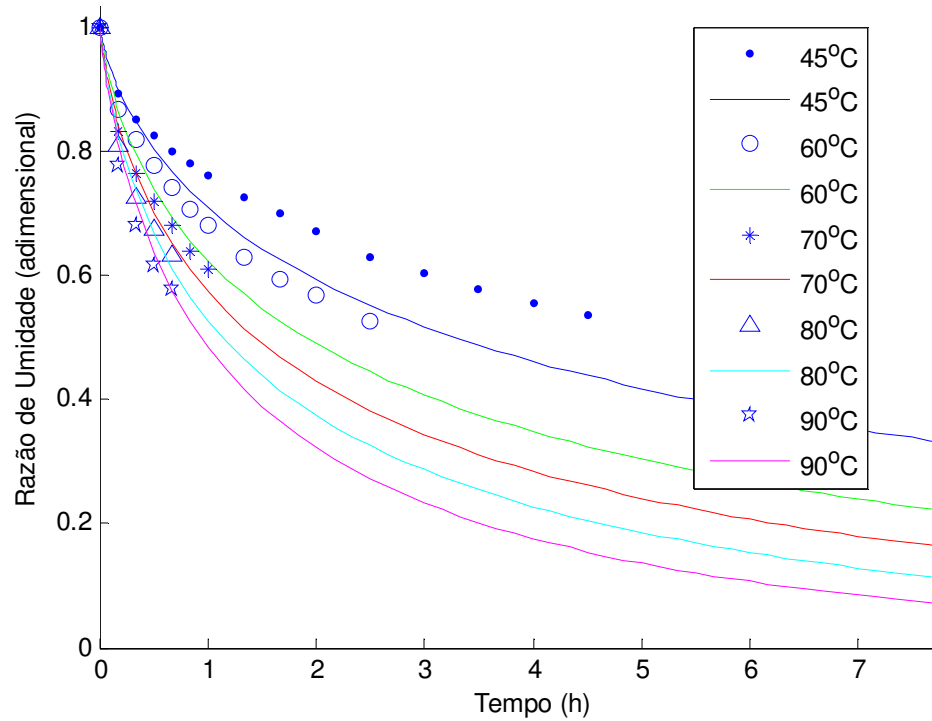


Figura 73: Dinâmica da secagem de soja - Influência da temperatura do ar. $v = 1,5 \text{ m/s}$, $X_0 = 0,13$

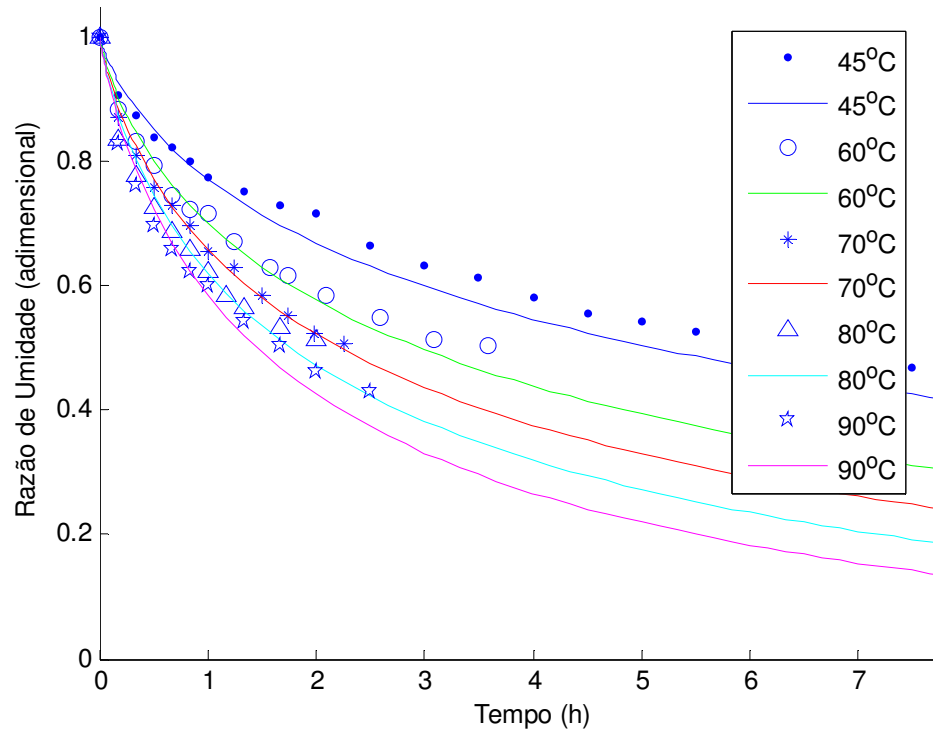


Figura 5000

teores maiores existe um maior gradiente de umidade entre o grão e o ar. Outro fator é que, quando o grão possui um alto teor de umidade, grande parte dessa água se concentra nos poros dos grãos, sendo mais fácil sua liberação. Já com baixos teores de umidade, a concentração de água nos poros é menor, sobrando a água que faz parte da composição das moléculas dos grãos, que é mais difícil de ser liberada.

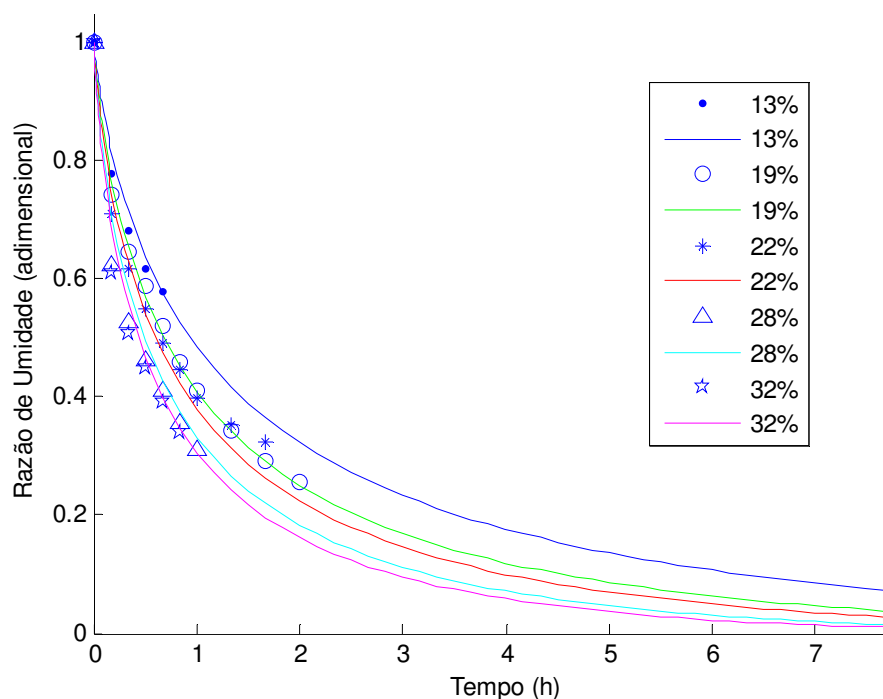


Figura 75: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5$ m/s, $T_s = 90^\circ\text{C}$

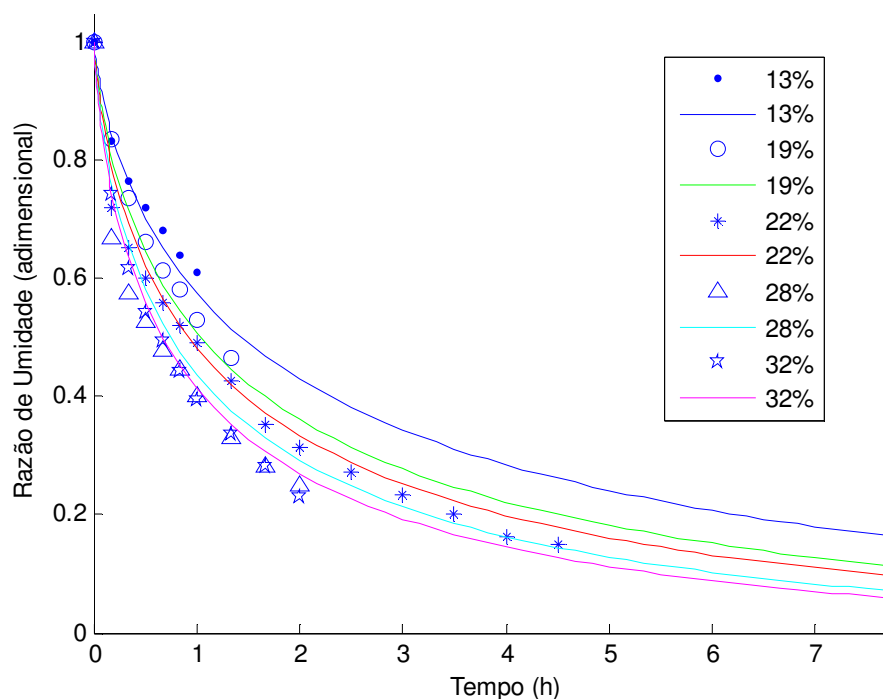


Figura 76: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5$ m/s, $T_s = 70^\circ\text{C}$

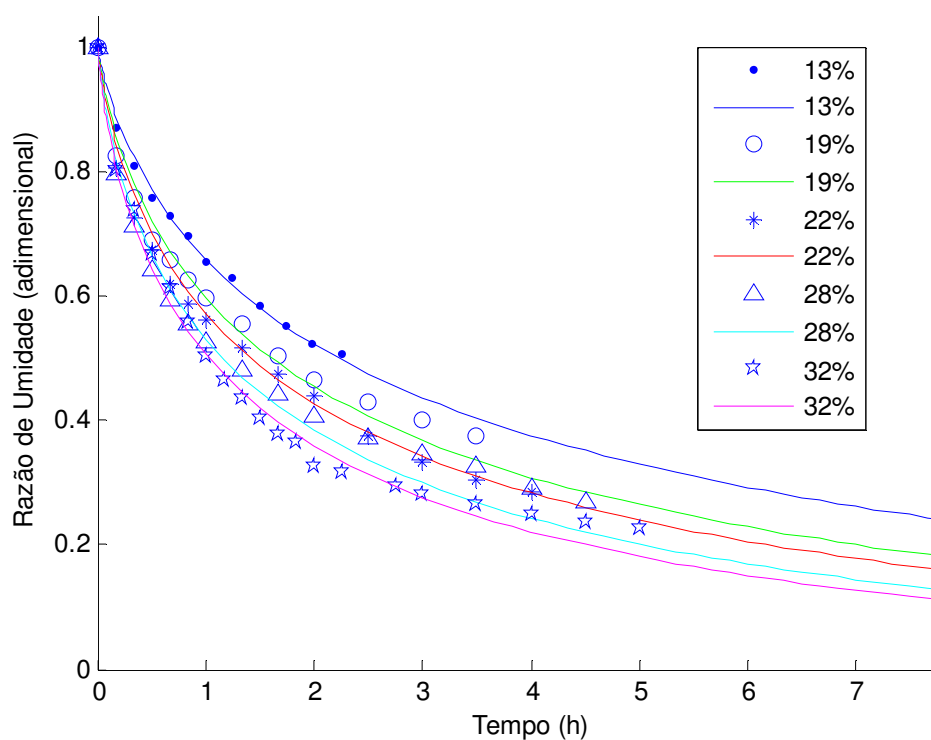


Figura 77: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $T_s = 70^\circ\text{C}$

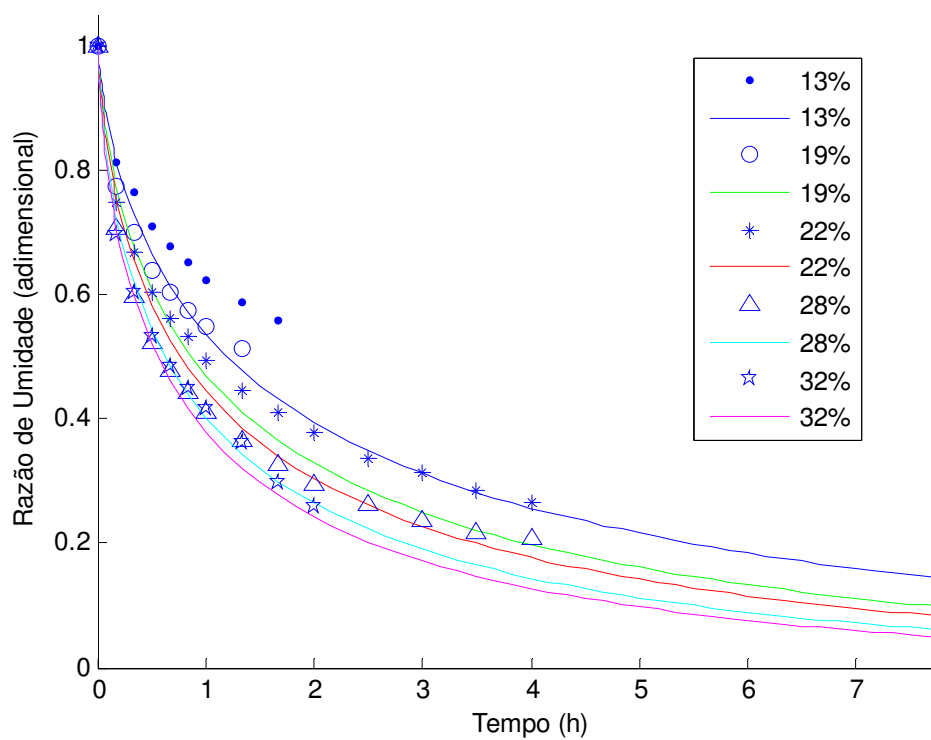


Figura 78: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 2,5 \text{ m/s}$, $T_s = 60^\circ\text{C}$

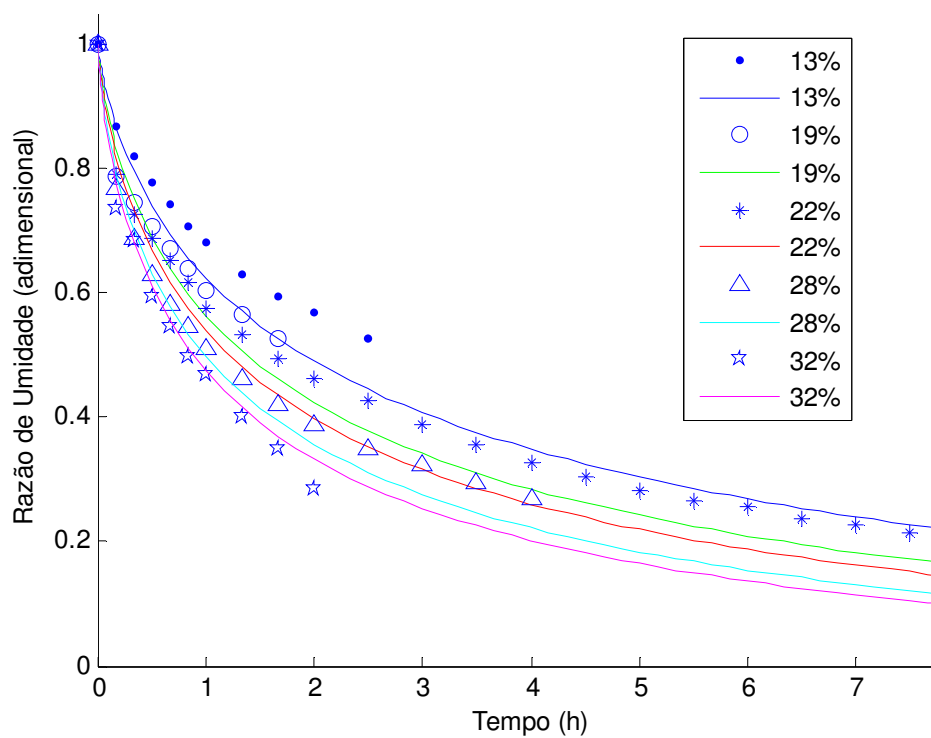


Figura 79: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 1,5 \text{ m/s}$, $T_s = 60^\circ\text{C}$

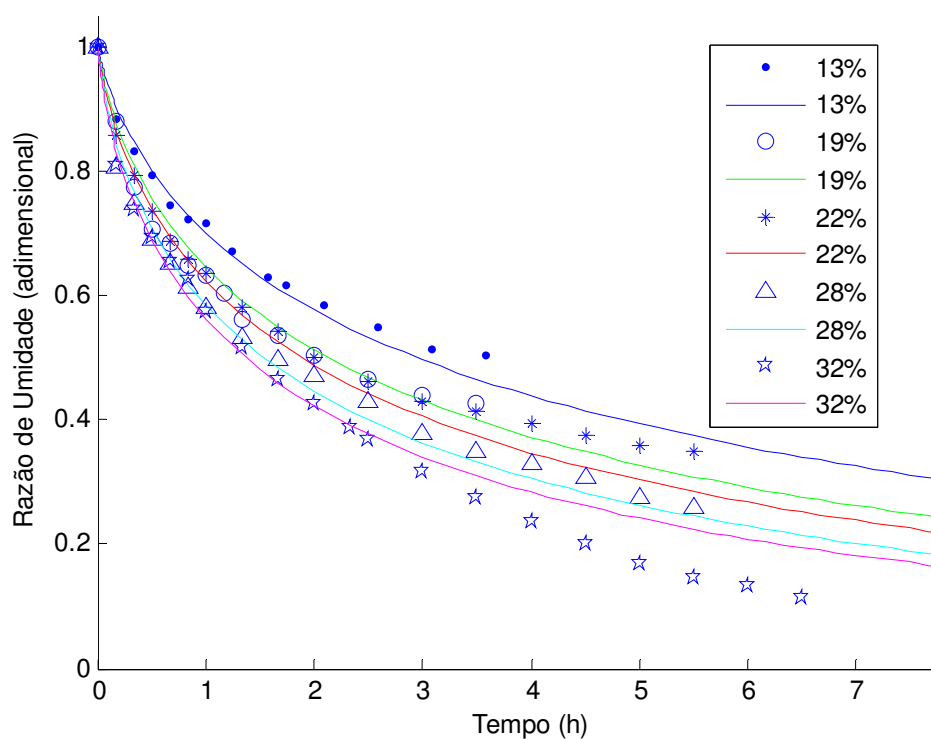


Figura 80: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $T_s = 60^\circ\text{C}$

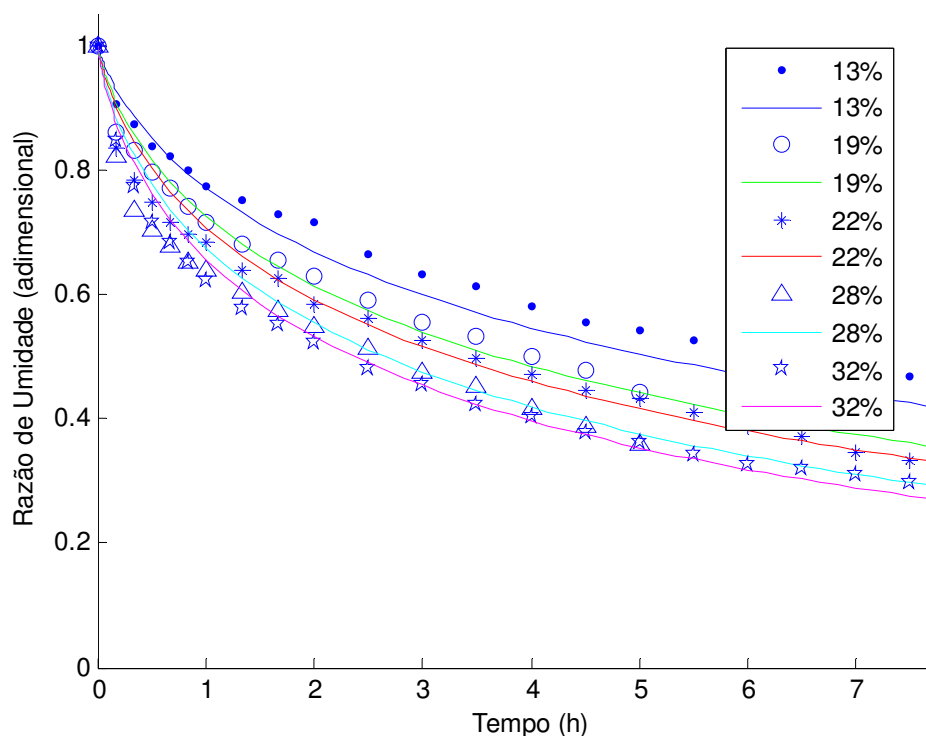


Figura 81: Dinâmica da secagem de soja - Influência do teor de umidade inicial do grão. $v = 0,9 \text{ m/s}$, $T_s = 45^\circ\text{C}$

Com o aumento da concentração de água nos grãos a taxa de secagem também aumenta, já que o coeficiente de difusão torna-se maior, principalmente para o teor de umidade de 0,32. Se o coeficiente de difusão é muito grande, a água passa mais facilmente, isto é, há um aumento da troca de massa entre o ambiente e o grão.

3.2 CURVAS DE TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem representa a velocidade de secagem do produto, isto é, a variação do teor de umidade dos grãos por tempo (dX/dt em relação à evolução do tempo (t)).

O processo de secagem é caracterizado por três períodos distintos: período de taxa crescente, período de taxa constante e período de taxa decrescente. Entretanto, para secagem de produtos agrícolas, caso da soja, o terceiro período é quase sempre o único observado, conforme mostra abaixo as figuras.

As curvas de taxa de secagem foram obtidas a partir da derivação das respectivas curvas de secagem pelo método de diferenças ($\Delta X / \Delta t$), ajustado para se obter os valores da taxa nos pontos originalmente utilizados na construção das curvas de secagem, ou seja, para calcular a taxa no ponto i , faz-se (MOTTA LIMA et. al, 2001):

$$\text{Calcular } \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{i_-} \text{ entre } i-1 \text{ e } i; \quad (3.2)$$

$$\text{Calcular } \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{i_+} \text{ entre } i \text{ e } i+1; \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_i = \frac{\left[\left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{i_-} + \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{i_+} \right]}{2} \quad (3.4)$$

$$\text{em } X_0 : \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{0_+} + \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{1_-} \quad (3.5)$$

$$\text{em } X_e : \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right)_{X_e^-} \quad (3.6)$$

As Figuras 82 e 83 apresentam as curvas de taxas de secagem para alguns dos processos experimentais efetuados.

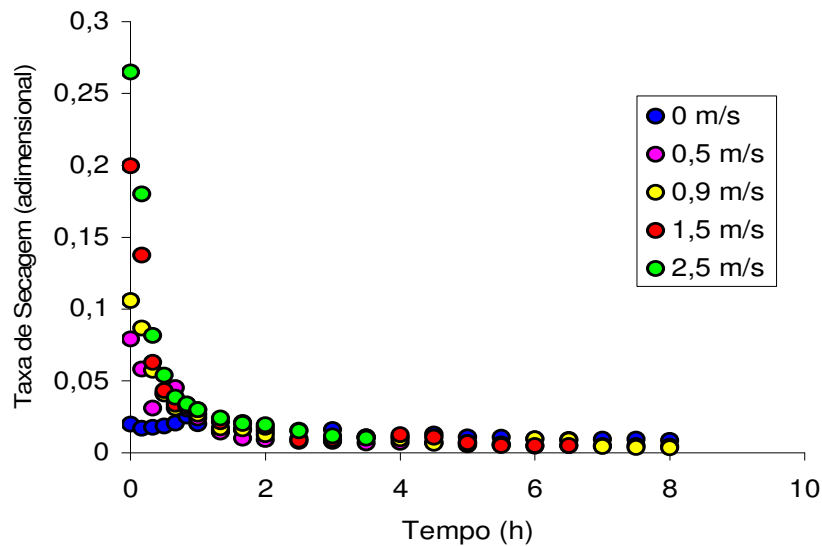
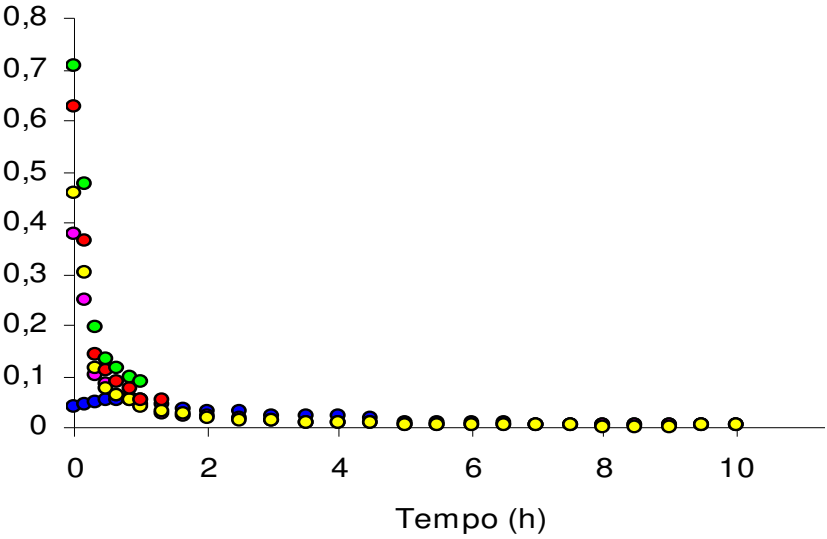


Figura 82: Taxa de secagem - $T_s = 45^\circ\text{C}$, $X_0 = 0,22$



CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados obtidos têm-se, para as condições utilizadas neste trabalho, as seguintes conclusões:

A metodologia experimental empregada mostrou-se adequada para atingir os objetivos da pesquisa. Verificou-se que os dados obtidos apresentaram uma concordância satisfatória com aqueles fornecidos pela literatura, o que demonstra a confiabilidade dos experimentos aqui analisados.

Com o estudo do processo de secagem de soja em camada fina em secador de leito fixo, verificou-se que a secagem é significativamente afetada pelos parâmetros velocidade e temperatura do ar de secagem e teor de umidade inicial dos grãos de soja.

Pode-se observar que a velocidade do ar de secagem apresenta significativa influência no processo, observando-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Verifica-se que a dinâmica de secagem dos grãos de soja mostra uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar, característica presente na maioria dos produtos agrícolas. Nota-se que a influência da temperatura do ar na taxa de secagem é maior no princípio do experimento, diminuindo com o tempo de processamento.

Após as primeiras horas, a secagem apresentou velocidade decrescente, devido ao transporte interno da água ser menor do que a taxa de evaporação; assim, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e, portanto, há aumento da temperatura do produto. A velocidade de secagem depende da temperatura, umidade relativa e fluxo do ar, do tempo de exposição a estas condições, dos teores de água inicial e final, de características dos grãos e das propriedades da interface grão-ar. Quanto mais elevada a temperatura e o fluxo de ar, maior a velocidade de secagem e menor o tempo total de exposição ao ar aquecido.

Assim, os mais elevados tempos de secagem foram obtidos para a velocidade de 0 m/s (secagem na estufa) e os menores para 2,5 m/s. Da mesma forma, observou-se que o maior tempo de secagem, para todos os teores de umidade, ocorreu a 45°C, e o menor a 90°C, havendo efeito decrescente no tempo de secagem à medida que acontece a elevação na temperatura do ar. Isso ocorre devido ao aumento do potencial de secagem em decorrência do aumento da temperatura do ar, ocasionando diminuição da umidade relativa do ar de secagem.

Em relação à concentração de água no grão verificou-se que o seu aumento acarreta uma elevação do coeficiente de difusão, o que faz com que a taxa de secagem torne-se maior, pois a água sai mais facilmente do grão.

Quanto ao modelo matemático utilizado nesta pesquisa, foi modificado aquele proposto por Khatchatourian (2003), onde aqui foi alterada a equação que descreve a transferência de massa, a fim de incorporar as variáveis velocidade do ar de secagem e teor de umidade inicial do grão, de forma a tornar mais satisfatória a simulação em relação ao dados experimentais.

A alteração proposta no modelo mostrou-se adequada visto que verificou-se que a velocidade do ar de secagem é um parâmetro muito importante e que se faz indispensável dentro do modelo matemático. Conforme mostraram as análises realizadas, ela é significativa dentro do processo de secagem, o que mostra a necessidade de usá-la nas simulações.

A análise da secagem em camada fina de grãos de soja com base no modelo proposto apresentou a necessidade de melhorar as equações no que diz respeito às curvas de 0,5 m/s, que foram as que apresentaram menor concordância entre dados experimentais e simulados. Por este motivo, já está se trabalhando em outro modelo que melhor descreve o processo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de Modelos Matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 349-53, 1999.
- AL-YAHYA, S.A.; MOGHAZI, H. Static pressure drop through barley grain. **Canadian Agricultural Engineering**, [S.I.], v. 40, n. 2, p. 213-7, apr. 1998.
- ANDRADE, E.T. et al. Distribuição de temperatura em grãos armazenados em silos: modelagem por elementos finitos. **Revista Brasileira de Armazenagem**. Viçosa, v. 26, p. 28-35, 2001.
- ANUÁRIO Brasileiro da Soja. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2005.
- ARNOSTI JUNIOR, S. **Análise da influência da velocidade e temperatura do fluido na secagem de sementes em leito deslizante e escoamentos cruzados**. São Carlos: UFSCar, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 1993.
- ATHIÉ, I. et al. **Conservação de Grãos**. Campinas: Fundação Cargill, 1998.
- BAKKER-ARKEMA, F.W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S.I.], v.30, p.1-22, 1984.
- BAKKER-ARKEMA, F.W. High-temperature grain drying. In: Simpósio Internacional de Conservação de Grãos, 1993, Canela. **Anais**. Canela: CESA/FAO, 1994. 163-76.
- BARROZO, M.A.S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados**. São Carlos: UFSCar, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 1995.
- BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Campinas: UNICAMP, 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1987.
- BIAGI, J.D.; VALENTINI, S.R.T.; QUEIROZ, D.M. Secagem de produtos agrícolas. In: CORTEZ, L.A.B.; MAGALHÃES, P.S.G. (coord.). **Introdução à engenharia agrícola**. Campinas: Unicamp, 1992.
- BORGES, P.A.P. **Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária **Regras para análise de sementes**. Brasília: 1992.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKENA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Publishing Company, 1992.

BRUBAKER, J.E.; POS, J. Determining static coefficient of friction of grains on structural surfaces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, [S.I.], 1975.

CARLESSO, V.O. et al. Secagem de Sementes de Maracujá em Camada Delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.27, n.3, p. 444-8, dez. 2005.

CARNAHAM, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J.O. **Applied numerical methods**. New York: John Wiley, 1969.

CARNEIRO, L.M.T.A. **Antecipação da colheita, secagem e armazenagem na manutenção da qualidade de grãos e sementes de trigo comum e duro**. Campinas: UNICAMP, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. **As Faces da Física**. São Paulo: Moderna, 2001.

CARUSO, R. **Soja: Uma caminhada sem fim**. Campinas: Fundação Cargill, [S.d.].

CARVALHO, N.M. **A Secagem de Sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994.

CASSINI, A.S. **Análise das características de secagem da proteína texturizada de soja**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. Piracicaba: USP, 1996. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), ESALQ, Universidade Estadual de São Paulo, 1996.

CHANDRA, S.; MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.14, n. 4, p. 644-6, 1971.

CHITTENDEN, D.H.; HUSTRULID, A. Determining drying constant for shelled corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 9, n. 1, p. 52-5, 1966.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, [S.I.], p. 549-51, 1967.

CORSO, J. **Modelagem matemática do processo de secagem de soja em secador contínuo de leito fixo**. Ijuí: UNIJUÍ, 1998. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 1998.

COSTA, N. P. et al. Perfil dos aspectos físicos, fisiológicos e químicos de sementes de soja produzidas em seis regiões do Brasil. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.27, n. 2, p.1-6, 2005.

COURTOIS, F.; LASSERAN, J.C. A CAD Software to improve the heat energy efficiency of mixed-flow maize dryers. **CESA/FAO Latin American Technical Meeting of Grain Drying a Storage**, p. 18-22, 1993.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2.ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.

DALPASQUALE, V.A. **Drying of soybeans in continuous-flow dryers and fixed-bed drying systems**. Michigan: 1981. Tese (Ph.D), Michigan State University, 1981.

DAY, C.L. Device for measurement voids in porous materials. **Agricultural Engineering**. [S.I.], v. 45 (1), p. 36-7, 1964.

EMBRAPA Soja. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. CD-ROM.

FARLOW, S. J. **Partial differential equations for scientists and engineers**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1984.

FISCHER, L. **Estudo teórico/experimental da dinâmica da secagem de soja em camada fina**. Ijuí: UNIJUÍ, 2003. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2003.

GARCIA, D.C. et al. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, mar.-abr. 2004. Disponível em: < <http://www.scielo.br> > Acesso em 6 out. 2005.

GOEDEKEN, D.L.; SHAH, K.K.; TONG, C.H. True Thermal Conductivity Determination of Moist Porous Food Materials at Elevated Temperatures. **Journal of Food Science**, [S.I.], v. 63, n. 6, p. 1062-6, 1998.

GOMES, P. **Soja**. São Paulo: Nobel, 1975.

GUARIENTI, E. **Qualidade industrial de trigo**. 2.ed. Passo Fundo: Embrapa, 1996.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publishing Company, 1980.

HARRINGTON, J.F. Seed storage and logevity. In: KOZLOWSKI, T.T. **Seed biology**. New York : Academic, 1972. v.3.

HAWARD HUNT, W.; PIXTON, S.W. **Moisture, It's Significance, Behavoir and Measurement, In Storage of Cereal Grains and Their Products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974.

HELDMANN, D.R.; HARTEL, R.W. **Principles Shl(P)ood120d (P)11(roc2(e)-2(e)4(s))4(s)in**

LASSERAN, J.C. The drying of grains-principles, equipment, energy savings and fire safety. In: MULTON, J.L. **Preservation and storage of grains, seeds and their by-products**. Paris: Tec & Doc-Lavoisier, 1988.

LÓPEZ, A.; PIQUÉ, M.T.; ROMERO, A. Simulation of deep bed drying of hazelnuts. **Drying Technology** v. 16, n. 3-5, p.651-65, 1998.

LUYKOV, A.V. **Transferência de calor e de massa nos processos de secagem**. Moscou: Estatal de Energia, 1956.

MAGEE, T.R.A.; BRANSBURG, T. Measurement of Thermal Diffusivity of Potato, Malt Bread and Wheat Flour. **Journal of Food Engineering**, [S.I.], v. 25, p. 223-32, 1995.

MANDHYAN, B.L.; PRASAD, S. Effect of Particle Size, Moisture Content, Pressure and Temperature on the Physical and Thermal Properties of Soybean. **Journal of Food Science Technology**, [S.I.], v. 31, n. 5, p. 395-9, 1994.

MARTINS, R.R. **Secagem intermitente com fluxo cruzado e altas temperaturas e sua influência na qualidade do trigo duro (*Triticum durum* L.)**. Campinas: UNICAMP, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

MATA, M.E.R.M.C.; DANTAS, L.A.; BRAGA, M.E.D. Programa Computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 33-50, 1999.

MILLER, E.E.; MILLER, R.D. Theory of capillary: I. practical implications. **Proc. Soil Science Society American**, [S.I.], v. 19, p. 267-71, 1975.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach Science Publishers, 1980.

MOTTA LIMA, O.C. et al. Secagem condutiva/conectiva de celulose fibra longa com ar ambiente em convecção forçada. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1389-99, 2001.

MOTTA, W.A. **Adaptação do método contínuo de secagem para sementes de arroz**. Pelotas: UFPel, 1997. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes), Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 1997.

MURATA, S.; TAGAWA, A.; ISHIBASHI, S. The effect of moisture content and temperature on specific heat of cereal grains measured by DSC. **Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery**. v. 46, n. 6, p. 547-54, 1987.

MUIR, W.E.; VIRAVANICHAL, S. Specific heat of wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 17, p. 338-42, 1972.

NELIST, M.E.; HUGHES, M. Physical and biological processes in the drying of seed. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 1, n. 1, p. 613-43, 1973.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.B. **Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado**. São Carlos: UFSCar, 2003, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2003.

ÖZISIK, M.N. **Heat conduction**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

PARRY, J.L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 32, p. 1-29, 1985.

PAVANI, O.D. **Grãos, estudo da armazenagem e do manuseio**. Óleos e Grãos. [S.I.], 1992.

PERES, R.M.N. A Física de Materiais Unidimensionais. In COLÓQUIO DE FÍSICA DO INSTITUTO POLITÉCNICO DE TOMAR: A Física no Século XXI, 2, 2001, Tomar. **Anais**. Tomar: Instituto Politécnico de Tomar, 2001 [S.p.].

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. **Manual de Engenharia Química**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1980.

PETRY, V.J. **Modelagem Matemática do Processo de Secagem de Soja em Secadores de Leito Fixo**. Ijuí: UNIJUÍ, 2000. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2000.

PHILIP, J.H.; DE VRIES, D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient. **Trans. Am. Geophys**, Union, v. 38, n. 2, p. 222-32, 1957.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília: AGIPLAN, 1985.

PORTELLA, J.A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de Grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001.

PRADO, M.M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. São Carlos: UFSCar, 2004, Tese (Doutorado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2004.

PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO, E.C. **Modelos Matemáticos de Simulação de Secagem de Grãos**. Viçosa: Centreinar, 1985.

QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; MELO, E.C. **Prática de simulação de secagem em calculadoras programáveis**. Viçosa: Centreinar, 1982.

SARTORI, J.A. **Qualidade dos grãos de milho após o processo de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

SAUSEN, **Estabilidade do método de MacCormack com esquema time-split para aplicação em modelo matemático de secagem em fluxo cruzado**. Ijuí: UNIJUÍ, 2004. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2004.

SHEDD, C.K. Resistance of grains and seeds to airflow. **Agricultural Engineering**, [S.I.], v. 34, n. 9, p. 616-9, 1953.

SILVA, L.C. **Armazenagem de Grãos**. Disponível em: <<http://www.agais.com/armgraos.htm>> Acesso em 12 jan. 2006.

SILVA, L.C. **Secagem de grãos**. Disponível em: <<http://www.agais.com/secgraos.htm>> Acesso em 12 jan. 2006.

SILVA, J.S.E. **Pré-Processamento de Produtos Agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995.

SOARES, J.B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (Glicine max L.)**. Viçosa: UFV, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 1986.

SOUSA, L.V.S. **Propriedades físicas de grão de girassol relacionadas à armazenagem**. Campinas: UNICAMP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

SRIVASTAVA, K.A.; GOERING, E.C.; ROHRBACH, P.R. Engineering Principles of agricultural machines. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, n.6, 576p. Jun. 1993.

SWEAT, V.E. Thermal properties of foods. In: **Engineering Properties of Foods**. Ch.2. New York: M.A. Rao & S.S.H. Rizhvi, Marcel Dekker, 1986.

TAVMAN, S.; TAVMAN, I.H.; EVCIN, S. Measurement of Effective Thermal Conductivity of Wheat as a Function of Moisture Content. **International Communicator in Heat and Mass Transfer**, USA, v. 25, n. 5, p. 733-41, 1998.

THE SOLAE COMPANY. **Fundamentos da Soja.** Disponível em: <<http://www.solae.com.br/soyessentials.html>> Acesso em 13 abr. 2006.

THOMPSON, T.L; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-6, 1968.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Secagem a altas temperaturas.** Disponível em: <<http://www.deg.ufla.br/Armazem/SecagemAltaTemperatura/htm>> Acesso em 12 jun. 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Departamento de Engenharia Agrícola. **Energia na Agricultura: Secagem e Armazenagem.** Disponível em: <<http://www.agridata.mg.gov.br/racenerg.htm>> Acesso em 6 out. 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURES USDA. **Handbook of the nutritional contents of foods.** New York: Dover Publications, 1975.

VILLELA, F.A.; SILVA, W.R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 49, n. 1, p. 145-53, 1992.

VILLELA, F.A. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho.** Piracicaba: USP, 1991. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), ESALQ, Universidade Estadual de São Paulo, 1991.

WATTS, K.C.; BILANSKI, W.K. Method for Estimating the Thermal Diffusivity of Whole Soybeans. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, p. 1143-5, 1973.

WEBER, E.A. **Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos.** Canoas: Salles, 2005.

WEBER, P.E. **Dinâmica do processo de secagem de grãos de soja em camada espessa: simulação numérica e estudo experimental.** Ijuí: UNIJUÍ, 2001. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2001.

ZILL, D.G.; CULLEN, M.R. **Equações Diferenciais.** São Paulo: Pearson Makron Books, 2005. v.2.

APÊNDICE A – COMPARAÇÃO COM DADOS DE SOARES

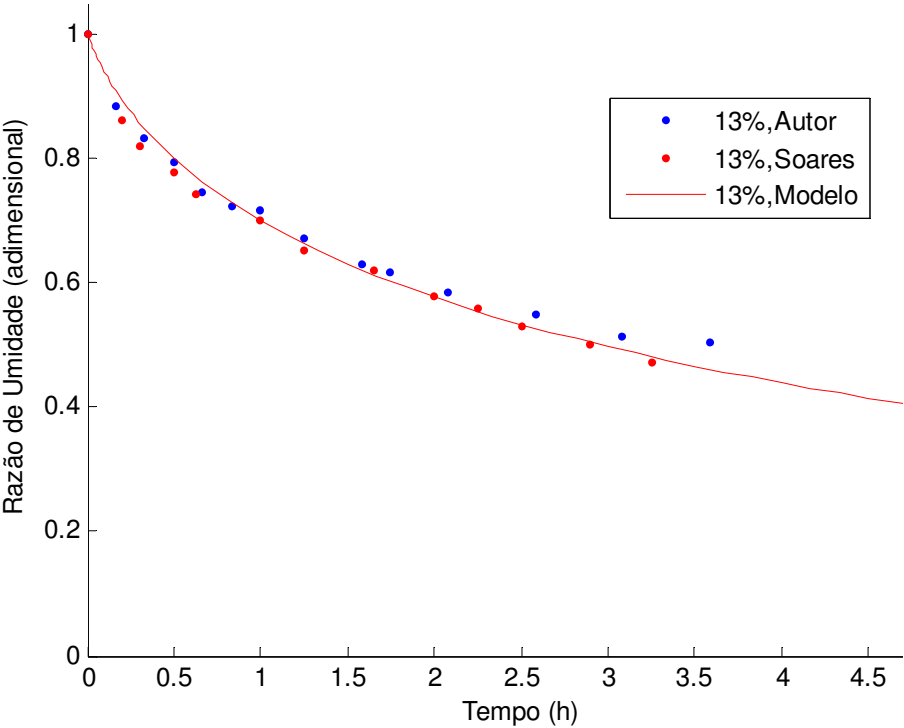


Gráfico 1: $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,13$

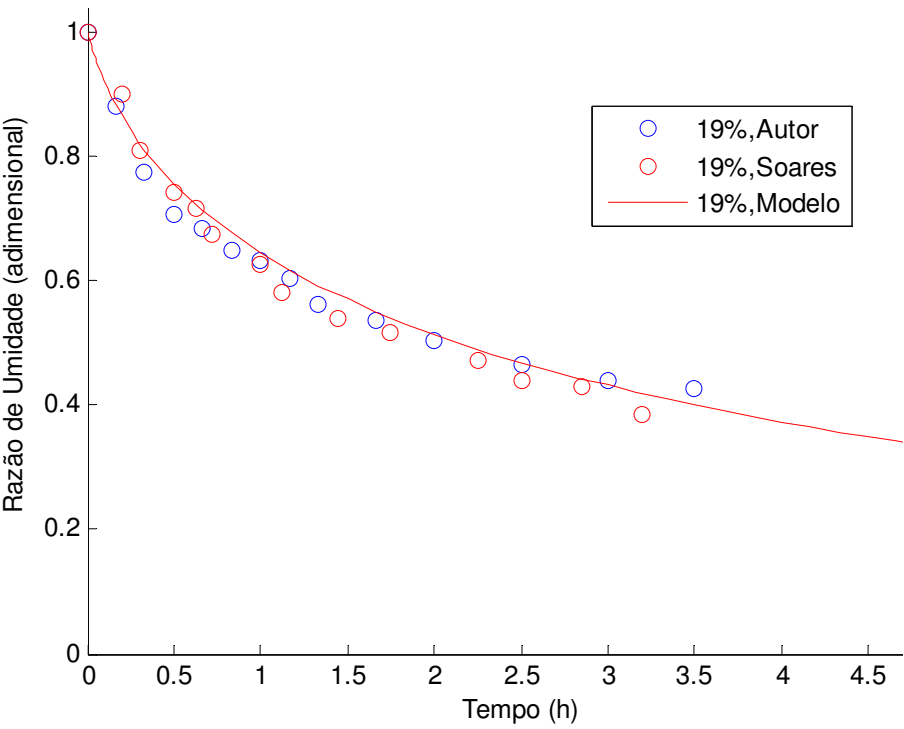


Gráfico 2: $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,19$

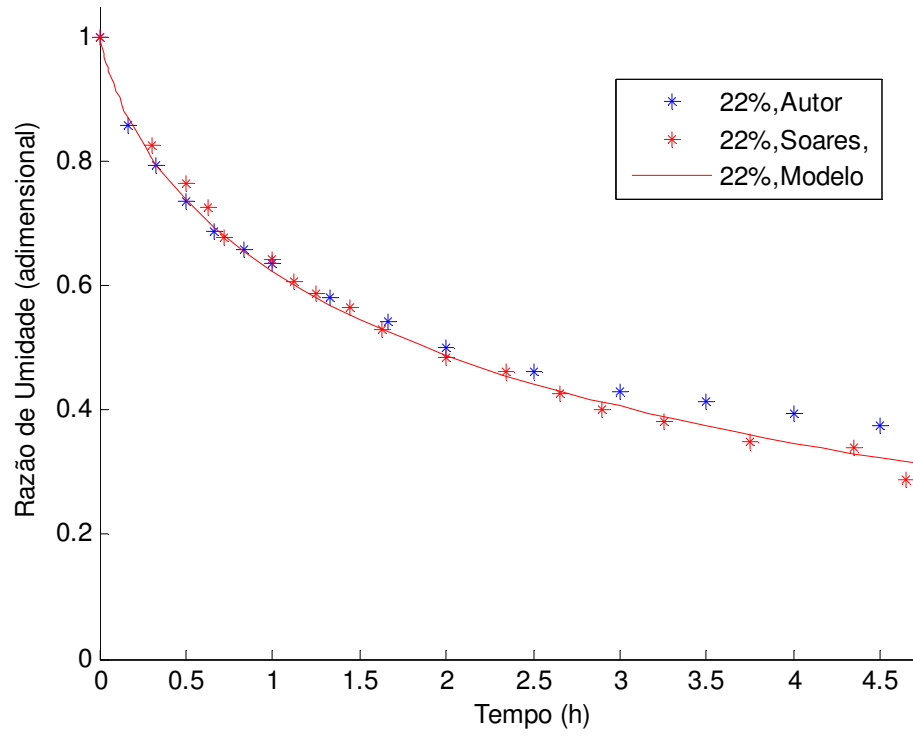


Gráfico 3: $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,22$

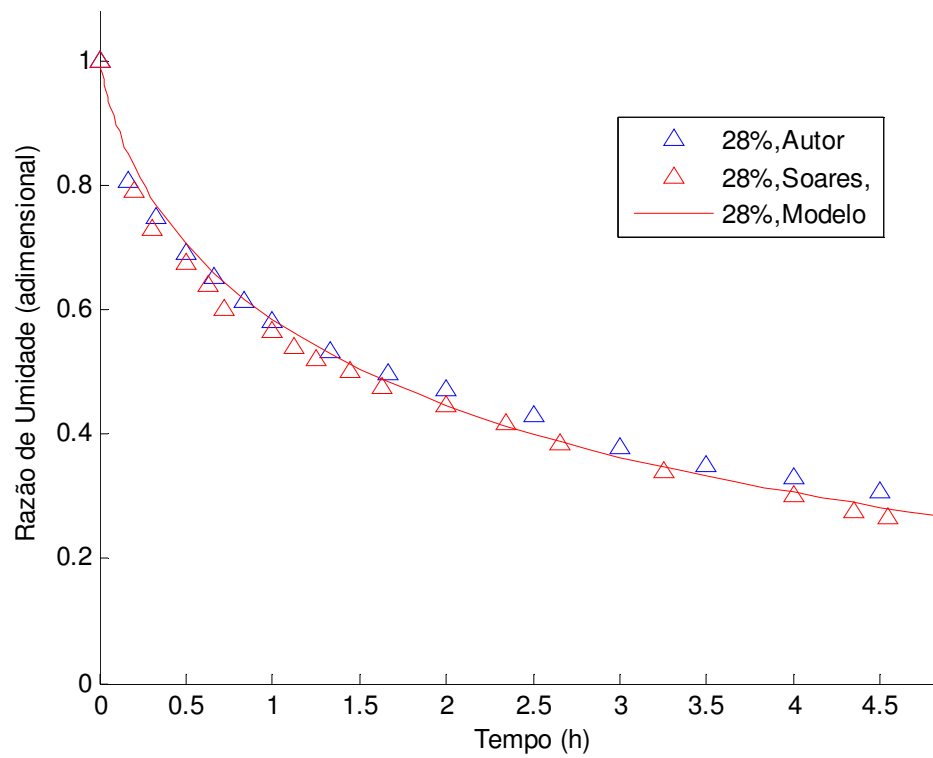


Gráfico 4: $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,28$

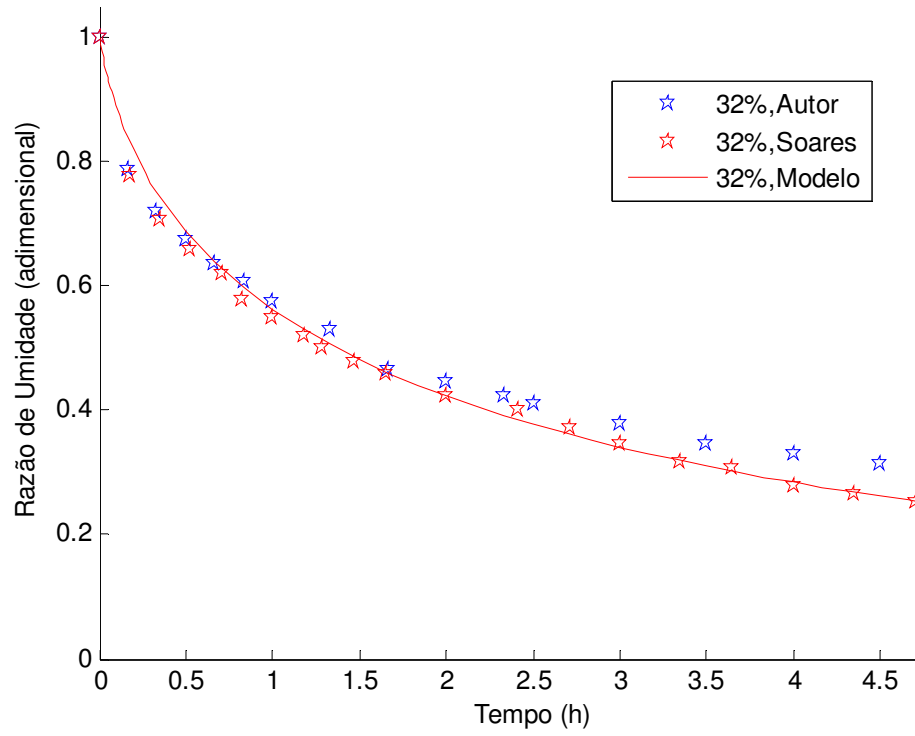


Gráfico 5: $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,32$

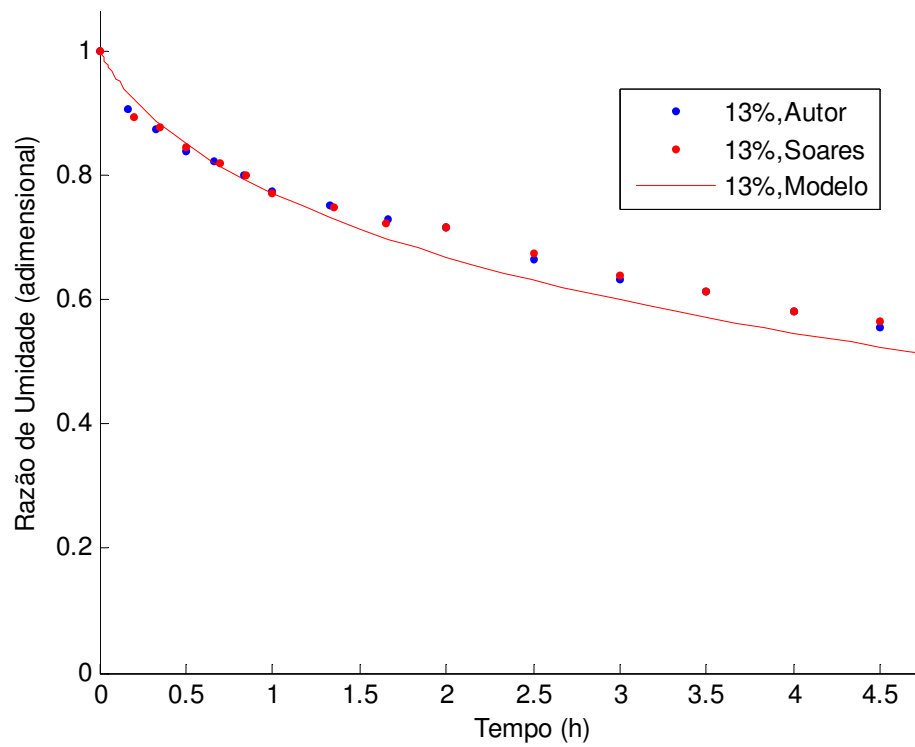


Gráfico 6: $T = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,13$

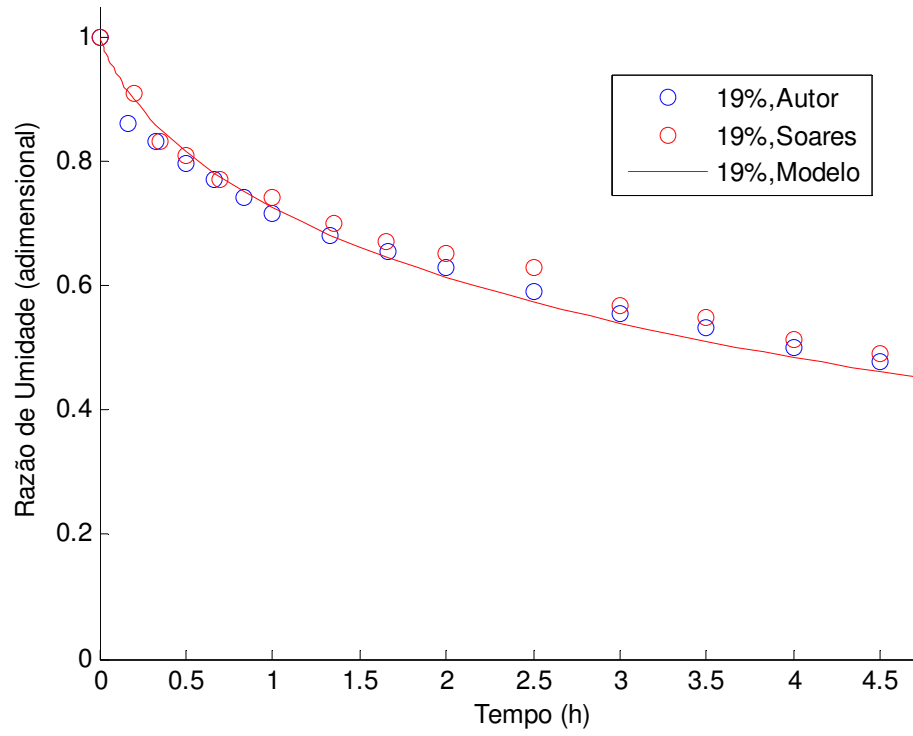


Gráfico 7: $T = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,19$

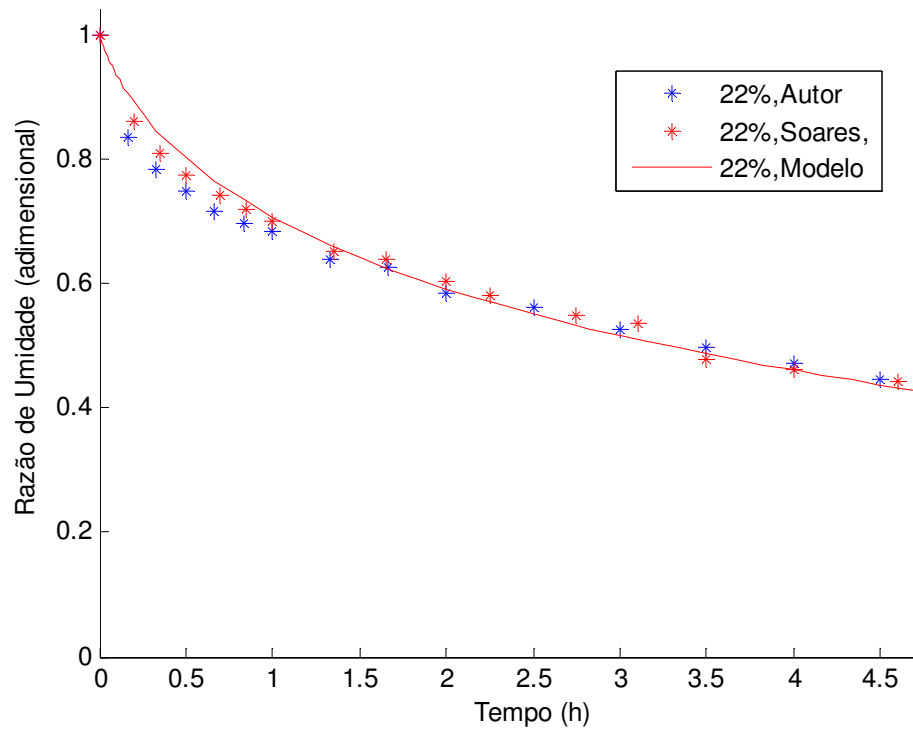


Gráfico 8: $T = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,22$

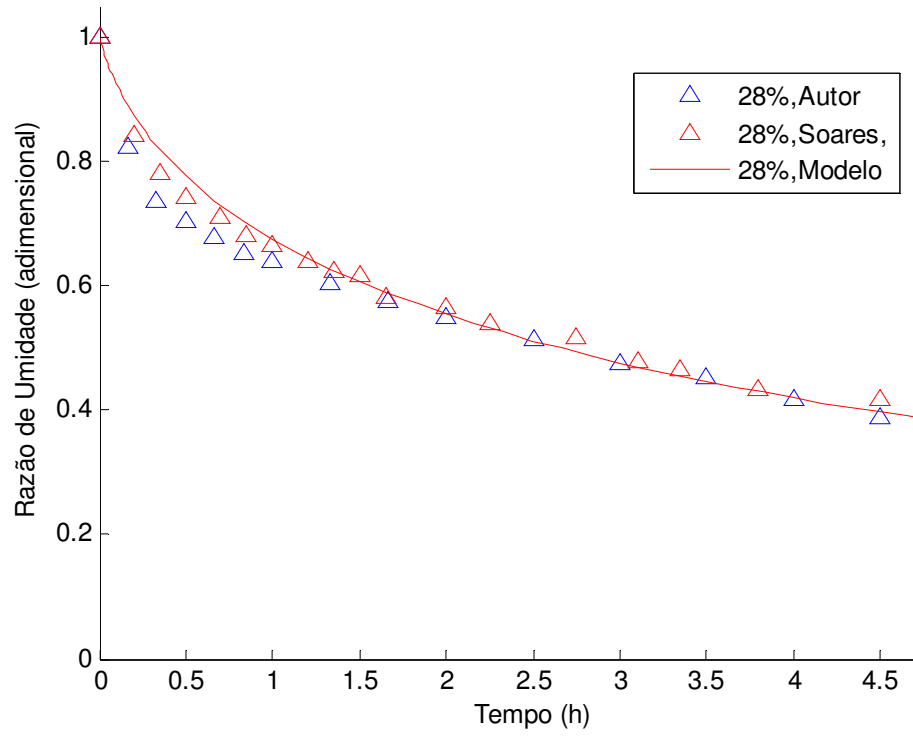


Gráfico 9: $T = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,28$

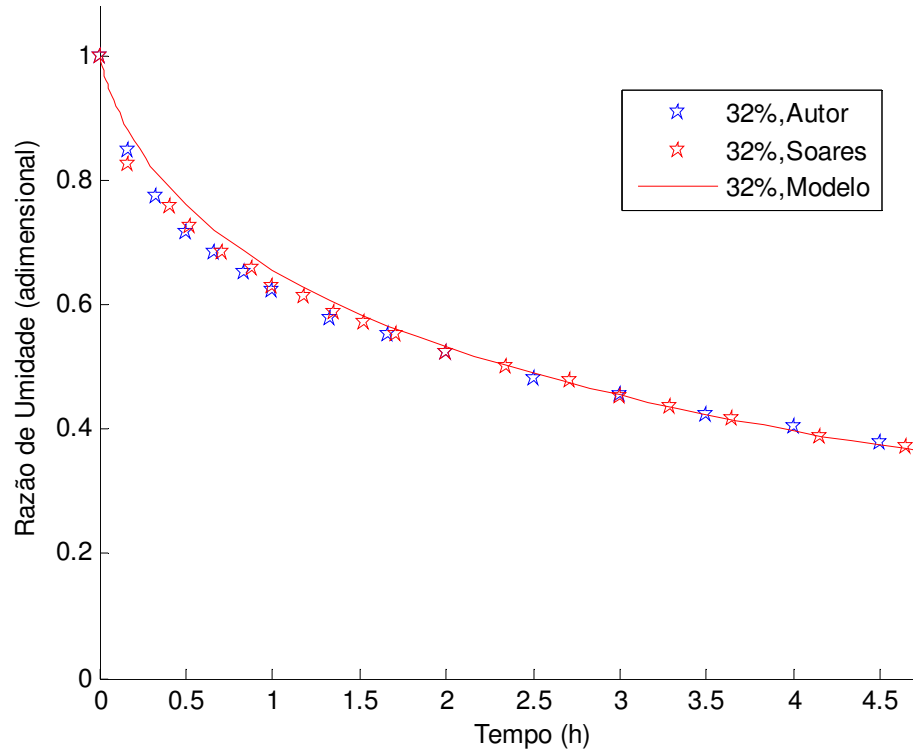


Gráfico 10: $T = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9 \text{ m/s}$ e $X_0 = 0,32$

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)