

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E
SECAGEM DE SEMENTES COM COBERTURA
ARTIFICIAL

Margarete Martins Pereira Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

São Carlos – SP

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E
SECAGEM DE SEMENTES COM COBERTURA
ARTIFICIAL**

Margarete Martins Pereira Ferreira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

São Carlos – SP

2003

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F383dc	<p>Ferreira, Margarete Martins Pereira. Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial / Margarete Martins Pereira Ferreira. -- São Carlos : UFSCar, 2004. 235 p.</p>
	<p>Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.</p>
	<p>1. Secagem. 2. Recobrimento. 3. Leito fixo. 4. Sementes. 5. Gel. 6. Sementes - Qualidade. I. Título.</p>
	<p>CDD: 660.28426 (20^a)</p>

Dedico esta Tese aos meus pais
Joaquim Pereira da Silva, Geralda
Martins Pereira (*in memoriam*) e ao
meu marido José Roberto Ferreira.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, pelos ensinamentos, orientação, amizade, carinho e incentivo constantes.

Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire pelos seus ensinamentos, pela amizade, apoio e incentivo.

Aos professores do Centro de Secagem / UFSCar, Prof^a Dra. Ana Maria da Silveira, Prof^a Dra. Maria do Carmo Ferreira e Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa, pelas contribuições que deram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares pelo apoio, compreensão e incentivo que deram no decorrer deste trabalho.

Aos técnicos do DEQ-UFSCar, especialmente ao Sr. Oscar da Silva, Sr. Walter Suficiel e Sr. Dorival Prenholato.

As técnicas Alzira Andrade Gonzáles, Clarice Leal, Sandra Pereira da Silva pelo inestimável auxílio na separação das sementes e principalmente pela amizade.

A colega e amiga Pérola Luccas pela amizade e pela concessão dos equipamentos para medida da condutividade e difusividade térmicas.

Aos amigos e colegas, especialmente ao Alexandre, Amauri, Ana Cláudia, Carolina, Conceição, Cristiane, Euclides, Leonardo, Lissandra,

Luanda, Manoel, Marcelo, Roger, Rosilene, Salete, Tatiana, Marina, Fabíola, pela amizade, contribuições ao trabalho e aos demais que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

Ao CNPq, CAPES e PRONEX/FINEP pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os estudos sobre a preparação e secagem de sementes com cobertura artificial possibilitaram a integração e sintetização das linhas de pesquisa referentes à secagem de sementes e géis. Os objetivos deste trabalho consistem em desenvolver uma metodologia que possibilite promover o recobrimento de sementes com material a base de gel, caracterizar o sistema semente-gel e realizar a busca de informações sobre a interação entre as partículas e o fluido na operação de secagem em leito fixo, analisando-se, também, os efeitos que as operações envolvidas na construção da semente recoberta provocarão na qualidade fisiológica das sementes, antes e após cada operação realizada. Os materiais utilizados foram sementes de milheto, *Pennisetum glaucum*, gel ágar e sorbato. A mistura determinada como adequada ao recobrimento visando a manutenção da qualidade fisiológica e a aderência foi de 1,5 % de gel ágar e de 5% de sorbato em relação ao gel. Após o desenvolvimento de metodologia que permitiu a realização do recobrimento, o sistema semente-gel originado foi caracterizado, utilizando-se técnicas de laboratório e equipamentos comerciais, isto é, foram determinadas as dimensões características, esfericidade, massa específica, condutividade, difusividade térmicas e calor específico. Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico do sistema semente-gel-ar, devido ao elevado teor de umidade do material de recobrimento, foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia que acelerasse a retirada de umidade. A equação de Chen-Clayton foi a que melhor representou a dessorção de água do sistema, com boa concordância em relação aos dados experimentais, na faixa de temperaturas de 25 a 50°C e umidades de 11 a 84% bu. A cinética de secagem foi obtida em leito fixo e camada fina para temperaturas de 30 a 50°C e velocidades de 0,5 a 2,5 m/s, sendo representada pela equação de Page. Testes de secagem convectiva das partículas conduzidos em camada espessa permitiram obter a máxima espessura de leito fixo que fornece produto adequado ao armazenamento. As avaliações dos efeitos imediatos e latentes, advindos de diferentes operações, comprovaram a manutenção da qualidade fisiológica das sementes. Ou seja, o sistema semente-gel satisfaz as expectativas quanto à recomposição da semente, caracterização física em estudos específicos e, também, mostrou-se com estrutura adequada para o processo de secagem convectiva em leitos de pequena espessura.

ABSTRACT

The studies on the preparation and drying of seeds with artificial coat covering promote the integration of the referring research lines for drying of seeds and gel. Thus, the aim of this research were carried out a methodology to promote the coated of seeds with material the base of gel, to characterize the system seed-gel and to realize the search of information about the interaction among particles and fluid during the drying process in a fixed bed. In addition, it was also analyze, before and after each accomplished operation, the effects of the stages involved in the construction of the coated seed on the physiologic quality of them. Millet seeds (*Pennisetum glaucum*), gel agar and sorbitol were used in the tests. The best mixture was used to coat seeds in order to maintain their physiologic quality and the gel adherence. To them was composed such mixture by 1.5% of gel agar and by 5% of sorbitol in relation to the gel. After the development of the methodology of coating, some analyses were used to characterize the system seed-gel such as: dimensions, sphericity, specific mass, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat. Due to the high moisture content of the coating material, it was necessary the development of a methodology that accelerated the moisture transfer, for the determination of the equilibrium moisture content of the system seed-gel-air. The best equation to determine the equilibrium of the system it was Chen-Clayton's equation, which presented a good agreement with the experimental data, in the range of temperatures from 25 to 50°C and moisture from 11 to 84% bu. The drying kinetics was obtained in fixed bed of thick layer for temperatures from 30 to 50°C and velocities from 0.5 to 2.5 m/s, The equation fitted the experimental data of drying kinetics better was one proposed by Page. . Tests of convective drying in fixed of thick layer allowed obtaining the maxim thickness of bed to supplies appropriate product to the storage. The immediate and latent effects were evaluated and according to them, the physiologic quality was maintained. Therefore, the system seed-gel satisfied the expectations concern with tests of physical characterization and regeneration of the seeds. However, this system seed-gel was also appropriate for convective drying process in fixed bed of small thickness.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xx
NOMENCLATURA	xxv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	08
2.1 – ASPECTOS TECNOLÓGICOS SOBRE A COBERTURA ARTIFICIAL DE SEMENTES.....	09
2.2 – RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS.....	11
2.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	15
2.3.1 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS.....	16
2.3.2 – ESFERICIDADE	17
2.3.3 – MASSA ESPECÍFICA	20

2.3.4 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	20
2.3.5 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	24
2.3.6 – CALOR ESPECÍFICO.....	26
2.4 – UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	28
2.5 – CINÉTICA DE SECAGEM.....	34
2.6 – SECAGEM DE SEMENTES.....	38
2.7 – SECAGEM DE GÉIS.....	44
2.8 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES.....	47
2.8.1 – A GRAMÍNEA MILHETO.....	48
2.8.2 – TESTES PADRONIZADOS.....	50
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1 – MATERIAIS.....	55
3.1.1 – SEMENTES DE <i>Pennisentum glaucum</i>	56
3.1.2 – PREPARAÇÃO DAS SEMENTES.....	59
3.1.3 – UMIDADE DAS PARTÍCULAS E REUMIDIFICAÇÃO.....	60
3.1.4 – GEL ÁGAR.....	63
3.1.5 – ESCOLHA E PREPARAÇÃO DA MISTURA A BASE DE GEL.....	64

3.1.6 – PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DE RECOBRIMENTO.....	66
3.2 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL	67
3.2.1 – MOLDAGEM E GELEIFICAÇÃO DA CAMADA SOBRE AS PARTÍCULAS	68
3.3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SEMENTES SEM E COM COBERTURA ARTIFICIAL	71
3.3.1 – DIÂMETRO CARACTERÍSTICO, ESFERICIDADE E MASSA ESPECÍFICA	71
3.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	73
3.3.3 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	75
3.3.4 – CALOR ESPECÍFICO	78
3.4 – ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO DO SISTEMA SEMENTE-GEL-AR.....	78
3.4.1 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO	79
3.4.2 – ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	83
3.5 – UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM.....	84
3.5.1 – SECADOR DE CONVECÇÃO FORÇADA	85

3.5.2 – HOMOGENEIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUÍDO.....	87
3.5.3 – CÉLULAS DE MEDIDAS.....	88
3.5.4 – INSTRUMENTAÇÃO DA CÉLULA DE MEDIDAS	93
3.6 – CINÉTICA DE SECAGEM.....	95
3.6.1 – LEITO FIXO EM CAMADA FINA.....	95
3.6.2. –PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	97
3.6.3 – DISCRIMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SECAGEM.....	98
3.7 – TESTES DO SISTEMA SEMENTE-GEL ATRAVÉS DA SECAGEM EM LEITO FIXO	99
3.7.1 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	99
3.7.2 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS.....	99
3.7.3 – DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA, UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA	101
3.8 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO LEITO ESPESSE.....	105
3.9 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS SEMENTES	109

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
4.1 – SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	112
4.1.1 – SEPARAÇÃO DE MATERIAIS INERTES.....	112
4.1.2 – REUMIDIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	113
4.1.3 – ESCOLHA E PREPARAÇÃO DA MISTURA A BASE DE GEL.....	116
4.2 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL	118
4.2.1 – RECOBRIMENTO DAS SEMENTES COM GEL VIA IMERSÃO	119
4.2.2 – MOLDAGEM E GELEIFICAÇÃO DA CAMADA SOBRE AS PARTÍCULAS	120
4.2.3– AVALIAÇÃO DA REUMIDIFICAÇÃO E RECOBRIMENTO.....	122
4.2.4 – AVALIAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL EM PLACAS.....	122
4.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES “ <i>in natura</i> ” E DO SISTEMA SEMENTE-GEL.....	124
4.3.1 – DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS, FORMA E MASSA ESPECÍFICA.....	125

4.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	127
4.3.3 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	131
4.3.4 – CALOR ESPECÍFICO.....	135
4.4 – ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO DO SISTEMA SEMENTE-GEL-AR.....	136
4.4.1 – OBTENÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO ...	136
4.4.2 – TRATAMENTO DOS DADOS.....	138
4.5 – CINÉTICA DE SECAGEM.....	145
4.5.1 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM.....	145
4.5.2 – ANÁLISE DOS DADOS ATRAVÉS DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS E SEMI- EMPÍRICAS DA LITERATURA.....	151
4.6 – TESTES DO SISTEMA SEMENTE-GEL ATRAVÉS DA SECAGEM EM LEITO FIXO.....	156
4.6.1 – DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA E UMIDADE NO LEITO EM CAMADA ESPessa.....	156
4.6.2 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO LEITO	163
4.7 – AVALIAÇÃO DAS QUALIDADES FISIOLÓGICAS.....	175

4.7.1 – ANÁLISE DO EFEITO IMEDIATO.....	176
4.7.2 – ANÁLISE DO EFEITO LATENTE	182
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	186
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	193
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	195
ANEXO A – DADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA (k_{ef})	205
ANEXO B – DADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA (α_{ef})	211
ANEXO C – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	216
ANEXO D – DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM OBTIDOS EM CAMADA FINA	221

ANEXO E – DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM**OBTIDOS EM CAMADAS COM****DIFERENTES ESPESSURAS DE****PARTÍCULAS 230**

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1–	Foto das sementes de <i>Pennisetum glaucum</i>	57
Figura 3.2–	Esquema do reumidificador de sementes utilizado (CHICARONI et alii, 1998).....	63
Figura 3.3–	Esquema da placa confeccionada para a realização do recobrimento das sementes.....	68
Figura 3.4–	Esquema do aparato utilizado na determinação da condutividade térmica efetiva (LUCCAS et alii, 2002).....	74
Figura 3.5–	Aparato utilizado na determinação da difusividade térmica efetiva (LUCCAS et alii, 2002).....	76
Figura 3.6–	Esquema do recipiente utilizado nos testes de equilíbrio higroscópico, contendo a solução salina e as amostras do agregado.....	81
Figura 3.7–	Esquema da unidade experimental de secagem utilizada (SILVA, 1997).....	86
Figura 3.8–	Esquema da célula de medida utilizada na obtenção da cinética de secagem em camada fina.....	89
Figura 3.9–	Esquema da célula de secagem com suporte para acoplar à tubulação da unidade de secagem.....	91
Figura 3.10–	(a) Esquema da célula de secagem em leito espesso com suportes inferior e superior. (b) Suporte inferior, para acoplar a célula de secagem à tubulação, (c) suporte superior e tubulação para continuidade do escoamento de ar.....	92

Figura 3.11– Célula com disposição helicoidal dos termopares (a) e detalhe da bainha que contém o termopar (b).....	102
Figura 3.12– Esquema do suporte dos termopares e distribuição dos termopares para medida da temperatura na região de saída do leito.....	107
Figura 4.1– Teor de umidade em base úmida em função do tempo de residência no reumidificador ($T = 35^{\circ}\text{C}$)..	114
Figura 4.2– Fluxograma de formação do sistema semente-gel...	119
Figura 4.3– Foto do sistema semente-gel.....	121
Figura 4.4– Resultado típico de temperatura em função do tempo para determinação de k_{ef} obtido para sementes sem recobrimento.....	128
Figura 4.5– Resultado típico de temperatura em função do tempo para determinação de k_{ef} obtido para sementes com recobrimento.....	129
Figura 4.6– Resultado típico de temperatura na parede e no centro da célula em função do tempo para determinação de α_{ef} obtido para sementes sem recobrimento.....	132
Figura 4.7– Resultado típico de temperaturas na parede e no centro da célula em função do tempo para determinação de α_{ef} , obtido para sementes recobertas.....	133

Figura 4.8–	Diferença de elevação das temperaturas das sementes no centro e na parede da célula em função do tempo.....	133
Figura 4.9–	Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 25°C.....	143
Figura 4.10–	Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 30°C.....	143
Figura 4.11–	Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 40°C.....	144
Figura 4.12–	Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 50°C.....	144
Figura 4.13–	Adimensional de umidade em função do tempo parametrizado em períodos de tempo distintos para a pesagem da célula.....	147
Figura 4.14–	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=2,5\text{m/s}$	148

Figura 4.15– Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=30^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=1,5 \text{ m/s}$	149
Figura 4.16– Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=40^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=1,5\text{m/s}$	149
Figura 4.17– Adimensional de umidade em função do tempo, para $v_{\text{sup}}=2,5 \text{ m/s}$, parametrizado na temperatura.....	150
Figura 4.18– Adimensional de umidade em função do tempo, para $T=30^{\circ}\text{C}$, parametrizado em relação à velocidade do fluido.....	150
Figura 4.19– Teor de umidade em base seca em função do tempo de secagem.....	154
Figura 4.20– Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leito espesso, parametrizado em z	157
Figura 4.21– Umidade do material em função da posição no leito espesso, parametrizado no tempo.....	160
Figura 4.22– Massa específica do material em função da posição no leito espesso, parametrizado no tempo.....	162
Figura 4.23– Temperatura na saída do leito em função da posição radial, para $h=1,5 \text{ cm}$, parametrizada na posição angular.....	164
Figura 4.24– Temperatura em função da posição angular, para $h=1,5 \text{ cm}$ e $t=40\text{min}$, parametrizado em r	165
Figura 4.25– Temperatura em função da posição angular, para $h=2,0\text{cm}$ e $t=40\text{min}$, parametrizada em r	166

Figura 4.26– Foto da célula de secagem com altura de $1,5 \times 10^{-2}$ m, (a) na condição inicial e (b) após 40 minutos de secagem.....	167
Figura 4.27– Foto superior da célula de secagem após (a) 60, (b) 80, (c) 100 e (d) 120 minutos de secagem.....	168
Figura 4.28– Foto da célula de secagem com altura de $2,0 \times 10^{-2}$ m, (a) na condição inicial e (b) após 40 minutos de secagem.....	169
Figura 4.29– Foto superior da célula de secagem após (a) 60, (b) 80, (c) 100 e minutos de secagem.....	170
Figura 4.30– Umidade das partículas em função da posição angular, parametrizadas em h e t.....	171
Figura 4.31– Temperatura do sólido em função da posição angular, parametrizado em h e t, para o ar de secagem escoando à temperatura de 40°C	173
Figura 4.32– Fotos das sementes após a germinação, considerando os efeitos imediatos dos processos de recobrimento e secagem.....	181
Figura 4.33– Sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> no quinto dia de germinação, efeito latente.....	184
Figura C1– Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de Henderson para sementes com recobrimento a base de gel ágar.....	217
Figura C2– Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de Henderson-Thompson para sementes com recobrimento a base de gel ágar.....	217

Figura C3–	Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de Chung-Pfost para sementes com recobrimento a base de gel ágar.....	218
Figura C4–	Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de Chen-Clayton para sementes com recobrimento a base de gel ágar.....	218
Figura C5–	Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de Halsey modificada para sementes com recobrimento a base de gel ágar	219
Figura C6–	Distribuição de resíduos em função dos valores de M_{eq} preditos pela equação de GAB para sementes com recobrimento a base de gel ágar.....	219
Figura C7–	Distribuição dos Resíduos da Equação de Chen-Clayton.....	220
Figura D1	Distribuição normal para a equação de Page.....	228
Figura D2	Valores observados em função dos valores preditos para a equação de Page.....	228
Figura D3	Figura D3 – Valores observados em função dos valores preditos para a (a) equação de LEWIS (Eq. 2.15); (b) equação de HENDERSON (Eq. 2.16); (c) equação de Overhults (Eq. 2.19).....	229
Figura E1–	Esquema da localização das posições angulares.....	231

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Equações para isotermas de equilíbrio.....	32
Tabela 2.2– Equações empíricas e semi-empíricas para a representação da cinética de secagem.....	37
Tabela 3.1– Composição química média de grãos de milho (PURSEGLOVE, 1972).....	58
Tabela 3.2– Propriedades do gel ágar (BIRD et alii, 1981).....	64
Tabela 3.3– Umidade relativa de soluções salinas em diferentes temperaturas (LABUZZA et alii, 1985).....	80
Tabela 4.1– Propriedades físicas das sementes sem e com recobrimento a base de gel ágar.....	125
Tabela 4.2– Teor de umidade de equilíbrio do agregado celular e desvio médio.....	139
Tabela 4.3– Parâmetros estimados e os critérios de comparação para as equações de equilíbrio.....	140
Tabela 4.4– Valores dos parâmetros e dos coeficientes de correlação para as equações de secagem analisadas.	152
Tabela 4.5– Umidades críticas em base seca obtidas nos experimentos.....	155
Tabela 4.6– Percentual de germinação de sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> antes e após o recobrimento, efeito imediato.....	176

Tabela 4.7–	Percentual de germinação de sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com cobertura artificial antes e após a secagem em diferentes condições operacionais da unidade.....	178
Tabela 4.8–	Percentual de germinação de sementes de <i>Pennisetum glaucum</i> com cobertura artificial e secas em diferentes condições operacionais da unidade, antes e após o armazenamento.....	183
Tabela A1–	Dados de temperatura em função do tempo para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> sem recobrimento....	206
Tabela A.2–	Dados de temperatura em função do tempo para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> sem recobrimento. Réplica.....	207
Tabela A.3–	Dados de temperatura em função do tempo para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar.....	208
Tabela A4–	Dados de temperatura em função do tempo para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a base de gel ágar. Réplica.....	209
Tabela A.5–	Dados de temperatura em função do tempo para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento a	

	base de gel agar. Réplica	210
Tabela B1–	Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para a determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> sem recobrimento.....	212
Tabela B2–	Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para a determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> sem recobrimento. Réplica..	213
Tabela B3–	Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para a determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento.....	214
Tabela B4–	Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para a determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de <i>Pennisetum glaucum</i> com recobrimento. Réplica..	215
Tabela D1–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, T=40°C e v=2,5 m/s.....	222
Tabela D2–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, T=30°C e v=2,5 m/s.....	222
Tabela D3–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, T=40° e v= 0,5 m/s.....	223

Tabela D4–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=30^{\circ}\text{C}$ e $v=0,5\text{ m/s}$	224
Tabela D5–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=50^{\circ}\text{C}$ e $v=2,5\text{ m/s}$	225
Tabela D6–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=50^{\circ}\text{C}$ e $v=1,5\text{ m/s}$	225
Tabela D7–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=30^{\circ}\text{C}$ e $v=1,5\text{ m/s}$	226
Tabela D8–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=40^{\circ}\text{C}$ e $v=1,5\text{ m/s}$	226
Tabela D9–	Dados da cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=50^{\circ}\text{C}$ e $v=0,5\text{ m/s}$	227
Tabela E1–	Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leito espesso, parametrizado em z (altura do leito).....	231
Tabela E2–	Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leito espesso, parametrizado em z $h=7,5 \times 10^{-2}\text{ m}$, $T=49^{\circ}\text{C}$. Réplica.....	232
Tabela E3–	Umidade do material em função da posição no	

	leito espesso, parametrizado no tempo.....	233
Tabela E4–	Massa específica das sementes em função da posição, parametrizada no tempo.....	233
Tabela E5 –	Temperatura na saída do leito em função da posição radial, para $h=1,5$ cm, parametrizada na posição angular.....	233
Tabela E6 –	Temperatura em função da posição angular, para $h=1,5$ cm e $t=40$ min, parametrizada em r	234
Tabela E7 –	Temperatura em função da posição angular, para $h=2,0$ cm e $t=40$ min, parametrizada em r	234
Tabela E8 –	Umidade das partículas em função da posição angular, parametrizadas em h e t	234
Tabela E9 –	Temperatura do sólido em função da posição angular, parametrizada em h e t	235

NOMENCLATURA

a, b, c, d, e, f, n, A, C, D, E:	parâmetros definidos ou constantes das equações para isotermas de equilíbrio ou cinética de secagem	Dimensional ou adimensional de acordo com as equações
c_p :	calor específico à pressão constante	$[L^2\theta^{-1}T^{-2}]$
d_l :	diâmetro linear máximo da partícula	$[L]$
d_p :	diâmetro da esfera equivalente	$[L]$
e:	espessura do recobrimento	$[L]$
E_a :	energia de ativação	$[ML^2T^{-2}]$
F:	estatística de Fisher	$[]$
F_o :	número de Fourier	$[]$
GE:	percentual de germinação	$[]$
\overline{GE} :	razão entre as percentagens de germinação das sementes	$[]$
h:	altura do leito	$[L]$
k:	constante de secagem, ou condutividade térmica	$[T^{-1}]$ $[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
m:	Massa	$[M]$
M:	umidade do sólido (bs)	$[]$
MR:	razão de umidade	$[]$
r:	raio, coordenada	$[L]$
R:	raio da célula	$[L]$
R^2 :	coeficiente de correlação	$[]$
q:	densidade de fluxo de calor	$[ML^{-2}T^{-1}]$
t:	Tempo	$[T]$
T:	Temperatura	$[\theta]$
UR:	umidade relativa do ar	$[]$
v:	Velocidade	$[LT^{-1}]$
V:	Volume	$[L^3]$
z:	coordenada do leito na direção do escoamento do fluido	$[L]$

SÍMBOLOS GREGOS

α :	difusividade térmica	$[L^2T^{-1}]$
α_{ef} :	difusividade térmica do meio poroso	$[L^2T^{-1}]$
α_s :	difusividade térmica do material sólido	$[L^2T^{-1}]$
ε :	porosidade	[]
ϕ :	esfericidade, d_p/d_1	[]
ρ :	massa específica	$[ML^{-3}]$
τ :	taxa constante de aquecimento	$[T^{-1}\theta]$

SUBSCRITOS

a:	antes
c:	centro
d:	depois
eq:	equilíbrio
ef.:	efetivo
f:	fluido
o:	inicial
p:	parede
r:	parede interna da célula
s:	sólido
sup:	superficial

SOBRESCRITOS

–: valor médio

ABREVIACÕES

bs:	base seca	massa de água no material/massa material seco
bu:	base úmida	massa de água no material/massa total de material
Eq:	equação	
P.L:	picnometria líquida	
P.G:	picnometria gasosa	
Re:	réplica	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A otimização entre as relações de custo e benefício nas atividades agropecuárias atuais requer investigações que conduzam ao aumento na produção das fontes de proteínas de origens vegetal e animal.

Na agroindústria moderna estes aspectos devem ser atendidos de acordo com o conceito de desenvolvimento sustentável, o que conduz a novos desafios neste setor, entre os quais, a busca de uma melhor preservação de sementes, principalmente de gramíneas, em padrões pré-estabelecidos.

A utilização de revestimento artificial em sementes poderá proporcionar maior proteção ao hílio, além da fornecida pelos revestimentos naturais, tais como cotilédones, cascas e mucilagens. Este recobrimento visa inibir o ataque de pragas e/ou fornecer nutrientes necessários para uma melhor emergência da planta. Diversos são os materiais que podem ser utilizados para este recobrimento como, por

exemplo, os revestimentos clássicos, entre os quais, os fungicidas e fertilizantes, que, no entanto, têm sido severamente criticados pelos danos causados no meio ambiente.

Como uma visão alternativa, sobre a busca de novas técnicas e materiais de beneficiamento dos grãos, pode-se considerar os avanços em cultura de células de plantas que conduziram ao desenvolvimento de sementes artificiais. Géis como o alginato e o ágar têm sido usados para realizar a inclusão de materiais para sementes artificiais (REPUNTE et alii, 1995 e 1996).

Para a utilização prática de sementes artificiais também é necessário que os embriões encapsulados não germinem durante o período de preservação ou transporte. REPUNTE et alii (1996) realizaram a encapsulação de células no gel alginato e recobriram com uma camada de parafina, que atuou como uma barreira à passagem de oxigênio, e assim as sementes permaneceram em estado de dormência.

No caso do recobrimento das sementes seguida de secagem, a redução do teor de umidade na camada de recobrimento poderá proporcionar um armazenamento inadequado caso a cobertura da partícula não seja permeável ao oxigênio.

Colóides a base de géis poderão apresentar as mesmas vantagens dos revestimentos usuais no momento, esperando que sejam superiores por não provocarem os efeitos negativos presentes nos mesmos.

As informações existentes na literatura para o recobrimento de partículas com géis apresentam-se somente para pequenas quantidades de materiais, visando atender aos estudos com interesses apenas sob o ponto de vista bioquímico e biológico (REPUNTE et alii, 1996).

Não foram encontrados, na literatura disponível e consultada, dados precisos referentes à preparação da semente recoberta, tais como a técnica de recobrimento a ser utilizada, a composição da mistura a base de gel para compor o revestimento, e a secagem da semente recoberta. Torna-se necessário realizar a preparação do sistema semente-gel, a sua caracterização e obtenção de dados, tais como, o conhecimento do equilíbrio termodinâmico entre o sistema e o ar atmosférico, a cinética de secagem, entre outras informações. Assim como avaliar os efeitos na qualidade das sementes após as operações envolvidas no desenvolvimento da semente com cobertura artificial.

Tratando-se dos materiais separadamente, sementes e géis, existe um conhecimento acumulado no que se refere ao processo de secagem, caracterização e avaliação da qualidade. No Centro de Secagem de Pastas, Suspensões e Sementes da Universidade Federal de São Carlos

(CSPSS/UFSCar) foram desenvolvidos vários trabalhos para diferentes tipos de sementes como soja (BARROZO, 1995), *Brachiaria brizantha* (ARNOSTI, 1997) e mamão (PRADO, 1999 e PRADO e SARTORI, 2002), entre outras, que foram submetidas aos processos citados anteriormente. Recentemente, foram desenvolvidas pesquisas referentes também ao gel ágar considerando misturas com diferentes constituintes, tais como, celulose, glicose e amido, entre outros (MOREIRA, 2000; BRAUN et alii, 2002, BRAUN, 2003; ARRIECHE, 2003).

Os estudos que estão sendo desenvolvidos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar relativos às operações de secagem de sementes e géis podem ser integrados, tendo em vista as buscas sobre os fenômenos de transferência envolvidos na secagem de sementes com cobertura artificial de gel. Este fato motiva a realização do presente estudo.

– Objetivos do trabalho.

O problema é tratado levando em consideração as pesquisas realizadas sobre a secagem de gel e de sementes com mucilagem. Supõe-

se que sejam possíveis de serem integradas e sintetizadas através da preparação de sementes com cobertura artificial a base de gel.

O trabalho visa contribuir para o desenvolvimento do processo de secagem convectiva deste novo sistema semente-gel, fazendo a análise das propriedades das partículas com e sem a cobertura, avaliando a capacidade de recomposição fisiológica das sementes e do sistema e conduzindo testes de secagem em leito fixo com a intenção de buscar informações sobre a interação entre o sistema desenvolvido e o fluido de secagem.

Com base neste contexto, os objetivos deste trabalho são desenvolver uma metodologia que possibilite promover o recobrimento de sementes com material a base de gel, caracterizar o sistema semente-gel e realizar a busca de informações sobre a interação entre as partículas e o fluido na operação de secagem em leito fixo. Serão analisados, também, os efeitos que as operações envolvidas na construção da semente recoberta provocarão na qualidade fisiológica das sementes, antes e após cada operação realizada.

Tendo em vista atingir estes objetivos, foi necessária a realização de um trabalho experimental onde foram cumpridas as seguintes etapas:

i) preparação de sementes, bem como, de misturas em diferentes composições para o recobrimento, tendo como base o gel ágar, e desenvolvimento de metodologia que possibilite agregar esta mistura à superfície das partículas, formando o sistema semente-gel, e análise do efeito da cobertura de sementes de *Pennisetum glaucum* através de avaliações da fixação, sustentação, umidade e recomposição;

ii) caracterização física das sementes sem e com cobertura artificial, usando técnicas de laboratório e equipamentos comerciais, através das determinações do diâmetro médio, comprimento característico, esfericidade, massa específica, espessura do recobrimento, condutividades e difusividades térmicas efetivas e dos sólidos, calor específico, assim como, o desenvolvimento de metodologia para a obtenção experimental de isothermas de equilíbrio higroscópico para o sistema semente-gel-ar e análise de equações de equilíbrio para materiais orgânicos da literatura;

iii) condução de testes de secagem com sementes recobertas em leito fixo, para obtenção, com base em planejamento fatorial das experiências, da cinética de secagem em camada fina, sendo a análise dos dados realizada através de equações empíricas e semi-empíricas

existentes na literatura para a representação de materiais orgânicos, assim como, variação da espessura do leito para avaliação das propriedades de diferentes camadas de partículas em função de condições operacionais da unidade de secagem e análise experimental da formação de aglomerados de sementes, e

iv) avaliação das qualidades fisiológicas do *Pennisetum glaucum*, através de testes padrões de germinação, e análise dos efeitos imediatos e latentes devido às operações realizadas com as sementes.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seleção dos materiais para compor os constituintes na formação de um sistema semente-gel depende, principalmente, da estrutura da semente, da mistura que forma a camada de cobertura externa, a base de gel, e do tipo de processamento aplicado.

Os processos de recobrimento e de secagem têm uma importância peculiar, em razão dos equipamentos e das condições operacionais utilizadas possibilitarem muitas vezes, a ocorrência de efeitos de deterioração nos materiais.

Inicialmente, a revisão bibliográfica será direcionada aos aspectos tecnológicos sobre o milho e a cobertura de sementes, em seguida, à caracterização física dos materiais, logo após é dada ênfase aos trabalhos referentes à secagem convectiva de sementes e géis e, finalmente, são apresentados os testes oficiais padronizados para a avaliação da qualidade de sementes.

2.1 – ASPECTOS TECNOLÓGICOS SOBRE A COBERTURA ARTIFICIAL DE SEMENTES

O recobrimento de sementes pode ser considerado como a etapa inicial para o desenvolvimento de células agregadas, as quais são embriões de sementes sem cotilédones. As sementes devem ser recobertas por uma película artificial permeável ao oxigênio, tendo em vista possibilitar a sua estocagem por um maior período de tempo em relação à semente “in natura” e melhor emergência da planta na época do plantio.

O recobrimento de sementes de gramíneas com material a base de gel, seguida de secagem, surge com o intuito de minimizar perdas por ataque de pragas ou fungos devido ao elevado teor de umidade do recobrimento, podendo ainda promover adsorção de nutrientes.

Esta aplicação é vantajosa por não provocar o acúmulo de herbicidas e pesticidas no solo e nascentes de água, preservando a biodiversidade dos mesmos. Apresenta também a vantagem de não provocar intoxicação dos trabalhadores que irão manusear as sementes.

Este tipo de cobertura também é adequado porque é desejável que as sementes possuam a capacidade de recomposição preservada durante a armazenagem. O uso de uma cobertura que posteriormente

atue como meio de cultura poderá ser favorável à recomposição das sementes, mesmo em solos de regiões semi-áridas.

Para que seja feito este recobrimento é necessário realizar a busca de informações sobre sementes e géis para que se promova a integração entre os materiais gerando o sistema semente-gel.

Os materiais devem ser classificados e homogeneizados visando garantir a reprodutibilidade nas características dos mesmos. Para realizar a integração entre a semente e o gel é necessária a busca de uma metodologia que possibilite agregar o material de recobrimento, a base de gel, à superfície das sementes.

Esta combinação gera um sistema pouco conhecido, sendo necessária a realização de um estudo experimental para a caracterização e posterior secagem, para avaliar o comportamento do sistema em contato com o fluido de secagem.

Por ser a etapa de recobrimento fundamental para construção do sistema a ser estudado inicia-se a busca de informações através deste tópico.

2.2 – RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS

O primeiro passo para a formação de célula agregada é a determinação de uma matriz de encapsulação adequada que permita que o embrião venha a se desenvolver no futuro. A determinação da metodologia que irá permitir a realização deste recobrimento é de fundamental importância para que não ocorram danos no material durante a operação, portanto, torna-se necessário o conhecimento de diferentes técnicas de recobrimento e materiais utilizados.

O recobrimento é uma operação unitária de grande importância comercial sendo utilizada no processamento de uma grande variedade de produtos (FREIRE e OLIVEIRA, 1992).

As razões pelas quais utiliza-se o recobrimento são variadas, podendo ser realizada para proteção de um produto de ações indesejáveis, facilitar o manuseio de produtos, melhoria da aparência estética, mascarar sabores e odores desagradáveis, aumentar a resistência mecânica do produto, diminuição da taxa de dissolução de substâncias químicas, entre outras, de acordo com FREIRE e OLIVEIRA (1992).

A operação de recobrimento de partículas é realizada convencionalmente em “painéis rotatórias” ou drageadeiras. Há ainda a utilização de novas técnicas e variações desta convencional, como as

drageadeiras perfuradas que são utilizadas, por exemplo, na indústria farmacêutica (ROCHA, 1992).

A técnica de “spray drying” é uma das utilizadas, por exemplo, na microencapsulação de pequenas partículas, conforme RÉ (1998).

O recobrimento de partículas em leitos móveis favorece a transferência de calor e massa entre os constituintes, mas pode provocar desgastes mecânicos indesejáveis para alguns tipos de materiais.

Para o caso do recobrimento de sementes objetiva-se proporcionar uma preservação maior que a da cobertura natural aumentando a longevidade, devido à inibição ao ataque de pragas. Assim como, facilitar a absorção de nutrientes e viabilizar a dosagem precisa dos mesmos.

A operação de recobrimento através da técnica de imersão proporciona um impacto mecânico mínimo ao sistema, diminuindo ou eliminando desgastes mecânicos o que é desejável para o caso de sementes.

CONCEIÇÃO FILHO et alii (1998) estudaram o recobrimento de sementes de soja com fertilizantes. O recobrimento foi realizado por atomização de uma suspensão de fertilizantes em leito de jorro. Os experimentos buscaram avaliar as influências da temperatura do ar no leito de jorro, vazão de fertilizante no rendimento do processo e a

capacidade de germinação das sementes recobertas. As conclusões mostraram que a técnica foi apropriada para o recobrimento das sementes com fertilizante e a secagem das mesmas teve um teor de umidade aceitável.

Porém, o aumento da temperatura do ar de operação e da vazão da suspensão reduziram o rendimento e a capacidade de germinação.

Diversos materiais podem ser utilizados para efetuar o recobrimento, entre estes materiais, têm-se os fungicidas, fertilizantes (revestimentos clássicos) e os géis (interesse atual). Os fungicidas protegem do ataque de pragas, porém, apresentam as desvantagens comentadas no item 2.1.

Os géis poderão apresentar as mesmas vantagens dos materiais convencionais sendo superiores por não provocarem os fatores negativos presentes naqueles.

Para que o recobrimento seja efetuado com o material a base de gel é necessário que sejam obtidas várias informações que são ainda pouco conhecidas para o sistema semente-gel. Estas necessidades são motivação para este trabalho.

Entre os trabalhos existentes na literatura, tem-se REPUNTE et alii (1996), no qual os autores realizaram um estudo visando preparar sementes artificiais utilizando gel alginato, que poderia preservar as

qualidades da semente durante a estocagem, conforme proposto por BROWN (1994). No entanto, na literatura consultada não foram encontrados trabalhos que desenvolvessem uma metodologia que levasse à formação de um sistema semente-gel e, realizasse a análise dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na operação de secagem das sementes recobertas com material a base de gel.

A operação de secagem realizada durante o recobrimento ou após, dependendo da técnica escolhida, envolve os fenômenos de transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido de secagem. Como a semente terá atingido a maturidade fisiológica não haverá água condensada na superfície, portanto, no fenômeno de transferência de massa predomina na maioria das sementes o mecanismo de difusão no sólido e o mecanismo de convecção predominará no gel da superfície.

A literatura não fornece dados precisos referentes à preparação da semente com a cobertura, como por exemplo, as concentrações do material de recobrimento.

Deve-se estabelecer quais são as necessidades para que o recobrimento seja realizado e para que os resultados sejam adequados, ou seja, haja a adesão da camada de recobrimento e que as qualidades das sementes sejam preservadas.

A secagem da semente recoberta é de fundamental importância, pois a quantidade de umidade remanescente no sistema semente-gel irá proporcionar ou não a preservação do mesmo e a posterior emergência da plântula.

As operações envolvidas na constituição de uma semente recoberta devem ser avaliadas não somente através dos fenômenos de transferência envolvidos entre o sólido e o fluido, mas também, em função da qualidade das sementes antes e após cada operação. Assim, será possível avaliar a influência das mesmas sobre as qualidades das sementes.

As propriedades dos materiais são de grande importância para avaliação dos fenômenos envolvidos nas operações de constituição de um novo sistema e, portanto, serão tratadas nos itens a seguir.

2.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

É dada ênfase às propriedades necessárias ao desenvolvimento do sistema semente-gel e propriedades como a massa específica, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico que são essenciais para o desenvolvimento de estudos de secagem convectiva e

estabelecimento das equações que representam os fenômenos de transferência de massa e energia.

2.3.1 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS

A caracterização do tamanho e forma de partículas sólidas é de fundamental importância na análise de problemas na área de sistemas particulares (PEÇANHA e MASSARANI, 1986). A quantificação de tais características pode ser realizada de várias formas.

A escolha do tipo de diâmetro de partícula a ser usado em dado problema é, entre outras coisas, determinada pelo próprio tamanho da partícula envolvida, de acordo com PEÇANHA e MASSARANI (1986).

A picnometria é uma das técnicas que possibilita a determinação do diâmetro médio de uma semente. Esta técnica consiste na determinação do volume do corpo. Este volume e o volume de uma forma geométrica que seja semelhante à forma do material em estudo possibilitam a obtenção do diâmetro médio desejado. É uma das técnicas mais utilizadas embora seja extremamente trabalhosa. Pode-se utilizar tanto a picnometria líquida como a gasosa.

Este tipo de caracterização também pode ser realizado através da análise de imagens. Entre os trabalhos existentes na literatura, ARNOSTI (1997) utilizou o analisador de imagens GALAI para caracterizar sementes de gramínea de *Brachiaria brizantha*. Na picnometria consideram-se três dimensões, enquanto na análise de imagens consideram-se apenas duas.

O analisador de imagens GALAI fornece o diâmetro médio de Feret e o raio médio de Martin que são medidas realizadas em diferentes ângulos sobre a imagem projetada do objeto. O diâmetro de Feret representa melhor a dimensão de partículas alongadas.

PRADO e SARTORI (2002) utilizaram a análise de imagens através do software Image Pro-Plus[®] para determinação das dimensões de sementes de papaya obtendo baixos desvios para as medidas. Os resultados foram reprodutíveis e o método foi adequado para sementes de papaya que possuem um revestimento natural com elevado teor de umidade.

2.3.2 – ESFERICIDADE

A forma de partículas é expressa através dos chamados fatores de

forma. A esfericidade tem sido o parâmetro mais usado para expressar a forma de partículas sólidas (McCABE et alii, 1993).

A esfericidade pode ser determinada através da relação do diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula (d_p) e o diâmetro linear máximo da partícula (d_l).

$$\phi = \frac{d_p}{d_l} \quad (2.1)$$

As técnicas utilizadas para a determinação de d_p são o Coulter Counter e a picnometria (PEÇANHA e MASSARANI, 1986).

APPLE (1996) e COSTA (1997) determinaram respectivamente a esfericidade de sementes de soja e da areia utilizando o analisador de imagens GALAI. APPLE (1996) obteve valores de diâmetro e esfericidade muito próximos aos obtidos por SARTORI (1986) através da técnica de picnometria.

PEÇANHA e MASSARANI (1986) correlacionaram os diâmetros de peneiração e o da esfera de mesmo volume que a partícula para diferentes materiais, a esfericidade das partículas também foi

verificada através de técnicas rápidas de cálculo que visam tornar mais prática a determinação do diâmetro da partícula, necessário na Equação (2.1), e observaram baixos índices de dispersão dos dados experimentais.

ARNOSTI (1997) utilizou a técnica de análise de imagens, através do equipamento de análises GALAI, para determinar a esfericidade de sementes de *Brachiaria brizantha* com diferentes teores de umidade. A expressão utilizada pelo equipamento é representada na Equação (2.2).

$$\phi = \frac{\text{Área projetada}}{\text{Perímetro}} \times 4 \pi \quad (2.2)$$

PRADO e SARTORI (2002) utilizaram as medidas obtidas para diâmetro médio de partícula e diâmetro linear máximo, obtidas através da análise de imagens utilizando o software Image Pro-Plus[®], para determinação da esfericidade de sementes de mamão com e sem revestimento natural de mucilagem.

2.3.3 – MASSA ESPECÍFICA

A massa específica é determinada através da relação da massa da amostra, m_{amostra} , pelo volume da amostra, V_{amostra} , Equação (2.3).

$$\rho_s = \frac{m_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} \quad (2.3)$$

A massa pode ser quantificada através de balança analítica e o volume pode ser obtido utilizando-se a técnica da picnometria.

Para sementes de café que também possuem uma cobertura natural sobre os cotilédones, FREITAS (1998) utilizou a técnica de variação do volume de mercúrio em uma proveta para determinar o volume médio das partículas.

2.3.4 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os métodos usuais de medida de condutividade térmica de um material são classificados em método do estado estacionário e método

transiente. Em cada método, vários tipos de procedimentos têm sido utilizados (NAGASAKA et alii, 1973).

GODFREY et alii (1965) determinaram a condutividade térmica do dióxido de urânio utilizando a técnica de fluxo de calor radial no intervalo de -57 a 1100°C. Este método é muito preciso, mas apresenta como desvantagem a necessidade de uma grande quantidade de amostra e, também, as medidas são demoradas (aproximadamente 8 horas para determinar cada ponto). A medida do fluxo de calor externo foi realizada numa amostra cilíndrica composta por uma pilha de discos, vários dos quais foram instrumentados com termopares para determinação do gradiente de temperatura radial. No centro dos discos há um orifício através do qual insere-se uma fonte de calor que gera um fluxo de calor radial. Para que não houvesse correntes de convecção e, para, minimizar as perdas por radiação o espaço entre a amostra e o recipiente no qual estavam dispostas foi preenchido com Al_2O_3 . Os resultados de condutividade térmica obtidos possuem uma incerteza de 1,5%.

SHARMA e THOMPSON (1973) citam trabalhos que utilizaram método do estado estacionário e trabalhos desenvolvidos a partir do método do estado transiente. Nestes trabalhos, foram utilizados diferentes aparatos. A condutividade térmica do sorgo foi determinada

por tais pesquisadores usando a teoria de fonte de calor (linear) da análise de transferência de calor transiente.

Esta teoria é baseada na relação entre a condutividade térmica e a elevação da temperatura em um meio infinito homogêneo causado por uma fonte de calor linear que emite energia constante.

O resultado foi a variação da condutividade térmica em relação à umidade sendo que, foi obtida uma relação linear entre a condutividade térmica e o conteúdo de umidade.

HARRIOTT (1975) obteve três modelos para a condutividade térmica para “pellets” porosos baseados nas diferentes áreas de contato das partículas que constituem o “pellet”.

SHARMA et alii (1975) obtiveram condutividades térmicas de “pellets” catalíticos compostos de sílica, sílica-alumina e catalisador níquel usando o método transiente.

MADAMBA et alii (1995) determinaram a condutividade térmica do alho usando o instrumento de Fitch modificado. O método de Fitch modificado assume uma condução quase estacionária de transferência de calor através do material.

A calibração do equipamento foi realizada através de condutividades térmicas conhecidas de maçãs e batatas. Um fator de

correção foi determinado relacionando os valores obtidos pelo método modificado de Fitch e o método padrão. As medidas realizadas da condutividade térmica foram ajustadas a modelos empíricos obtendo-se valores aceitáveis. O método de Fitch modificado foi considerado adequado na medida de condutividade térmica do alho a qual variou significativamente com a variação do conteúdo de umidade da amostra. O método da sonda foi considerado inadequado para ser aplicado ao alho dado o seu tamanho.

SHRIVASTAVA e DATTA (1999) utilizaram o método da sonda para a determinação da condutividade térmica de cogumelos, as investigações mostraram que a propriedade física varia com o conteúdo de umidade e temperatura.

ARNOSTI (1997) utilizou o método em regime não estacionário da sonda linear para determinação da condutividade térmica de sementes de *Brachiaria brizantha* proposto por BLACKWELL (1952). Este método considera uma fonte linear de calor contínua imersa num meio infinito isotrópico e homogêneo. A geometria para utilização deste método é um fator importante, sendo que, a geometria cilíndrica mostrou ser a mais adequada, amplamente testada e aprovada.

Além da condutividade térmica, a difusividade térmica também deve ser determinada.

2.3.5 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA

DICKERSON (1965) propõe a utilização de um equipamento que permite a determinação rápida da difusividade térmica em alimentos. A difusividade térmica é determinada em condições de transferência de calor transiente.

ARNOSTI (1997) utilizou esta metodologia para a determinação da difusividade térmica de sementes de *Brachiaria brizantha*.

O equipamento utilizado por DICKERSON (1965) era constituído de uma célula cilíndrica com aproximadamente 0,051m de diâmetro interno e 0,23m de altura. O material da parede era de alta condutividade, sendo que a base e o topo da célula eram constituídos de material isolante para minimizar a transferência de calor axial. As medidas de temperaturas foram realizadas por dois termopares localizados junto a parede e outro no centro da célula, o sistema com a amostra, após totalmente fechado, era inserido em um banho termostático, onde permanecia até o final de cada experimento.

O método foi testado a partir da difusividade térmica do cloreto de potássio, cloreto de sódio e sulfeto de sódio obtidos através da Equação (2.4).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.4)$$

onde, k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica e c_p é o calor específico do material.

DICKERSON (1965) concluiu que o equipamento pode ser usado para determinar a difusividade térmica de alimentos com incerteza de aproximadamente 5%.

Tendo-se determinadas a difusividade térmica, a condutividade térmica e a massa específica do material torna-se possível a determinação do seu calor específico através da Equação (2.4) ou através das metodologias citadas a seguir.

2.3.6 – CALOR ESPECÍFICO

Para a determinação do calor específico, a amostra pode ser aquecida de forma direta via corrente elétrica (em poucos casos através de reação química) ou de maneira indireta. Os métodos de aquecimento direto são mais comuns para calorímetros adiabáticos.

SHARMA e THOMPSON (1973) citam trabalhos como os de BABBITT (1945) e MOSTE (1953) que relataram a determinação do calor específico de grãos de trigo para diferentes valores do conteúdo de umidade. O calor específico foi determinado através de valores de massa específica, condutividade térmica e difusividade térmica utilizando-se a Equação (2.4).

SHARMA e THOMPSON (1973) determinaram o calor específico de sementes de sorgo através do método das misturas. Este método consiste na determinação da mudança de temperatura da água contida em um calorímetro a 40°F. A amostra do grão é colocada dentro do calorímetro a aproximadamente 75°F. O calor específico foi determinado através de uma equação de balanço de energia.

MADAMBA et alii (1995) determinaram o calor específico do alho usando um calorímetro através do método das misturas. O método

foi considerado como tendo precisão suficiente para a determinação desta propriedade do alho.

SHRIVASTAVA e DATTA (1999) determinaram o calor específico de cogumelos (*Pleurotus florida*) através do método das misturas para conteúdo de umidade variando de 10,24 a 89,68% base úmida e temperaturas no intervalo de 40 a 70°C. Esta propriedade aumentou linearmente com o aumento das variáveis em questão.

ARNOSTI (1997) utilizou o método das misturas para a determinação do calor específico de sementes de *Brachiaria brizantha*, não conseguiu bons resultados devido à pequena massa específica desta semente. As sementes flutuavam no líquido o que dificultava a mistura.

A utilização de líquido com massa específica menor que a das sementes interferia nos resultados devido à alta volatilidade destes líquidos com massa específica abaixo de 700 kg/m³. A determinação do calor específico das sementes de *Brachiaria brizantha* foi possível através do método de calorimetria de varredura diferencial e da relação entre a condutividade térmica, difusividade térmica e massa específica.

Dando continuidade à revisão bibliográfica sobre a caracterização de materiais deve-se também tratar das diferentes técnicas

utilizadas para determinar a umidade de equilíbrio, devido às complexidades inerentes ao sistema semente-gel.

2.4 – UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A umidade de equilíbrio de um material, para uma dada temperatura e umidade relativa do ar na vizinhança, é definida como o teor de umidade deste, correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Ou seja, a umidade de equilíbrio é o teor mínimo de umidade que um sólido pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais, portanto, é essencial no desenvolvimento do processo de secagem.

A quantidade de umidade retida num sólido em equilíbrio com um gás úmido depende da estrutura do sólido, da temperatura, pressão e do teor de umidade do gás.

O processo através do qual o equilíbrio é obtido, por adsorção ou dessorção de umidade, influencia no teor de umidade no estado de equilíbrio devido ao fenômeno de histerese (ARNOSTI et alii, 1999). As sementes têm apresentado maiores valores de umidade de equilíbrio quando esta é obtida por dessorção de umidade do que por adsorção de

umidade (CHUNG e PFOST, 1967). Este fato não é bem explicado podendo ser devido à retração e modificações nas estruturas celulares provocada durante a secagem diminuindo assim os espaços possíveis para a reabsorção de umidade.

As técnicas usuais para a determinação da umidade de equilíbrio podem ser classificadas em método gravimétrico e higrométrico. No método gravimétrico a temperatura e a atividade da água do ar são mantidas constantes até que o conteúdo de umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio. O ar pode circular (método dinâmico) ou permanecer estagnado (método estático) na vizinhança do sólido.

No método dinâmico é necessário realizar o monitoramento das condições operacionais, como temperatura e umidade do ar de circulação, ou seja, a dificuldade está em manter constantes as condições termodinâmicas do ambiente.

O método estático caracteriza-se por não haver movimentação do ar e as soluções que são dispostas nos recipientes são agitadas mecanicamente para garantir a homogeneidade e saturação das mesmas.

As soluções que são usadas para a determinação das isotermas de equilíbrio através do método estático podem ser soluções ácidas de diferentes concentrações ou soluções salinas saturadas. Estas soluções regulam a pressão de vapor nas vizinhanças da semente. O uso de

soluções salinas é mais comum devido à segurança no manuseio e pela maior facilidade em manter a umidade relativa constante. Se ocorrer evaporação da água, alguns sais precipitam, mas a umidade relativa não varia (LABUZZA et alii, 1985).

No método higrométrico o conteúdo de umidade do material é mantido constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio.

A atividade de água do ar é medida via higrômetro ou manômetro. Pode-se, também, utilizar-se equipamento comercial no qual a atividade de água é medida com grande precisão e em um intervalo de tempo muito menor quando comparado com o método estático.

Com a utilização do método estático o tempo para que o equilíbrio seja atingido é de 2 a 4 semanas, dependendo do material, enquanto que, através do equipamento eletrônico para a determinação da atividade de água são necessárias no máximo algumas horas dependendo das características do material utilizado.

As equações para a estimativa da umidade de equilíbrio dividem-se em teóricas, semi-empíricas e empíricas.

As equações teóricas baseiam-se nas teorias cinéticas de absorção onde se pode destacar a equação de Kelvin, Langmuir e BET (Brunauer, Emmett e Toller). Os modelos teóricos não conseguem prever

com precisão a umidade de equilíbrio para grãos em ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Os modelos empíricos e semi-empíricos surgiram na tentativa de aumentar a precisão na estimativa desta variável.

As principais equações utilizadas na literatura para a previsão da umidade de equilíbrio de produtos biológicos estão reunidas na Tabela 2.1.

O método estático gravimétrico tem sido o mais utilizado nas determinações da umidade de equilíbrio de sementes, foi utilizado por BARROZO (1995) o qual obteve a equação de Halsey–Modificada como sendo a que apresentou melhores resultados para sementes de soja.

ARNOSTI (1997) apresentou a equação de Henderson-Thompson como a melhor para representar os dados de equilíbrio para as sementes de *Brachiaria brizantha*.

No trabalho de PRADO (1999) para as sementes de mamão, com ou sem o recobrimento de mucilagem, a equação que apresentou melhor ajuste nas condições do estudo foi a Halsey-Modificada.

MOREIRA (2000) no intervalo de temperatura de 25° a 50°C e umidade relativa na faixa de 11 a 84% obteve as isotermas de equilíbrio para o gel ágar. Os dados experimentais ajustaram-se melhor à equação de G.A.B. apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Equações para isotermas de equilíbrio

Designação	Referência	Equações
Halsey	HALSEY (1948)	$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(a(T_s + c))}{\ln UR} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.5)$
Henderson	HENDERSON (1952)	$M_{eq} = \left(\frac{\ln(1-UR)}{-aT_s} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.6)$
Chung-Pfost	CHUNG-PFOST (1967)	$M_{eq} = \frac{-1}{b} \times \ln \left(\frac{(T_s + c) \ln UR}{-a} \right) \quad (2.7)$
Henderson- Thompson	THOMPSON et alii (1968)	$M_{eq} = \left(\frac{\ln(1-UR)}{-a(T_s + c)} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.8)$
Chen-Clayton	CHEN-CLAYTON (1971)	$M_{eq} = \left(\frac{-1}{cT^d} \right) \left(\frac{\ln UR}{-aT_s^b} \right) \quad (2.9)$
Halsey Modificada	OSBORN et alii (1989)	$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(a(T + c))}{\ln UR} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.10)$
G.A.B	GARCIA- ALVARADO et alii (1995)	$M_{eq} = \frac{A.C.UR.b}{(1-AUR)(1-AUR+A.C.UR)} \quad (2.11)$
		$A = a.e^{E/T_s} \quad (2.12)$
		$C = c.e^{D/T_s} \quad (2.13)$

Entre as pesquisas realizadas para materiais com alto conteúdo de umidade, tem-se LOPEZ et alii (2000) que determinaram as equações de G.A.B. e Halsey como as que proporcionaram melhores ajustes para a umidade de equilíbrio de rejeitos de vegetais, folhas verdes e frutas.

Constata-se que o modelo G.A.B tem sido válido para materiais com elevado teor de umidade.

Entre as pesquisas que utilizaram o método higrométrico com a utilização de equipamento eletrônico, tem-se HUBINGER et alii (1992). Os quais determinaram as isotermas de sorção para goiaba, manga e abacaxi e concluíram que o procedimento em muitos casos pode ser mais apropriado que o método clássico de determinação do equilíbrio através da técnica estática, principalmente, para altas atividades de água e temperatura. ROVEDO et alii (1993) utilizaram o método higrométrico com sementes de couve-flor e utilizaram a equação BET para descrever as isotermas de dessorção a diferentes temperaturas. POLLIO et alii (1998) utilizaram a equação de GAB para descrever as isotermas de dessorção de grãos de amaranto para diferentes temperaturas.

Além dos métodos citados, ALMEIDA et alii (1997) propuseram a construção de um equipamento e avaliação do mesmo na determinação das isotermas de equilíbrio através da conciliação das vantagens dos métodos estático e dinâmico. Foram levantados dados de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar para grãos de feijão, partículas de alumina, PVC e celulose prensada. Os sistemas que foram apresentados mostraram-se adequados ao objetivo proposto, tendo uma redução significativa do tempo dispensado na realização dos

experimentos em relação ao método estático. Os dados que foram obtidos mostraram-se coerentes quando comparados com os dados da literatura.

O conhecimento da equação que representa a dependência da umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade do ar é de importância fundamental na pesquisa e desenvolvimento de secadores convectivos. Conforme o enfoque dado aos trabalhos realizados sobre a dinâmica da secagem de sementes e de géis nos itens a seguir.

2.5 – CINÉTICA DE SECAGEM

A obtenção da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelagem matemática da operação e projeto de secadores convectivos em camada espessa.

É através deste estudo que se estabelecem as equações da umidade em função do tempo de secagem para os diferentes períodos de taxa de secagem. Sendo que podem ser período de aquecimento, período a taxa de secagem constante e período a taxa de secagem decrescente, dependendo do material submetido à secagem e das condições operacionais do secador.

A cinética de secagem possibilita também a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes.

Grãos de cereais raramente exibem período de secagem a taxa constante a menos que sejam colhidos em estado muito imaturo ou tenham água condensada sobre sua superfície. No entanto, materiais orgânicos, por exemplo, tecido de algodão com alto teor de umidade possuem o período a taxa de secagem constante pronunciado, conforme SOUSA et alii, (2002). No trabalho destes pesquisadores a dinâmica de secagem pode ser representada por equações generalizadas.

Materiais nos quais a difusão controla o movimento de líquido tendem a ter períodos a taxa constante mais curtos ou imperceptíveis.

O período de secagem a taxa decrescente pode ser bem mais amplo que o período a taxa constante, podendo ser subdividido em dois ou mais períodos. A vazão do gás que influencia tão apreciavelmente a taxa de secagem constante torna-se menos importante à medida que a velocidade de secagem diminui. O período a taxa decrescente termina quando se atinge o teor de umidade de equilíbrio, ou seja, a umidade do material está em equilíbrio termodinâmico com o vapor contido no meio de secagem.

O período a taxa decrescente é representado por várias teorias. As teorias de migração de umidade em sólidos surgem para explicar os mecanismos de migração de umidade no interior dos mesmos, durante o período a taxa decrescente. FORTES e OKOS (1980) descrevem detalhadamente a teoria da difusão, da capilaridade, da vaporização–condensação, teoria de Kischer, de Luikov, de Philip e de DeVries. Sendo que, a teoria de Luikov é a mais difundida.

BARROZO (1995) cita trabalhos que utilizaram a modelagem baseada neste modelo.

O estudo em camada fina é o mais empregado para a determinação da cinética de secagem onde, uma camada de material é submetida ao ar de secagem sendo que, a temperatura, umidade relativa e a velocidade permanecem constantes ou sejam, as condições do fluido de secagem podem ser consideradas não alteradas quando em contato com o sólido. Assim, é possível a determinação de parâmetros de secagem e equações para a taxa de secagem.

Os resultados obtidos através do estudo em camada fina são indispensáveis na predição das equações de taxa de secagem utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência de calor e massa em leitos de camada espessa (MASSARANI e TELLES, 1992).

A Tabela 2.2 fornece as equações empíricas e semi-empíricas mais utilizadas na literatura para a representação da cinética de secagem de grãos e sementes.

Tabela 2.2 – Equações empíricas e semi-empíricas para a representação da cinética de secagem

Equação	Fonte
$MR = \exp(-Kt)$ Onde: $K = a \cdot \exp(-b/T_f)$	(2.14) LEWIS (1921)
$MR = \exp(-Kt^n)$ Onde: $K = a \cdot \exp(-b/T_f)$	(2.15) PAGE (1949)
$MR = c[\exp(-Kt) + 1/9 \exp(-9Kt)]$ Onde: $K = a \cdot \exp(-b/T_f)$	(2.16) HENDERSON e HENDERSON (1968)
$T = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$ Onde: $a = c + dT_f$ e $b = eT_f$	(2.17) THOMPSON et alii (1968)
$MR = \frac{\bar{M} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 F_o)$ Onde $F_o = \frac{Dt}{R^2}$	(2.18) CHU e HUSTRULID (1968)
$MR = \exp[-(Kt)^n]$ Onde: $K = \exp(a + b/T_f)$	(2.19) OVERHULTS et alii (1973)
$MR = c \exp(-Kt)$ Onde: $K = a \cdot \exp(-b/T_f)$	(2.20) BROOKER et alii (1974)
$MR = \exp(-Kt^n)$ Onde: $K = a + bUR$	(2.21) FARMER et alii (1983)
$\frac{dM}{dt} = -a(M - M_{eq})$, $M = a \exp(-bt) + M_{eq}$	(2.22) TECHASENA et alii (1991)
$MR = [a + bt]^{-2}$ Onde: $a = c \exp(-d/T_f)$ e $b = e \exp(-f/T_f)$ ou	(2.23) MOTTA LIMA e MASSARANI (1995)
$MR = a + [bt + cT^2 + dT^3] \exp(-e/T_f)$	(2.24)
$MR = a \exp[-k_1 \exp(-E_{a1}/T)]t + b \exp[-k_2 \exp(-E_{a2}/T)]t$	(2.25) SRZEDNICKI et alii (1996)

a,b,c,d,e,f = parâmetros definidos ou constantes

2.6 – SECAGEM DE SEMENTES

Os secadores convectivos têm sido os mais recomendados para a secagem de materiais granulares e colóides. A secagem convectiva envolve dois fenômenos fundamentais e simultâneos, onde o calor é transferido do fluido de secagem para o sólido, evaporando o líquido contido na superfície do material e a massa é transferida em fase líquida ou vapor no interior do material, ocorrendo a transferência do vapor da superfície para a vizinhança do sólido.

A operação de secagem é de fundamental importância para a preservação de sementes. As sementes devem ser armazenadas com um teor de umidade adequado para que preservem suas qualidades fisiológicas e físicas.

Para a realização da secagem de forma adequada são necessários conhecimentos sobre as características referentes às dimensões das partículas, fator de forma, massa específica, propriedades térmicas e, principalmente, a umidade de equilíbrio.

A secagem da semente consiste na retirada de parte da umidade contida na mesma, sendo que, estão envolvidos nesta operação os fenômenos de transferência de calor e massa entre o fluido e o sólido.

A secagem artificial da semente, embora possua custo superior ao da secagem natural, proporciona controle do processo reduzindo rapidamente o conteúdo de umidade a níveis aceitáveis, sendo possível obter um material com umidade mais uniforme e sem a necessidade de riscos às intempéries ambientais.

As técnicas utilizadas na secagem de sementes variam dependendo das variedades das mesmas e necessidades finais do produto.

No que se refere às sementes de leguminosas, uma das mais extensivamente estudadas é a soja, que já foi submetida a diversas técnicas como leito deslizante com escoamentos cruzados, leito de jorro em operação contínua e batelada (BARROZO, 1995; FELIPE, 1999).

Entre tais estudos, tem-se BARROZO (1995) que estudou a transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos cruzados. A modelagem do processo foi realizada via modelo a duas fases. FELIPE (1999) estudou a influência das principais variáveis (vazão, umidade absoluta e temperatura do ar) do processo de secagem na qualidade das sementes de soja em secador de leito deslizante e escoamentos concorrentes. Ambos avaliaram as qualidades das sementes.

O feijão é outra leguminosa de grande importância e interesse. DIAS et alii (1998) desenvolveram estudo sobre a secagem de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*) em leito de jorro bidimensional a fim de avaliar a influência do tempo de secagem, da vazão do ar injetado no sistema e da carga de grãos em cada batelada sobre o tempo de cozimento, a capacidade de absorção, a densidade e o diâmetro da partícula.

O café é também um grão de grande importância, entre outros fatores, devido ao seu valor econômico no mercado internacional. FREITAS (1998) realizou a secagem de café utilizando um secador de bandejas vibradas conseguindo um produto com melhor aspecto estético.

SFREDO et alii (2002) utilizaram bandejas sem e com vibração na secagem do café. Para temperatura de 45°C, utilizando-se bandejas vibradas obtiveram uma redução de três horas no tempo de secagem.

Com relação às gramíneas ARNOSTI (1997) desenvolveu um secador transportador do tipo esteira operando em regime de escoamentos cruzados entre o sólido e o fluido para a secagem de sementes de gramínea (*Brachiaria brizantha*) obtendo resultados adequados às necessidades quanto ao processo de secagem.

PRADO (1999) realizou a secagem de sementes de mamão papaya com e sem a mucilagem em leito fixo, avaliando os efeitos da presença de mucilagem e a qualidade das sementes.

A mucilagem é um recobrimento natural presente em algumas sementes de frutos carnosos, tais como mamão, tomate e maracujá. A formação do sistema semente-gel objetiva reforçar a proteção ao embrião das sementes da mesma forma que a mucilagem, permitindo que as qualidades das sementes sejam preservadas.

As sementes utilizadas nos estudos sobre a secagem nem sempre estão disponíveis durante todo o ano. Para não haver dependência com relação à época de colheita torna-se necessário realizar a reumidificação das sementes para que as mesmas atinjam valores de umidade próximos aos de colheita.

A operação de reumidificação pode ser realizada através de borrifamento dos grãos, imersão das sementes e permanência em ambiente saturado por vapor de água. A operação de reumidificação lenta tem fornecido os melhores resultados conforme NOVAIS (1990).

As condições de qualidade devem ser verificadas antes e após a operação de reumidificação a fim de verificar os efeitos da mesma. CHICARONI (1999) constatou que o aumento do tempo de residência no reumidificador (ambiente saturado por vapor de água) provocou

danos à qualidade fisiológica das sementes de *Brachiaria brizantha*. Portanto, quando necessária deve ser realizada a avaliação da qualidade das sementes após esta operação.

O secador de leito fixo tem sido a técnica utilizada para diversas espécies de sementes, isto ocorre por esta técnica ser considerada a base para compreensão dos fenômenos fundamentais que permeiam os estudos em todos os outros leitos móveis particulados. O leito fixo apresenta a vantagem de minimizar os impactos mecânicos sobre as sementes, uma vez que estas não se movimentam através do leito, assim, espera-se que a qualidade das sementes seja melhor preservada.

A utilização deste tipo de leito na secagem de sementes com recobrimento a base de gel é desconhecida com base na literatura consultada.

Dada a falta de informação sobre o comportamento deste tipo de material, ao entrar em contato com o fluido de secagem para a determinação das quantidades de massa e energia transferidas entre as fases sólida e fluida no interior de um secador é imprescindível o levantamento dos modelos matemáticos existentes na literatura, para identificar as propriedades físicas, condições de equilíbrio e coeficientes de transporte exigidos na modelagem.

Existe um número grande de modelos matemáticos para representar os fenômenos de transferência simultânea de calor e massa durante a secagem de sólidos (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Os modelos baseados em estudos de materiais granulares em camada espessa dividem-se em simplificados, que são o modelo logarítmico e o modelo camada por camada, e nos fundamentados nas leis de transferência de calor e massa entre as fases sólida e fluida (modelos a duas fases) que são os mais completos e aceitos entre os pesquisadores.

Os modelos baseados nas leis de transferência de calor e massa entre as fases sólida e fluida fazem distinção entre as fases. Em geral, as seguintes simplificações são feitas, o encolhimento do grão é desprezível durante o processo de secagem, o gradiente de temperatura no interior da partícula não é considerado, a condução térmica entre as partículas não é considerada, os grãos possuem velocidade uniforme e o gás tem escoamento uniforme, a perda de calor através da parede do sistema é desprezível e as capacidades caloríficas do gás e do grão são constantes ao longo do leito (MASSARANI e TELLES, 1992).

As questões que geram divergências e dificuldades com relação ao modelo a duas fases são, principalmente, as referentes às condições de

equilíbrio termodinâmico e as determinações experimentais dos coeficientes de transporte.

Embora os modelos sejam bem estabelecidos, para que possam ser validados há, ainda, a necessidade de que sejam realizados testes em unidades de laboratório com os materiais em estudo para as determinações das propriedades físicas, umidade de equilíbrio, cinética de secagem e variáveis de processo.

Assim, é muito importante o procedimento experimental que leva à busca de informações sobre as variáveis de processo como temperaturas do sólido e do fluido, velocidade e umidade relativa do fluido de secagem e velocidade e umidade do sólido em um leito. Através da análise das variáveis como temperaturas do sólido e do fluido e umidade do fluido pode-se verificar se há homogeneidade das propriedades dentro de um leito ou, se durante a operação de secagem ocorre uma desestruturação do leito.

2.7 – SECAGEM DE GÉIS

Os géis são materiais de grande interesse neste estudo frente à capacidade de poderem ser utilizados como material de recobrimento.

O gel ágar é um colóide hidrofílico obtido a partir de algas marinhas e originam, principalmente, das famílias *Gracilaraceae* e *Gelidiaceae*, cujos géis são homogêneos sendo de grande aplicabilidade como meio de cultura de microorganismos, emulsificante e geleificante.

O gel ágar apresenta diferença em sua composição química e nas propriedades físicas de acordo, principalmente, com a espécie da alga da qual é extraído e com o lugar onde são encontradas (BIRD et alii 1981; MOURADI - GIVERNAUD et alii, 1992; BIRD e HINSON, 1992).

Poucos são os estudos referentes à secagem de géis, entre os quais, tem-se IGLESIAS et alii (1993) que realizaram a secagem do gel ágar para determinação da curva característica de secagem. Observaram que o gel ágar apresenta um período a taxa constante predominante no processo.

ROQUES et alii (1994) realizaram a modelagem de secagem de amostras do gel poli-acrilamida utilizando a secagem combinada convectiva e microondas. Propuseram um modelo matemático com parâmetros físicos independentes para prever taxa de secagem.

REPUNTE et alii (1996) investigaram os efeitos do conteúdo de água no gel ágar usando-o como meio de regeneração de células agregadas, no entanto, na constituição de células agregadas foi utilizado o gel alginato com recobrimento de parafina.

MOREIRA (2000) obteve avanços referentes ao desenvolvimento de metodologia e determinação do equilíbrio do sistema ágar-água-ar em ampla faixa de umidade do ar e de temperatura, verificando que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o G.A.B. MOREIRA (2000) utilizou para os experimentos de secagem, gel ágar moldado em forma cilíndrica com 0,2 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro e avaliou a importância da temperatura, da velocidade do ar e interação entre a temperatura e a velocidade na secagem do gel ágar através dos experimentos de secagem convectiva. Avaliou, ainda, através dos experimentos de secagem em camada fina que a equação de Lewis representa bem a cinética de secagem do gel ágar. O encolhimento foi quantificado através de medidas diretas. A relação de encolhimento expressa entre o diâmetro e a espessura do gel foi linear.

BRAUN (2003) analisou amostras de géis compostas por diferentes frações de massa de ágar, amido, celulose, glicose e água, em geometrias retangulares, construídas com suportes rígidos. Foram determinadas as propriedades do material com base em testes de secagem convectiva. A partir de dados de dessorção da água das amostras imersas no ar em escoamento no interior de um secador de convecção forçada foi realizada uma análise do processo a partir de equações de balanço de massa para

as fases sólida e fluida.

Recentemente, ARRIECHE (2003) desenvolveu um sistema gel, com geometria esférica, que permitiu analisar o efeito do escoamento do fluido na amostra gel, no transporte de umidade, encolhimento e na evolução da forma da amostra, durante a secagem por convecção forçada. O encolhimento foi observado pela tomada de imagens, e utilizado para o cálculo de fatores de forma.

Além das informações específicas sobre os processos de secagem de sementes e géis, o desenvolvimento do sistema semente-gel requer a busca de informações sobre o tipo de semente a ser utilizada e as suas implicações em relação ao uso adequado de testes padronizados para a avaliação da qualidade da semente “in natura” e com cobertura artificial.

2.8 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES

O beneficiamento de sementes é realizado com o intuito de preservar a qualidade das mesmas durante o armazenamento, permitindo uma boa emergência das plântulas no período de plantio. Entretanto, variáveis operacionais como temperatura e velocidade do ar de secagem, vazão de sementes no leito (para o caso de leitos móveis e operação

contínua), umidade relativa do ar de secagem, temperatura e umidade do sólido e o próprio recobrimento podem alterar a qualidade das sementes, sendo necessário, avaliar os efeitos que as mesmas provocam.

Esta avaliação segue regras oficializadas pelo Ministério da Agricultura que são padronizadas e de aceitação universal. A padronização dos testes visa viabilizar o comércio de sementes (CARVALHO, 1986). Para a aplicação dos testes devem-se ter primeiramente as informações específicas sobre a variedade de semente a ser estudada.

2.8.1 – A GRAMÍNEA MILHETO

Os milhetos são usados para forragem e como grão na alimentação de pessoas (WILSON, 1955) dependendo principalmente do gênero e da espécie.

O milheto é uma gramínea que se divide em cinco gêneros *Panicum*, *Setaria*, *Echinochloa*, *Pennisetum* e *Paspalum*.

BARYEH (2002) determinou características como umidade, comprimento do grão, espessura e área superficial para o *Pennisetum gambiense*, que é utilizado como produto básico na alimentação em regiões áridas e semi áridas do oeste da África.

No gênero *Pennisetum* a espécie mais importante cultivada é a *glaucum* conhecida como “pearl” ou “cattail millet”. Os milhetos freqüentemente produzem uma quantidade de grãos maior que outros tipos de cereais em condições de solo infértil, calor intenso e chuvas escassas e ainda como vantagem a maioria necessita de uma curta estação para o desenvolvimento (LEONARD e MARTIN, 1963).

O milheto é cultivado em várias regiões do país, mas seu cultivo em regiões de clima frio apresenta inúmeras vantagens. Nas épocas frias do ano as pastagens paralisam seu crescimento provocando sérios prejuízos. Assim, há a necessidade de forrageiras que possuam alta velocidade de crescimento e que possam produzir grande quantidade de forragem com alta qualidade, em curto período de tempo.

O milheto exhibe uma vegetação alta (até 3m) e entouceirada, apresenta boa tolerância à seca e ao frio (Site: agrocosta.com.br, 2000), baixa resistência à umidade. Produz forragem tenra com excelente valor nutritivo, possui de 15 a 16% de proteína bruta na massa seca (Site: naterra.com.br, 2000).

O milheto é muito palatável e apresenta excelente digestibilidade em animais de médio e grande porte. Quando comparado ao milho e sorgos forrageiros, apresenta melhor absorção de água e nutrientes, adaptando-se bem a solos de baixa e média fertilidade.

Em comparação com o sorgo forrageiro, não ocorre problema de toxidez durante todo o ciclo, é a forrageira anual de porte alto mais resistente à seca (SAIBRO, 1972), sendo atualmente utilizada no pastoreio direto e corte para cocho, silagem, feno e como cobertura verde (Site: matsuda.com.br, 2000).

A produção de massa verde está na faixa de 37 a 45ton/ha, entretanto, as sementes do milho apresentam graves problemas quanto à preservação, sendo facilmente degradadas pelo ataque de pragas. Isto gera a necessidade de encontrar fatores que possam aumentar sua longevidade como, por exemplo, o recobrimento seguido de secagem.

2.8.2 – TESTES PADRONIZADOS

O teste que busca avaliar as condições de germinação no próprio campo é chamado de “Teste de Vigor de Plântulas”. Este nome foi proposto para diferenciá-lo do teste de germinação, sendo realizado em caráter de complementaridade. Este teste é desenvolvido obedecendo a normas, tais como, profundidade de plantio e quantidade de umidade fornecida. As condições do meio (solo ou areia) onde um lote vai ser plantado são variáveis, não sendo possível prever o comportamento das sementes sob todas as condições possíveis.

A qualidade fisiológica é, também, avaliada através de testes de envelhecimento precoce que visam avaliar o vigor uma vez que o teste de germinação é realizado em condições ambientais ótimas, não sendo suficiente para prever a capacidade de desempenho das sementes no campo.

Os testes que avaliam a qualidade física das sementes visam quantificar os índices de fissuras no tegumento e prováveis danos mecânicos e/ou térmicos sofridos pelas partículas.

Os testes mais utilizados para a avaliação de qualidades fisiológicas (germinação e vigor) e qualidade física (LANARV, 1980) são descritos a seguir.

Teste Padrão de Germinação (TPG): deve-se utilizar no mínimo 400 sementes divididas em repetições de 4 x 100, 8 x 50 ou 16 x 25, devem ser colocadas em substrato próprio, papel-toalha, tecido ou areia dependendo da semente, previamente umedecido.

O substrato e as sementes são colocados em germinadores cuja temperatura é controlada, sendo de 20°C durante a noite e 30°C durante o dia, ou 25°C durante todo o teste, sendo a umidade relativa do ar de aproximadamente 100%. No geral as sementes ficam nestas condições por um período total de oito dias, sendo que no quarto ou quinto dia

procede-se a contagem das plântulas germinadas e infeccionadas. Após esta contagem o material é levado novamente à germinadora ficando ali, por mais três ou quatro dias quando será realizada a última contagem.

Teste de Envelhecimento Precoce: este teste que visa avaliar o vigor das sementes faz com que as mesmas sejam submetidas a condições extremamente adversas, onde os processos de deterioração são acelerados. Coloca-se um lote de 200 sementes numa câmara de envelhecimento precoce, com temperatura de 40°C e umidade relativa de 100%, durante um período de 48 horas. Após o período de exposição as sementes são submetidas ao Teste Padrão de Germinação.

Teste do Hipoclorito de Sódio: para detectar fissuras na superfície das sementes são colocadas em placa de Petri dois lotes de 100 sementes e recobertas com solução de hipoclorito de sódio a 5% durante 7 minutos. Após este período as sementes intumescidas são contadas.

O método de aquisição de imagens também está sendo utilizado em trabalhos para analisar a presença de quebras na camada externa de sementes.

GUNASEKARAN et alii (1988) utilizaram a aquisição de imagens para detectar a presença de quebras na camada externa de sementes de soja recobertas e também para verificar a quebra de

cotilédones. Foram avaliadas as intensidades de incidência de luz, assim como, a base na qual a semente é colocada para que a imagem seja adquirida. A orientação adequada da semente em direção à câmara é fundamental.

A realização de testes de secagem sob determinadas condições de operação é de fundamental importância para poder avaliar os fenômenos e possíveis mudanças que podem ocorrer com o sólido durante as operações envolvidas no desenvolvimento do sistema semente-gel.

Apesar dos recentes progressos nos estudos sobre a secagem de sementes e de géis, constata-se uma escassez de informações, principalmente, na busca da integração destas duas linhas de pesquisa através da realização do recobrimento de sementes com material a base de gel.

Estudos desenvolvidos no CSPSS do DEQ/UFSCar possibilitam a integração destas pesquisas que são a secagem de sementes e a secagem de géis, vindo suprir as necessidades atuais.

Não foram localizadas, na literatura consultada, informações sobre as concentrações adequadas para o material de recobrimento a base

de gel, ou metodologias que promovam a adição de material à base de gel à superfície das sementes.

O revestimento da semente com gel gera uma combinação pouco conhecida, levando à necessidade de estudos experimentais que visem sua caracterização no que se refere ao tamanho das partículas, forma, massa específica, condutividade e difusividade térmica, calor específico, umidade de equilíbrio higroscópico e comportamento do material durante o contato com o fluido de secagem.

A necessidade da busca de um recobrimento que forneça proteção sem provocar danos à semente (tegumento, endosperma e embrião) e que permita o desenvolvimento sustentável com relação ao meio ambiente é evidente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, as metodologias de preparação dos materiais e o desenvolvimento das operações para a construção do sistema semente-gel, bem como, as metodologias para as determinações das propriedades físicas, a unidade experimental de secagem convectiva, assim como, o tratamento dos dados obtidos.

3.1 – MATERIAIS

Os materiais utilizados para a construção do sistema semente-gel são sementes da gramínea *Pennisetum glaucum* (milheto), gel ágar e sorbato (MERCK).

O milheto é cultivado em várias regiões do país, sendo vantajoso principalmente em regiões de clima frio como citado no item 2.8.1, entretanto, suas sementes são facilmente atacadas por pragas. Assim, decidiu-se escolher esta gramínea para realizar o estudo experimental de

recobrimento artificial a base de gel.

A escolha do gel ágar deve-se ao fato de ser um material de grande aplicabilidade em vários setores e, sendo permeável ao oxigênio, poderá permitir que as sementes mantenham suas qualidades e devido, também, à sua provável capacidade de fixação na superfície da partícula.

Outro fator decisivo, para o estudo ser direcionado para estes materiais, encontra-se no fato de já existirem pesquisas no CSPSS/UFSCar destes materiais de forma isolada.

3.1.1 – SEMENTES DE *Pennisetum glaucum*

Entre os diferentes gêneros e espécies de milheto, optou-se pelo gênero *Pennisetum* e a espécie *glaucum* que é a mais importante entre as cultivadas em nosso país. Esta escolha deve-se, também, a geometria da partícula, que favorece o contato entre partículas no leito de secagem, e a quantidade de proteínas em sua composição.

Foram utilizadas sementes adquiridas no comércio e oriundas diretamente do campo. Praticamente a totalidade das sementes utilizadas foi adquirida no comércio e estavam previamente secas com umidade em torno de 12% bu.

As sementes de *Pennisetum glaucum* adquiridas com umidade em torno de 12% bu são apresentadas na foto mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Foto das sementes de *Pennisetum glaucum* escala (1×10^{-2} m : $0,24 \times 10^{-2}$ m).

As sementes provenientes diretamente do campo foram utilizadas como referência para obter dados de umidade e possibilitar a comparação com os valores das sementes adquiridas com teor de umidade reduzido e reumidificadas. Isto é necessário devido à

impossibilidade de obter, durante todo o período de realização dos experimentos, sementes oriundas diretamente do campo e com elevado teor de umidade.

A composição química média de grãos de milho encontrada na literatura é apresentada na Tabela 3.1. De acordo com PURSEGLOVE (1972) o valor nutritivo do milho é equivalente ao do arroz e do trigo.

Tabela 3.1 – Composição química média de grãos de milho
(PURSEGLOVE, 1972)

Constituinte	Participação na Composição Química (%)
Água	12,4
Proteína	11,6
Carboidratos (Totais)	67,1
Gordura	5,0
Fibra	1,2
Cinzas	2,7

Segundo PURSEGLOVE (1972) a composição de proteínas pode variar de 8,8 a 16,1 %, o valor apresentado na Tabela 3.1 foi obtido da análise de um determinado cultivo.

Com base nos constituintes apresentados na Tabela 3.1 constata-se a riqueza das partículas com elevado teor de carboidratos e proteínas.

A realização do recobrimento artificial com material permeável ao oxigênio poderá promover a proteção das sementes.

Tomadas as decisões sobre os materiais a serem estudados, deve-se dirigir à preparação dos constituintes que compõem o sistema semente-gel.

3.1.2 – PREPARAÇÃO DAS SEMENTES

As sementes na forma que são adquiridas, com teor de umidade reduzido, ou advindas do campo contém materiais inertes e sementes quebradas devido às operações a que foram submetidas. Portanto, é necessário que as mesmas passem por um processo de separação para a retirada destes materiais.

A primeira separação foi realizada via peneiramento. A seguir, foram retiradas de forma manual as impurezas e as sementes danificadas por ataque de insetos ou devido ao próprio manuseio. As sementes intactas, após a seleção, passaram por um quarteador do tipo Johnes marca DEO LEO de 16 canais e divisão em duas partes a fim de homogeneizar a amostra que foi utilizada nos experimentos.

De posse das amostras homogeneizadas é necessário a determinação da umidade das sementes, para verificação de quanto as

sementes adquiridas secas devem ser reumidificadas para atingirem um valor de umidade próximo ao de colheita.

3.1.3 – UMIDADE DAS PARTÍCULAS E REUMIDIFICAÇÃO

A umidade das sementes foi determinada através do método direto da estufa (LANARV, 1980), as massas das amostras foram determinadas e levadas a uma estufa da marca FANEM, modelo 315 SE por um período de 24 horas à temperatura de $(105\pm 3)^{\circ}\text{C}$. Após este período as amostras foram retiradas da estufa e levadas a um dessecador por 20 minutos. Atendido o equilíbrio térmico entre as amostras e o ambiente realizou-se a quantificação da massa em balança analítica com precisão de 10^{-7}kg então, determinou-se a porcentagem de umidade nas amostras em base úmida.

A umidade do material em base úmida é determinada através da divisão da massa de água perdida, obtida através da diferença da massa inicial e da massa seca, pela massa inicial do sólido.

– Reumidificação das sementes.

As sementes foram adquiridas “in natura”, através de colheita direta no campo e, secas com umidade em torno de 12% bu uma vez que aquelas não estão disponíveis durante todo o ano. As sementes foram utilizadas nos experimentos com umidade reduzida (em torno de 12% bu) e reumidificadas, por um processo de reumidificação artificial para que atingissem valores próximos da umidade de colheita. O valor de reumidificação foi estabelecido a partir dos valores de umidade dos grãos advindos da colheita em campo na região de São Carlos–SP.

Dentre as técnicas apresentadas no Capítulo 2, a que tem apresentado os melhores resultados para as sementes de gramíneas é a que utiliza o processo de reumidificação lenta por meio da absorção do vapor d’água saturado pela semente, conforme apresentado por NOVAIS (1990) e, portanto, esta foi a técnica utilizada neste estudo.

– Reumidificador de sementes.

No processo de adsorção do vapor d’água pelas sementes foi utilizado o procedimento de reumidificação de sementes proposto por

CHICARONI (1998), de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.2.

A temperatura da água no interior da câmara, Figura 3.2, é controlada durante a operação através de resistências elétricas de 2500 W, facilmente encontradas no comércio e de baixo custo, ligadas a um controlador digital de temperatura da marca FAC modelo 203 D.

Um suporte retangular de 55x60 cm, que possui como base uma tela, sustenta as sementes na região de vapor d'água saturado, sem que haja contato direto com a superfície d'água, Figura 3.2.

Após a regulagem da temperatura para 35°C, esta temperatura foi selecionada a partir de testes preliminares, as sementes foram colocadas no suporte de tela. As amostras foram retiradas em tréplicas em quatro posições equidistantes para determinação da umidade através do método da estufa.

A operação de reumidificação foi realizada dispondo uma camada de material na tela de suporte e, também, uma camada de espessura de $1,5 \times 10^{-2}$ m. A camada não pode ser muito espessa para evitar a ocorrência do fenômeno de ardedura e as sementes germinarem durante o processo de reumidificação.

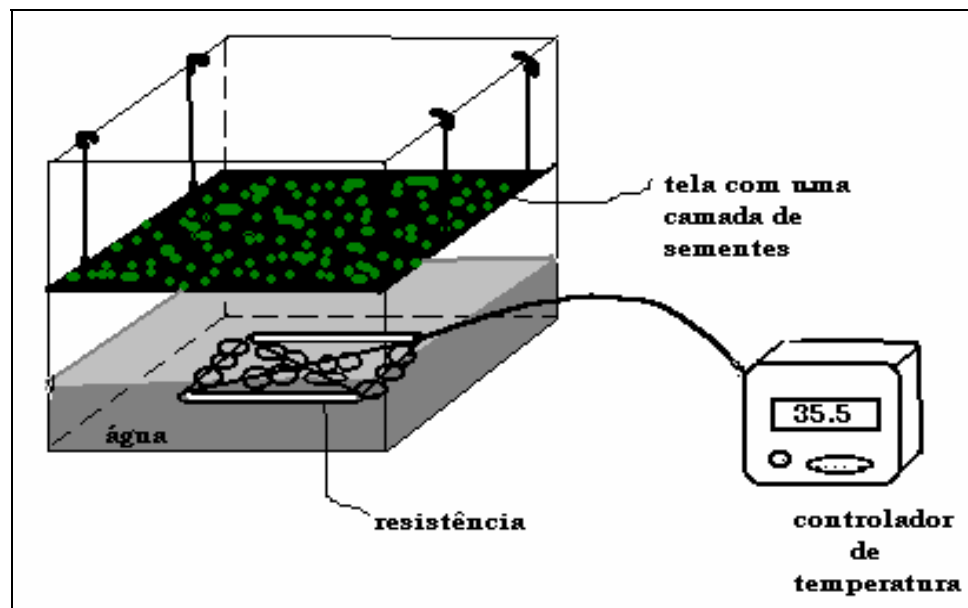


Figura 3.2 – Esquema do reumidificador de sementes utilizado (CHICARONI et alii, 1998).

3.1.4 – GEL ÁGAR

Conforme apresentado no item 2.7, o gel ágar apresenta variações na sua composição química e nas propriedades físicas de acordo, principalmente, com a espécie da alga da qual é extraído e com a região onde são encontradas.

Portanto, foi necessário reduzir ao máximo a variabilidade destes fatores para não influenciarem nos resultados obtidos. Com esta finalidade, o gel ágar foi adquirido na forma granular de um mesmo

fornecedor (DIFCO) e de um mesmo lote visando manter as mesmas características do material durante todo o desenvolvimento do trabalho.

As propriedades químicas e físicas, bem como, a solubilidade do gel ágar encontradas na literatura são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades do gel ágar (BIRD et alii, 1981)

Solubilidade	Propriedades químicas e físicas
Insolúvel em água fria. Pouco solúvel em água quente. Facilmente solúvel em água em ebulição.	pH~7,0
	Capacidade de formar gel acima de 0,04% de concentração.
	Gel forte a 1% de concentração.
	Funde entre 80°C e 85°C
	Pode apresentar rupturas acima de 40°C.
	É permeável ao oxigênio.

3.1.5 – ESCOLHA E PREPARAÇÃO DA MISTURA A BASE DE GEL

Na preparação do material de recobrimento a base de gel utilizou-se o procedimento descrito no Food Chemicals Codex (1980). Foi utilizada uma balança da marca GEHAKA com resolução de 1×10^{-6}

kg. Foram preparados dois tipos de soluções, uma solução binária de água e gel ágar, e outra mistura que favorecesse a sua adesão às sementes, composta por água, gel ágar e sorbato.

A água destilada utilizada para reidratar o gel seco foi aquecida, após a ebulição, o gel ágar foi adicionado permanecendo em cozimento durante 10min (600s) sob agitação contínua. A mistura cuja preparação teve a adição do sorbato foi preparada de duas maneiras distintas, adicionando-se o sorbato em diferentes intervalos de tempo, no início das preparações juntamente com o ágar e, também, após cinco minutos do cozimento do ágar.

Ao final deste procedimento a temperatura da solução foi reduzida para aproximadamente 39°C para iniciar o recobrimento das sementes. A escolha desta temperatura deve-se ao fato da geleificação do gel nas concentrações utilizadas iniciar a temperaturas de aproximadamente 35°C e, também, ao fato de temperaturas acima de 40°C poderem prejudicar o embrião (parte viva) da semente.

3.1.6 – PREPARAÇÃO DAS MISTURAS DE RECOBRIMENTO

Na preparação das misturas de recobrimento buscou-se determinar uma composição que permitisse a moldagem e extração das sementes recobertas. Formando uma estrutura que tornasse possível o manuseio sem que houvesse rupturas e viabilizasse a realização da caracterização do sistema semente-gel, o processo de secagem, a manutenção da qualidade das sementes e a reprodutibilidade destes resultados.

Visando encontrar a melhor forma de recobrimento, foram preparadas soluções com diferentes concentrações. As soluções binárias preparadas com água e gel ágar possuíam concentrações de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5% de gel ágar.

As soluções que continham água, gel ágar e sorbato possuíam as mesmas concentrações de gel ágar e concentrações de sorbato de 1%, 2%, 5%, 6%, 8%, 12%, 50% e 100% em relação ao gel.

3.2 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL

Várias são as técnicas de recobrimento existentes de acordo com FREIRE e OLIVEIRA (1992), conforme discutido no item 2.2. Podem ser utilizados leitos móveis que favorecem a transferência de calor e massa ou leitos fixos que diminuem o impacto mecânico nas sementes. Entretanto, para este material de recobrimento, que se apresenta na fase de goma, e para as características da superfície destas sementes não foram encontradas informações na literatura consultada. Portanto, inicialmente foi utilizada a técnica de imersão, por promover mínimo impacto nas sementes, diminuindo ou eliminando desgastes mecânicos.

Foram recobertas sementes reumidificadas com valores de umidade de aproximadamente 22% bu (próximo ao valor de colheita) e sementes secas com umidade em torno de 12% bu possibilitando a determinação do melhor método a ser utilizado.

A determinação da umidade do sistema semente-gel foi realizada através de duas metodologias, método da estufa e conforme o método apresentado por LEES (1980) para géis

O método de LEES consiste em deixar a amostra por 4 horas em estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$, determinando-se a massa da amostra ao término deste período, a amostra é levada novamente à estufa e após 30 minutos

quantifica-se a massa novamente. Caso a massa apresente variação, prossegue-se a secagem e de 30 em 30 minutos realiza-se nova determinação até que a mesma permaneça constante.

3.2.1 – MOLDAGEM E GELEIFICAÇÃO DA CAMADA SOBRE AS PARTÍCULAS

O recobrimento foi realizado através de imersão direta das sementes no colóide, seguida da disposição das mesmas em bandeja e através de recobrimento individual com a utilização de placas perfuradas, de acordo com a representação esquemática na Figura 3.3.

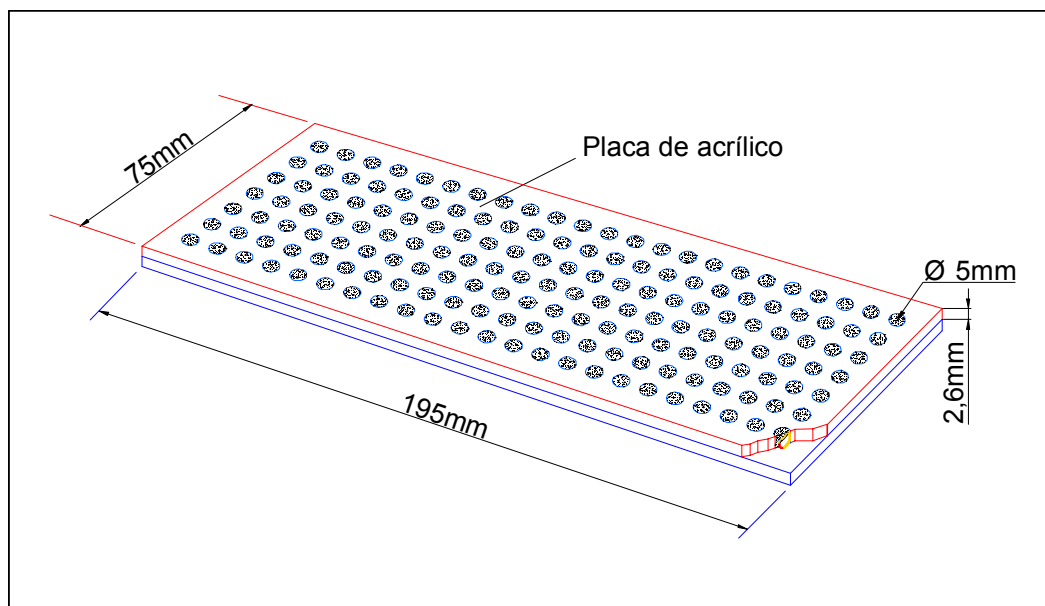


Figura 3.3 – Esquema da placa confeccionada para a realização do recobrimento das sementes.

Foram construídas placas perfuradas com dimensões de $1,95 \times 10^{-1}$ m de comprimento, $7,5 \times 10^{-2}$ m de largura e espessuras de 4×10^{-3} m e $2,6 \times 10^{-3}$ m. Os diâmetros dos orifícios que comportam as sementes são de 5×10^{-3} m.

As placas foram construídas visando permitir a realização do recobrimento o mais uniforme possível no que se refere à espessura da camada de material adicionado. As sementes foram distribuídas individualmente em cada orifício, os quais foram preenchidos com material a base de gel a uma temperatura em torno de 39°C .

Foram avaliadas placas confeccionadas com diferentes materiais, ou sejam, PVC, aço inox e acrílico, tendo em vista garantir a melhor condição de moldagem e extração do sistema semente-gel das placas. Isto é, busca-se um procedimento que cause o mínimo dano possível ao sistema.

Para possibilitar um maior período de manipulação do gel ágar sem ocorrer a solidificação, antes da cobertura e posicionamento das sementes, foram utilizadas duas técnicas. Na primeira as placas eram mantidas sobre uma manta de aquecimento a uma temperatura de aproximadamente 40°C e o gel era mantido aquecido em banho termostático.

Na segunda técnica, somente o gel foi mantido aquecido. Para manter o gel aquecido o recipiente foi mantido submerso em banho ultratermostático, marca TECNAL, a uma temperatura de aproximadamente 40°C. Assim, a retirada do gel do recipiente submerso e transporte para verter a mistura na placa, ocorreram a uma temperatura que ainda possibilitava centralizar a semente no orifício. Para isto, contou-se com a ajuda de um bastão que foi construído com uma ponta de metal. A geleificação do gel ocorreu a aproximadamente 36°C.

Na temperatura ambiente era aguardado que o gel se solidificasse para remoção das sementes da placa. Estes grãos envoltos com gel eram então utilizados na caracterização do material e nos ensaios de secagem.

As propriedades relacionadas ao fluido são geralmente obtidas diretamente da literatura (SINGH e HELDMAN, 1993, PERRY e GREEN, 1977). Portanto, o grande desafio referiu-se à construção do sistema semente-gel e na caracterização do mesmo.

Após a confecção do sistema semente-gel, foi possível iniciar os experimentos de caracterização física do mesmo.

3.3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SEMENTES SEM E COM COBERTURA ARTIFICIAL

Entre as técnicas laboratoriais e equipamentos comerciais apresentadas no Capítulo 2, foram utilizadas para a caracterização dos materiais as metodologias descritas a seguir.

3.3.1 – DIÂMETRO CARACTERÍSTICO, ESFERICIDADE E MASSA ESPECÍFICA

– Diâmetro característico.

A determinação do diâmetro médio, comprimento médio dos diâmetros medidos a cada intervalo de 2° e passando pelo centróide da semente, e do maior comprimento característico da partícula, comprimento da linha mais longa unindo dois pontos contidos no perímetro da partícula e passando pelo centróide, foi realizada através da análise de imagens num contador de partículas GALAI MACRO VIEWER utilizando-se software Image Pro-Plus[®]. A utilização desta metodologia para as sementes com recobrimento exigiu que as mesmas fossem tingidas com azul de metileno (P.A. SYNTH) para fornecer o

contraste necessário à obtenção da imagem necessária à realização das medidas.

– Espessura do revestimento.

A espessura do revestimento foi obtida através da média entre a diferença dos diâmetros médios das sementes com recobrimento e das sementes sem recobrimento.

– Esfericidade.

O fator de forma das partículas foi determinado através da esfericidade, determinada como a razão entre o diâmetro médio e o maior comprimento característico, Equação 2.1.

$$\phi = \frac{d_p}{d_l} \quad (2.1)$$

– Massa específica.

As massas específicas das sementes de *Pennisetum glaucum* e do sistema semente-gel foram determinadas através da picnometria líquida, utilizando-se hexano P.A e a água como líquidos de referência, e picnometria gasosa através do ACCUPYE 1300[®], MICROMERITICS INC, na qual utilizou-se o gás hélio, possibilitando a comparação dos resultados obtidos na utilização de técnicas laboratoriais e de equipamento comercial.

3.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica efetiva foi obtida utilizando-se a célula cilíndrica projetada e construída por LUCAS et alii (2002) baseada no método em regime transiente da sonda linear (BLACKWELL, 1952, TYE, 1969). Este método foi utilizado por permitir a determinação desta propriedade em um intervalo de tempo de horas ao passo que outros métodos demandariam um tempo elevado, podendo vir a interferir na umidade da amostra.

O equipamento consiste de uma célula de medida, a qual possui uma sonda cuja resistência interna é ligada a uma fonte estabilizada de

voltagem e um termopar que é ligado a um registrador potenciométrico. Os valores de temperatura em função do tempo, corrente e tensão foram medidos simultaneamente possibilitando a determinação da densidade de fluxo de calor (q). O equipamento utilizado para a condução dos experimentos apresenta-se esquematizado na Figura 3.4.

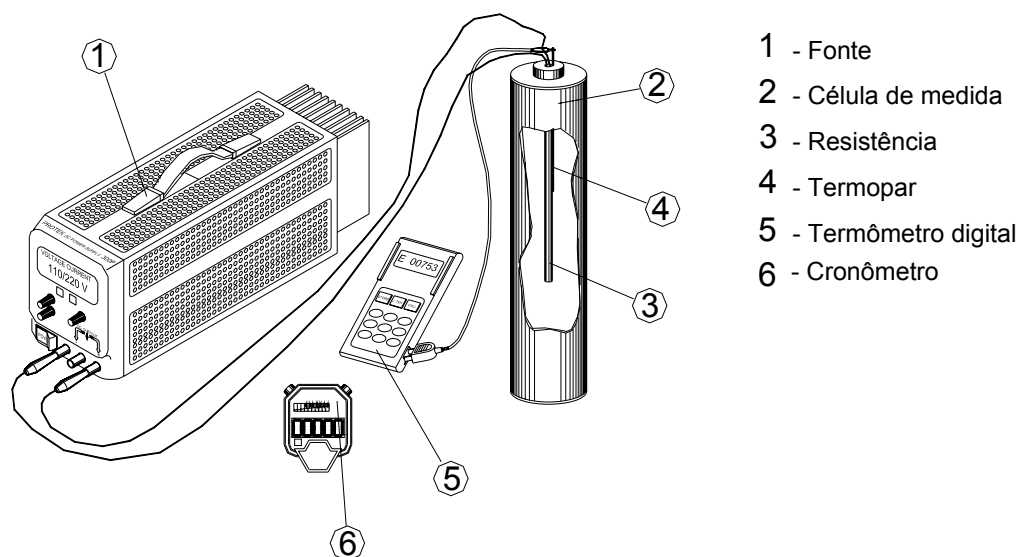


Figura 3.4 – Esquema do aparato utilizado na determinação da condutividade térmica efetiva (LUCCAS et alii, 2002).

Plotou-se um gráfico dos dados obtidos da variação de temperatura em função do tempo. Determinou-se uma região linear cujo

coeficiente angular é $q/k_{ef}4\pi$, Equação (3.1), assim, determinou-se a condutividade térmica efetiva.

$$\frac{d\Delta T}{dlnt} = \frac{q}{k_{ef} 4\pi} \quad (3.1)$$

Com base na determinação da condutividade térmica do meio poroso, k_{ef} , obteve-se a condutividade térmica do sólido, k_s , através de correlações da literatura conforme apresentado em LUCCAS et alii (2002). Através da moagem das sementes sem recobrimento e aplicação de diferentes pressões de empacotamento para formação do leito, determinou-se o k_{ef} para as sementes sem recobrimento. A porosidade do meio, ε , foi determinada utilizando-se a técnica gravimétrica.

3.3.3 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica foi determinada utilizando-se a célula projetada e construída por LUCCAS et alii (2002) baseando-se no método proposto por DICKERSON (1965) onde a transferência de calor ocorre em regime transiente e a temperatura da amostra aumenta linearmente com o tempo.

O método consiste em colocar uma célula cilíndrica cujas paredes são confeccionadas com material de alta condutividade térmica, latão, e as extremidades, que são a base e o topo da célula são confeccionadas com material isolante, teflon, a fim de minimizar a transferência de calor axial entre a amostra e o meio externo.

As medidas de temperatura foram realizadas via termopares conectados a um milivoltímetro. As posições dos termopares são duas, uma na parede da célula de medida e outra no centro da célula cilíndrica, Figura 3.5.

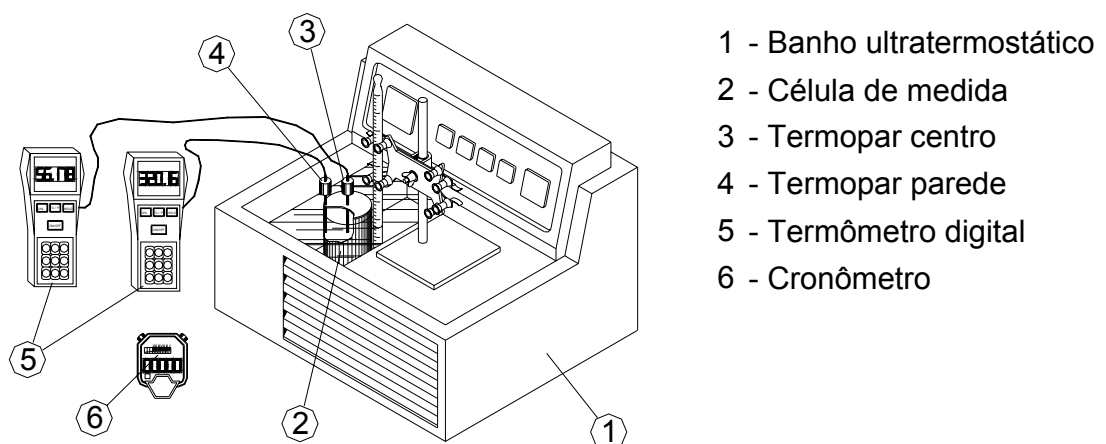


Figura 3.5 – Aparato utilizado na determinação da difusividade térmica efetiva (LUCCAS et alii, 2002).

A temperatura inicial é constante e de igual valor nas duas regiões de medida. Satisfeita esta condição o experimento é iniciado através do aquecimento da água do banho termostático no qual a célula cilíndrica com a amostra está mergulhada. As medidas de temperatura são realizadas em intervalos iguais de tempo.

Através da Equação (3.2) determina-se a difusividade térmica efetiva (α_{ef}).

$$\alpha_{ef} = \frac{\tau R^2}{4(T_r - T_c)} \quad (3.2)$$

onde, τ é a taxa constante de aquecimento, R é o raio da célula, T_r é a temperatura da parede interna da célula e T_c é a temperatura no centro da célula, conforme a Figura (3.5).

Os valores de τ , T_r e T_c são obtidos no intervalo da curva de temperatura em função do tempo que for linear, ou seja, na região de aquecimento uniforme.

A partir da difusividade térmica do meio, α_0 , determina-se a difusividade térmica da amostra, α_s , através de correlações da literatura, conforme LUCAS et alii (2002).

3.3.4 – CALOR ESPECÍFICO

O calor específico das sementes de milho foi determinado com base na Equação (2.4), utilizando-se os valores de condutividade e difusividade térmicas e massa específica previamente determinados.

$$c_{ps} = \frac{k_s}{\alpha_s \rho_s} \quad (2.4)$$

onde, c_{ps} é o calor específico do sólido, k_s é a condutividade térmica do sólido, α_s é a difusividade térmica do sólido e ρ_s é a massa específica do sólido.

3.4 – ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO DO SISTEMA SEMENTE-GEL-AR

Em função da não disponibilidade de dados referentes à umidade de equilíbrio das sementes de milho com recobrimento a base de gel ágar e ao desconhecimento do comportamento frente às metodologias existentes (método gravimétrico e método higrométrico), propôs-se

diferentes métodos baseados no método estático gravimétrico com a utilização de soluções salinas (LABUZZA et alii, 1985) para a determinação da umidade de equilíbrio.

3.4.1 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Para a determinação da umidade de equilíbrio foram avaliados diferentes métodos visando obter o mais adequado para este tipo de material. Foram utilizadas metodologias de laboratório e equipamentos comerciais.

Dentre os métodos a serem avaliados, escolheu-se o método gravimétrico estático com soluções salinas. O método estático foi escolhido devido a maior facilidade em obter condições termodinâmicas constantes. E a escolha das soluções salinas deve-se ao fator segurança no manuseio e pela maior facilidade em manter a umidade relativa do meio constante.

A Tabela 3.3 apresenta os valores de umidade relativa de diferentes soluções salinas a diferentes temperaturas.

As soluções salinas foram colocadas em potes hermeticamente fechados, esquematizados na Figura 3.6.

Tabela 3.3 – Umidade relativa de soluções salinas em diferentes temperaturas (LABUZZA et alii, 1985).

Solução	Temperatura (°C)				
	25	30	40	45	50
Salina	Umidade Relativa (decimal)				
LiCl	0,113	0,113	0,112	0,111	0,111
CH ₃ COOK	0,225	0,216	0,204	0,195	0,192
MgCl ₂	0,328	0,324	0,318	0,314	0,312
K ₂ CO ₃	0,432	0,432	0,432	0,432	0,433
NaNO ₂	0,645	0,635	0,616	0,603	0,597
NaCl	0,753	0,750	0,748	0,747	0,746
KCl	0,843	0,834	0,818	0,808	0,802

Os potes possuíam cerca de $7,0 \times 10^{-2}$ m de altura e $6,0 \times 10^{-2}$ m de diâmetro sendo que, as amostras ficaram suportadas no interior destes potes sem que houvesse contato direto com a solução. Os potes foram inseridos em incubadoras, marca FAUVEL modelo EI 430 G, com temperatura regulável que estavam com os valores previamente ajustados.

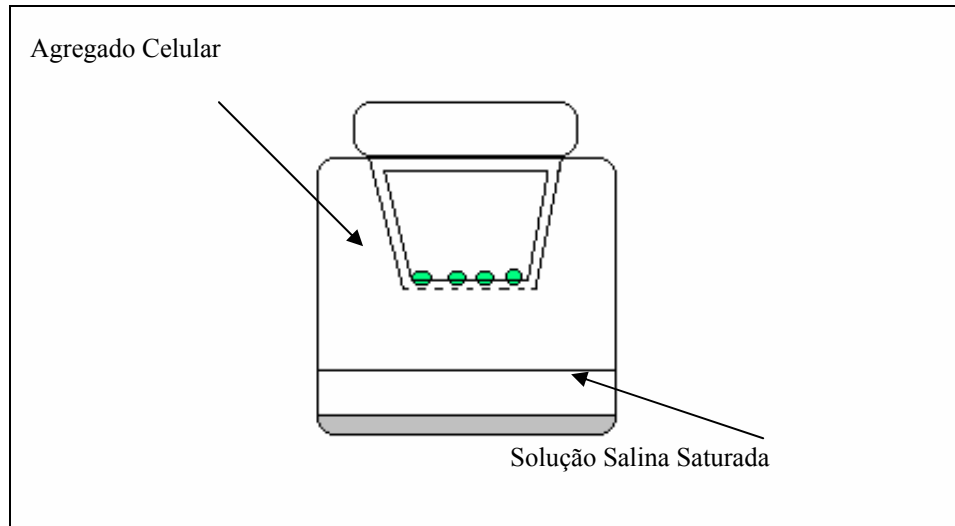


Figura 3.6 – Esquema do recipiente utilizado nos testes de equilíbrio higroscópico, contendo a solução salina e as amostras do agregado.

Os potes foram retirados da incubadora e as soluções agitadas diariamente, via agitador magnético, STIRRER/HOTPLATE, com o auxílio de barras magnéticas QUIMIS-307/P, planas, com 11x7mm, revestidas com teflon, para garantir a homogeneidade e saturação das mesmas durante todo o experimento. Assim, a transferência de massa ocorreu em condições de umidade relativa e temperatura do ar aproximadamente constantes.

As massas das amostras de sementes recobertas foram determinadas em balança analítica de precisão 1×10^{-7} kg, quando não

mais ocorria variação da massa considerava-se que a condição de equilíbrio era atingida. A seguir, o teor de umidade era determinado pelo método de LEES (1980), de acordo com a metodologia apresentada no item 3.2.

Utilizou-se, também, o método higrométrico, com o auxílio do equipamento comercial Thermoconstanter modelo TH200 da NOVASINA. Este método apresenta como vantagem menor tempo de análise sendo de minutos a horas dependendo do material em questão, enquanto no método estático demandam-se dias.

Além destes métodos clássicos, duas novas metodologias foram propostas e analisadas, as aplicações de duas variações do método gravimétrico foram avaliadas visando promover a aceleração da retirada de umidade do sistema. Uma metodologia consistiu em colocar as sementes recobertas em ambiente de umidade reduzida (solução de LiCl), seguida da transferência para ambientes de diferentes umidades.

A outra metodologia proposta e analisada tem por base a maior redução do teor de umidade das sementes e posterior retirada de umidade do sistema semente-gel. O teor de umidade das sementes é reduzido de (12 ± 1) para $(10 \pm 1)\%$ bu em estufa de circulação forçada a 20°C por um período de 1 hora. Realiza-se o recobrimento das sementes e o sistema passa por aceleração de retirada de umidade através da

colocação do mesmo em estufa de circulação forçada a 20°C por um período de (20 ± 5) minutos e posterior colocação em ambientes de diferentes umidades relativas e temperaturas em potes hermeticamente fechados.

Foi necessária a retirada das sementes recobertas da estufa enquanto ainda houvesse a ocorrência de dessorção de vapor d'água para que fosse realizada a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico. As massas das amostras inseridas nas incubadoras foram quantificadas de acordo com o método estático gravimétrico convencional (LABUZA et alii, 1985).

Os experimentos foram realizados em réplicas e em trélicas, quando necessário, para verificar a reprodutibilidade dos dados obtidos.

3.4.2 – ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

Os dados obtidos experimentalmente foram utilizados para obter uma correlação que represente a dependência da umidade de equilíbrio do sólido em função da umidade relativa e temperatura do ar circundante.

Foram analisadas as Equações (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) e (2.11) que representam respectivamente as equações de Henderson

(HENDERSON, 1952), Chung-Pfost (CHUNG-PFOST, 1967), Henderson-Thompson (THOMPSON et alii, 1968), CHEN-CLAYTON (1971), Halsey Modificada (OSBORN et alii, 1989), G.A.B (GARCIA-ALVARADO et alii, 1995), e foram apresentadas na Tabela 2.1.

Adotou-se técnicas estatísticas para o ajuste das equações aos dados experimentais, foi utilizado o método de regressão não linear através do software STATISTICA[®].

O critério estatístico utilizado foi baseado nos valores do coeficiente de correlação (R^2), na análise da distribuição de resíduos e na razão entre média quadrática da regressão e média quadrática devida aos resíduos (F) comparada a valores tabelados, conforme NETO et alii (1996).

3.5 – UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM

A fim de minimizar os impactos mecânicos sobre as partículas a secagem foi conduzida em uma unidade experimental de leito fixo. Trata-se de uma unidade de secagem via convecção forçada composta pelos sistemas de escoamento, aquecimento e resfriamento de fluido, periféricos e a célula de secagem propriamente dita.

3.5.1 – SECADOR DE CONVECÇÃO FORÇADA

A unidade experimental de secagem utilizada é a esquematizada na Figura 3.7. A partir da unidade de secagem construída por SILVA (1997), foram realizadas modificações para que a mesma pudesse atender às condições operacionais utilizadas neste trabalho.

Foi inserido um trocador de calor do tipo casco e tubo com circulação de água na região coaxial, na configuração de escoamentos contra correntes, para possibilitar atingir a faixa operacional de temperaturas utilizadas. Adicionou-se, também, um novo sistema de chave seletora e milivoltímetro digital a fim de possibilitar a conexão de um conjunto de termopares para a aquisição de temperaturas em leito fixo e camada espessa.

Conforme a Figura 3.7, o equipamento de secagem é composto por um soprador(1), trocador de calor para refrigeração(2), medidor de vazão do tipo placa de orifício (3), aquecedor elétrico (4) acoplado a um variador de voltagem (5), psicrômetro(6), chave seletora e milivoltímetro digital (7), termopar de cobre-constantan (8), célula de secagem(9),

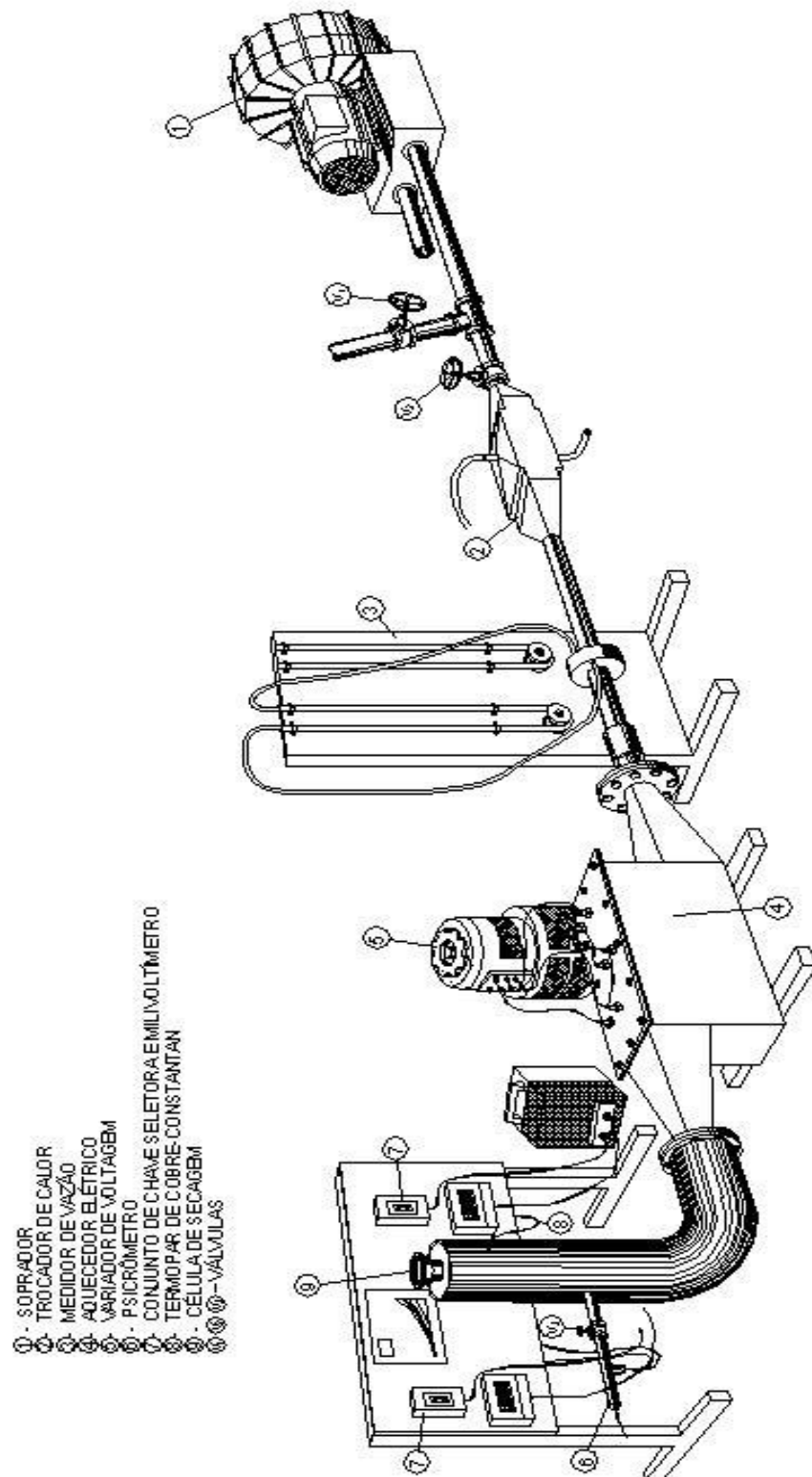


Figura 3.7–Esquema da unidade experimental de secagem utilizada

(SILVA, 1997).

válvulas gaveta para regulagem de vazão (V_1 e V_2), e a válvula esférica no acesso ao psicrômetro (V_3). Termopares de cobre-constantan são ligados ao milivoltímetro digital para medidas de temperaturas na célula de secagem.

A tubulação posterior ao aquecedor elétrico é toda isolada por uma camada de, aproximadamente, 3 cm de espessura de lã de vidro e revestida com folhas de alumínio corrugado, para minimizar as perdas de calor pelas paredes.

3.5.2 – HOMOGENEIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUIDO

A homogeneização do escoamento do fluido, nas condições operacionais utilizadas, é obtida em aproximadamente 92%, conforme PRADO (1999), da área transversal da tubulação na região de entrada do fluido na célula de secagem, através da passagem do fluido por uma câmara com telas defletoras localizada entre a célula de medida e o aquecedor de ar.

Para garantia da homogeneização das distribuições de temperatura, velocidade e umidade relativa na seção cilíndrica,

necessária aos testes de secagem, o equipamento permanecia em operação por até cerca de duas horas e meia, dependendo das condições operacionais.

3.5.3 – CÉLULAS DE MEDIDAS

Foram construídas e montadas diversas células de secagem, tendo em vista as operações com diferentes espessuras de leito.

– Leito em camada fina.

As células de secagem foram construídas em PVC. As dimensões da célula para a secagem em camada fina são baseadas nas dimensões da unidade de secagem e nos tamanhos das partículas recobertas.

A célula possui diâmetro de $5,1 \times 10^{-2}$ m e altura de $1,5 \times 10^{-2}$ m. Esta altura foi determinada para comportar, aproximadamente, quatro diâmetros de partículas. O desenho esquemático é apresentado na Figura 3.8.

A célula de secagem foi isolada com lã de vidro durante os experimentos, visando minimizar as perdas térmicas para o ambiente.

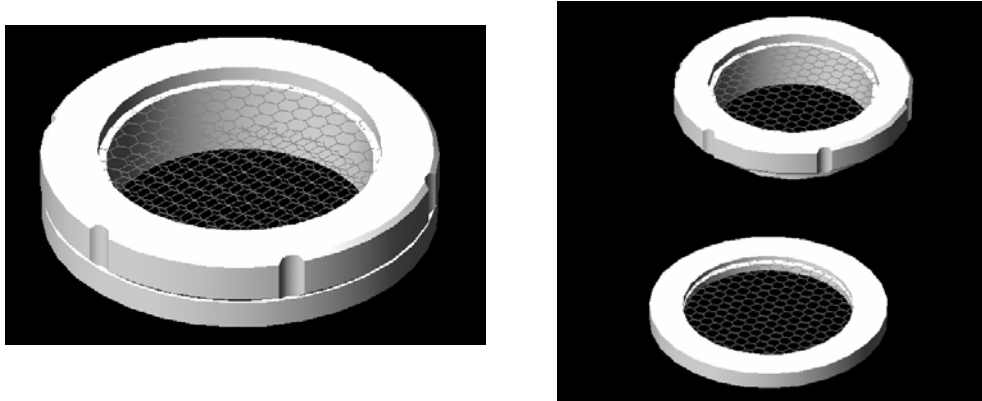


Figura 3.8 – Esquema da célula de medida utilizada na obtenção da cinética de secagem em camada fina.

A célula de secagem foi acoplada na posição horizontal na região de saída do ar de secagem. A fixação da célula foi realizada por meio de um sistema que visou facilitar a retirada da mesma para a quantificação da massa, realizada de forma intermitente.

– Leito em camada espessa.

O leito de secagem em camada espessa foi construído visando evitar um dos grandes problemas da experimentação em leito fixo, associado à determinação da umidade do sólido via amostragem durante a secagem, a descaracterização da estrutura, para tanto, a célula foi construída com base na montagem de módulos.

A espessura do leito de secagem foi determinada em função dos resultados advindos dos leitos de secagem em camada fina. A partir desta espessura de material, construiu-se uma célula de secagem com diâmetro de $5,1 \times 10^{-2}$ m e altura de $7,5 \times 10^{-2}$ m. A célula era formada por módulos de $1,5 \times 10^{-2}$ m de altura o que possibilitava estratificar o leito na direção transversal ao escoamento do fluido para retirada de amostras do material e a posterior realização de medidas de temperatura, umidade e massa específica do sólido.

Os esquemas da célula de secagem em leito espesso são apresentados nas Figuras 3.9 e 3.10. Na Figura 3.9 tem-se uma visão detalhada da célula de secagem, com diâmetro de $5,1 \times 10^{-2}$ m e o suporte para acoplamento à unidade experimental.

Na Figura 3.10 (a) visualiza-se o suporte para acoplar a célula de secagem à tubulação de escoamento do ar e o suporte superior. Na Figura 3.10 (b) pode-se visualizar a borracha de vedação que foi colocada na base para evitar vazamentos.

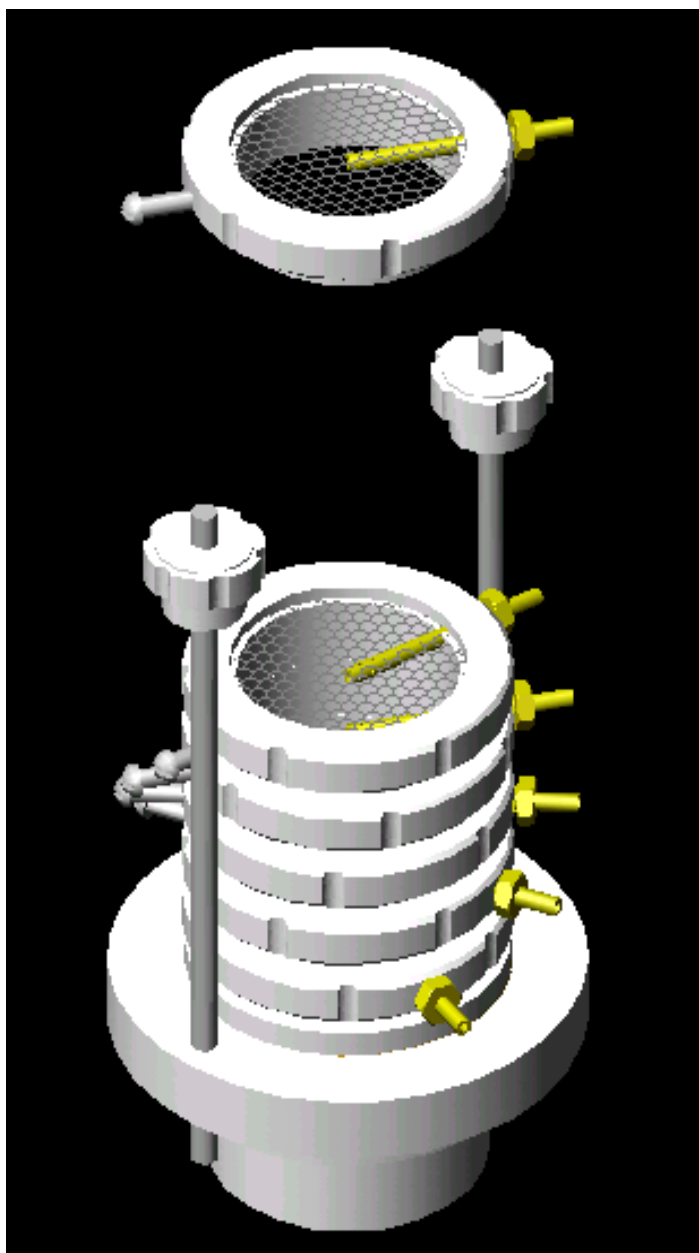
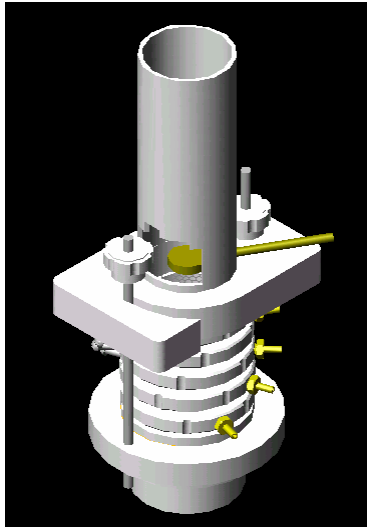
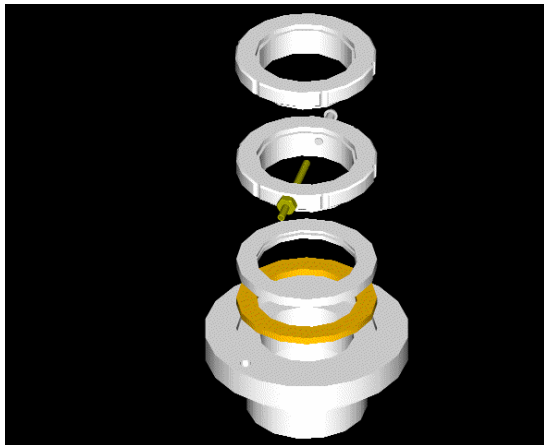


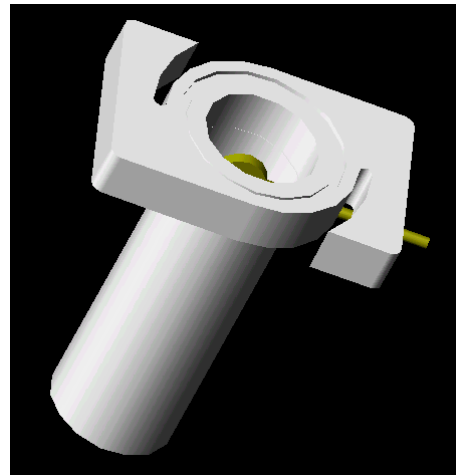
Figura 3.9 – Esquema da célula de secagem com suporte para acoplar à tubulação da unidade de secagem.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10 – (a) Esquema da célula de secagem em leito espesso com suportes inferior e superior. (b) Suporte inferior, para acoplar a célula de secagem à tubulação. (c) suporte superior e tubulação para continuidade do escoamento de ar.

Com o objetivo de minimizar efeitos de borda na saída do leito, foi acoplada à mesma uma tubulação para dar continuidade ao escoamento de ar, Figura 3.10 (c), este suporte superior proporciona, também, sustentação do leito à base.

3.5.4 – INSTRUMENTAÇÃO DA CÉLULA DE MEDIDAS

– Umidade do fluido e do sólido.

A umidade do ar foi determinada via psicrometria, medindo-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido no psicrômetro, 6, (FIGURA 3.7) do gás e a temperatura de bulbo seco na região próxima à entrada do leito. Utilizou-se o software CAT[®], que possui correlações psicrométricas para a determinação da umidade relativa. A incerteza provável de medida da umidade relativa do ar de secagem foi em torno de 4,0%.

Para a determinação da umidade das partículas houve a interrupção do experimento, em intervalos de tempo pré-estabelecidos, com a retirada da célula de secagem do escoamento de ar. A partir da estratificação do leito nas suas cinco posições, foi determinada a distribuição de umidade ao longo do leito. Com o auxílio de uma

guilhotina as sementes eram retiradas de cada célula, as amostras foram colocadas em uma placa de Petri, quantificadas as massas e levadas à estufa.

As umidades do sistema semente-gel foram determinadas através do método apresentado por LEES (1980) para a determinação da umidade do gel, item 3.2. Com a utilização destes métodos a incerteza provável na umidade do sólido é de 1,0%.

– Velocidade e temperatura do fluido.

Para as medidas de velocidade e temperatura do fluido, foi utilizado um termoanemômetro de fio quente digital da marca ALNOR. Estas medidas foram realizadas através de orifícios feitos na região de entrada do fluido na célula de secagem, com resolução de medidas de 0,1 m/s e 1°C para a velocidade e temperatura, respectivamente.

Uma segunda metodologia foi utilizada para medir estas variáveis. A medida da temperatura do fluido foi efetuada também através de um termopar de cobre-constantan de superfície estendida, localizado próximo à região de conexão da célula de secagem, conforme (8) na Figura 3.7, cuja incerteza de medida é de aproximadamente 0,25°C. Em relação à velocidade do fluido, foi determinada através do

medidor de vazão do tipo placa de orifício, previamente calibrado, conectado a um manômetro, representado por (3) na Figura 3.7, e considerando-se a área da seção transversal ao escoamento do fluido. Para esta medida ocorre uma incerteza provável de 4,0%. Esta segunda metodologia foi utilizada, principalmente na estabilização da unidade de secagem nas condições operacionais desejadas.

3.6 – CINÉTICA DE SECAGEM

3.6.1 – LEITO FIXO EM CAMADA FINA

A determinação da cinética de secagem foi realizada a partir da determinação da umidade das amostras em função do tempo.

A primeira etapa desta operação consistiu na estabilização do sistema térmico.

Acionava-se o soprador, representado na Figura 3.7, e ajustava-se a vazão de ar. Os sistemas de aquecimento ou refrigeração eram regulados para que o ar atingisse a temperatura de operação desejada. Foi utilizada uma célula auxiliar, idêntica à célula de medida, Figura 3.8, visando manter o equilíbrio térmico e fluidodinâmico do sistema na

partida dos experimentos e quando a célula de medida era retirada para as determinações de massa da amostra em função do tempo de secagem.

Após a estabilização do sistema de aquecimento, a célula de secagem principal era acoplada ao tubo de circulação do fluido, iniciando-se, assim, a operação de secagem do sistema semente-gel.

A fim de minimizar o fenômeno de transferência de calor entre as fases, as sementes e o fluido de secagem possuíam a mesma temperatura. Para isto foi utilizada a metodologia proposta por NOVAIS (1990), na qual as sementes eram colocadas em um ambiente com temperatura controlada e ar próximo à saturação. Assim, predominou o fenômeno de transferência de massa entre as partículas e o fluido, permitindo que se determine o coeficiente de transferência de massa e a taxa de secagem, ambos de fundamental importância na modelagem de secadores.

A variação de massa do sistema durante o processo foi quantificada em intervalos de tempo pré-determinados, através da quantificação da massa da célula de secagem em uma balança analítica AND modelo FR-200MKII, de precisão $1,0 \times 10^{-6}$ kg.

A operação de secagem era finalizada quando a massa da amostra permanecia constante ao longo do tempo.

A umidade das sementes foi determinada conforme o método apresentado no item 3.5.4.

Os dados obtidos destes experimentos, ou seja, a dependência da massa do sistema em função do tempo e a massa seca final possibilitaram traçar as curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem. A umidade de equilíbrio foi determinada através da equação que forneceu melhor ajuste aos dados advindos das isotermas de equilíbrio.

As análises de regressões lineares realizadas nos gráficos de M em função do tempo de secagem levaram à determinação do teor de umidade crítico, conforme KEEY (1972). Sendo que, o método utilizado consistiu no ajuste dos dados referentes ao período de taxa constante, ou seja, são considerados os valores a cada regressão linear, até se obter um coeficiente de correlação (R) igual a, no mínimo, 0,99. Assim, são tratados somente os dados referentes à taxa constante (PRADO, 1999 e ARRIECHE, 2003).

3.6.2 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.

As condições experimentais foram escolhidas visando analisar a influência da velocidade e da temperatura do ar sobre a cinética de secagem. Os níveis de tais variáveis foram propostos de acordo com um

planejamento fatorial (3^2) considerando a influência de tais variáveis nas especificidades das sementes e do gel ágar.

Para a temperatura foram utilizados os valores de 30°C, 40°C e 50°C e para a velocidade foram utilizadas 0,5 m/s, 1,5 m/s e 2,5 m/s. Os experimentos foram realizados em réplicas para verificar a reprodutibilidade dos dados.

3.6.3 – DISCRIMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SECAGEM

A análise dos dados obtidos foi realizada através de tratamento estatístico utilizando-se o método de regressão não linear para a estimação dos parâmetros de transferência de massa.

Foram avaliadas as equações empíricas e semi-empíricas, Equação (2.14), (2.15), (2.16), (2.19) e (2.20) apresentadas no item 2.5 que representam respectivamente as equações de LEWIS (1921), PAGE (1949), HENDERSON E HENDERSON (1968), OVERHULTS et alii (1973) e BROOKER et alii (1974). Estas equações foram escolhidas por representarem a cinética de secagem de materiais orgânicos e de materiais com elevados teores de umidade inicial.

3.7 – TESTES DO SISTEMA SEMENTE-GEL ATRAVÉS DA SECAGEM EM LEITO FIXO

3.7.1 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para garantir a homogeneidade e a reprodutibilidade da estrutura do leito em camada espessa foi utilizada a técnica empregada por ZOTIN (1985) para a colocação das partículas no interior das células de medidas.

Esta técnica consiste em adicionar as partículas, em etapas, para que cada porção tenha a mesma altura de queda. Após a adição de determinada quantidade de sólido são dadas batidas na parede externa da célula para acomodação do meio poroso.

3.7.2 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Para o estabelecimento das condições operacionais do equipamento a serem utilizadas para a determinação da temperatura do fluido, umidade e massa específica do sistema semente-gel deve-se, também, levar em consideração a manutenção da integridade da camada de recobrimento.

Foram realizados testes preliminares verificando-se que para a espessura de leito de $7,5 \times 10^{-2} \text{m}$ a aplicação de velocidades superficiais superiores a 1,0 m/s são inadequadas na utilização deste tipo de material.

Os resultados obtidos em testes preliminares mostraram que devido à estrutura do leito de secagem, constituído por este tipo de partículas, não é possível atingir uma velocidade de, por exemplo, 2,5 m/s em leito camada espessa com $7,5 \times 10^{-2} \text{m}$ de altura, sem que ocorra a danificação da camada de recobrimento das sementes localizadas no topo do leito, ou seja, na seção de leito entre $6,0 \times 10^{-2}$ e $7,5 \times 10^{-2} \text{m}$ a partir da região de entrada do fluido.

Isto, leva à perda da qualidade uma vez que as sementes localizadas na parte superior do leito podem sofrer danos em sua camada de recobrimento, tais como, ruptura da camada de gel ou macro fissuras possíveis de serem detectadas por meio de observação visual.

Os testes realizados com valores de velocidade do fluido de 0,5m/s proporcionaram resultados satisfatórios, ou seja, não ocorreu o desprendimento da camada de recobrimento e, portanto, foi a velocidade utilizada em leito espesso com altura de $7,5 \times 10^{-2} \text{m}$.

As temperaturas do fluido utilizadas foram de 50°C e de 30°C para determinação respectivamente da umidade e massa específica do

sólido, sendo que os correspondentes valores de umidades relativas do ar de secagem encontram-se apresentados junto aos resultados obtidos.

3.7.3 – DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA, UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA

– Temperatura do fluido.

Para a determinação da temperatura do fluido no leito foram confeccionados termopares do tipo gaiola, ou seja, confeccionou-se os termopares de cobre constantan, utilizando-se a soldadora de termopares desenvolvida por CAMARGO (2003). Estes foram inseridos em bainhas com diâmetro de 0,29 mm e comprimento em torno de 4 cm. As partes externas dos sensores em relação à parede da célula foram isoladas com lã de vidro, visando minimizar o efeito aleta de transferência de calor entre o leito e o ambiente.

Os termopares de cobre constantan foram previamente aferidos utilizando-se um sistema de calibração (BLOCK CALIBRATOR DB-35L). A resolução das medidas é de 0,05°C, mas a aquisição do valor medido foi realizada através de um circuito de medida de temperatura com um milivoltímetro cuja flutuação é de aproximadamente 0,25°C,

portanto, a incerteza da medida é estabelecida em função do sistema de medida do milivoltímetro.

A Figura 3.11(a) apresenta o esquema da célula de secagem em leito espesso com a disposição helicoidal dos termopares e a Figura 3.11 (b) mostra uma visão da bainha que contém o termopar, instalada no interior do leito.

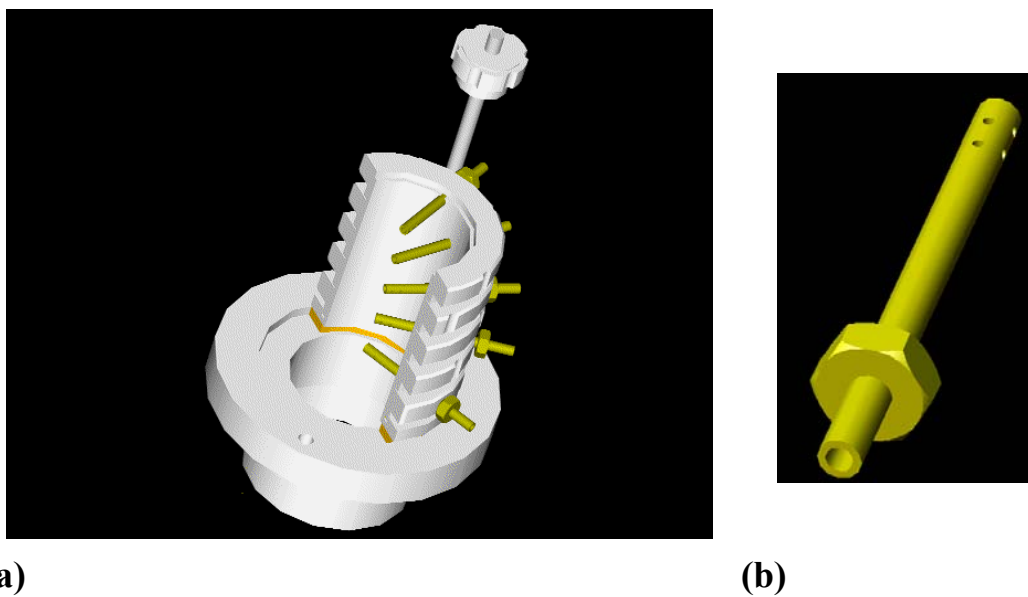


Figura 3.11 – Célula com disposição helicoidal dos termopares (a) e detalhe da bainha que contém o termopar (b).

Os suportes que contêm os termopares foram dispostos de forma helicoidal ao longo do leito visando minimizar a interferência dos sensores sobre o escoamento do ar, Figura 3.11 (a).

A medida de temperatura do fluido na região de entrada do leito para a secagem em camada espessa foi realizada por um termopar de cobre constantan com superfície estendida conectado ao circuito de medidas de temperatura, (8), na Figura 3.7.

– Temperatura do sólido.

A temperatura do sólido foi determinada realizando-se a estratificação do leito. Foram retiradas amostras em cada seção, com o auxílio de uma guilhotina, e colocadas em recipientes com paredes isoladas termicamente, no interior dos quais estavam instalados termopares de cobre-constantan (ARNOSTI, 1997). Em seguida, realizava-se a medida de temperatura das amostras por meio do circuito de medida de temperatura.

– Umidade do sólido ao longo do leito.

A partir das amostras oriundas da estratificação do leito e utilizadas para determinação da temperatura, determinou-se a distribuição de umidade ao longo do leito. As sementes foram colocadas em uma placa de Petri, as massas quantificadas e colocadas na estufa conforme metodologias já descritas para a determinação do teor de umidade das partículas.

– Massa específica.

A partir das amostras de sementes retiradas em cada seção do leito, através da estratificação do mesmo, foi realizada a determinação da massa específica do material utilizando picnometria líquida.

As determinações das temperaturas do fluido, umidades e massas específicas do sólido ao longo do leito levaram à avaliação da homogeneidade das propriedades no leito com diferentes espessuras apresentadas a seguir.

3.8 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO LEITO ESPESSO

Para a determinação da temperatura do fluido, na região de saída do leito, foi realizada a medida desta variável através da leitura no sistema composto pelo conjunto de chave seletora e milivoltímetro, conforme apresentado na Figura 3.7. Enquanto que, para as determinações da temperatura e umidade das sementes ao longo do leito, foram realizados ensaios nos quais, em intervalos de tempos pré-determinados o leito era retirado da unidade experimental de secagem e aberto para coleta de materiais e posterior determinação de tais propriedades no leito.

Assim, para as determinações destas variáveis o leito era estratificado e o experimento, para um novo intervalo de tempo, reiniciava a partir do tempo zero. Assim, para a medida de um conjunto de dados, em uma mesma condição operacional, foram realizados de três a quatro ensaios.

– Condições operacionais utilizadas.

Na condução dos testes de secagem foram utilizados para a velocidade do ar de secagem os valores de 0,5 e 1,0 m/s. Esta escolha

deve-se ao fato de que velocidades superiores a 1,0 m/s para leitos com maiores espessuras, $7,5 \times 10^{-2} \text{m}$, são impraticáveis com base em resultados obtidos em ensaios preliminares, conforme descrito no item 3.7.2.

A temperatura selecionada foi de aproximadamente 40°C, devido aos resultados advindos de testes de avaliação da qualidade das sementes.

– Instrumentação na região de saída do leito.

Para a determinação da temperatura do fluido foram inseridos treze termopares na região de saída do leito.

Para a fixação dos termopares, na região de saída do leito, foi construída uma base que permitiu que os termopares fossem colados nas posições desejadas evitando a mobilidade dos mesmos. A base utilizada para suporte dos termopares foi acoplada na extremidade superior da célula.

A representação esquemática da base, bem como, as distribuições dos termopares são apresentadas na Figura 3.12.

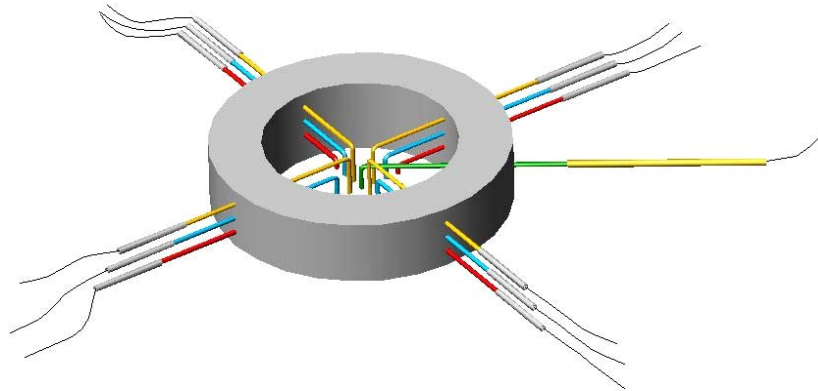


Figura 3.12 – Esquema do suporte dos termopares e distribuição dos termopares para medida da temperatura na região de saída do leito.

Os sensores ficaram localizados a 2×10^{-3} m acima do leito. Em seu trabalho, ROUILLER (2000) verificou que a diferença entre as temperaturas medidas nesta posição e as medidas realizadas com os termopares sobre a tela, apresentam uma diferença no máximo de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Um sensor ficou localizado na posição central e os demais nas posições angulares de 0, 90, 180 e 270 graus (Figura E1), sendo que sobre cada uma destas posições foram distribuídos três termopares em diferentes posições radiais.

Para a distribuição dos termopares foi eliminada a região sob efeito de parede, ou seja, três vezes o diâmetro da partícula baseando-se

em ZOTIN (1985), e a região restante foi dividida de forma que os termopares ficassem equidistantes. Logo, os termopares estavam a aproximadamente a $0,39 \times 10^{-2} \text{m}$, $0,77 \times 10^{-2} \text{m}$ e a $1,16 \times 10^{-2} \text{m}$ do centro do leito para as medidas das temperaturas.

– Umidade e temperatura do sólido.

Foram utilizados os métodos da estufa e da coleta de amostras em recipientes adiabáticos para determinar respectivamente a umidade e a temperatura do sólido.

A análise de imagens foi adotada para verificar a ocorrência de regiões com diferentes teores de umidades e a estrutura do leito. Para realização das fotos utilizou-se o método intermitente. A célula era posta sempre na mesma posição para obtenção das fotos e retornava na mesma posição para a unidade de secagem.

Durante a retirada da célula do leito, para efetuar as fotos foi utilizada uma célula auxiliar a fim manter o equilíbrio térmico e fluidodinâmico do sistema. Para o transporte da célula de secagem foi utilizado um dessecador.

A amostra foi colocada sobre uma superfície luminosa e, também, havia dois focos de luz incidindo lateralmente para permitir a obtenção de uma melhor imagem.

3.9 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS SEMENTES

Testes visando avaliar a qualidade fisiológica das sementes foram realizados antes e após cada operação que pudesse alterar esta propriedade do material.

Levando em conta que na literatura consultada não se faz referência para a avaliação deste tipo de sistema semente-gel, foram analisados dois tipos de substratos para verificar qual é o mais adequado levando em conta as especificidades do material. Avaliou-se, então, os substratos de papel toalha germitest e de areia, que são usuais para sementes com mucilagens, extraídas de frutos carnosos.

As sementes foram dispostas em papel germitest e em areia previamente lavada com granulometria de aproximadamente $0,8 \times 10^{-3}$ m.

Para a avaliação do substrato de areia, as sementes foram colocadas em uma camada uniforme de areia umedecida, em placas de Petri, com uma profundidade de plantio em torno de $0,5 \times 10^{-2}$ m.

As sementes recobertas também foram colocadas em papel toalha do tipo germitest, sendo os mesmos enrolados, colocados em uma cuba de material refratário, o qual foi coberto com filme plástico a fim de manter a umidade.

As placas de Petri e os refratários foram levados a uma germinadora, da marca FAUVEL, a uma temperatura de $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ e com a umidade relativa do ar em torno de 100%.

Foram avaliados os efeitos que as operações de recobrimento e o processo de secagem provocaram na qualidade fisiológica das sementes.

A qualidade fisiológica foi analisada via teste padrão de germinação, de acordo com o método descrito no item 2.8. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentavam o desenvolvimento das estruturas essenciais de seu embrião, demonstrando condições de produzir plântula normal sob condições variáveis de campo.

As sementes que germinaram foram contadas e através da relação com o número total da amostra calculou-se a razão entre as porcentagens de germinação, antes e após as operações de recobrimento e secagem.

Através da Equação (3.3) realiza-se o cálculo da razão entre as porcentagens de germinação antes e após uma determinada operação.

$$\overline{GE} = \frac{GE_d}{GE_a} \times 100\% \quad (3.3)$$

onde,

GE_a é o índice de germinação antes da operação.

GE_d é o índice de germinação após à operação.

Fez-se, também, uma avaliação do desenvolvimento das sementes através da medida do crescimento das plântulas com o objetivo de verificar a velocidade de desenvolvimento da planta.

Foram realizadas comparações entre os efeitos imediato (teste branco) e latente da recomposição das sementes, com e sem a cobertura artificial.

O efeito imediato foi avaliado realizando-se os testes de qualidade fisiológica imediatamente após cada uma das operações citadas anteriormente. Enquanto que, o efeito latente foi avaliado com as sementes recobertas e secas armazenadas em local seco e ventilado por um período de dormência de aproximadamente 2 meses e submetidas aos testes de qualidade.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados que foram obtidos seguindo-se a metodologia proposta para o trabalho, bem como, as respectivas discussões.

4.1 – SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são avaliadas as metodologias utilizadas para realizar a preparação, seleção e reumidificação das sementes, assim como, a escolha das concentrações para preparação da mistura a base de gel ágar.

4.1.1 – SEPARAÇÃO DE MATERIAIS INERTES

As sementes foram adquiridas na região de São Carlos com pureza em torno de 95,9 % (Boletim de análise de sementes do fornecedor, NATERRA), exigindo a separação de inertes.

As sementes foram peneiradas a fim de separar o material inerte da amostra a ser estudada e promover maior uniformidade em relação ao tamanho das partículas. A peneira que apresentou melhores resultados para este propósito foi a tyler mesh 12 que possui abertura de 1,41mm.

A partir do peneiramento foi possível retirar a maioria das sementes quebradas e cascas que estavam desprendidas das sementes.

Realizado o peneiramento promoveu-se a seleção manual. Embora seja uma operação extremamente trabalhosa conduz a resultados excelentes, obtendo-se sementes com grau de pureza próximo a 100%.

As sementes “in natura”, advindas diretamente do campo, também, foram adquiridas na região de São Carlos. Após a retirada das sementes das espigas, retirou-se a casca que envolve as sementes para realização da homogeneização.

A homogeneização das sementes da gramínea *Pennisetum glaucum* foi realizada através do quarteador do tipo Johnes de 16 canais, conforme descrito no item 3.1.2.

4.1.2 – REUMIDIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Foi utilizada a metodologia apresentada no item 3.1.3, para a realização da reumidificação das sementes de milheto.

Durante esta operação constatou-se que as sementes devem ser distribuídas no reumidificador em monocamadas, pois à medida que a espessura da camada aumenta, diminui o tempo para que as mesmas comecem a germinar. Em camadas em torno de $1,5 \times 10^{-2}$ m de espessura as sementes começam a germinar em aproximadamente 7 horas. Com a utilização de monocamada pretende-se evitar a ocorrência do fenômeno de ardedura, que é o aumento de temperatura ocasionado pela compactação, ou seja, devido a elevadas espessuras de material.

A Figura 4.1 apresenta o resultado típico do teor de umidade das sementes em função do tempo de residência no reumidificador.

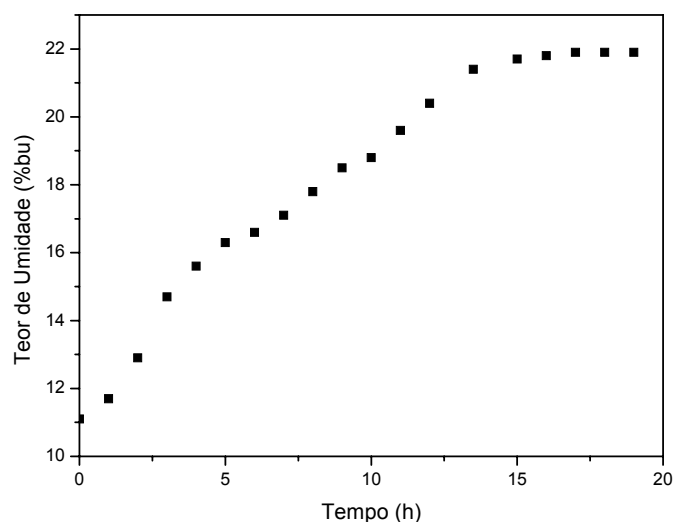


Figura 4.1 – Teor de umidade em base úmida em função do tempo de residência no reumidificador ($T = 35^{\circ}\text{C}$).

Ao determinar a porcentagem de umidade contida nas amostras retiradas em quatro regiões eqüidistantes do leito, obteve-se um produto com teor de umidade médio de $(22 \pm 1)\%$ bu.

Portanto, pode-se considerar a obtenção de um produto reumidificado com teor de umidade uniforme devido ao baixo desvio das medidas.

Os resultados advindos de diferentes experiências mostraram que a presença das sementes no vapor saturado durante aproximadamente 20 horas a uma temperatura em torno de 35°C elevou a umidade das sementes de aproximadamente 11% bu (secas após a colheita) para $(22 \pm 1)\%$ bu. Constatou-se que o baixo valor do desvio entre as diferentes medidas realizadas garante a reprodutibilidade destes dados da umidade no final da reumidificação.

Realizando a reumidificação em monocamadas de partículas, os resultados ficaram de acordo com os obtidos por CHICARONI et alii (1998), que para tempos de residência inferiores a 72 horas, não constatou a ocorrência de germinação das sementes de gramínea de *Brachiaria brizantha*.

4.1.3 – ESCOLHA E PREPARAÇÃO DA MISTURA A BASE DE GEL

O gel ágar foi preparado segundo o método descrito no FOOD CHEMICAL CODEX (1980). Foram preparadas diferentes soluções com água nas concentrações de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 % de ágar.

O recobrimento com a utilização de concentrações de ágar superiores a 2% foi dificultado uma vez que a mistura iniciava a mudança para a fase sólida a temperaturas superiores a 39°C e o recobrimento foi realizado em torno de 39°C para não danificar as sementes, ou seja, a formação das sementes encapsuladas antes da solidificação era dificultada. Conforme a literatura, o gel ágar mostrou-se um gel forte a 1,5% de concentração (BIRD et alii, 1981).

ARRIECHE (2003) também verificou facilidade na extração de amostras esféricas de géis construídas com misturas a base de gel ágar em moldes de latão, devido à lubrificação própria que ocorre em concentrações superiores a 1%.

A aplicação do gel ágar às sementes mostrou haver uma dificuldade de aderência do recobrimento, sendo necessária a busca de uma mistura que permitisse a fixação do material através de melhor aderência possibilitando o manuseio. A adição de sorbato com

concentrações variando de 1 a 100% em relação ao ágar foi realizada com este propósito.

A avaliação foi realizada em relação à aderência do gel às sementes, verificando a composição da mistura que permitia o manuseio das sementes encapsuladas sem que houvesse desprendimento do recobrimento e em função da capacidade de recomposição após o recobrimento. A recomposição foi verificada através da avaliação da germinação via o teste TPG, que forneceu um índice de germinação de $(56 \pm 2)\%$.

Este valor é considerado satisfatório pelo fato da secagem após o recobrimento ter sido realizado em estufa, um meio inóspito para este material.

As adições de sorbato foram de 1%, 5%, 6%, 8%, 12%, 50% e 100% em relação ao gel ágar. O sorbato atuou como ligante, conforme era esperado, segundo YOO (1993), favorecendo a aderência da camada desta mistura às sementes.

A adição foi realizada no início das preparações juntamente com o ágar e, também, após cinco minutos de aquecimento do ágar. O ágar e o sorbato permanecendo em aquecimento conjuntamente por 10 minutos apresentaram uma melhor aderência às sementes.

As concentrações de 1,5% do ágar e de 5% do sorbato em relação ao ágar propiciaram melhores condições de operação em relação ao manuseio do material durante o recobrimento e aderência às sementes e, portanto, foram as concentrações utilizadas.

Após a determinação da composição apropriada dos materiais de recobrimento na mistura, foi dado início à construção do sistema semente-gel.

4.2 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL

Após a determinação das concentrações mais adequadas para o recobrimento das sementes com material a base de gel ágar, foi realizada a preparação das misturas e o recobrimento das sementes. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma de formação do sistema semente-gel.

Com base na Figura 4.2, tem-se que a semente após a seleção e homogeneização é representada pela etapa 1 com diâmetro médio d_p , a semente recoberta com mistura a base de gel por 2, onde d_R corresponde ao diâmetro da semente recoberta, a etapa 3 representa a operação de secagem, 4 representa a semente recoberta após a operação de secagem, e a etapa 5 o processo de germinação da semente recoberta, mostrando a

expansão do gel devido à absorção de água e o desenvolvimento da planta.

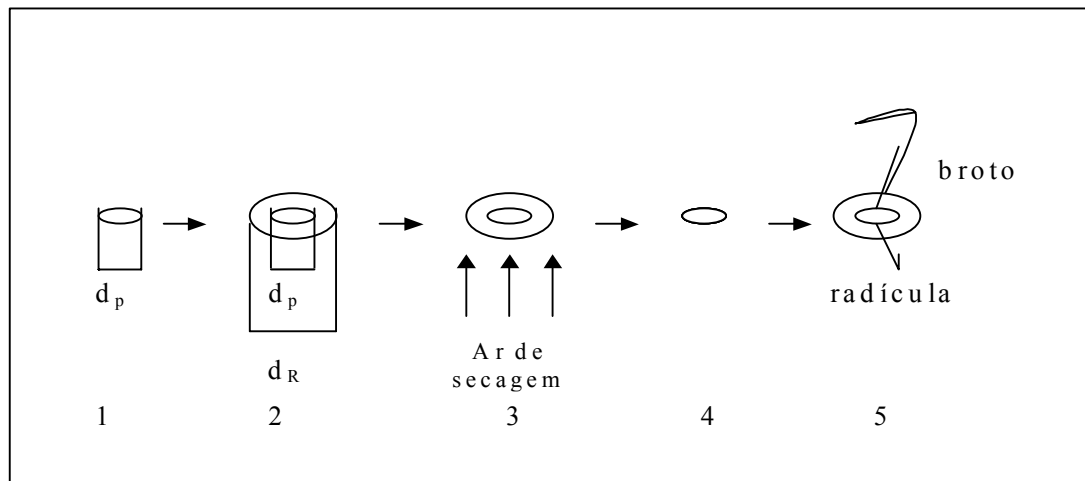


Figura 4.2 – Fluxograma de formação do sistema semente-gel.

4.2.1 – RECOBRIMENTO DAS SEMENTES COM GEL VIA IMERSÃO

Inicialmente, o recobrimento das sementes foi realizado por meio de imersão das mesmas na solução e posterior retirada, sendo colocadas sobre uma placa, de acordo com a metodologia usada por REPUNTE et alii (1996) para a construção de células agregadas a partir de embriões.

A aplicação da metodologia de imersão não proporcionou resultados satisfatórios, pois levou à formação de aglomerados que ao

serem rompidos, após a secagem, provocavam a ruptura do recobrimento das sementes. A espessura do recobrimento não era uniforme, de acordo com observação visual e, após a secagem, em torno de 90% das sementes ficavam parcialmente descobertas, ou seja, sem a camada artificial sobre as sementes.

4.2.2 – MOLDAGEM E GELEIFICAÇÃO DA CAMADA SOBRE AS PARTÍCULAS

A realização do recobrimento em placas perfuradas, Figura 3.3, de tal maneira que cada semente fosse recoberta individualmente foi utilizada para a busca da resolução deste problema.

Nos primeiros ensaios, as dimensões dos furos nas placas foram de 5×10^{-3} m de diâmetro e 4×10^{-3} m de profundidade (espessura da placa).

Com estas dimensões o recobrimento ficou muito espesso, sendo necessária, uma pré-secagem para permitir a retirada do sistema semente-gel das placas e, também, dificultou a secagem propiciando a germinação das sementes. Devido a este fato, a dimensão da placa foi alterada para $2,6 \times 10^{-3}$ m de espessura e mantido o diâmetro dos orifícios de 5×10^{-3} m. Na decisão por esta nova medida levou-se em conta,

também, as dimensões das sementes (diâmetro médio e comprimento linear máximo).

Com esta nova dimensão, a retirada das sementes recobertas da placa foi possível após 20 minutos do recobrimento, sendo mínima a perda de sementes por rompimento da camada de recobrimento, aproximadamente 5% para o lote de sementes recobertas.

A Figura 4.3 apresenta a foto das sementes recobertas após a extração das placas de recobrimento, onde se pode constatar a formação do agregado celular.



Figura 4.3 – Foto do sistema semente-gel.

4.2.3 – AVALIAÇÃO DA REUMIDIFICAÇÃO E RECOBRIMENTO

Os resultados obtidos com a utilização da reumidificação lenta na presença de vapor d'água foram reprodutíveis, apresentados no item 4.1.2, e possibilitaram a utilização de sementes com maior teor de umidade. Entretanto, observou-se que ao recobrir as sementes ocorria a germinação em um intervalo de tempo variando de 20 a 48 horas dependendo das condições a que eram submetidas. Isto, inviabilizava a realização de alguns experimentos necessários à caracterização do sistema. Portanto, foram utilizadas sementes com umidade de aproximadamente 12%bu para o recobrimento.

4.2.4 – AVALIAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA SEMENTE-GEL EM PLACAS

Visando ao aproveitamento total da solução preparada e à otimização da operação de recobrimento, buscou-se métodos que permitissem manter a mistura de recobrimento na fase gomosa pelo maior período de tempo possível.

O aquecimento das placas de moldagem em mantas de aquecimento durante o recobrimento, a uma temperatura de aproximadamente 40°C, tendo em vista facilitar a operação de recobrimento, prolongando o tempo de permanência do gel na fase de goma, não foi adequado.

As placas confeccionadas em PVC e acrílico sofreram pequenas deformações durante o aquecimento, isto permitia que o gel adicionado escoasse entre as placas dificultando o recobrimento. Por outro lado, o desprendimento das sementes recobertas das placas confeccionadas em aço inox e PVC foi dificultado.

Quando era realizada a abertura dos moldes, parte dos materiais ficavam aderidos, havendo danos no recobrimento de aproximadamente 80% das sementes.

As placas confeccionadas em aço inox foram então polidas, mas a dificuldade na extração persistiu.

O material que apresentou vantagens com relação ao desprendimento do sistema semente-gel foi o acrílico, sendo, portanto, o utilizado nos experimentos. Ocorreu, ainda, a dificuldade de realização desta operação antes que ocorresse a solidificação do gel, este problema foi solucionado mantendo-se o becker, que continha o gel, no interior de um banho termostático TECNAL à temperatura em torno de 40°C.

Nesta temperatura o gel estava ainda no estado de goma e o tempo necessário para a retirada do material e colocação nas placas provocava uma queda na temperatura, não afetando os embriões das sementes.

A metodologia utilizada indicou a possibilidade da realização do recobrimento das sementes, obtendo-se uma camada de recobrimento que aderiu às partículas, cumprindo-se a Etapa 2 da Figura 4.2.

O sistema constituído possibilitou o manuseio, logo, foi possível em seguida, realizar os testes para a determinação das propriedades físicas do sistema semente-gel e das sementes “*in natura*”.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES “*in natura*” E DO SISTEMA SEMENTE-GEL

Após o sistema semente-gel ser formado, este foi caracterizado através de técnicas de laboratório e equipamentos comerciais.

4.3.1 – DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS, FORMA E MASSA ESPECÍFICA

A aplicação das metodologias apresentadas no item 3.3.1 levaram à determinação do diâmetro médio, maior comprimento característico, esfericidade e massa específica das sementes “in natura” e do sistema semente-gel. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas das sementes sem e com recobrimento a base de gel ágar.

Propriedade	Sementes	
	Sem recobrimento	Com recobrimento
Mo (%bu)	Secas: (12±1) “In natura”: (27±1) Reumidificadas: (22±1)	(88±2)
$d_p \times 10^2$ (m)	(0,20±0,02)	(0,45±0,01)
$d_l \times 10^2$ (m)	(0,24±0,01)	(0,48±0,01)
$e \times 10^3$ (m)	----	(0,13±0,01)
ϕ (Eq. 2.1)	(0,83±0,02)	(0,94±0,02)
$\rho_s \times 10^{-3}$ (kg/m ³)	Seca: P.L: (1,48±0,02) P.G: (1,38±0,01)	P.L: (1,03±0,01) P.G: (1,05±0,01)
	“In natura” P.L: (1,33±0,01)	

P.L: picnometria líquida; P.G: picnometria gasosa

Verifica-se, a partir da Tabela 4.1, que a umidade das sementes reumidificadas, aproximadamente 22% bu, ficou abaixo da umidade obtida para as sementes “in natura”, em torno de 27% bu. Isto pode ser devido à modificação da estrutura interna das sementes, adquiridas com a umidade reduzida, durante o processo a que foram submetidas impossibilitando reproduzir a mesma condição de umidade ou a desigualdade de condição de maturidade na época da colheita entre a semente analisada e a adquirida seca.

Observa-se que o teor de umidade obtido para as sementes “in natura”, aproximadamente 27% bu, apresenta-se dentro da faixa de valores de 20 e 40% bu obtidos, respectivamente, para sementes de outros gêneros e espécies de gramíneas (ARNOSTI, 1997). As sementes com umidade de aproximadamente 12% bu após o recobrimento com material a base de gel ágar apresentaram uma umidade muito superior, sendo em torno de 88% bu, fato esperado devido às características da composição da mistura gel ágar e sorbato.

A espessura de recobrimento e a forma do orifício da placa de recobrimento fizeram com que ocorresse o aumento da esfericidade das partículas, sendo superior à esfericidade obtida para sementes de frutos carnosos, $(0,87 \pm 0,01)$ para sementes de papaya (PRADO, 1999), por exemplo. A esfericidade do agregado celular, $(0,94 \pm 0,02)$, obtida é

próxima a de esferas, o que torna os leitos de secagem mais uniformes. Os pequenos desvios das medidas mostram que os resultados foram reprodutíveis.

Na determinação da massa específica das sementes adquiridas com umidade em torno de 12% bu e sem recobrimento a utilização da picnometria líquida forneceu um valor 7% superior ao obtido através da gasosa. Para as sementes recobertas a diferença foi de apenas 2%, conforme era esperado.

4.3.2 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os dados obtidos para a dependência da temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) do meio constituído por sementes sem e com recobrimento (k_{ef}) são apresentadas no Anexo A. As Tabelas A.1 e A.2 são relativas às sementes sem recobrimento e as Tabelas A.3 a A 5 correspondem às sementes com recobrimento.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os resultados típicos obtidos para as sementes sem e com recobrimento, respectivamente, oriundos das Tabelas A.1 e A.3.

O valor médio da condutividade térmica efetiva obtido para as sementes sem recobrimento, sendo a porosidade do leito, determinada via método gravimétrico, de aproximadamente 0,32 e a umidade do meio de $(11 \pm 1) \%$ bu, através da Equação (3.1) foi de $(4,89 \pm 0,02) \times 10^{-2}$ W/m°C. Para as sementes recobertas o valor foi de $(21,00 \pm 0,05) \times 10^{-2}$ W/m°C, para uma porosidade do leito de aproximadamente 0,25 e umidade do meio de $(88 \pm 2)\%$ bu (LUCCAS et alii, 2002).

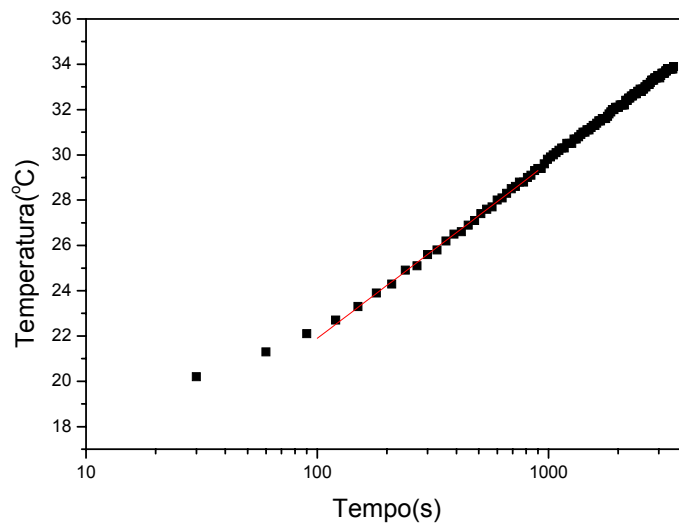


Figura 4.4 – Resultado típico de temperatura em função do tempo para determinação de k_{ef} obtido para sementes sem recobrimento.

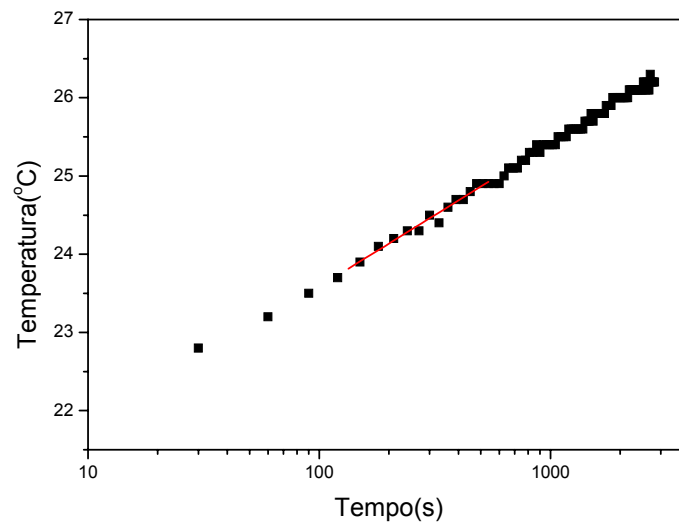


Figura 4.5 – Resultado típico de temperatura em função do tempo para determinação de k_{ef} obtido para sementes com recobrimento.

Os maiores valores obtidos para a condutividade térmica efetiva do leito constituído por sementes recobertas em relação ao leito de sementes sem recobrimento era esperado, uma vez que as superfícies de contato foram alteradas para materiais que possuem maior condutividade térmica, no caso a combinação gel ágar-sorbato-água.

A presença do gel proporcionou, também, um contato entre partículas mais eficiente. SAKIYAMA et alii (1999) e PERRY (1984) apresentam os valores da condutividade térmica do gel ágar e da água a 32°C como sendo respectivamente de $60,0 \times 10^{-2}$ W/m°C e de $4,95 \times 10^{-2}$

W/m°C. Portanto, o valor do parâmetro medido para as sementes recobertas engloba o efeito do gel ágar, mostrando a influência da composição do revestimento que domina a condução de calor entre as partículas.

Comparando-se as sementes sem recobrimento com outro gênero de gramínea, verifica-se que o *Pennisetum glaucum* possui maior condutividade térmica que a *Brachiaria brizantha*, que é de aproximadamente $3,78 \times 10^{-2}$ W/m°C (LUCCAS et alii, 2002). Como o *Pennisetum glaucum* possui diâmetro médio aproximado de $(0,20 \pm 0,02) \times 10^{-2}$ m e a *Brachiaria brizantha* possui geometria elipsóide e diâmetro médio de Feret de aproximadamente $3,34 \times 10^{-3}$ m (ARNOSTI, 1997); o empacotamento do primeiro gênero de gramínea foi mais eficiente, ocasionando uma maior condução entre as partículas do leito.

A determinação da condutividade térmica para o sólido, através da utilização de correlações existentes na literatura, no trabalho desenvolvido por LUCCAS et alii (2002), mostrou que os modelos forneceram valores de k_s dispersos, evidenciando a necessidade do desenvolvimento de correlações específicas para as sementes e que considerem a complexidade da estrutura interna da partícula.

Visando à determinação da condutividade térmica do sólido para as sementes sem recobrimento, constituíram-se leitos de sementes

desestruturadas com diferentes forças de empacotamentos. No caso do *Pennisetum glaucum* sem recobrimento a variação da força, utilizada no empacotamento, de 0,25 tonelada até 1,0 tonelada, não proporcionou alterações na condutividade térmica efetiva do leito.

Supõe-se, portanto, que k_{ef} em torno de $(5,98 \pm 0,02) \times 10^{-2}$ W/m.°C, obtidos para as referidas forças de empacotamento, esteja próximo ao valor real de k_s , isto é, da semente. Entretanto, esta metodologia não é adequada ao sistema semente-gel uma vez que, a aplicação de diferentes forças ao leito formado pelo agregado provoca a separação do recobrimento das sementes. Devido ao contato no interior do leito que é favorecido em função da forma das partículas recobertas, considerou-se o valor da condutividade térmica efetiva do leito, constituído por sementes recobertas como sendo o próprio valor da condutividade térmica das sementes recobertas. Os desvios médios das medidas foram de 0,05, mostrando a reprodutibilidade dos dados.

4.3.3 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Os dados obtidos para a temperatura no centro e na parede da célula na determinação da difusividade térmica efetiva do meio constituído por sementes sem e com recobrimento (α_{ef}) encontram-se

reunidos no Anexo B. As Tabelas B.1 e B.2 são relativas às sementes sem recobrimento e as Tabelas B.3 e B.4 às sementes com recobrimento.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os resultados típicos obtidos nos experimentos realizados para as determinações das difusividades térmicas efetivas para as sementes sem e com recobrimento, respectivamente, oriundos das Tabelas B.1 e B.3.

A Figura 4.8 apresenta o resultado típico da diferença de elevação de temperatura entre a parede e o centro da célula em função do tempo, sendo utilizada para determinar o tempo a partir do qual ambas as temperaturas têm uma elevação constante, de acordo com DIAS et alii (1998).

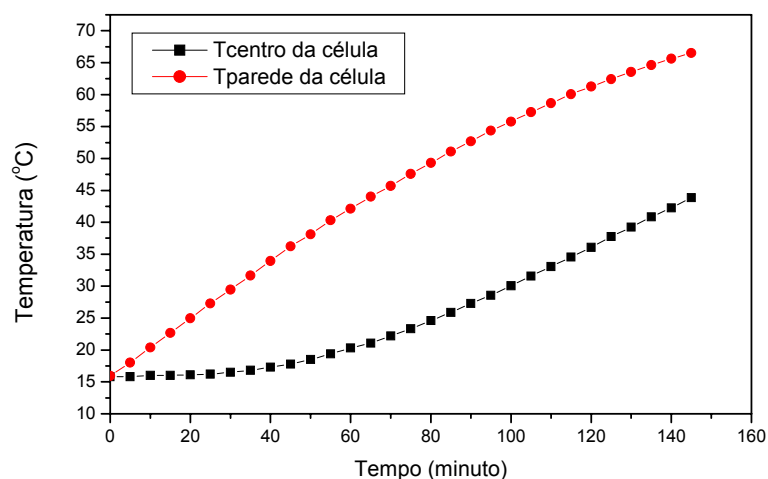


Figura 4.6 – Resultado típico de temperaturas na parede e no centro da célula em função do tempo para determinação de α_{ef} , obtido para sementes sem recobrimento.

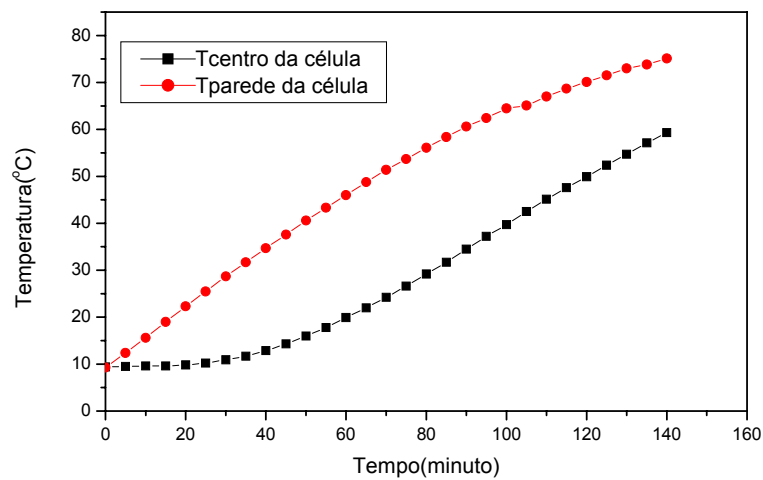


Figura 4.7 – Resultado típico de temperaturas na parede e no centro da célula em função do tempo para determinação de α_{ef} , obtido para sementes recobertas.

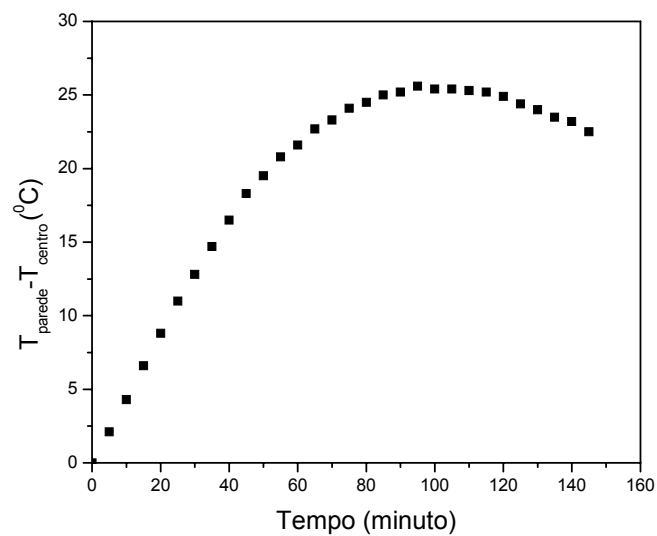


Figura 4.8 – Diferença de elevação das temperaturas das sementes no centro e na parede da célula em função do tempo.

A difusividade térmica efetiva do leito composto por sementes de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento, com umidade de $(11 \pm 1)\%$ bu e porosidade de aproximadamente 0,22, obtida via método gravimétrico, foi determinada através da Equação (3.2), apresentando o valor de $(0,96 \pm 0,03) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 18% inferior ao valor obtido para as sementes de gramínea de *Brachiaria brizantha* (LUCCAS et alii, 2002), com umidade de $(11 \pm 1)\%$ bu e porosidade do leito de 0,58.

O valor da difusividade térmica obtido a partir da Equação (3.2), para as sementes recobertas com umidade de $(88 \pm 2)\%$ bu e porosidade do leito em torno de 0,18, determinada via método gravimétrico, foi de $(1,53 \pm 0,03) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor é superior ao da difusividade térmica efetiva para o milho sem recobrimento, devido à alteração na superfície de contato e, também, considerou-se como sendo a difusividade térmica do sólido devido à aproximação da forma esférica das partículas que favorecem o contato no leito.

Os pequenos desvios mostram que houve reprodutibilidade dos dados.

A medida para as sementes recobertas foi bem próximo do valor da água, $1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ segundo KOSTAROPOULOS e SARAVACOS (1997), diferindo apenas 5%, e do gel ágar com concentração de 0,2%, cujo valor é de aproximadamente $1,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, conforme SAKIYAMA

et alii (1999), diferindo em 8%. Esta comparação mostra que o resultado obtido é coerente, uma vez que, o revestimento possui elevada umidade e o material de recobrimento possui 1,5% de gel ágar.

A determinação da difusividade térmica efetiva para as sementes sem recobrimento e desestruturadas foi de $1,04 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 8,0% superior ao valor das partículas “in natura”, devido à maior interação entre as partículas no leito.

4.3.4 – CALOR ESPECÍFICO

A determinação do calor específico foi realizada através da utilização da definição da difusividade térmica, que correlaciona as propriedades condutividade térmica, calor específico e massa específica Equação (2.4). A partir dos valores de condutividade e difusividade térmicas e massa específica determinados, obteve-se os respectivos valores para o calor específico de sementes sem recobrimento e com recobrimento como sendo de $(0,34 \pm 0,01) \text{ kJ/kgK}$ e $(1,31 \pm 0,01) \text{ kJ/kgK}$, respectivamente. Logo, estes são valores médios válidos para a pressão atmosférica e temperatura na faixa de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ a $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Tendo-se avaliadas as reprodutibilidades das medidas e das determinações destas propriedades físicas, segue-se a caracterização das sementes recobertas através da determinação do teor de umidade de equilíbrio termodinâmico do sistema semente-gel com a vizinhança, contendo ar atmosférico em diferentes estados de temperatura e umidade relativa.

4.4 – ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO DO SISTEMA SEMENTE-GEL-AR

Nesta caracterização do material é necessária a determinação da umidade de equilíbrio e posterior tratamento para a determinação da equação de isoterma de equilíbrio mais adequada para a representação dos dados termodinâmicos.

4.4.1 – OBTENÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Na busca da umidade de equilíbrio para o sistema semente-gel fez-se, inicialmente, a utilização do método estático gravimétrico com

soluções salinas em sementes com umidade de $(18 \pm 1)\%$ bu, após reumidificação, e $(12 \pm 1)\%$ bu recobertas com material a base de gel.

Esta metodologia não possibilitou a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico, uma vez que as sementes germinavam em aproximadamente dois dias, quando submetidas às condições termodinâmicas constantes.

Diante deste resultado insatisfatório buscou-se, então, um novo método no qual seria feita a aceleração de retirada de umidade da partícula por meio do uso de solução salina de LiCl. Mesmo com a proposta desta metodologia, constatou-se a impossibilidade de impedir a germinação das sementes com umidade de $(12 \pm 1)\%$ bu e recobertas. A germinação iniciava-se antes que houvesse uma dessorção de umidade suficiente, para posterior locação aos diferentes ambientes de umidade, conforme o procedimento mostrado no item 3.4.

Assim, na busca de uma nova metodologia que proporcionasse a obtenção da umidade de equilíbrio, aplicou-se o método higrométrico, através da utilização do aparelho eletrônico de determinação da atividade de água Thermoconstanter–NOVASINA[®]. No entanto, devido às características do sistema semente-gel, não foi possível obter resultados reprodutíveis, assim como, nos métodos anteriores.

Portanto, fez-se necessária a busca de um outro procedimento, ou seja, a aplicação da metodologia desenvolvida de aceleração de retirada de umidade do sistema semente-gel em estufa de circulação forçada, seguida da colocação em ambiente de soluções salinas saturadas. Esta aplicação possibilitou que não houvesse formação de fungos ou germinação do núcleo para as temperaturas de (25 ± 2) a $(50\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa variando de 11,0 a 84,0%.

A utilização desta metodologia possibilitou atingir o equilíbrio higroscópico das sementes recobertas, necessitando de 9 a 12 dias, dependendo da umidade relativa e da temperatura utilizadas.

A Tabela 4.2 apresenta os dados de umidade de equilíbrio obtidos e os valores de desvio médio, *s*. Os desvios médios apresentaram pequenas variâncias demonstrando que os resultados obtidos são reprodutíveis.

4.4.2 – TRATAMENTO DOS DADOS

Para a determinação da dependência da umidade de equilíbrio em função da umidade relativa e temperatura fez-se o tratamento dos dados utilizando-se o pacote computacional STATISTICA[®].

Tabela 4.2 – Teor de umidade de equilíbrio do agregado celular e desvio médio.

Solução Salina	Temperatura (°C)			
	25	30	40	50
	Umidade de Equilíbrio (kg de H ₂ O/kg de sólido seco)			
LiCl	9,34	6,67	6,25	5,10
	9,41	5,75	4,88	5,12
	8,77	...	4,43	...
	s=0,27	s=0,46	s=0,71	s=0,01
C ₂ H ₃ O ₂ K	9,58	7,10	6,45	6,22
	9,37	7,28	6,29	6,09
	9,30	...	6,18	6,55
	s=0,11	s=0,09	s=0,10	s=0,18
MgCl ₂	10,12	9,19	8,33	7,85
	11,10	9,32	9,08	7,39
	10,92	9,22	8,25	7,85
	s=0,40	s=0,05	s=0,35	s=0,20
K ₂ CO ₃	12,73	10,02	10,0	9,81
	12,78	10,41	9,81	9,86
	12,24	10,95	9,04
	s=0,23	s=0,33	s=0,38	s=0,03
NaNO ₂	16,50	13,45	12,96	11,69
	15,68	14,32	11,97	11,85
	15,61
	s=0,38	s=0,44	s=0,5	s=0,08
NaCl	18,91	15,25	15,89	12,87
	19,86	15,38	15,12	13,70
	18,79	16,47	15,75	...
	s=0,45	s=0,51	s=0,31	s=0,42
KCl	22,67	17,16	17,11	13,11
	20,81	18,39	16,54	13,92
	22,18	13,27
	s=0,72	s=0,62	s=0,29	s=0,32

Foram analisadas as equações de equilíbrio utilizadas na literatura para materiais biológicos, ou seja, as equações de HENDERSON (1952), CHUNG-PFOST (1967), Henderson-Thompson (THOMPSON et alii,

1968), CHEN-CLAYTON (1971), Halsey Modificada (OSBORN et alii, 1989) e G.A.B (GARCIA-ALVARADO, 1995), utilizando-se a estimação não linear por mínimos quadrados.

A Tabela 4.3 mostra os parâmetros estimados, de acordo com as equações da Tabela 2.1, para T_s em °C e UR em base decimal obtém-se M_{eq} em base seca, bem como, os critérios de comparação para as equações de equilíbrio.

O critério estatístico utilizado foi baseado nos valores do coeficiente de correlação (R^2), na análise da distribuição de resíduos e na razão entre a média quadrática da regressão e a média quadrática devida aos resíduos (F).

Tabela 4.3 – Parâmetros estimados e os critérios de comparação para as equações de equilíbrio.

Equação	R^2 e Razão F	Parâmetros
*Chung-Pfost (Equação 2.7)	$R^2=0,97$ F=682,8,	a=214,77; b=0,21; c=-7,0
*Henderson-Thompson (Equação 2.8)	$R^2=0,97$ F=761,3	a=1,27x10 ⁻³ ; b=2,2; c=-7,2
**Chen-Clayton (Equação 2.9)	$R^2=0,98$ F=574,2	a=20,5; b=-0,27; c=5,1x10 ⁻² ; d=0,40
*Halsey modificada (Equação 2.10)	$R^2=0,97$ F=534,9	a=-0,035; b=2,53; c=6,94
***GAB (Equação 2.11)	$R^2=0,97$ F=371,0	a=8,89; b=5,3x10 ⁻³ ; c=3,2x10 ⁻² ; d=1460,05; e=2040,07

*F_(2; 68; 0,95)=3,13; **F_(3; 67; 0,95)=2,74; ***F_(4; 66; 0,95)=2,51; *F, **F, ***F: valores tabelados.

A distribuição dos resíduos para as equações analisadas encontram-se reunidos no Anexo C.

Dentre as equações analisadas, a equação de Henderson não proporcionou distribuição aleatória dos resíduos, conforme pode ser verificado no Apêndice C. A equação de Chen-Clayton apresentou distribuição aleatória de resíduos e menor razão falta de ajuste por erro puro, quando comparada com as demais equações. Obteve-se o maior valor de R^2 , 0,98, e razão F de 574,2 que é bem superior a 5 vezes o valor tabelado 2,74, como recomenda-se na literatura (NETO et alii, 1996). A Figura C.7 apresenta a distribuição dos resíduos utilizando a equação de Chen-Clayton, a qual é aleatória.

Logo, com base na Tabela 4.3, tem-se válida no domínio de $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$ e $11\% \leq \text{UR} \leq 84\%$ a equação de Chen-Clayton para a estimativa da umidade de equilíbrio do sistema semente-gel.

$$M_{\text{eq}} = \frac{-1}{0,051 \times T_s^{0,40}} \ln \left[\frac{\ln(\text{UR})}{-20,45 \times T_s^{-0,27}} \right] \quad (4.1)$$

Nas Figuras 4.9 a 4.12 visualizam-se os resultados obtidos para a umidade de equilíbrio higroscópico do agregado celular e a curva obtida através da Equação (4.1) que representa a dependência $M_{\text{eq}} = M_{\text{eq}}(\text{UR}, T)$,

obtida através de ajuste dos dados à equação de Chen-Clayton, que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais.

Com base nas informações obtidas sobre a caracterização do sistema semente-gel foi possível realizar o projeto e a construção de células de medidas para acoplar na unidade de secagem convectiva existente no laboratório do CSPSS/UFSCar. Assim como, iniciar os testes de secagem em leitos fixos de diferentes espessuras, buscando tornar possível realizar a etapa 3 da Figura 4.2, ou seja, obtenção de informações relativas ao comportamento de um conjunto de partículas do sistema semente-gel submetidas ao contato direto com ar aquecido, no interior do escoamento de fluido, em diferentes condições operacionais.

Com este intuito, seguem-se a obtenção e a análise da dependência da taxa de transferência de umidade entre o sólido e o fluido em função das condições operacionais da secagem em leito fixo em camada fina, em conjunto com a avaliação da evolução da estrutura do leito nas condições de camada espessa, para verificação da reprodutibilidade e homogeneidade das medidas no interior do leito fixo.

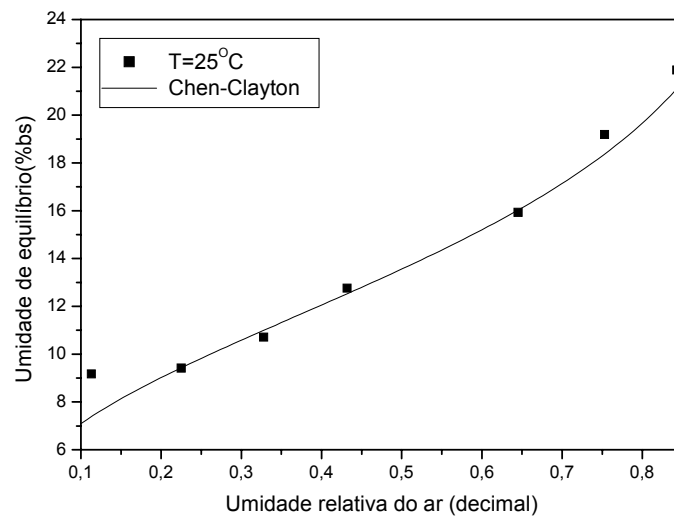


Figura 4.9 – Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 25°C.

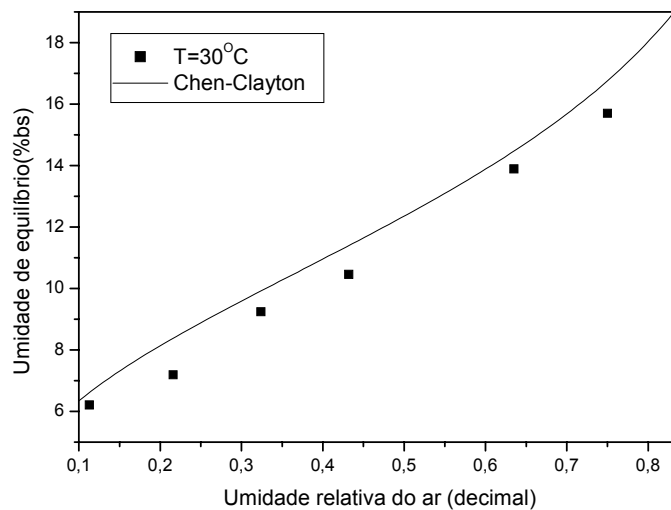


Figura 4.10 – Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 30°C.

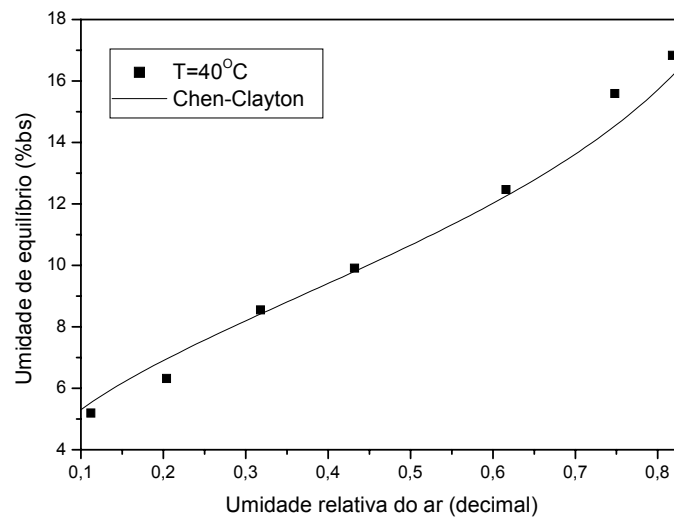


Figura 4.11 – Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 40°C.

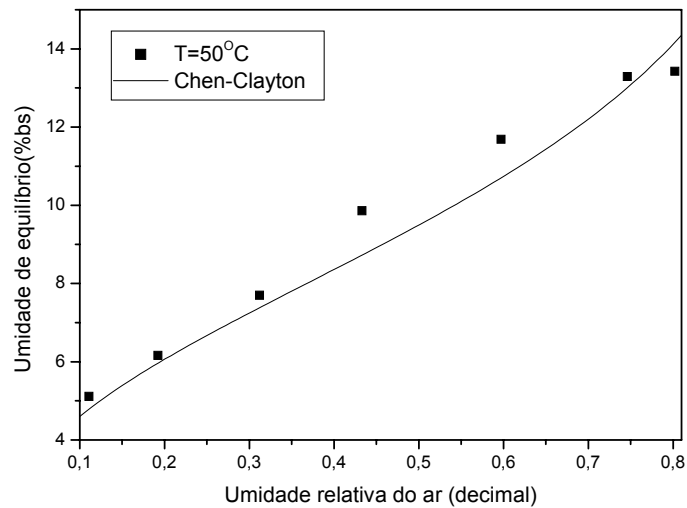


Figura 4.12 – Dados experimentais de isotermas de equilíbrio, sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar, para temperatura de 50°C.

4.5 – CINÉTICA DE SECAGEM

Nesta seção é estudado o comportamento cinético das sementes recobertas. Conforme recomendado na literatura (BROOKER et alii, 1974) a cinética de secagem foi realizada via camada fina. São apresentados os resultados advindos da operação na unidade experimental de secagem convectiva.

4.5.1 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM

A unidade experimental, apresentada na Figura 3.7, foi utilizada nas operações de secagem e atendeu às necessidades específicas para o processo de secagem deste tipo de material. Nas condições operacionais definidas, as distribuições de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar são uniformes, de acordo com as garantias experimentais comprovadas no trabalho realizado por PRADO (1999).

Os resultados experimentais obtidos para a umidade das sementes recobertas em função do tempo de secagem permitiram a obtenção das curvas de umidade adimensional (MR), definida através da Equação (4.2), em função do tempo de secagem. A umidade de

equilíbrio (M_{eq}) necessária ao cálculo de MR foi obtida através da Equação (4.1), com o seguinte domínio de validade $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$ e $11\% \leq UR \leq 84\%$ e M_0 correspondente ao teor inicial de umidade do material.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (4.2)$$

A Figura 4.13 apresenta o resultado típico do adimensional de umidade em função do tempo de operação de secagem, parametrizado em dois intervalos distintos de tempo de retirada da célula para a quantificação da massa, nas condições operacionais de temperatura e velocidade do fluido respectivamente iguais a 42°C e $2,5 \text{ m/s}$.

A partir da Figura 4.13 pode-se fazer a análise da influência das retiradas periódicas da célula de medida da unidade de secagem, mediante a comparação de experimentos com diferentes números de retiradas, em intervalos de 5 em 5 minutos e de 10 em 10 minutos para o procedimento de quantificação de massa da célula.

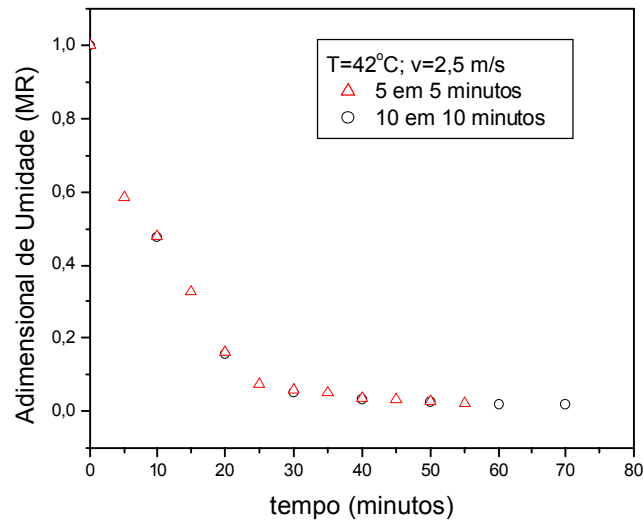


Figura 4.13 – Adimensional de umidade em função do tempo parametrizado em períodos de tempo distintos para a quantificação da massa da célula.

Nota-se nesta figura, que os dados são reprodutíveis, portanto, o pequeno tempo necessário para a determinação da massa das amostras, em torno de 10 segundos, não interfere nos resultados desta metodologia, logo o procedimento experimental utilizado foi adequado.

Os dados experimentais relativos à secagem em camada fina são apresentados no Anexo D.

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam respectivamente os resultados típicos obtidos para o adimensional de umidade em função do tempo de secagem para as seguintes condições operacionais 50°C e 2,5m/s, 30°C e 1,5m/s e 40°C e 0,5 m/s. A umidade relativa do ar de secagem foi de aproximadamente 21%.

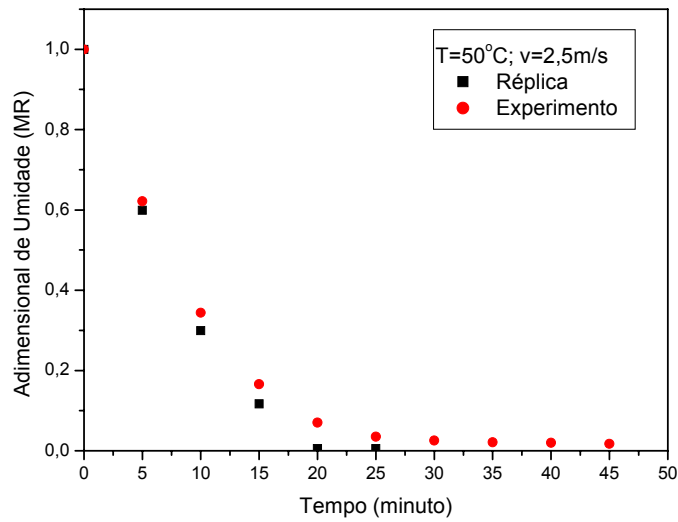


Figura 4.14 – Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=2,5\text{m/s}$.

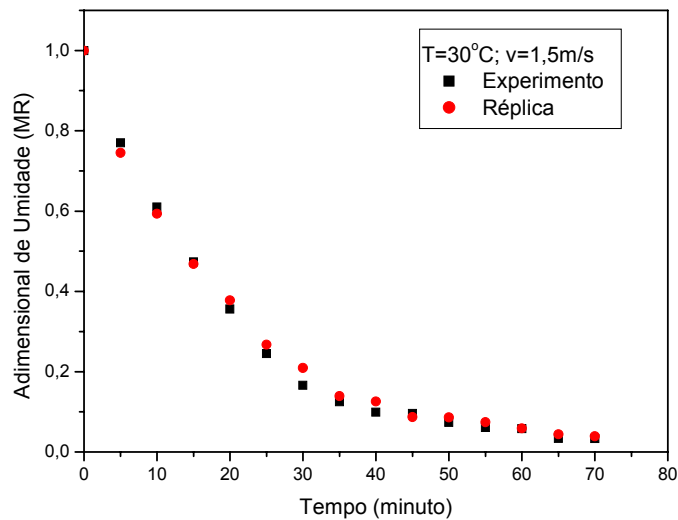


Figura 4.15 – Adimensional de umidade em função do tempo do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=30^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=1,5\text{ m/s}$.

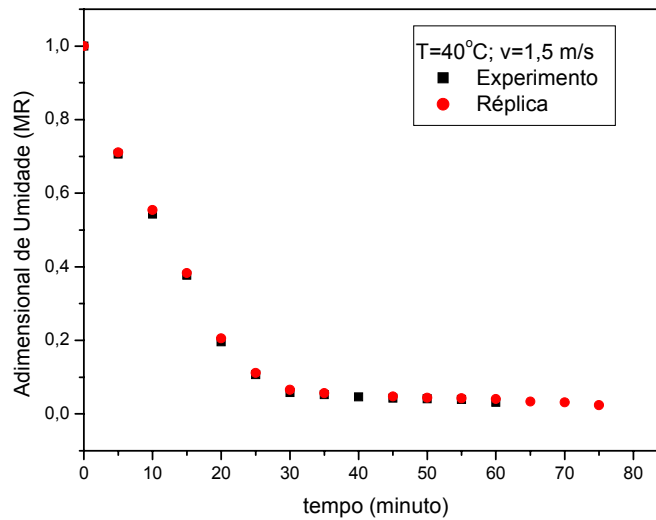


Figura 4.16 – Adimensional de umidade em função do tempo do tempo de secagem em leito fixo e camada fina, para $T=40^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{sup}}=1,5\text{m/s}$.

Os experimentos foram realizados em réplica sendo possível observar através das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 que os mesmos foram reproduzíveis uma vez que as diferenças entre os valores de MR dos experimentos e das réplicas são inferiores às incertezas de medida.

A Figura 4.17 apresenta os resultados típicos do adimensional de umidade em função do tempo de secagem, para a velocidade do ar de 2,5 m/s, parametrizado nos diferentes valores de temperatura utilizados. Enquanto que, a Figura 4.18 reúne os resultados típicos da adimensional de umidade em função do tempo de secagem advindos dos testes de

secagem conduzidos a 30°C nas condições operacionais de velocidades de 0,5 m/s, 1,5 m/s e 2,5 m/s.

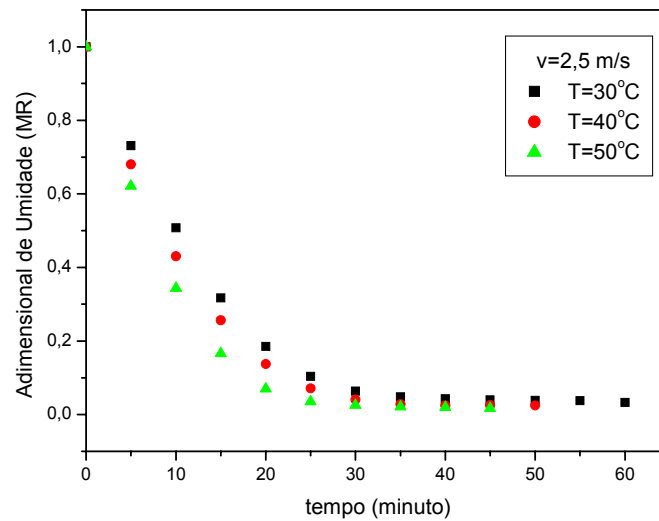


Figura 4.17 – Adimensional de umidade em função do tempo, para $v_{sup}=2,5$ m/s, parametrizado na temperatura.

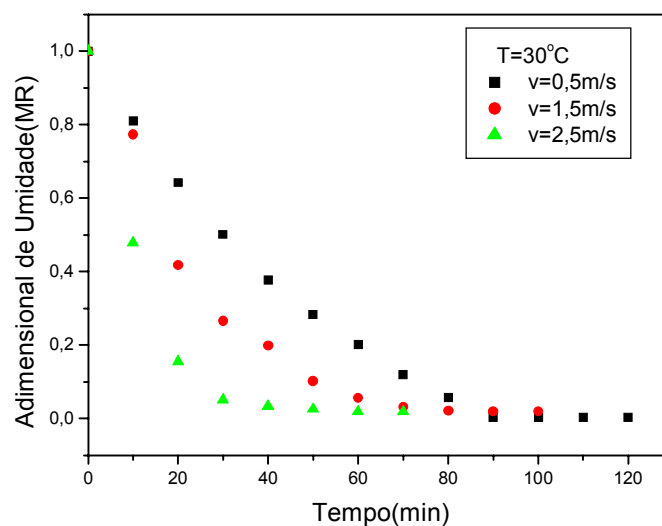


Figura 4.18 – Adimensional de umidade em função do tempo, para $T=30^{\circ}\text{C}$, parametrizado em relação à velocidade do fluido.

As curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18 foram elaboradas de maneira a tornar possível a visualização dos efeitos, separadamente, da influência da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem.

Através da Figura 4.17 pode-se verificar, como era esperado, que a influência da temperatura é significativa nas condições de operação de secagem utilizadas.

A partir da Figura 4.18 tem-se que o efeito convectivo é acentuado para todas as velocidades, isto se deve ao fato do elevado conteúdo de umidade das sementes.

4.5.2 – ANÁLISE DOS DADOS ATRAVÉS DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS E SEMIEMPÍRICAS DA LITERATURA

Com base nos resultados experimentais obtidos foi realizado o tratamento dos dados através do pacote computacional STATISTICA[®]. Entre as equações existentes na literatura foram estimados os parâmetros para as equações de LEWIS (1921), PAGE (1949), HENDERSON e HENDERSON (1968), OVERHULTS et alii (1973) e BROOKER et alii (1974), apresentadas na Tabela 2.2, para T_f em °C e t em minuto. Foram

determinadas as distribuições de resíduos e a distribuição dos valores observados em função dos valores preditos permitindo verificar a adequação das equações aos dados experimentais.

Os valores obtidos para os parâmetros das equações analisadas e os coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 4.4. As Figuras D2 e D3 apresentam respectivamente os valores observados em função dos valores preditos para a equação de Page (Eq. 2.15) e Lewis (Eq. 2.14), equação de Henderson (Eq. 2.16) e equação de Overhults (Eq. 2.19).

Tabela 4.4- Valores dos parâmetros e dos coeficientes de correlação para as equações de secagem analisadas.

Equação	Parâmetros	R²
LEWIS (1921) (Equação 2.14)	a=0,17 b=48,5	0,90
PAGE (1949) (Equação 2.15)	a=0,22; b=42,4 n=0,87	0,90
HENDERSON (1968) (Equação 2.16)	a=0,17; b=48,6; c=0,97	0,89
OVERHULTS (1973) (Equação 2.19)	a=-1,72; b=-48,9; n=0,87	0,90
BROOKER (1974) (Equação 2.20)	a=0,16; b=47,6; c=0,97	0,89

Avaliando-se os ajustes obtidos, para as equações reunidas na Tabela 4.4, com base no coeficiente de correlação, não é possível

verificar qual é a equação mais adequada. Entretanto, os parâmetros obtidos para a Equação (2.20) não apresentaram nível de significância inferior a 0,05 e portanto, esta não é adequada. A partir da distribuição de resíduos, Figura D2, verifica-se que a equação de PAGE (1949) apresenta um menor desvio entre os valores observados e os preditos assim, pode-se recomendar o uso desta equação para representar os dados obtidos na secagem do sistema semente-gel, sendo representada pelas Equações (4.2) e (4.3).

$$MR = \exp(-Kt^{0,86}) \quad (4.2)$$

$$\text{onde, } K = 0,22 \cdot \exp(-41,3/T_f) \quad (4.3)$$

válida para o domínio de $30^\circ\text{C} \leq T_f \leq 50^\circ\text{C}$ e $0,5 \text{ m/s} \leq v \leq 2,5 \text{ m/s}$.

– Determinação do teor de umidade crítica.

A partir dos períodos de secagem, a taxa constante e decrescente, das sementes recobertas em leito fixo foi possível a obtenção da umidade crítica, de acordo com a metodologia apresentada no item 3.6. A Figura 4.19 mostra um resultado típico de teor de umidade em base seca em função do tempo de secagem, com a

respectiva regressão linear, que determina o ponto crítico de secagem e delimita os períodos de secagem a taxa constante e a taxa decrescente.

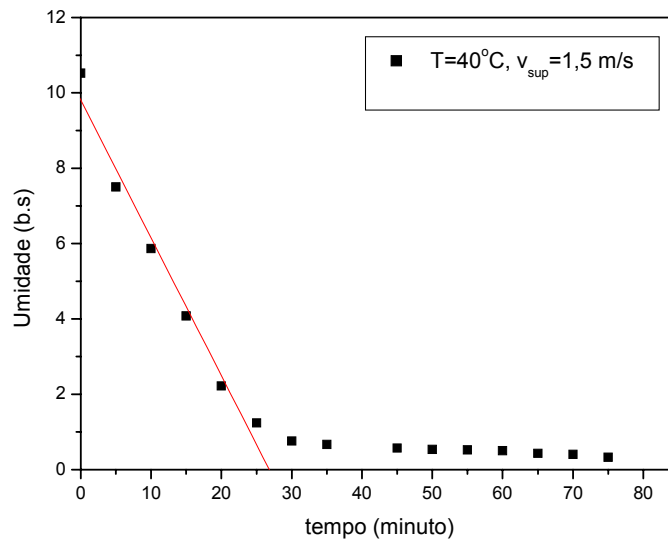


Figura 4.19 – Teor de umidade em base seca em função do tempo de secagem.

Na avaliação da Figura 4.19 obteve-se um teor de umidade crítica em torno de 2,2 kgágua/kg sólido seco. A Tabela 4.5 reúne os valores de umidades críticas obtidos para os demais experimentos.

Os valores de umidade crítica do sistema semente-gel foram difíceis de serem obtidos, devido ao encolhimento que ocorre durante a perda de umidade, conforme constatado, também por BRAUN (2003) na secagem de placas constituídas por misturas a base de gel ágar.

Nas regiões onde se determinam os teores de umidade crítica há a formação de uma parábola, assim, as umidades críticas apresentadas na

Tabela 4.5 foram obtidas como pontos pseudocríticos, de maneira análoga ao realizado por KEEY (1972) e BRAUN (2003).

Tabela 4.5 – Umidades críticas em base seca obtidas nos experimentos.

Condições operacionais		M _{crítico} (bs) kgágua/kg sólido seco
Temperatura (°C)	Velocidade(m/s)	
30	0,5	4,4±0,1
30	1,5 e 2,5	2,7±0,5
40 e 50	0,5 a 2,5	

A partir da Tabela 4.5, pode-se constatar que, exceto para a condição de 30°C e 0,5 m/s, o teor de umidade crítico é independente das condições operacionais da unidade de secagem.

Este comportamento era esperado, pois, conforme KEEY (1972), a umidade crítica depende apenas das condições iniciais do material e, segundo BRAUN (2003), para a condição operacional onde as transferências de calor e massa são baixas o comportamento é distinto das demais condições para estes sistemas a base de gel ágar; provavelmente, devido à reestruturação que ocorre na massa da amostra.

4.6 – TESTES DO SISTEMA SEMENTE-GEL ATRAVÉS DA SECAGEM EM LEITO FIXO

Após a caracterização da semente com a cobertura artificial a base de gel foram conduzidos os testes de secagem com o intuito de avaliar a interação entre o material em estudo e o ar na secagem em leito fixo.

4.6.1 – DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA, UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA NO LEITO EM CAMADA ESPESSA

Para as determinações das distribuições de temperatura, umidade e massa específica ao longo do leito em camada espessa foram utilizados os procedimentos descritos no item 3.7.3.

– Temperatura do fluido.

As medidas da temperatura no interior do leito fixo e camada espessa foram realizadas para as condições operacionais de umidade

relativa do ar de aproximadamente 39%, velocidade do fluido de secagem em torno de 0,5m/s e temperatura na região de entrada, coordenada $z=0$, de aproximadamente 49°C. Os dados obtidos para tais condições são apresentados na Tabela E1.

Os resultados típicos de temperatura do fluido obtidos nas posições que representam as alturas de leito de 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 cm, no interior da célula, são apresentadas na Figura 4.20.

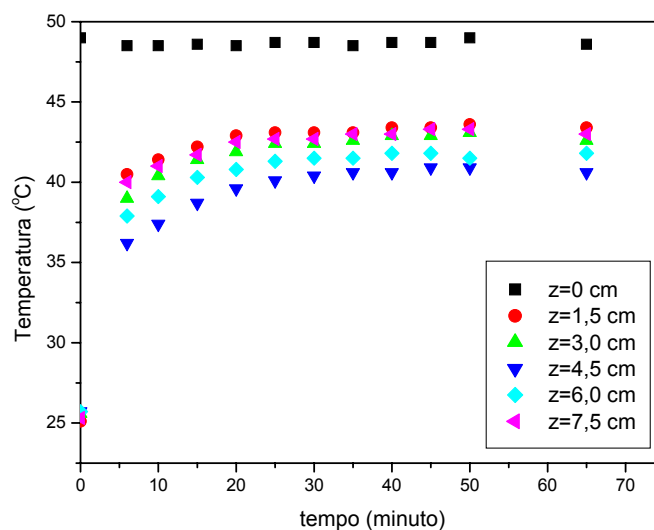


Figura 4.20 – Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leito espesso, parametrizado em z .

A partir da Figura 4.20 pode-se verificar que na posição de 6,0 cm atingem-se temperaturas superiores às da posição de 4,5 cm. Enquanto, que na posição de 7,5 cm as temperaturas medidas somente

são inferiores às da posição de 1,5 cm, ou seja, em posições mais distantes da base do leito as temperaturas são mais elevadas que as de posições inferiores. Estes resultados são devido à formação de canais preferenciais, que são confirmados por meio de observação visual, isto ocorre em função das características do material que constitui o leito, ou seja, o sistema semente-gel.

Este fenômeno ocorreu nos experimentos realizados em diferentes condições operacionais e quando se realizava a réplica os resultados obtidos não eram reprodutíveis, conforme se pode verificar na Tabela E2, do Anexo E. Assim, observa-se que, além de haver a formação de canais preferenciais, estes ocorrem de forma aleatória no leito.

No estágio inicial de secagem ocorrem canais preferenciais de escoamento do ar devido às próprias características do leito fixo, ou seja, devido à maior porosidade ocasionada pelo arranjo das partículas na parede. A razão entre o diâmetro de tubo e o diâmetro de partícula é de aproximadamente 11,3 no início da secagem, ROUILLER (2003) em seu trabalho concluiu que para as razões menores que 11,4, apresentam-se canais preferenciais distribuídos em quase toda a superfície do leito fixo, ou seja, esta condição no processo favorece a formação de canais. A medida que se promove a secagem, o fenômeno do encolhimento que

ocorre no material de recobrimento das partículas leva à formação de regiões vazias no leito e intensifica a formação destes canais.

Durante a secagem em leito fixo e camada espessa, para a altura utilizada de 7,5 cm, não ocorre uma acomodação do leito de forma gradativa, há inicialmente a formação de regiões com vazios, ausência de partículas, e então, ocorre a desestruturação do leito para ocupação destas regiões.

Verificou-se que o sistema semente-gel é muito complexo e ao entrar em contato com o fluido de secagem pode ocorrer, ainda, a formação de aglomerados de partículas, conforme observados visualmente.

– Umidade das partículas.

Os experimentos realizados com o intuito de determinar a umidade das sementes recobertas ao longo do leito espesso foram interrompidos após 20, 40, 100 e 160 minutos de secagem, para a retirada de amostras das seções da célula de secagem.

O intervalo de tempo de 20 minutos foi escolhido por representar aproximadamente o tempo necessário para atingir a umidade crítica.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.21, e são referentes aos valores reunidos na Tabela E3. As condições operacionais utilizadas foram temperatura do fluido de 30°C, velocidade em torno de 0,5m/s e umidade relativa do ar de aproximadamente 33%.

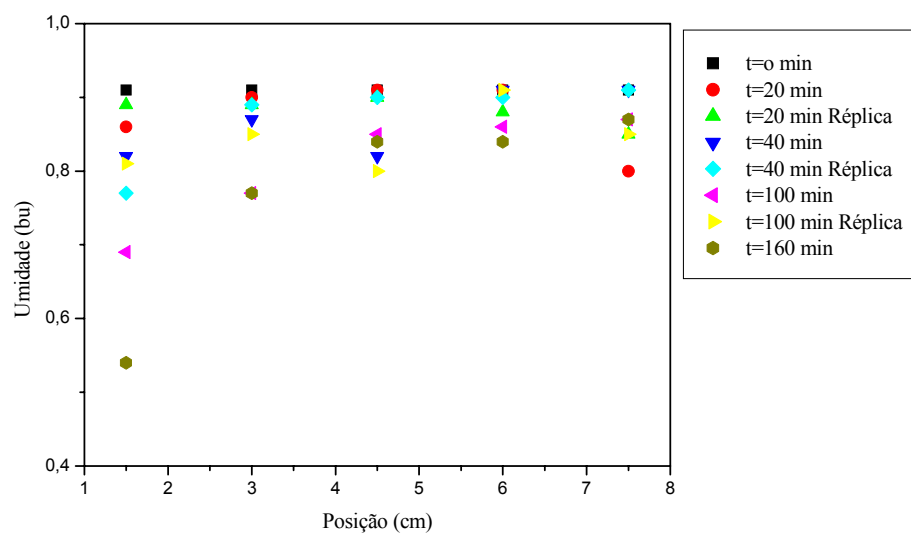


Figura 4.21 – Umidade do material em função da posição no leito espesso, parametrizado no tempo.

A partir da Figura 4.21 verifica-se que não ocorre uma separação bem definida entre as regiões de secagem, conforme já era esperado. Isto ocorre devido aos fenômenos envolvidos no processo de secagem desta natureza de partículas de acordo com as discussões já realizadas.

Isto pode ser justificado devido à ocorrência de canais preferenciais, conforme citado no item anterior. Assim as partículas localizadas na parte superior da célula de medida podem atingir teores de umidades inferiores às partículas localizadas nas regiões mais próximas da alimentação do ar de secagem na base do leito ($z=0$).

Para o período de tempo correspondente a 160 minutos, observa-se a distinção entre diferentes regiões de secagem. Este fato deve-se, em parte, à acomodação das sementes, assim, há uma mistura aleatória entre as partículas e, também, o teor de umidade das sementes tende à umidade de equilíbrio em regiões diferentes do leito, devido ao tempo de operação.

Os resultados obtidos para as réplicas não foram reprodutíveis, conforme já era esperado, uma vez que os canais preferenciais ocorrem aleatoriamente no leito, conforme verificado através das medidas de temperatura.

– Massa específica das partículas.

A determinação da massa específica durante a secagem ao longo do leito fixo e camada espessa foi realizada nas mesmas condições

operacionais da determinação da umidade do material. Nestes testes os intervalos de tempo foram de 40, 100 e 160 minutos para a retirada das amostras. Os resultados típicos obtidos podem ser verificados na Figura 4.22 e na Tabela E4, Anexo E.

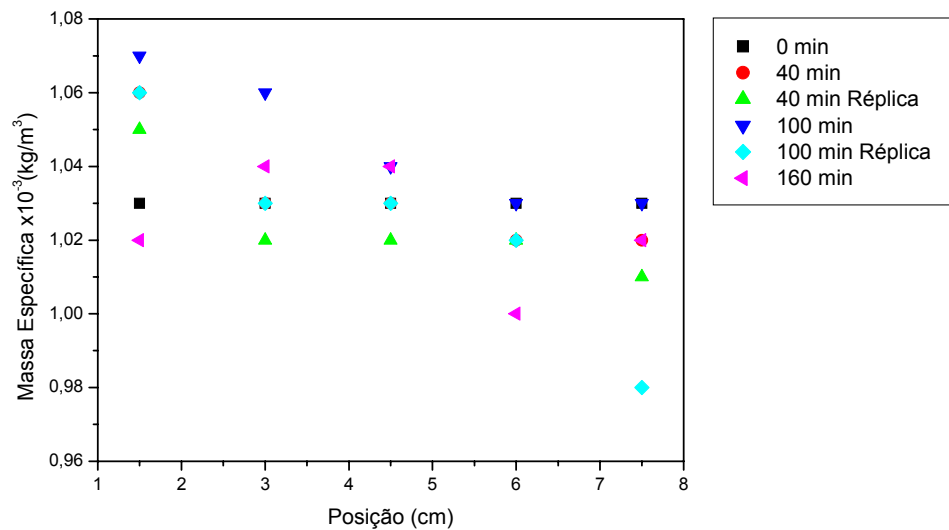


Figura 4.22 – Massa específica do material em função da posição no leito espesso, parametrizado no tempo.

A partir da Figura 4.22 verifica-se que os valores obtidos para a massa específica em diferentes alturas do leito, assim como já foi verificado para as distribuições de temperatura do fluido de secagem e da umidade das partículas ao longo do leito, não apresentam um comportamento bem definido durante o tempo de secagem.

Como durante a secagem em leito espesso, com altura de 7,5 cm, houve a formação de canais preferenciais e a não reprodutibilidade das propriedades mensuradas, no item a seguir faz-se a avaliação das propriedades para diferentes espessuras de leito visando à busca de homogeneidade das propriedades medidas.

4.6.2 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO LEITO

As condições operacionais utilizadas para o fluido de secagem foram em torno de 40°C e velocidades de 0,5 e 1,0 m/s. Estas condições foram utilizadas devido à análise da qualidade fisiológica obtida para diferentes condições operacionais. A umidade relativa do fluido foi em torno de 30%.

A temperatura do fluido na saída do leito foi medida de acordo com a metodologia apresentada no item 3.8. As medidas foram realizadas em quatro posições angulares, de acordo com as Figuras 3.12 e E1.

A Figura 4.23 representa resultados típicos para a temperatura na saída do leito com a respectiva réplica. Os dados foram obtidos para temperatura de $(40\pm 1)^\circ\text{C}$, velocidade de aproximadamente 1,0 m/s,

umidade relativa em torno de 30% e altura da célula de secagem (h) de 1,5 cm.

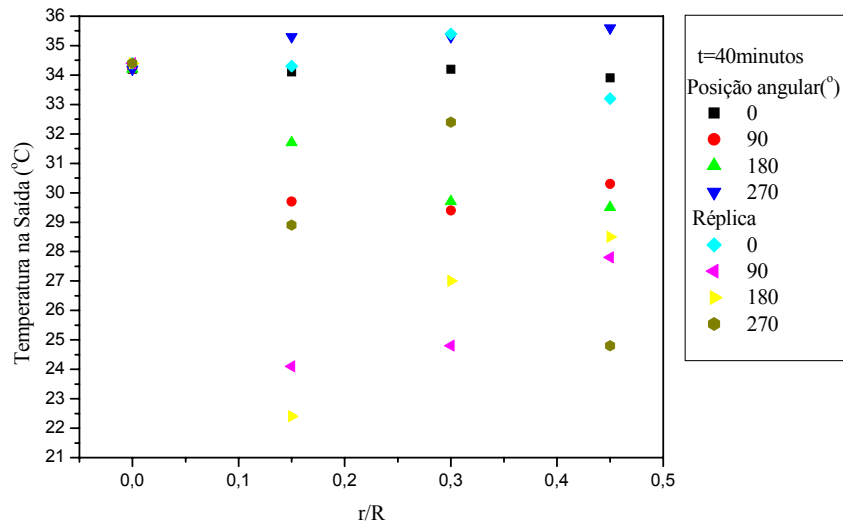


Figura 4.23 – Temperatura na saída do leito em função da posição radial, para $h=1,5$ cm, parametrizada na posição angular.

Como era esperado, verifica-se com base na Figura 4.23, que ocorre uma dispersão nas medidas em relação à posição angular. De acordo com a literatura, ROUILLER (2000) verificou que para qualquer tipo de empacotamento, em leito fixo, as distribuições angulares de temperatura foram oscilatórias, independente da posição radial, sendo que, a maior oscilação ocorre próxima à região de parede. Neste caso as oscilações foram muito pronunciadas em todas as regiões, não apenas

próximo à parede. Lembrando as características destas partículas, além dos problemas estruturais típicos de leito fixo, têm-se, também, as propriedades específicas deste leito, comprovado com a formação de vazios no leito, durante a operação de secagem e mostrados anteriormente.

As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam os resultados típicos para os valores de temperaturas obtidos em função da posição angular, parametrizados na posição radial.

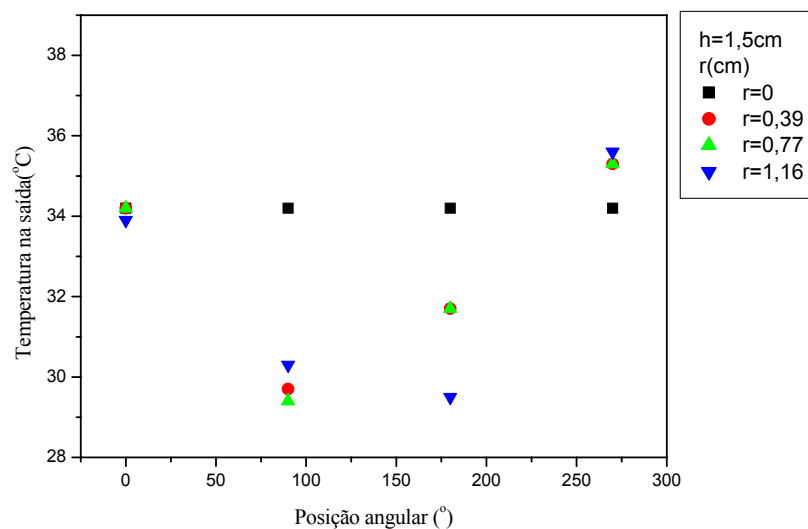


Figura 4.24 – Temperatura em função da posição angular, para $h=1,5$ cm e $t=40$ min, parametrizada em r .

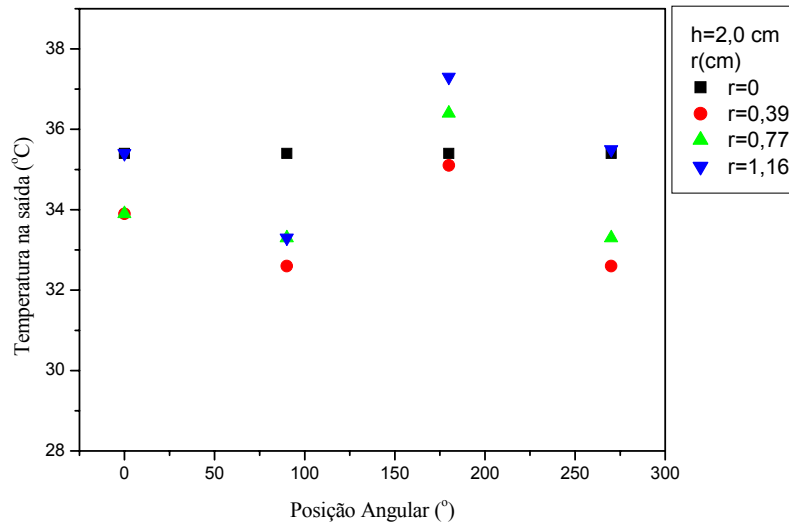


Figura 4.25 – Temperatura em função da posição angular, para $h=2,0\text{cm}$ e $t=40\text{min}$, parametrizada em r .

A partir das Figuras 4.24 e 4.25 constata-se através dos valores obtidos, para as temperaturas em uma mesma posição angular, para a altura de leito de 1,5 cm e 2,0 cm que ambos os leitos não são homogêneos em relação à temperatura medida.

A Figura 4.26 (a) apresenta a foto com visão superior da célula de secagem no tempo zero, ou seja, antes de acoplar à unidade de secagem e (b) a célula após 40 minutos de secagem, intervalo de tempo onde foram realizadas as medidas de temperatura apresentadas na Figura 4.24.

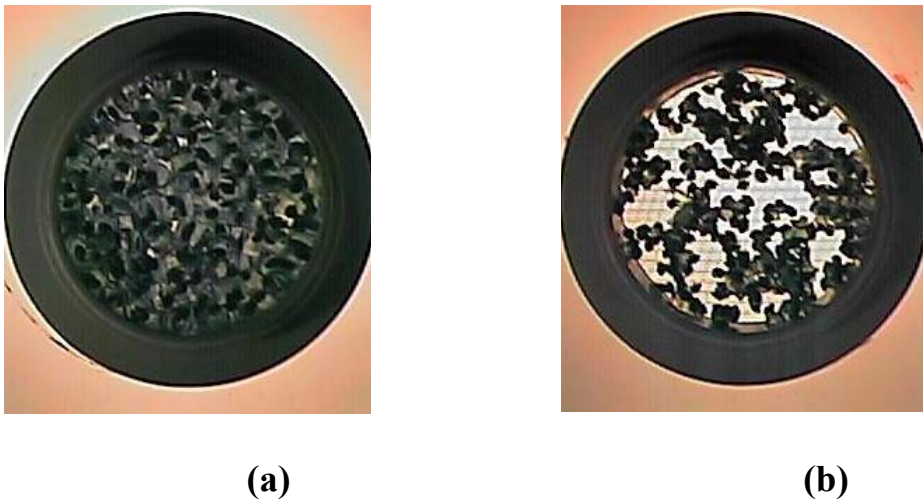


Figura 4.26 – Foto da célula de secagem com altura de $1,5 \times 10^{-2}$ m, (a) na condição inicial e (b) após 40 minutos de secagem.

A partir da Figura 4.26 pode-se observar que mesmo para a espessura de leito de 1,5 cm após 40 minutos de secagem, na célula de secagem já existem muitas regiões vazias no leito, devido ao encolhimento. Este fato é responsável pelas oscilações de temperatura verificadas.

A Figura 4.27 apresenta a foto da célula de secagem, $h=1,5$ cm, após 60, 80, 100 e 120 minutos de secagem.

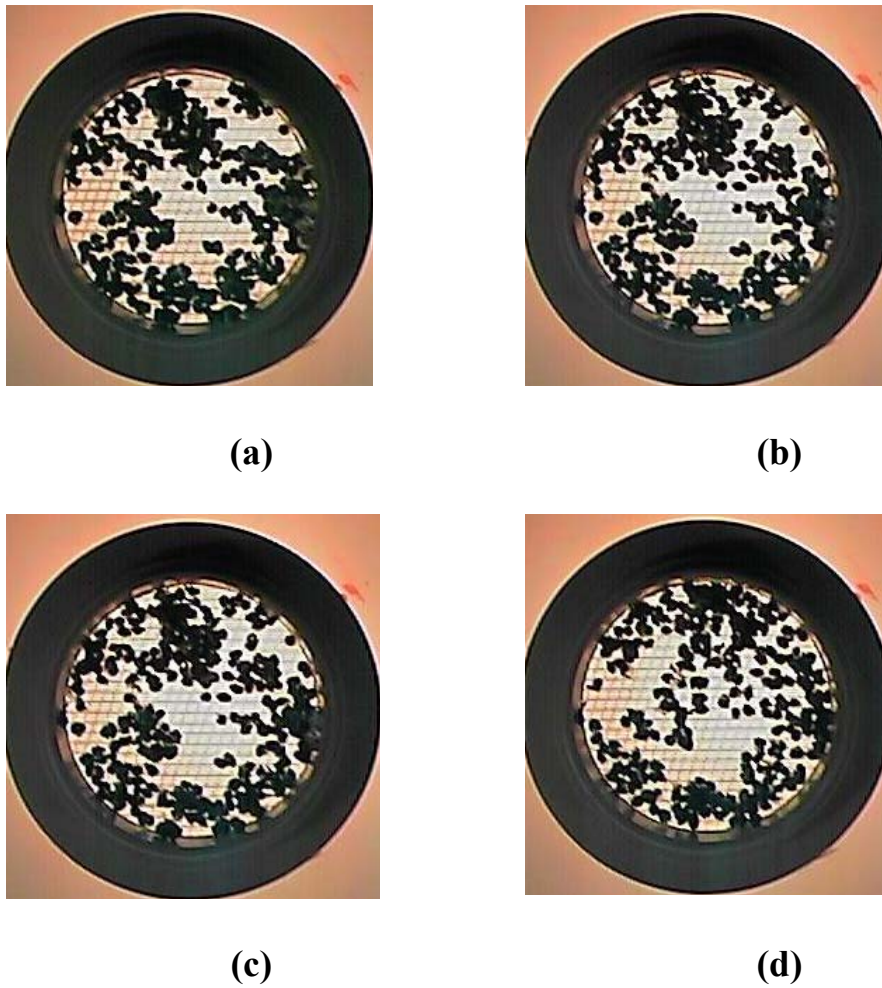


Figura 4.27 – Foto superior da célula de secagem após (a) 60, (b) 80, (c) 100 e (d) 120 minutos de secagem.

Através das Figuras 4.26 e 4.27 é possível observar a evolução da secagem em função do tempo de exposição ao fluido, verificando-se a formação de regiões vazias que ocorrem durante a secagem, originando as diferenças obtidas nas medidas de temperatura na saída do leito, apresentadas nas Figuras 4.23 e 4.24.

A Figura 4.28 apresenta a foto com visão superior da célula de secagem com altura de 2,0 cm na condição inicial (a), ou seja, antes de acoplar à unidade de secagem e (b) a célula após 40 minutos de secagem.

**(a)****(b)**

Figura 4.28 – Foto da célula de secagem com altura de $2,0 \times 10^{-2}$ m, (a) no tempo inicial igual a zero e (b) após 40 minutos de secagem.

A partir da Figura 4.28, também, é possível visualizar os canais preferenciais que ocorrem durante a secagem e originam a descontinuidade do leito.

A Figura 4.29 apresenta a foto da célula de secagem após 60, 80 e 100 minutos de secagem para um leito com altura de 2,0 cm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.29 – Foto superior da célula de secagem após (a) 60, (b) 80, (c) 100 e minutos de secagem.

A partir das Figuras 4.28 e 4.29 comprova-se os resultados obtidos nas medidas de temperatura, conforme já analisados.

– Umidade das partículas.

A umidade das partículas foi determinada conforme metodologia apresentada no item 3.7.3.

A Figura 4.30 apresenta os resultados típicos obtidos para o teor de umidade em leitos com alturas de 1,5 e 2,0 cm para sementes recobertas com umidade inicial em torno de 90% bu.

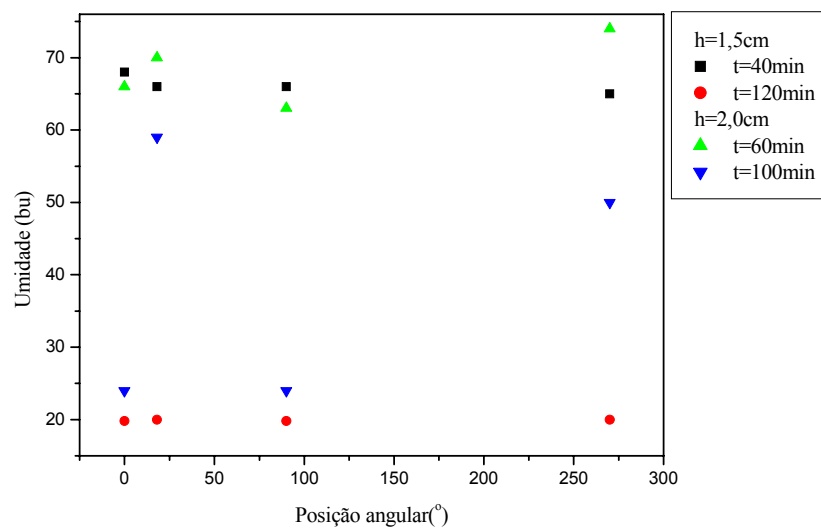


Figura 4.30 – Umidade das partículas em função da posição angular, parametrizadas em h e t.

A partir da Figura 4.30 é possível observar que para a altura de leito de 1,5 cm os valores obtidos para as diferentes posições angulares,

por exemplo, para o tempo de 120 minutos é de $(20\pm 1)\%$ bu, podendo, assim, considerar a umidade aproximadamente constante em diferentes quadrantes do leito. Enquanto que, para a altura de 2,0 cm, principalmente para o intervalo de tempo de 100 minutos, por exemplo, há uma oscilação muito grande da umidade devido à ocorrência de vazios e aglomerados, observados visualmente, que provocam a retenção de umidade em determinadas regiões.

Assim, embora tenha sido verificado que no leito de 1,5 cm há a ocorrência de regiões vazias, a distribuição de umidade, em condições experimentais, neste leito pode ser considerada constante e, portanto, esta espessura de leito é mais adequada que a de 2,0cm.

– Temperatura do sólido.

A Figura 4.31 apresenta os resultados típicos obtidos para a temperatura do sólido nos leitos com alturas iniciais de 1,5 e 2,0 cm. Para os leitos de 1,5 cm e 2,0 cm as temperaturas iniciais das sementes foram respectivamente em torno de 19°C e 24°C.

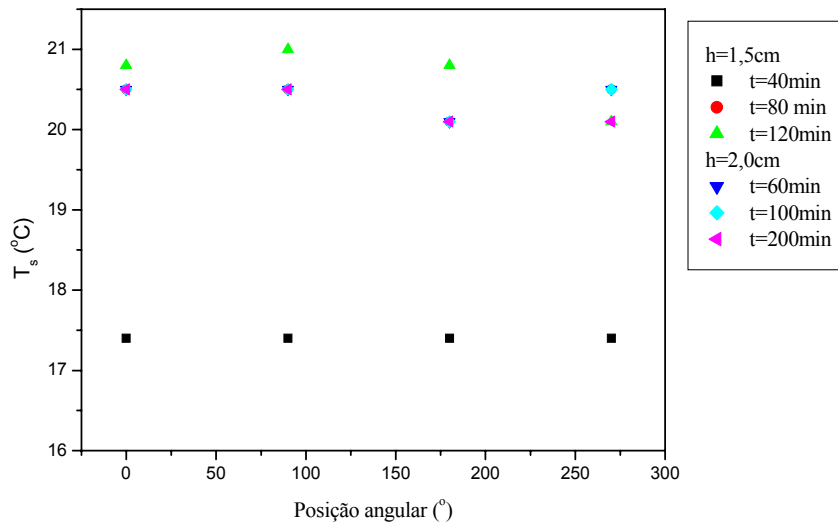


Figura 4.31 – Temperatura do sólido em função da posição angular, parametrizado em h e t , para o ar de secagem escoando à temperatura de 40°C.

A partir da Figura 4.31 observa-se que, inicialmente, ocorre a diminuição da temperatura, no leito de 1,5 cm de altura, de 19°C para aproximadamente 17,5°C, que consiste na evaporação da umidade superficial, até o intervalo de tempo de aproximadamente 40 minutos para depois ocorrer o aumento da temperatura até o valor máximo próximo de 21°C, ou seja, a variação de temperatura das sementes indica que ainda está ocorrendo dessorção de umidade no sistema.

Para o leito de 2,0 cm de altura a temperatura das sementes no início da operação foi maior, 24°C, ao entrar em contato com o fluido, a

temperatura sofreu uma redução, como no caso anterior, para aproximadamente 20°C, entretanto, este valor foi mantido por um período de tempo mais longo, provavelmente devido a maior espessura do leito e maior dificuldade de ocorrer a transferência de calor e massa entre o fluido e as partículas.

Realizadas as etapas de construção do sistema semente-gel, caracterização e avaliação do material ao entrar em contato com o fluido de secagem, completa-se o desenvolvimento do sistema semente-gel com a análise da capacidade de recomposição da planta como um todo, de acordo com a etapa 5 do fluxograma de formação deste sistema (Figura 4.2). Ou seja, é imprescindível que o sistema semente-gel possua e mantenha ao longo do tempo o embrião vivo. Para tanto, deve-se fazer a verificação da presença dos sistemas “radicular, caule e folhear”, quando submetidos a condições ambientais específicas, por meio de testes que quantifiquem a condição de manutenção do poder germinativo nas operações, bem como, de preservação do potencial de recomposição após a armazenagem, através do efeito latente.

4.7 – AVALIAÇÃO DAS QUALIDADES FISIOLÓGICAS

Mesmo sendo os resultados obtidos favoráveis aos processos de tratamento utilizados para agregar a mistura a base de gel sobre o tegumento do milho na formação do sistema semente-gel, para o enfoque do ponto de vista de ciência e tecnologia de produção de sementes ainda não são suficientes. Pois exigem, além dos aspectos de caracterização física do material, as informações relativas às influências das operações sobre a qualidade fisiológica das sementes.

A avaliação da qualidade fisiológica das sementes, sem e com recobrimento, foi realizada através do teste padrão de germinação apresentada no item 3.9. Foram avaliados os efeitos imediatos de cada operação (teste em branco) e o efeito latente após o recobrimento e secagem.

Na avaliação do substrato mais adequado aos testes de germinação, verificou-se que as sementes recobertas colocadas em papel germitest começaram a germinar no segundo dia, enquanto que, as sementes colocadas na areia foram contaminadas por fungos. Portanto, os testes foram realizados em papel germitest.

Através da Equação (3.3) realizou-se o cálculo da razão entre as porcentagens de germinação antes e após uma determinada operação.

$$\overline{GE} = \frac{GE_d}{GE_a} \times 100\% \quad (3.3)$$

onde,

GE_a : índice de germinação antes da operação.

GE_d : índice de germinação após a operação.

4.7.1 – ANÁLISE DO EFEITO IMEDIATO

Os resultados da avaliação da qualidade fisiológica considerando-se o efeito imediato do recobrimento são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Percentual de germinação de sementes de *Pennisetum glaucum* antes e após o recobrimento, efeito imediato.

Qualidade Fisiológica		
GE_a(%)	GE_d(%)	\overline{GE} (%)
71,2	71,0	99,7
76,5	76,3	99,7
72,0	71,6	99,4

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 mostram que a operação de recobrimento causou uma queda muito pequena no poder germinativo das sementes de milho. Utilizando-se o papel germitest as sementes recobertas germinaram em aproximadamente dois dias, este é um período muito curto uma vez que as sementes sem recobrimento levaram em torno de cinco dias para começarem a germinar.

Constatou-se, portanto, que a germinação foi até favorecida uma vez que a cobertura atuou como meio de cultura durante a condução dos testes, o que poderá trazer uma grande contribuição para o plantio das lavouras, principalmente, em regiões semi-áridas.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para os testes de germinação após o recobrimento e secagem das sementes, considerando os efeitos imediatos do processo sobre a qualidade.

A partir da Tabela 4.7 verifica-se que a qualidade fisiológica foi melhor preservada para as condições utilizadas de temperaturas de 30°C e 40°C em toda faixa de velocidade utilizada.

Tabela 4.7 – Percentual de germinação de sementes de *Pennisetum glaucum* com cobertura artificial antes e após a secagem em diferentes condições operacionais da unidade

Condições Operacionais		Qualidade Fisiológica		
T (°C)	v _{sup} (m/s)	GE _a (%)	GE _d (%)	\overline{GE} (%)
30	0,5	71,0	69,4	99,7
	1,5	76,3	76,1	99,7
	2,5	71,6	69,2	99,4
40	0,5	71,0	70,0	98,6
	1,5	76,3	72,8	95,4
	2,5	71,6	68,0	94,8
50	0,5	71,0	57,5	81,0
	1,5	76,3	55,0	72,1
	2,5	71,6	52,0	72,6

Para a temperatura de 50°C, como era esperado, os resultados obtidos para a germinação não foram satisfatórios, pois os índices de germinação após a secagem ficaram abaixo de 60%. Relembrando que embora do ponto de vista do processo as taxas de secagem nestas condições, na maioria das situações, são maiores em relação às temperaturas abaixo de 50°C, as condições operacionais do secador são

inadequadas, pois, ocorre uma redução muito grande no número de embriões vivos.

Mesmo após a secagem realizada com temperaturas inferiores a 50°C, o poder germinativo continuou sendo favorecido uma vez que em contato com a umidade do substrato, a película de gel agrega água à sua estrutura, sofrendo uma expansão, e o gel passa a agir como um meio de cultura promovendo um melhor desenvolvimento do embrião.

Este fenômeno provavelmente viabilizará o processo germinativo e desenvolvimento da planta em contato com a umidade do solo durante o plantio em campo.

A aplicação do teste de avaliação do vigor por meio do teste de envelhecimento precoce (TEP) não foi adequado ao material recoberto. Pois, quando as amostras foram submetidas à atmosfera da câmara de envelhecimento precoce de aproximadamente 100% de umidade relativa, um curto período de tempo, em torno de 36 horas, foi necessário para iniciar a germinação. Fazendo com que o sistema semente-gel iniciasse o processo germinativo antes da conclusão da avaliação desta qualidade fisiológica, que exige um período de 48 horas. Fenômeno este que não ocorre para as sementes de soja (BARROZO, 1995) e nem mesmo para a *Brachiaria brizantha* (ARNOSTI, 1997). Assim, realizou-se a avaliação

quanto ao tempo necessário para a germinação, através do método direto de observação, e efetuaram-se as medidas de radículas e brotos.

As sementes recobertas e secas levaram em torno de três dias para que a germinação ocorresse. Para as sementes sem recobrimento foram em torno de 5 dias. As plântulas originadas das sementes recobertas também se apresentaram mais vigorosas, sendo que $(75 \pm 2)\%$ das sementes com recobrimento que germinaram originaram brotos com tamanho de $(5,0 \pm 0,5) \times 10^{-2}$ m, em apenas três dias. Enquanto que, para as sementes sem recobrimento apenas $(24 \pm 3)\%$ dos embriões originaram brotos com tamanho de $(4,0 \pm 0,5) \times 10^{-2}$ m, num total de 5 dias.

A Figura 4.32 apresenta fotos das sementes após a germinação, com o desenvolvimento dos sistemas aéreos e radiculares bem visíveis, considerando nesta situação os efeitos imediatos do processo.

As amostras de sementes também foram submetidas ao teste do hipoclorito de sódio. Ressaltando que, esta análise é realizada observando-se o intumescimento das sementes, e que, no caso do material estudado, após a secagem, a camada de recobrimento torna-se uma película que ao entrar em contato com a água ocorre a absorção e se expande. Assim, ocorre o intumescimento devido às características do próprio material de cobertura e não devido à presença de fissuras, podendo comprometer a interpretação do resultado obtido.



Figura 4.32 – Fotos das sementes após a germinação, considerando os efeitos imediatos dos processos de recobrimento e secagem.

4.7.2 – ANÁLISE DO EFEITO LATENTE

Nos testes realizados sobre a avaliação do efeito latente para sementes que foram secas e armazenadas utilizaram-se sementes que

ficaram armazenadas durante aproximadamente dois meses. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

A partir dos resultados reunidos na Tabela 4.8 verifica-se que durante o período de armazenamento ocorreu uma pequena queda, em torno de 3,6% na capacidade de germinação das sementes. Além desta queda não ser muito significativa agregou-se uma maior proteção à semente em relação ao ataque de pragas. Ressalta-se que as sementes sem recobrimento que foram armazenadas pelo mesmo período de tempo em condições idênticas sofreram ataque de pragas, fato este, que implica em mais uma das grandes vantagens de se proceder ao recobrimento artificial das sementes com material a base de gel.

A Figura 4.33 apresenta uma foto das sementes tirada no quinto dia do processo de germinação, realizado após o período de armazenamento. Pode-se verificar que o desenvolvimento das radículas e brotos é bem visível, entretanto, há uma queda no tamanho dos brotos que passa a ter aproximadamente $(3,5 \pm 0,5)$ cm de comprimento em relação a $(5,0 \pm 0,5)$ cm antes do armazenamento, conforme era esperado, pois passaram pelo período de dormência (CARVALHO, 1986). As radículas foram tingidas com azul de metileno, visando melhorar a sua visualização.

Tabela 4.8 – Percentual de germinação de sementes de *Pennisetum glaucum* com cobertura artificial e secas em diferentes condições operacionais da unidade, antes e após o armazenamento.

Condições Operacionais		Qualidade Fisiológica		
T(°C)	v _{sup} (m/s)	GE _a (%)	GE _d (%)	\overline{GE} (%)
30	0,5	69,4	67,2	96,8
	1,5	76,1	73,7	96,8
	2,5	69,2	66,3	95,8
40	0,5	70,0	68,0	97,1
	1,5	72,8	70,7	97,1
	2,5	68,0	65,9	96,9
50	0,5	57,5	55,5	96,5
	1,5	55,0	53,2	96,7
	2,5	52,0	49,8	95,8



Figura 4.33 – Sementes de *Pennisetum glaucum* no quinto dia de germinação, efeito latente.

Portanto, é possível observar que as operações de recobrimento e secagem não afetaram significativamente a qualidade fisiológica das sementes. O recobrimento das sementes foi adequado e até mesmo melhorou a emergência dos embriões. Teve-se, também, a confirmação de que a camada de recobrimento é permeável ao oxigênio, pois os embriões permaneceram vivos.

Assim, verifica-se que é adequada a aplicação das metodologias desenvolvidas para o recobrimento com material a base de gel ágar para as sementes de *Pennisetum glaucum*, também, sob os aspectos de qualidades fisiológicas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre o desenvolvimento, a caracterização e a secagem de sementes com cobertura a base de gel, têm-se, para as condições operacionais utilizadas, as conclusões apresentadas a seguir.

As metodologias de preparação das partículas, bem como, a reumidificação lenta das sementes, em ambiente saturado por vapor d'água, foram adequadas para o *Pennisetum glaucum*. Entretanto, conforme a umidade das sementes reumidificadas se aproximam do valor “in natura”, comprometem o desenvolvimento do sistema semente-gel, pois, tornam-se susceptíveis à germinação. Assim, a formação do agregado celular desta gramínea foi viabilizado com umidades iniciais em torno de 12%bu.

Entre as soluções preparadas com diferentes composições, a solução binária constituída por água e ágar não foi adequada ao recobrimento, uma vez que, a fixação à superfície das sementes foi

dificultada, ocorrendo em torno de apenas 60% dos grãos. A adição de sorbato proporcionou melhor aderência às sementes, a composição de 1,5% de ágar e 5% de sorbato em relação ao gel foi a que originou as melhores coberturas artificiais das partículas e a manutenção da capacidade de recomposição das sementes.

A moldagem e geleificação da camada de revestimento, sobre a superfície das partículas, foi viabilizada mediante a imersão individual dos grãos em placas de acrílico perfuradas. A temperatura de manuseio do gel foi em torno de 39°C, e a autolubrificação, devido à concentração de 1,5% do ágar e a adição de sorbato, minimizaram a ocorrência de rachaduras durante a retirada do sistema semente-gel dos moldes.

A consistência adequada do agregado celular permitiu que a caracterização física via técnicas de laboratório e equipamentos comerciais, para as sementes sem e com recobrimento, fossem adequadas. Os métodos permitiram a caracterização quanto às suas dimensões, forma, massa específica, condutividade e difusividade térmicas e calor específico.

A semente recoberta apresentou alto teor de umidade, $(88\pm 2)\%$ bu, em função das características dos materiais, sendo que, a espessura de recobrimento foi de $(0,13\pm 0,01)\times 10^{-3}$ m. A cobertura levou ao aumento da esfericidade de $(0,83\pm 0,02)$ para $(0,94\pm 0,02)$,

favorecendo o contato entre as partículas na constituição de leitos fixos.

A comparação entre as massas específicas das sementes e do sistema semente-gel, determinadas através de picnometrias líquida e gasosa, mostraram que para as sementes sem recobrimento os valores obtidos por picnometria líquida foi de $(1,48 \pm 0,02) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 7% superior ao advindo da picnometria gasosa. Para as sementes recobertas foi de $(1,03 \pm 0,01) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 2% inferior ao obtido com a picnometria gasosa.

No estudo da condutividade e difusividade térmicas efetivas os métodos respectivamente da sonda linear e transiente foram adequados para as sementes sem recobrimento, desestruturadas e para as sementes recobertas. Para o meio constituído por sementes sem recobrimento, com porosidade em torno de 0,32, obteve-se o valor de $(4,89 \pm 0,02) \times 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{C}$, valor superior ao de outras gramíneas devido à forma do milho e do contato entre as partículas. O leito com sementes desestruturadas forneceu o valor de $(5,98 \pm 0,05) \times 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{C}$, que pode ser considerado como sendo a condutividade térmica do sólido.

Para as sementes recobertas o k_{ef} foi de $(21,00 \pm 0,05) \times 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{C}$, com a mesma ordem de grandeza do gel ágar, para porosidade de aproximadamente 0,25. O valor obtido de k_{ef} para as sementes

recobertas foi superior devido à alteração dos materiais e da forma do sistema semente-gel, que se aproxima de esfera, e melhora o contato entre as partículas. As correlações existentes na literatura para determinação da condutividade térmica do sólido através da condutividade térmica efetiva não foram adequadas para esta gramínea. Os resultados obtidos para a difusividade térmica efetiva foram de, $1,04 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, para as sementes desestruturadas, e de $1,53 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, para as sementes recobertas, ou seja, não foram tão distintos quanto os valores de condutividade térmica para as diferentes formas de contato.

A partir destas determinações foi possível o conhecimento do calor específico do sistema semente-gel.

No estudo das isotermas de equilíbrio as metodologias convencionais, métodos estático gravimétrico e higrométrico, mostraram-se inadequados para este tipo de material. A nova metodologia desenvolvida neste trabalho, baseada na aceleração de retirada da umidade da partícula seguida do método estático gravimétrico, apresentou dados reprodutíveis. Dentro dos critérios estatísticos utilizados, os dados de equilíbrio foram melhor representados através da equação de Chen-Clayton, para o processo de dessorção d'água das partículas.

No estudo da cinética de secagem em camada fina verificou-se

que a velocidade e a temperatura do ar de secagem tiveram influência significativa na secagem das sementes recobertas, sendo que o efeito convectivo foi predominante em função do elevado teor de umidade do sistema semente-gel. Os valores de umidade crítica foram identificados como pontos pseudocríticos e obteve-se $(2,7 \pm 0,7)$ bs, independente das condições operacionais. Entre as equações analisadas para a cinética de secagem, a equação de Page foi a que melhor representou os dados obtidos através dos critérios estatísticos utilizados.

Os testes de secagem do sistema semente-gel em leito fixo e camada espessa mostraram que no estágio inicial de secagem ocorrem canais preferenciais para o escoamento do fluido. Com base nas características destas partículas, além dos problemas estruturais inerentes de leito fixo, tem-se, também, as propriedades específicas deste tipo de leito que causaram, durante a operação de secagem, as formações de regiões vazias e a formação de aglomerados, conduzindo a uma não homogeneidade das propriedades do leito espesso.

A secagem em camadas com diferentes espessuras permitiram verificar que a altura máxima de leito recomendada, para o sistema semente-gel, que fornece um produto com umidade adequada ao armazenamento é de $1,5 \times 10^{-2}$ m.

Na avaliação da qualidade fisiológica das sementes, entre os

substratos analisados, o papel toalha germitest foi o mais adequado. A cobertura a base de gel atuou como meio de cultura, aumentou a velocidade de germinação e as plântulas originadas das sementes recobertas foram mais vigorosas, apresentando um tamanho 20% superior aos das sementes sem recobrimento em um menor intervalo de tempo. A avaliação de fissuras via teste de hipoclorito de sódio mostrou-se não recomendada, devido à complexidade da estrutura do sistema semente-gel que em contato com esta natureza de solução causa desestruturação do sistema.

A combinação do binômio altas taxas de secagem e preservação da qualidade fisiológica do produto indicam, com base nas análises dos efeitos imediatos e latentes, que a secagem convectiva deve ser realizada com condições operacionais no domínio de 30 a 40°C e velocidades do ar de 0,5 a 2,5 m/s. Para as condições de maiores taxas de secagem, a qualidade do material apresentou uma tendência de queda, na temperatura de 50°C, independente da velocidade utilizada.

A análise do efeito latente mostrou que durante o período de armazenamento ocorreu uma pequena queda, em torno de 3,6%, na capacidade de germinação das sementes. Mostrando que nas condições mais apropriadas para a operação de secagem, obteve-se, mesmo após o período de dormência, um produto com qualidade dentro dos padrões de

comercialização vigentes. Além deste aspecto positivo, esta redução não é significativa quando comparada às grandes vantagens da proteção proporcionada pelo recobrimento artificial das sementes.

Este trabalho mostrou ser possível realizar a integração e sintetização de duas linhas de pesquisa, a secagem de sementes e de géis, através da realização do recobrimento de sementes com material a base de gel. Foi possível fixar o recobrimento às sementes e caracterizar o sistema originado, utilizando técnicas disponíveis e através do desenvolvimento de novas metodologias, sendo que, a secagem convectiva do sistema semente-gel em leito fixo mostrou ser promissora para leitos com pequenas espessuras de material. As avaliações dos efeitos imediatos e latentes na qualidade do produto mostrou a viabilidade de recomposição das sementes com este tipo de recobrimento.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e conclusões obtidos, constata-se a possibilidade da continuidade dos estudos sobre a secagem de sementes com cobertura artificial.

Assim, tem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- buscar um processo para a operação de recobrimento de modo a torná-la adequada para a produção em larga escala;
- estudos específicos a respeito de modificação na composição da mistura de recobrimento, com possibilidades de enriquecimento do produto através da inserção de nutrientes;
- conduzir estudos de recobrimento e secagem com diferentes tipos de materiais e técnicas de contato entre o sólido e o fluido, por exemplo, leitos móveis, bem como, a comparação dos efeitos imediatos e latentes na qualidade do produto obtido em outros tipos de secadores;

– avaliação da cinética de secagem e análise do fenômeno de encolhimento durante a secagem, perante as condições operacionais do processo, para uma partícula isolada;

– análise dos efeitos causados pela reestruturação na superfície da partícula, em relação aos valores de umidade crítica, nas condições de baixas taxas de secagem;

– avaliação da superfície das sementes através do desenvolvimento de novos testes de qualidade física que determinem a ocorrência de fissures, e

– buscar o desenvolvimento de uma correlação específica para gramíneas que determine a condutividade térmica do sólido através da condutividade térmica efetiva do leito fixo constituído de sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, O. P.; CALÇADA, L. A.; MASSARANI, G. Análise de um sistema para levantamento de isotermas de secagem. In: Encontro sobre escoamentos em meios porosos, 1993. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, SP, UFSCar, p. 600-603, 1997.
- APPLE, M. F. Transferência de calor em leito deslizante com escoamentos cruzados: obtenção do coeficiente de transferência de calor entre o fluido e o sólido. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 89p., 1996.
- ARNOSTI Jr., S. Desenvolvimento de um secador transportador do tipo esteira com escoamentos cruzados e caracterização de sementes de gramíneas. Tese de doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 232p., 1997.
- ARNOSTI Jr., S; FREIRE, J. T.; SARTORI, D.J.M.; BARROZO, M. A. S. Equilibrium moisture content of *Brachiaria brizantha*. *Seed Science & Technology*, v. 27, p.273-282, 1999.
- ARRIECHE, L.S. Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 141p., 2003.
- BARROZO, M. A. S. Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. Tese de doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 163p., 1995.
- BARYEH, E. A. Physical properties of millet. *Journal of Food Engineering*, v.51, p.39-46, 2002.
- BIRD, K. T.; HANISAK, M. D.; RYTHER, J. Chemical quality and production of agars extracted from *Gracilaria tikvahiae* grown in different nitrogen enrichment conditions. *Botanica Marina*, v.24, p. 441-444, 1981.

- BIRD, K. T. e HINSON, T. K. Seasonal variations in agar yields and quality from north carolina agarophytes. *Botanica Marina*, v.35, p. 291-295, 1992.
- BLACKWELL, J. H. Radial-axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders. *Canadian Journal of Physics*, v. 31, p.472-479, 1952.
- BRAUN, E. I. J.; CASTILHO, R. H. F.; SARTORI, D.J.M. Transferência simultânea de massa e encolhimento na secagem de modelos géis simplificados de diferentes geometrias. In: 9th Latin American Congress in Heat and Mass Transfer, San Juan, Puerto Rico, 2002. *Actas del 9th LATCYM, Session: Drying Processes #90*. San Juan: UPRM, 2002,v.1.
- BRAUN, E. I. J. Análise da secagem convectiva de géis em função de: composição, estrutura e forma Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 146p., 2003.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARAKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. The Avi Publishing Company Inc., Westport, 1974.
- BROWN, D. C. W. Applied aspects of plant regeneration. In: Dixon, R. A e Gonzales, R. A. *Plant Cell Culture/.A Practical Approach*. 2aed. EUA, Oxford University Press, p. 138-145, 1994.
- CAMARGO, C. F. S. Desenvolvimento de um leito vibro-fluidizado e estudos dos coeficientes de transferência de calor de corpos submersos. Tese de doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 229p., 2003.
- CARVALHO, N. M. Vigor de Sementes. In: *Atualização em Produção de Sementes*, Fundação Cargill, Piracicaba, p.207-223, 1986.
- CHEN, C. S. e CLAYTON, J. T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. *Transactions of ASAE*, v.14, p. 927-929, 1971.

- CHICARONI, E. P.; PIMENTEL, R. O.; SARTORI, D. J. M. Qualidade e cinética de secagem de sementes de gramíneas em leito de esteira e camada delgada. In: XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis, RJ, p.413-420, 1998.
- CHICARONI, E. P.; Efeito da reumidificação e secagem em leito esteira na qualidade da semente da semente de *Brachiaria brizantha*. Trabalho de graduação. DEQ/UFSCar, São Carlos-SP, 1999, 83p.
- CHU, S. T. e HISTRULID, A. Numerical solution of diffusion equations. Transactions of the ASAE. v.11, p.705-709, 1968.
- CHUNG, D. S. e PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Transactions of ASAE, v.10, p.552-575, 1967.
- CONCEIÇÃO FILHO, R. S.; BARROZO, M. A. S.; LIMAVERDE, J. R.; ATAÍDE, C. H. The use of a spouted bed in the fertilizer coating of soybean seeds. Drying Technology, 16(9&10), p.2049-2064, 1998.
- COSTA, R. S. Influência do diâmetro de partícula sobre o coeficiente de transferência de calor entre o sólido e o fluido em leito deslizante e escoamentos cruzados. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, 127p., 1997.
- DIAS, M. C.; MARQUES, W. M.; BORGES, S. V.; MANCINI, M. C. Avaliação dos efeitos da secagem em leito de jorro bidimensional sobre as propriedades do feijão. In: XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis, RJ, p.371-376, 1998.
- DICKERSON Jr., R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology, p. 198-204, 1965.
- FARMER, G. S.; BRUSEWITZ, G. H.; WHITNEY, R. W. Drying properties of blustem grass seed. Transactions of the ASAE, p.234-237, 1983.

- FELIPE, C. A. S. Influência das variáveis de processo na qualidade de sementes de soja submetidas à secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 100p., 1999.
- FOOD CHEMICALS CODEX. 3a edição, National Academy Press, 2101 Constitution Avenue, N. W. Washington, D. C. 20418, p. 11, 1980.
- FORTES, M. e OKOS, M. R. Drying Theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains. In: Mujumdar, A. Advances in Drying, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p.119-154, 1980.
- FREIRE, J. T. e OLIVEIRA, W. P. Aspectos tecnológicos dos processos de recobrimento de partículas. In: Freire, J. T. e Sartori, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem. São Carlos, v.1, ed. UFSCar, p. 211-251, 1992.
- FREITAS, A O. Secagem de café em múltiplas bandejas vibradas com recirculação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 105p., 1998.
- GARCIA-ALVARADO, M. A.; DE LA CRUZ-MEDINA, J., WALISZEWSKIKUBIAC, K. N.; SALGADO-CERVANTES, M. A. Statistical analysis of the GAB and Henderson equations for sorption isotherms of foods. *Drying Technology*, v.13, p. 2141-2152, 1995.
- GODFREY, T. G.; FULKERSON, W.; KOLLIE, T. G.; MOORE, J. P.; MC ELROY, D. L. Thermal conductivity of uranium dioxide from -57 to 1100°C by a radial heat flow technique. *Journal of the American Ceramic Society*, p.297-305, 1965.
- GUNASEKARAN, S.; COOPER, T. M.; BERLAGE, A. G. Soybean seed coat and cotyledon crack detection by image processing. *Journal agric. Eng Res*, v.41, p. 139-148, 1988.
- HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. *J. Chem. Phys.*, v.16, p.931, 1948.

- HARRIOTT, P. Thermal conductivity of catalyst pellets and other porous particles, Part I: Review of models and published results. *The Chemical Engineering Journal*, v.10, p.65-71, 1975.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Eng.*, v.33, p.29-32, 1952.
- HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A computacional procedure for deep-bed drying analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v 13, p.87-95, 1968.
- HUBINGER, M.; MENEGALLI, F. C.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Water-vapor adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. *Journal of Food Science*, v.57(6), p.1405-1407, 1992.
- IGLESIAS, O.; GARCIA, A.; ROQUES, M.; BUENO, J. L. Drying of water gels: determination of the characteristic curve of agar-agar. *Drying Technology*, v.11(3), p. 571-587, 1993.
- KEEY, R. B. *Drying to Industrial Operations*. Pergamom Press, 1aed., p. 376 – 204, 1972.
- KOSTAROPOULOS A. E. e SARAVACOS G. D. Thermal diffusivity of granular and porous foods at low moisture content. *Journal of Food Engineering*, v.33, p.101-109, 1997.
- LABUZZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, v. 50, p. 385-390, 1985.
- LANARV / MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. *Regras para análise de sementes*. 1aed., Brasília, DF, 188 p., 1980.
- LEES, R. *Análisis de los alimentos: métodos analíticos y de control de calidad*, 2a ed, Editorial Acribia, Zaragoza, Espanha, 1980.
- LEONARD, W.H. e MARTIN, J.H. *Cereal Crops*. New York, The Macmillan Company, 1963. p. 741-769.

- LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. IN: The symposium on drying. The Journal of I&E.Ch., 13(5), p.427-432, 1921.
- LOPEZ, A.; IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; VIRSEDA, P. Modelling of sorption isotherms of dried vegetable wastes from wholesale market. Drying Technology, 18(4-5), p.985-994, 2000.
- LUCCAS, P.; FERREIRA, M. M. P.; SARTORI, D. J. M.; TEIXEIRA, J. T. Determinação de parâmetros térmicos de gramíneas. In: 9th Latin American Congress in Heat and Mass Transfer, San Juan, Puerto Rico, 2002. Actas del 9th LATCYM, Session: Drying Processes #93. San Juan: UPRM, 2002,v.1.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H., BUCKLE, K. A. Models for the specific heat and thermal conductivity of garlic. Drying Technology, 13(1&2), 295-317, 1995.
- MASSARANI, G. e TELLES, A. S. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: Freire, J. T. e Sartori, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem. São Carlos, v.1, ed. UFSCar, p. 1-39, 1992.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill INC., 1028p., 1993,
- MOREIRA, M. F., P. Secagem de gel ágar. Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 104p., 2000.
- MOTTA LIMA, O. C.; MASSARANI, G. Analysis of the drying equations. Proc. XXIII Brazilian Congress of Chemical Engineering, Maringá, Brasil, p.431-440, 1995.
- MOURADI-GIVERNAUD, A.; GIVERNAUD, T.; MORVAN, H.; COSSON, J. Agar from *Gelidium latifolium* (Rhodophyceae, Gelidiales): biochemical composition and seasonal variations. Botanica Marina. v.35. p.153-159, 1992.
- NAGASAKA, K.; SHIMIZU, M.; SUGIYAMA, S. End effect in thermal conductivity measurement by the transient method. Journal of Chemical Engineering of Japan, v.6, n.3, p.264-268, 1973.

- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos, 2ª ed., Campinas, Editora da Universidade Estadual de Campinas, 299p. 1996.
- NOVAIS, A. F. Análise da aplicação do leito deslizante e escoamentos cruzados na secagem de sementes de soja. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, 97p., 1990.
- OSBORN, G.; WHITE, G. M.; SULAIMAN, A. H.; WELTON, L. R. Predicting equilibrium moisture proportions of soybeans. Transactions of the ASAE, v.32, p.2109-2113, 1989.
- OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. Transactions of the ASAE, p.112-113, 1973.
- PAGE, G. E. Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer. Indiana-EUA, Purdue University (Dissertação de mestrado), 1949.
- PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. Dimensão característica e forma de partículas. In: Anais do XIV Encontro Sobre Escoamentos Em Meios Porosos, Campinas, SP, p. 302-312, 1986.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W. E MALONEY, J. O., 6th ed. Chemical Engineering Handbook, McGraw-Hill, 1984.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7th Edition. Editor McGraw-Hill, USA, 1997.
- POLLIO, M. L., TOLABA, M. P., SUAREZ, C., Measuring and modeling grain sorption equilibria of amaranth grains. Cereal Chemistry, 75(3), p.297-300, 1998.
- PRADO, M. M. Secagem de sementes de mamão papaya. Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 104p., 1999.

- PRADO, M. M. e SARTORI, D. J. M. Secagem de sementes de papaya em leito fixo e camada espessa: estudo experimental dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa e encolhimento. In: 9th Latin American Congress in Heat and Mass Transfer, San Juan, Puerto Rico, 2002. Actas del 9th LATCYM, Session: Drying Processes. #92. San Juan: UPRM, 2002, v.1.
- PURSEGLOVE, J. W. Monocotyledons 1, John Wiley & Sons, Inc, New York, v.1, 1972, p. 119-333.
- RÉ, M. I. Microencapsulation by spray drying. *Drying Technology*, 16(6), p.1195-1236, 1998.
- REPUNTE, V. P.; TAYA, M; TONE, S. Preparation of artificial seeds using cell aggregates from horseradish hairy roots encapsulated in alginate gel with paraffin coat, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, v.79(1), p. 83-86, 1995.
- REPUNTE, V. P.; TAYA, M; TONE, S. Conservation of root regeneration potential of cell aggregates from horseradish hairy roots used as artificial seeds. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.29, n.5, p.874-880, 1996.
- ROCHA, S. C. S. Recobrimento de comprimidos. In: Freire, J.T. e Sartori, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem. São Carlos, v.1, ed. UFSCar, p. 295-330, 1992.
- ROQUES, A. M.; ZAGROUBA, F.; DO AMARAL SOBRAL, P. Modelisation principles for drying of gels. *Drying Technology*, 12(6), p.1245-1262, 1994.
- ROUILLER, C. O. Análise, via modelagem pseudo-homogênea da transferência de calor em leito fixo e escoamento monofásico, Tese de doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 215p., 2000.
- ROVEDO, C. O.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Measuring and modelling the water vapour desorption in sunflower seed. *International Journal of Food Science and Technology*, 28, p. 153-158, 1993.

- SAIBRO, J. C., et alii. Avaliação do comportamento produtivo de sorgo, milho, e milheto forrageiros no Rio Grande do Sul, Anais do I Simpósio Internacional de Sorgo, Brasília, 1972.
- SAKIYAMA, T., AKUTSU, M., MIYAWAKI, O; E YANO, T., Effective thermal diffusivity of food gels impregnated with air bubbles. *Journal of Food Engineering*, v.39, p.323-328, 1999.
- SARTORI, D. J. M. Transferência de calor em leito deslizante. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 219p., 1986.
- SFREDO, M. A., LIMAVERDE, J. R.; FINZER, J. R. D. Study of the drying process of arabica coffee berries using trays vibrated drier. In: 9th Latin American Congress in Heat and Mass Transfer, #96. San Juan, Puerto Rico, 2002.
- SHARMA, C. S.; HARRIOTT, P.; HUGHES, R. Thermal conductivity of catalyst pellets and other porous particles, Part II: Experimental measurements. *The Chemical Engineering Journal*, 10, p.73-80, 1975.
- SHARMA, D. K. e THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. *Transactions of the ASAE*, p. 114-116, 1973.
- SHRIVASTAVA, M.; DATTA, A. K. Determination of specific heat and thermal conductivity of mushrooms (*Pleurotus florida*). *Journal of Food Engineering*, 39, p.255-260, 1999.
- SILVA, O. C. Estudo preliminar da secagem do polietileno tereftalato para fins de reciclagem. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 74p., 1997.
- SINGH, R. P., HELDMAN, R. D. *Introduction to Food Engineering*. Academic Press Inc. USA, 1993.
- SOUSA, L. H. C. D.; FONSECA, E. V.; RUIZ, G. C. F.; MENDES, E. S.; MOTTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C. Análise do efeito da velocidade e da temperatura do ar na secagem condutiva e convectiva de tecido de algodão. In: 30°ENEMP, 2002, São Carlos, SP. Anais do 30°ENEMP, São Carlos, SP: UPRM, 2002, v.1.

- SRZEDNICKI, G. S.; JOENG, Y. H.; DRISCOLL, R. H. Studies on drying of australian sweet cherries. Proc. Of the 10th International Drying Symposium (IDS'96), Kraków, Poland, v.B, p.831-838, 1996.
- STRUMILLO, C. e KUDRA, T., Drying: Principles, Applications and Desing, Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- TECHASENA, O.; LEBERT, A. M.; BIMBENET, J. J. Simulation of plum drying in deep bed. Dying Technology, 9(4), p.947-971, 1991.
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying- a new model. Transactions of the ASAE. v.11, p.582-586, 1968.
- TYE, R. P. Thermal conductivity. Academic Press, London and New York, v.1, p.376-391, 1969.
- WILSON, H. K. Grain Crops, 2th ed., New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1955. p. 271-274.
- YOO, B.; LEE, C. M. Thermoprotective effect of sorbitol on proteins during dehydration. Journal Agric. Food Chem. 41, p.190-192, 1993.
- ZOTIN, F. M. Z. O efeito de parede em colunas de recheio. Dissertação de mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 85p., 1985.
- 2000, <http://agrocosta.com.br>
- 2000, <http://www.matsuda.com.br>
- 2000, <http://www.naterra.com.br>

ANEXO A

DADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO
PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE
TÉRMICA EFETIVA (k_{ef})

Tabela A1 – Dados de temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento.

Meio: sementes de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento

Umidade: 11% (bu)

$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $2578,4 \times 10^{-3} \text{ Kg}$

Volume da célula = $2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,32

T(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	19,1	570	27,7	1140	30,3	1710	31,6	2280	32,6
30	20,2	600	28,0	1170	30,3	1740	31,6	2310	32,6
60	21,3	630	28,1	1200	30,5	1770	31,6	2340	32,7
90	22,1	660	28,3	1230	30,5	1800	31,7	2370	32,7
120	22,7	690	28,5	1260	30,5	1830	31,8	2400	32,7
150	23,3	720	28,6	1290	30,7	1860	31,9	2430	32,8
180	23,9	750	28,8	1320	30,7	1890	32,0	2460	32,8
210	24,3	780	28,8	1350	30,8	1920	32,0	2490	32,9
240	24,9	810	29,0	1380	30,9	1950	32,1	2520	32,8
270	25,1	840	29,1	1410	31,0	1980	32,1	2550	32,9
300	25,6	870	29,3	1440	31,0	2010	32,1	2580	32,9
330	25,8	900	29,4	1470	31,1	2040	32,2	2610	33,0
360	26,2	930	29,4	1500	31,1	2070	32,2	2640	33,0
390	26,5	960	29,6	1530	31,2	2100	32,2	2670	33,1
420	26,6	990	29,8	1560	31,3	2130	32,2	2700	33,1
450	26,9	1020	29,9	1590	31,3	2160	32,4	2730	33,1
480	27,1	1050	30,0	1620	31,4	2190	32,4	2760	33,2
510	27,4	1080	30,1	1650	31,5	2220	32,5	2790	33,3
540	27,6	1110	30,2	1680	31,5	2250	32,5	2820	33,3

Coefficiente de Correlação (R^2) = 0,9989

Coefficiente Angular = 7,76

$k_{ef} = 4,99 \times 10^{-2} \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Tabela A2 – Dados de temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento. Réplica.

Meio: sementes de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento

Umidade: 10% (bu)

$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $2578,4 \times 10^{-3} \text{ Kg}$

Volume da célula = $2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,32

t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	18,2	570	26,9	1140	29,3	1710	30,7	2280	31,7
30	19,3	600	27,1	1170	29,5	1740	30,8	2310	31,8
60	20,3	630	27,3	1200	29,5	1770	30,9	2340	31,8
90	21,0	660	27,5	1230	29,6	1800	31,0	2370	32,0
120	21,8	690	27,7	1260	29,7	1830	31,0	2400	32,0
150	22,4	720	27,8	1290	29,8	1860	31,0	2430	32,1
180	22,9	750	28,1	1320	29,9	1890	31,1	2460	32,1
210	23,3	780	28,2	1350	29,9	1920	31,1	2490	32,1
240	23,8	810	28,2	1380	30,0	1950	31,2	2520	32,1
270	24,2	840	28,4	1410	30,1	1980	31,3	2550	32,1
300	24,6	870	28,5	1440	30,2	2010	31,3	2580	32,2
330	24,9	900	28,7	1470	30,3	2040	31,4	2610	32,2
360	25,2	930	28,8	1500	30,3	2070	31,4	2640	32,2
390	25,5	960	28,8	1530	30,4	2100	31,5	2670	32,2
420	25,8	990	29,0	1560	30,5	2130	31,6	2700	32,3
450	26,0	1020	29,1	1590	30,5	2160	31,6	2730	32,3
480	26,3	1050	29,2	1620	30,5	2190	31,6	2760	32,4
510	26,6	1080	29,2	1650	30,6	2220	31,6	2790	32,4
540	26,8	1110	29,3	1680	30,7	2250	31,6	2820	32,4

Coefficiente de Correlação (R^2) = 0,9994

Coefficiente Angular = 8,11

$k_{ef} = 4,78 \times 10^{-2} \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Tabela A3 – Dados de temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar.

Meio: sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar

Umidade: 98% (bu)

$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $2157,8 \times 10^{-3} \text{ Kg}$

Volume da célula = $2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,25

T(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	22,3	570	24,9	1140	25,5	1710	25,8	2280	26,1
30	22,8	600	24,9	1170	25,5	1740	25,9	2310	26,1
60	23,2	630	25,0	1200	25,6	1770	25,9	2340	26,1
90	23,5	660	25,1	1230	25,6	1800	25,9	2370	26,1
120	23,7	690	25,1	1260	25,6	1830	25,9	2400	26,1
150	23,9	720	25,1	1290	25,6	1860	26,0	2430	26,1
180	24,1	750	25,2	1320	25,6	1890	26,0	2460	26,1
210	24,2	780	25,2	1350	25,6	1920	26,0	2490	26,1
240	24,3	810	25,3	1380	25,6	1950	26,0	2520	26,2
270	24,3	840	25,3	1410	25,7	1980	26,0	2550	26,2
300	24,5	870	25,4	1440	25,7	2010	26,0	2580	26,1
330	24,4	900	25,3	1470	25,7	2040	26,0	2610	26,2
360	24,6	930	25,4	1500	25,8	2070	26,0	2640	26,1
390	24,7	960	25,4	1530	25,7	2100	26,0	2670	26,1
420	24,7	990	25,4	1560	25,8	2130	26,0	2700	26,3
450	24,8	1020	25,4	1590	25,8	2160	26,0	2730	26,2
480	24,9	1050	25,4	1620	25,8	2190	26,1	2760	26,2
510	24,9	1080	25,5	1650	25,8	2220	26,1	2790	26,2
540	24,9	1110	25,5	1680	25,8	2250	26,1	2820	26,2

Coefficiente de Correlação (R^2) = 0,9823

Coefficiente Angular = 1,83

$k_{ef} = 2,1 \times 10^{-1} \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Tabela A4 – Dados de temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar. Réplica.

Meio: sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar

Umidade: 97 % (bu)

$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $2157,8 \times 10^{-3} \text{ Kg}$

Volume da célula = $2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,25

t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	22,3	570	25,0	1140	25,7	1710	26,0	2280	26,2
30	22,9	600	25,0	1170	25,7	1740	26,0	2310	26,2
60	23,2	630	25,1	1200	25,8	1770	26,0	2340	26,3
90	23,5	660	25,1	1230	25,8	1800	26,0	2370	26,3
120	23,7	690	25,2	1260	25,8	1830	26,1	2400	26,2
150	23,9	720	25,3	1290	25,8	1860	26,0	2430	26,3
180	23,9	750	25,4	1320	25,8	1890	26,0	2460	26,3
210	24,2	780	25,4	1350	25,9	1920	26,1	2490	26,3
240	24,3	810	25,4	1380	25,9	1950	26,1	2520	26,3
270	24,4	840	25,4	1410	25,8	1980	26,1	2550	26,3
300	24,4	870	25,4	1440	25,9	2010	26,2	2580	26,4
330	24,4	900	25,4	1470	25,9	2040	26,2	2610	26,4
360	24,7	930	25,4	1500	25,9	2070	26,2	2640	26,3
390	24,7	960	25,5	1530	26,0	2100	26,2	2670	26,4
420	24,8	990	25,5	1560	25,9	2130	26,2	2700	26,4
450	24,8	1020	25,5	1590	26,0	2160	26,2	2730	26,5
480	24,8	1050	25,5	1620	26,0	2190	26,2	2760	26,4
510	24,9	1080	25,5	1650	26,0	2220	26,2	2790	26,4
540	24,9	1110	25,6	1680	26,0	2250	26,2	2820	26,4

Coefficiente de Correlação (R^2) = 0,9912

Coefficiente Angular = 1,97

$k_{ef} = 2,0 \times 10^{-1} \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

Tabela A5 – Dados de temperatura em função do tempo para determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel agar. Réplica.

Meio: sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento a base de gel ágar

Umidade: 98% (bu)

$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = 2,1578 Kg

Volume da célula = $2,74 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,25

t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)	t(s)	T (°C)
0	22,3	570	25,1	1140	25,7	1710	26,0	2280	26,2
30	22,8	600	25,0	1170	25,7	1740	26,0	2310	26,2
60	23,2	630	25,1	1200	25,6	1770	26,0	2340	26,2
90	23,7	660	25,2	1230	25,7	1800	26,0	2370	26,3
120	23,7	690	25,2	1260	25,7	1830	26,0	2400	26,3
150	24,0	720	25,3	1290	25,8	1860	26,0	2430	26,2
180	24,2	750	25,3	1320	25,8	1890	26,0	2460	26,2
210	24,2	780	25,4	1350	25,7	1920	26,1	2490	26,3
240	24,3	810	25,4	1380	25,7	1950	26,1	2520	26,2
270	24,4	840	25,4	1410	25,8	1980	26,1	2550	26,3
300	24,5	870	25,4	1440	25,9	2010	26,1	2580	26,4
330	24,6	900	25,5	1470	25,9	2040	26,1	2610	26,4
360	24,7	930	25,5	1500	25,9	2070	26,2	2640	26,3
390	24,8	960	25,5	1530	25,9	2100	26,1	2670	26,3
420	24,8	990	25,5	1560	25,9	2130	26,1	2700	26,3
450	24,9	1020	25,5	1590	26,0	2160	26,2	2730	26,4
480	24,8	1050	25,5	1620	26,0	2190	26,2	2760	26,4
510	25,0	1080	25,5	1650	26,0	2220	26,2	2790	26,4
540	25,0	1110	25,6	1680	26,0	2250	26,3	2820	26,4

Coefficiente de Correlação (R^2) = 0,9940

Coefficiente Angular = 1,88

$k_{ef} = 2,1 \times 10^{-1} \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

ANEXO B

DADOS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO
TEMPO PARA DETERMINAÇÃO DA
DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA (α_{ef})

Tabela B.1 – Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento.

Meio: Sementes de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento

Umidade: 9% (bu)

$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $747,6 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Volume da célula = $9,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,40

Tempo (min)	Temperatura Centro (°C)	Temperatura Parede (°C)
0	15,8	15,8
5	15,8	17,9
10	16,0	20,3
15	16,0	22,6
20	16,1	24,9
25	16,2	27,2
30	16,5	29,3
35	16,8	31,5
40	17,3	33,8
45	17,8	36,1
50	18,5	38,0
55	19,4	40,2
60	20,3	41,9
65	21,1	43,8
70	22,2	45,5
75	23,3	47,4
80	24,6	49,1
85	25,9	50,9
90	27,3	52,5
95	28,6	54,2
100	30,1	55,5
105	31,6	57,0
110	33,1	58,4
115	34,6	59,8
120	36,1	61,0
125	37,8	62,2
130	39,3	63,3
135	40,9	64,4

Tabela B.2 – Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento. Réplica.

Meio: Sementes de *Pennisetum glaucum* sem recobrimento

Umidade: 9% (bu)

$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $747,6 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Volume da célula = $9,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,40

Tempo (min)	Temperatura Centro (°C)	Temperatura Parede (°C)
0	15,8	16,1
5	15,8	18,9
10	15,8	21,5
15	15,9	23,9
20	16,0	25,3
25	16,1	28,7
30	16,5	31,1
35	16,8	33,4
40	17,3	35,7
45	18,0	37,7
50	18,8	39,9
55	19,7	42,1
60	20,6	44,1
65	21,7	46,0
70	22,9	47,9
75	24,2	49,9
80	25,5	51,6
85	26,8	53,3
90	28,3	54,9
95	29,8	56,5
100	31,3	58,0
105	33,0	59,4
110	34,6	60,8
115	36,1	62,0
120	37,8	63,2
125	39,3	64,3
130	41,0	65,4
135	42,4	66,3

Tabela B.3 – Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de *Pennisetum glaucum* com recobrimento.

Meio: Sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento

Umidade: 98 % (bu)

$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $785,2 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Volume da célula = $9,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,18

Tempo (min)	Temperatura Centro (°C)	Temperatura Parede (°C)
0	9,4	9,3
5	9,5	12,4
10	9,6	15,6
15	9,6	19,0
20	9,8	22,3
25	10,2	25,5
30	10,9	28,7
35	11,7	31,7
40	12,9	34,7
45	14,3	37,6
50	16,0	40,6
55	17,8	43,3
60	19,9	46,0
65	22,0	48,8
70	24,2	51,4
75	26,6	53,7
80	29,2	56,1
85	31,7	58,4
90	34,5	60,6
95	37,2	62,4
100	39,7	64,5
105	42,5	65,1
110	45,1	67,0
115	47,6	68,7
120	49,9	70,1
125	52,4	71,5
130	54,7	73,0
135	57,1	73,8

Tabela B.4 – Dados de temperatura no centro e na parede da célula em função do tempo para determinação da difusividade térmica efetiva (α_{ef}) de *Pennisetum glaucum* com recobrimento. Réplica.

Meio: Sementes de *Pennisetum glaucum* com recobrimento

Umidade: 98% (bu)

$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$

Massa amostra = $785,2 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Volume da célula = $9,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

ε (porosidade) = 0,18

Tempo (min)	Temperatura Centro (°C)	Temperatura Parede (°C)
0	11,7	11,8
5	11,7	14,9
10	11,6	18,3
15	11,6	21,7
20	11,9	24,8
25	12,3	28,0
30	12,9	31,1
35	13,9	33,9
40	15,2	36,8
45	16,8	40,4
50	18,6	43,1
55	20,4	46,0
60	22,5	48,6
65	24,7	51,1
70	27,1	53,6
75	29,6	56,0
80	32,7	58,0
85	34,8	60,4
90	37,4	62,4
95	39,9	64,0
100	42,4	66,0
105	45,0	67,5
110	47,6	68,9
115	50,1	70,4
120	52,6	71,6
125	55,0	72,9
130	57,3	73,8
135	59,4	74,8

ANEXO C

DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

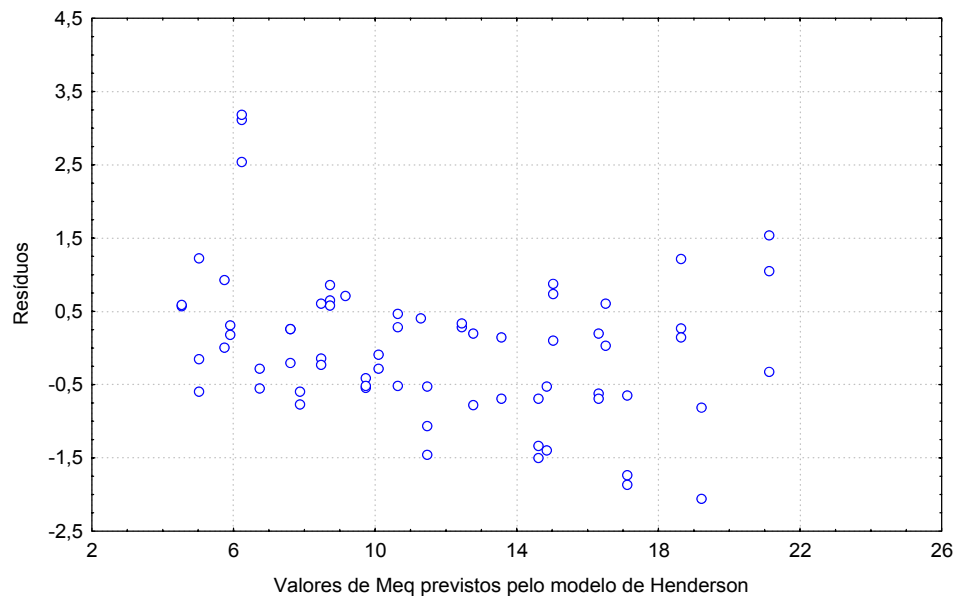


Figura C1 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de Henderson para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

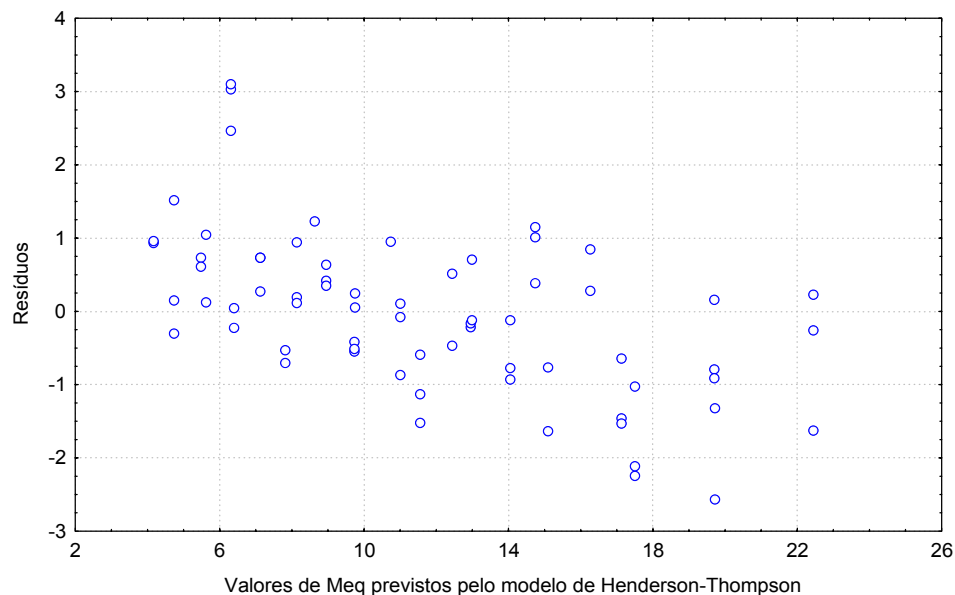


Figura C2 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de Henderson-Thompson para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

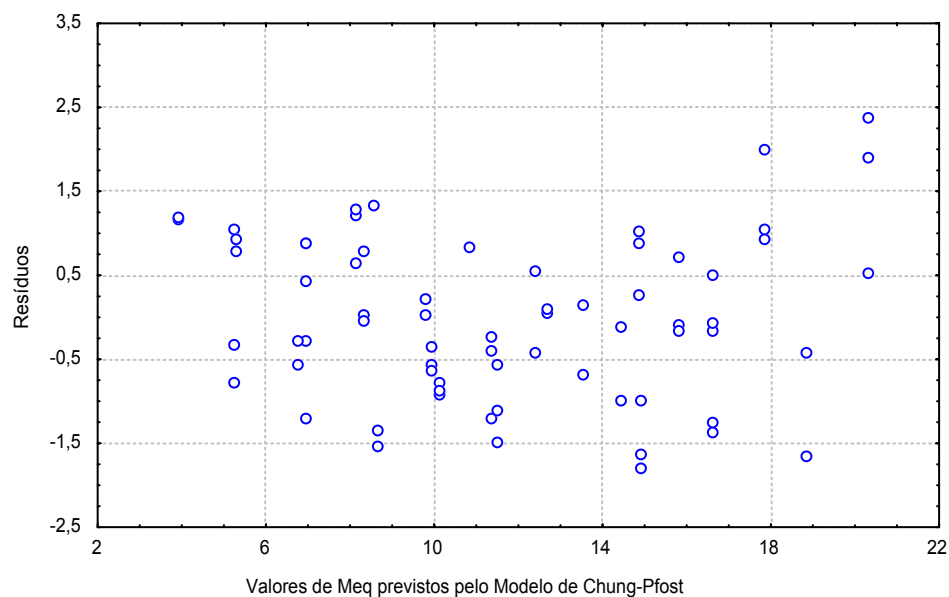


Figura C3 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de Chung-Pfost para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

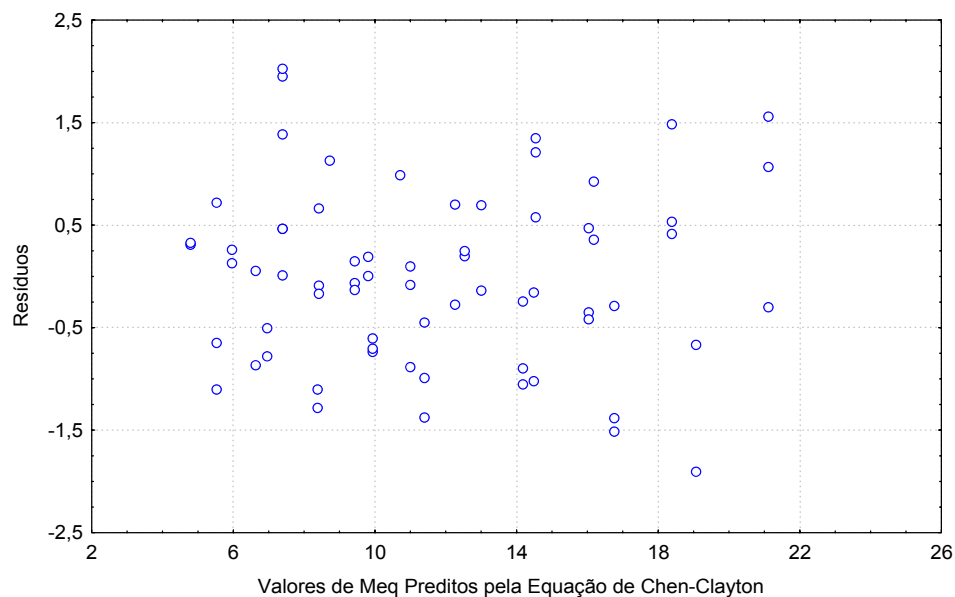


Figura C4 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de Chen-Clayton para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

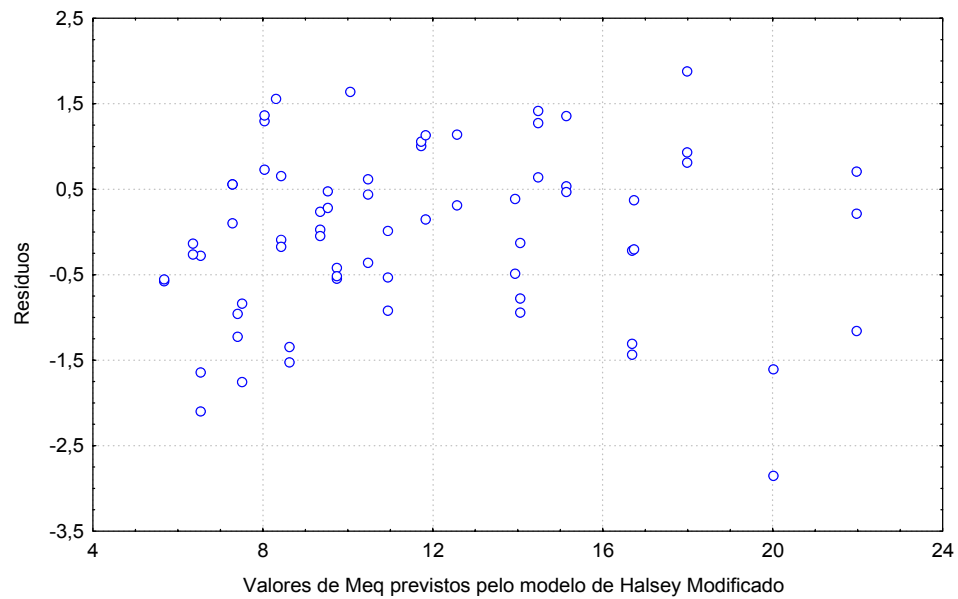


Figura C5 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de Halsey modificada para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

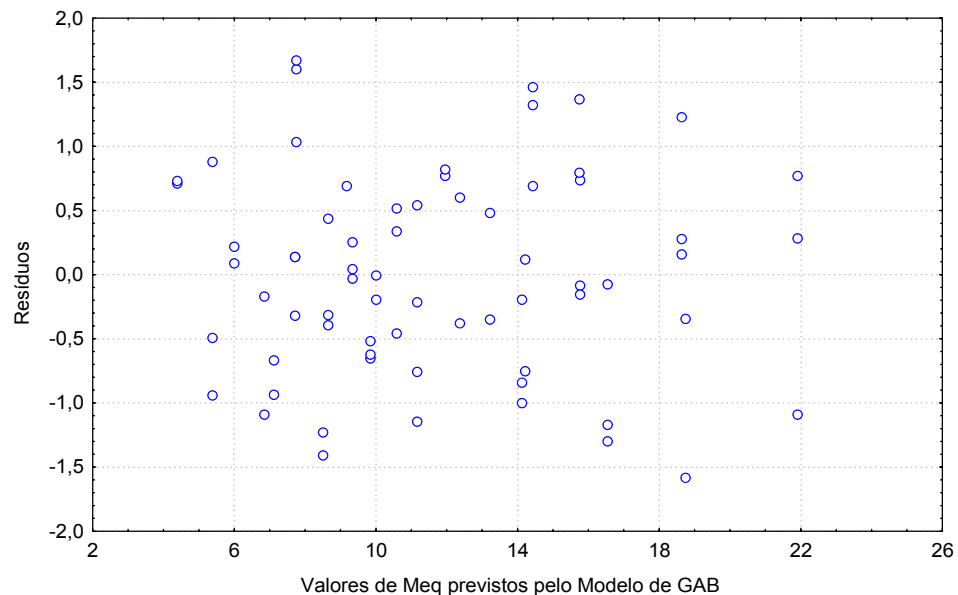


Figura C6 – Distribuição de resíduos em função dos valores de Meq previstos pela equação de GAB para sementes com recobrimento a base de gel ágar.

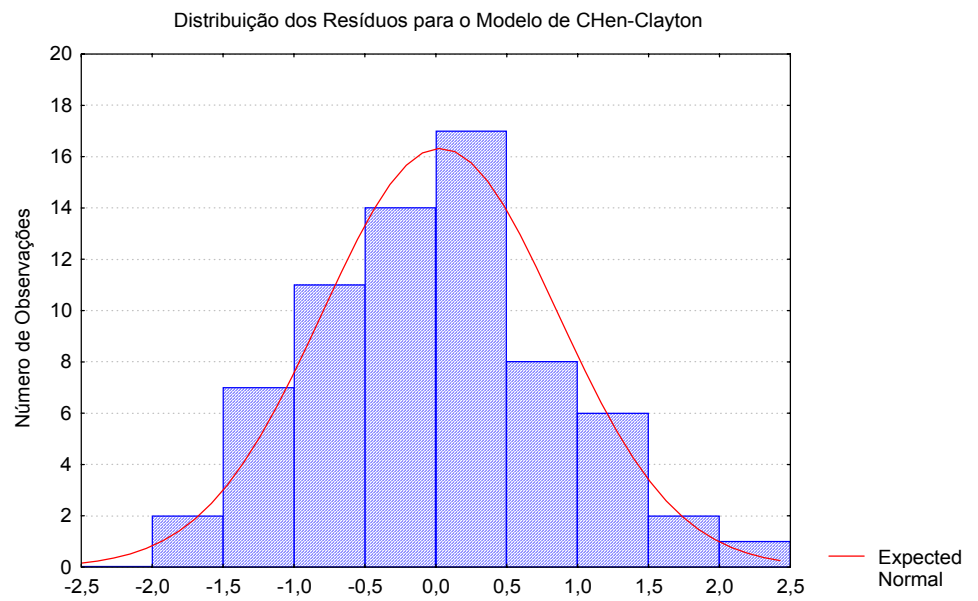


Figura C7 – Distribuição dos Resíduos da Equação de Chen-Clayton.

ANEXO D

DADOS EXPERIMENTAIS DE CINÉTICA DE SECAGEM OBTIDOS EM CAMADA FINA

Tabela D.1 - Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=2,5$ m/s.

Condição operacional: $T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=2,5$ m/s UR= 25,6%; $M_{eq}= 0,077$					
t (minutos)	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	10,528	1,000	0	9,972	1,000
5	7,190	0,681	5	7,268	0,727
10	4,578	0,431	10	5,018	0,499
15	2,761	0,257	15	3,101	0,306
20	1,514	0,138	20	1,774	0,172
25	0,824	0,071	25	0,958	0,089
30	0,500	0,040	30	0,548	0,048
35	0,373	0,028	35	0,393	0,032
40	0,338	0,025	40	0,339	0,027
45	0,345	0,026	45	0,316	0,024
50	0,338	0,025	50	0,298	0,022
			55	0,298	0,022
			60	0,244	0,017

Tabela D.2 - Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=30,0^{\circ}\text{C}$; $v=2,5$ m/s.

Condição operacional: $T=30,0^{\circ}\text{C}$; $v=2,5$ m/s UR= 42,9%; $M_{eq}= 0,114$					
t (minutos)	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	11,553	1,000	0	10,929	1,000
5	8,758	0,756	5	7,936	0,723
10,2	7,615	0,656	10	7,182	0,654
15	6,386	0,548	15	4,453	0,401
20	5,106	0,436	20	3,585	0,321
25	3,932	0,334	25,4	2,773	0,246
30	2,981	0,251	30	1,935	0,168
35	2,211	0,183	35	1,543	0,132
40	1,615	0,131	40	1,178	0,098
45	1,149	0,091	45,6	0,616	0,046
50	0,839	0,063	50	0,544	0,040
55	0,547	0,038	55	0,313	0,018
60	0,391	0,024	60	0,199	0,008
65	0,267	0,013	65	0,165	0,005
70	0,211	0,009	70	0,136	0,002
75	0,174	0,005			
80	0,149	0,003			

Tabela D.3 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=0,5\text{m/s}$.

Condições operacionais					
T=40,0°C; v=0,5m/s UR=28%; Meq=0,079%			T=40,0°C; v=0,5m/s UR=30%; Meq=0,082%		
T	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	8,015	1,000	0	8,370	1,000
5	7,270	0,906	5	7,310	0,872
10	6,602	0,822	10	6,725	0,801
15	5,905	0,734	15	6,201	0,738
20	5,252	0,652	20	5,472	0,650
25	4,652	0,576	25	4,780	0,567
30	4,110	0,508	30	4,130	0,488
35	3,617	0,446	35	3,638	0,429
40	3,205	0,394	40	3,276	0,386
45	2,7164	0,332	45	2,778	0,325
50	2,412	0,294	50	2,291	0,267
55	2,097	0,254	55	1,981	0,229
60	1,802	0,217	60	1,716	0,197
65	1,512	0,180	65	1,573	0,180
70	1,299	0,154	70	1,343	0,152
75	1,076	0,126	75	1,074	0,120
80	0,892	0,102	80	0,901	0,099
85	0,728	0,082	85	0,755	0,081
90	0,597	0,065	90	0,565	0,058
95	0,466	0,049	95	0,423	0,041
100	0,374	0,037	100	0,386	0,037
105	0,258	0,023			
110	0,171	0,012			
115	0,089	0,001			

Tabela D.4 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=30^{\circ}\text{C}$; $v=0,5\text{m/s}$.

Condições operacionais					
T=30°C; v=0,5m/s UR=43,1%; Meq=0,11%			T=30°C; v=0,5m/s UR=40,2%; Meq=0,11%		
t	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	11,431	1,000	0	10,62	1,000
5	10,404	0,909	5	9,84	0,924
10	9,801	0,856	10	8,554	0,803
15	8,755	0,764	15	8,33	0,782
20	7,219	0,628	20	7,81	0,733
25	7,027	0,611	25	7,32	0,686
30	6,205	0,538	30	6,53	0,611
35	6,027	0,523	35	6,26	0,585
40	5,305	0,459	40	5,79	0,540
45	4,848	0,418	45	5,385	0,502
50	4,477	0,386	50	4,980	0,463
55	3,874	0,332	55	4,176	0,387
60	3,510	0,300	60	3,804	0,351
65	3,172	0,270	65	3,405	0,314
70	2,874	0,244	75	2,818	0,258
75,5	2,570	0,217	80	2,169	0,196
80	2,325	0,195	85	2,041	0,184
85	2,080	0,174	95	1,669	0,148
90	1,828	0,151	100	1,041	0,089
95	1,616	0,133	105	0,966	0,081
100	1,417	0,115	110	0,703	0,056
105	1,252	0,101	115	0,432	0,031
110	1,060	0,084	120	0,155	0,004
115	0,927	0,072	125	0,155	0,004
120	0,782	0,059	125	0,155	0,004
125	0,636	0,046			
130	0,510	0,035			
135	0,397	0,025			
140	0,278	0,015			
145	0,179	0,006			

Tabela D.5 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T= 50,0^{\circ}\text{C}$; $v= 2,5$ m/s.

Condição operacional: $T= 50,0^{\circ}\text{C}$; $v= 2,5$ m/s $UR= 14,7\%$; $M_{eq}=0,054(\text{bs})$					
t (min)	M (b.s)	MR	t (min)	M (b.s)	MR
0	9,391	1,000	0	9,629	1,000
5	5,855	0,621	5	5,790	0,599
10	3,263	0,344	10	2,916	0,299
15	1,603	0,166	15	1,174	0,117
20	0,710	0,070	20	0,102	0,005
25	0,380	0,035	25	0,102	0,005
30	0,291	0,025			
35	0,251	0,021			
40	0,240	0,020			
45	0,212	0,017			

Tabela D.6 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=50,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$.

Condições operacionais					
$T=50,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$ $UR=16,7\%$; $M_{eq}=0,057\%$			$T=50,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$ $UR=16,4\%$; $M_{eq}=0,056\%$		
T	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	10,178	1,000	0	9,805	1,000
5	7,721	0,757	5	6,826	0,694
10	5,587	0,547	10	4,781	0,485
15	3,607	0,351	15,8	2,872	0,289
20	2,302	0,222	20	1,938	0,193
25	1,309	0,124	25	1,186	0,116
30	0,810	0,074	30,2	0,745	0,071
35	0,509	0,045	35	0,534	0,049
40	0,402	0,034	40	0,393	0,035
45	0,345	0,029	45	0,316	0,027
50	0,311	0,025	50	0,257	0,021
55	0,265	0,021	55	0,234	0,018
60	0,271	0,021	60	0,222	0,017

Tabela D.7 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=30,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$.

Condições operacionais: $T=30,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$ $\text{UR}=26,5\%$; $\text{Meq}=0,092\%$					
t(minutos)	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	9,960	1,000	0	10,927	1,000
5	7,693	0,770	5	8,166	0,745
10	6,114	0,610	10	6,523	0,594
15	4,761	0,473	15	5,166	0,468
20	3,602	0,356	20	4,183	0,378
25	2,511	0,245	25	2,987	0,267
30	1,727	0,166	30	2,356	0,209
35	1,324	0,125	35	1,600	0,139
40	1,068	0,099	40	1,451	0,126
45	1,034	0,096	45	1,035	0,087
50	0,818	0,074	50	1,023	0,086
55	0,688	0,0604	55	0,892	0,074
60	0,665	0,058	60	0,725	0,059
65	0,426	0,034	65	0,570	0,044
70	0,421	0,033	70	0,517	0,039

Tabela D.8 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$.

Condições operacionais					
$T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$ $\text{UR}=27,9\%$; $\text{Meq}=0,079\%$			$T=40,0^{\circ}\text{C}$; $v=1,5\text{m/s}$ $\text{UR}=28,0\%$; $\text{Meq}=0,076\%$		
t	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	9,018	1,000	0	10,524	1,000
5	6,390	0,706	5	7,501	0,711
10	4,933	0,543	10	5,867	0,554
15	3,445	0,377	15	4,080	0,383
20	1,829	0,196	20	2,224	0,206
25	1,037	0,107	25	1,242	0,111
30	0,596	0,058	30	0,761	0,066
35	0,549	0,053	35	0,665	0,056
40	0,490	0,046	45	0,571	0,047
45	0,460	0,043	50	0,536	0,044
50	0,446	0,041	55	0,520	0,043
55	0,430	0,039	60	0,503	0,041
60	0,360	0,031	65	0,428	0,034
			70	0,405	0,032
			75	0,328	0,024

Tabela D.9 – Dados de cinética de secagem de sementes recobertas em leito fixo e camada fina, $T=50,0^{\circ}\text{C}$; $v=0,5\text{m/s}$.

Condições operacionais: $T=50,0^{\circ}\text{C}$; $v=0,5\text{m/s}$ $UR=11,2\%$; $Meq=0,048\%$					
t(minutos)	M (b.s)	MR	t(minutos)	M (b.s)	MR
0	11,965	1,000	0	11,341	1,000
5	9,139	0,763	5	8,456	0,745
10	7,526	0,628	10	7,093	0,624
15	6,439	0,536	15	6,249	0,549
20	5,410	0,445	20	5,543	0,487
25	4,358	0,362	25	4,556	0,399
30	3,468	0,287	30	3,916	0,342
35	2,682	0,221	35	3,156	0,276
40	2,121	0,174	40	2,796	0,243
45	1,595	0,123	45	2,211	0,192
50	1,185	0,095	50	1,814	0,156
55	0,908	0,072	55	1,455	0,125
60	0,699	0,055	60	1,284	0,109
65	0,543	0,042	65	0,948	0,078
70	0,428	0,032	70	0,848	0,071
75	0,341	0,025	75	0,572	0,046
80	0,301	0,021	80	0,501	0,040
85	0,283	0,020	85	0,434	0,034
			90	0,302	0,023
			95	0,278	0,021
			100	0,280	0,021

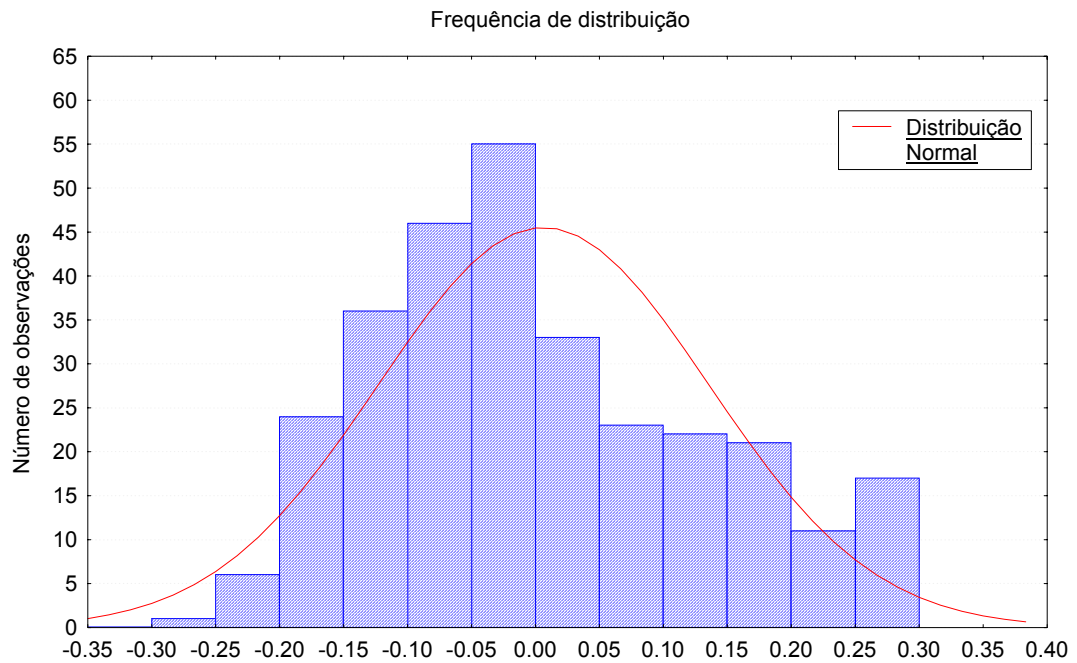


Figura D1 – Distribuição normal para a equação de Page.

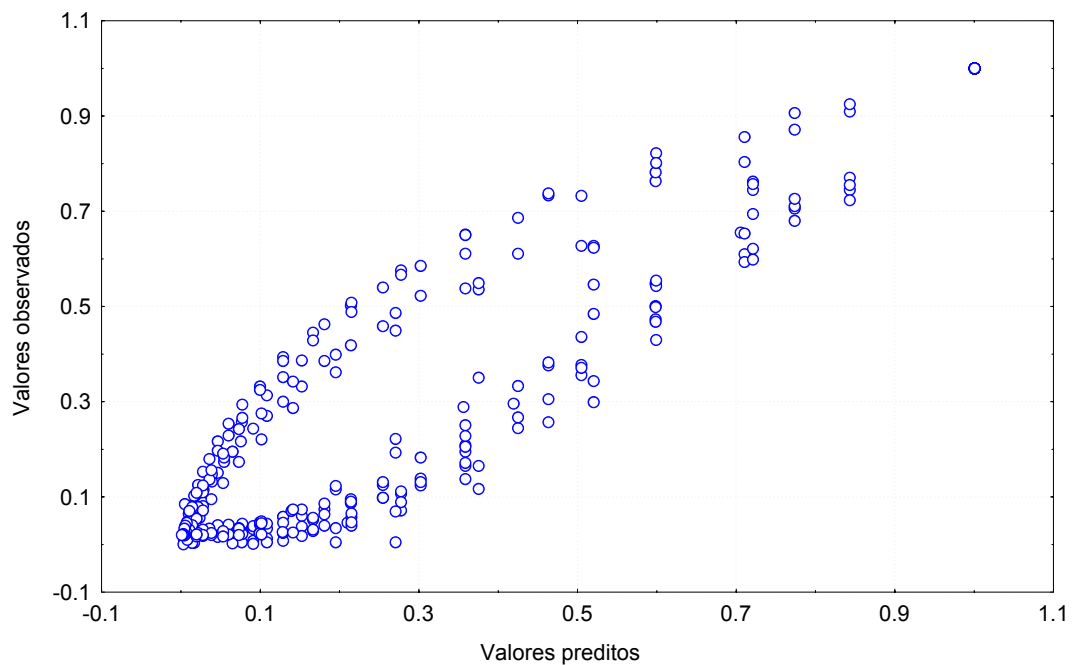


Figura D2 – Valores observados em função dos valores preditos para a equação de Page.

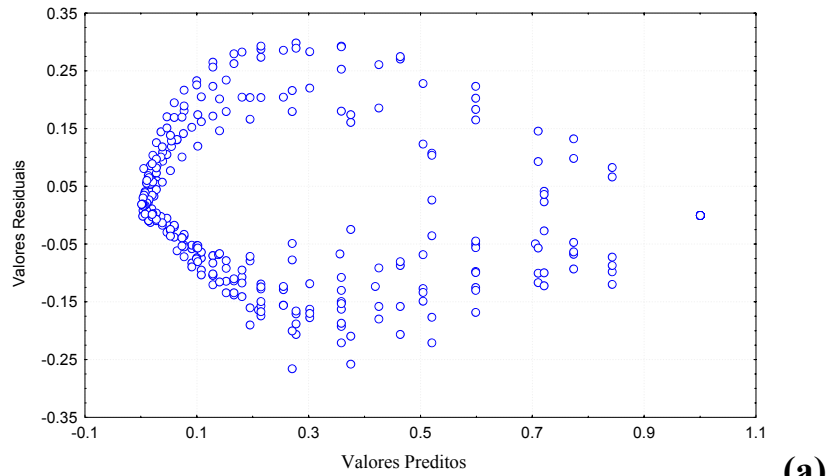
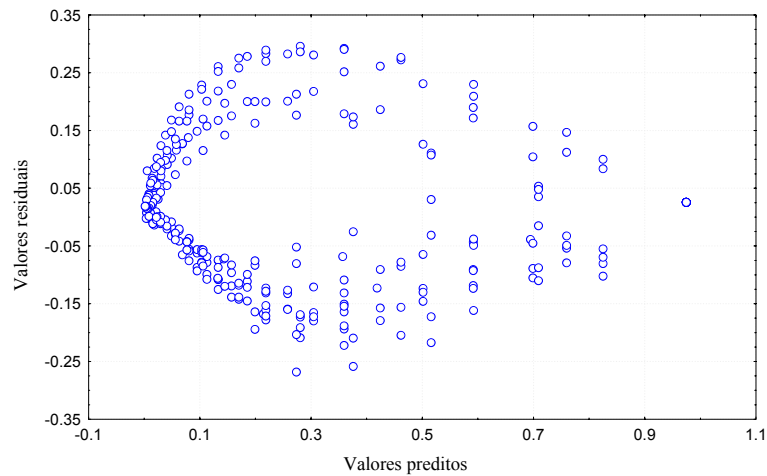
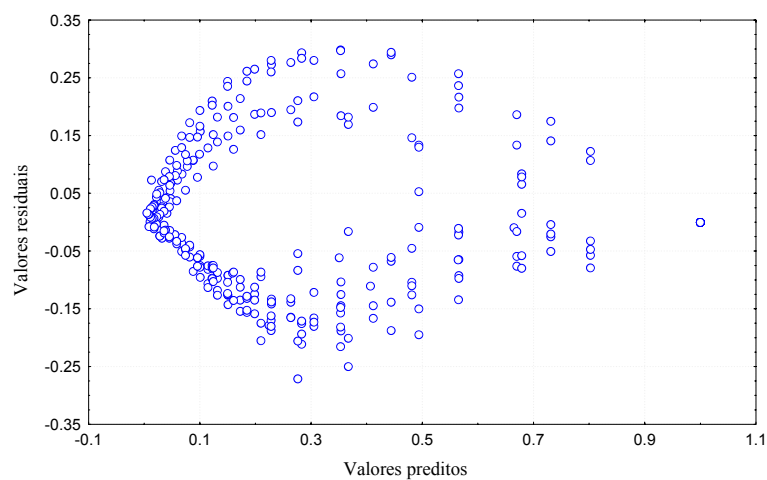
**(a)****(b)****(c)**

Figura D3 – Valores observados em função dos valores preditos para a (a) equação de LEWIS (Eq. 2.15); (b) equação de HENDERSON (Eq. 2.16); (c) equação de Overhults (Eq. 2.19).

ANEXO E

DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM OBTIDOS EM
CAMADAS COM DIFERENTES ESPESSURAS DE
PARTÍCULAS

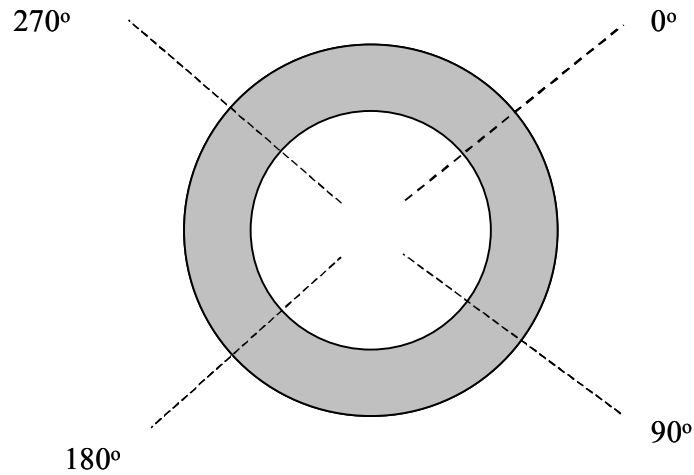


Figura E1 – Esquema da localização das posições angulares.

Tabela E1 – Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leito espesso, parametrizado em z (altura do leito), $h=7,5 \times 10^{-2} \text{m}$, $T=49^\circ\text{C}$.

Tempo (minuto)	Posição (cm) – Altura no leito					
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5
0,0	49,0	25,1	25,6	25,7	25,7	25,3
6,0	48,5	40,5	39,0	36,2	37,9	40,0
10,0	48,5	41,4	40,4	37,4	39,1	41,0
15,0	48,6	42,2	41,4	38,7	40,3	41,7
20,0	48,5	42,9	41,9	39,6	40,8	42,5
25,0	48,7	43,1	42,4	40,1	41,3	42,7
30,0	48,7	43,1	42,4	40,4	41,5	42,7
35,0	48,5	43,1	42,6	40,6	41,5	43,0
40,0	48,7	43,4	42,9	40,6	41,8	43,0
45,0	48,7	43,4	42,9	40,9	41,8	43,3
50,0	49,0	43,6	43,1	40,9	41,5	43,3
65,0	48,6	43,4	42,6	40,6	41,8	43,0

Tabela E2 – Temperatura do fluido em função do tempo de secagem, leite espesso, parametrizado em z (altura do leito), $h=7,5 \times 10^{-2}$ m.

Tempo (minuto)	Posição (cm) – Altura no leito					
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5
0,0	27,2	26,9	26,6	27,1	26,3	26,3
5,0	41,1	41,3	40,2	38,0	44,3	39,0
10,0	42,6	42,5	41,7	40,0	45,0	40,3
15,0	43,3	43,3	42,2	40,7	45,5	41,0
20,0	43,6	43,5	42,7	41,2	45,7	41,5
25,0	43,8	43,5	42,9	41,4	45,7	41,5
30,0	43,8	43,5	42,9	41,4	45,7	41,5
35,0	44,0	43,7	42,9	41,7	41,7	41,7
40,0	44,0	44,0	43,1	41,9	41,7	41,7
45,0	44,0	43,7	42,9	41,9	41,7	41,7
50,0	43,8	43,7	42,9	41,7	41,7	41,7

Tabela E3 – Massa específica do material em função da posição no leito espesso, parametrizado no tempo.

Posição	Tempo (minuto)							
	0	20	20	40	40	100	100	160
	Umidade (bu)							
1,5	0,91	0,86	0,89	0,82	0,77	0,69	0,81	0,54
3	0,91	0,90	0,89	0,87	0,89	0,77	0,85	0,77
4,5	0,91	0,91	0,90	0,82	0,90	0,85	0,80	0,84
6	0,91	0,91	0,88	0,91	0,90	0,86	0,91	0,84
7,5	0,91	0,7	0,85	0,91	0,91	0,87	0,85	0,87

Tabela E4 – Massa específica das sementes em função da posição parametrizada no tempo.

Posição	Tempo (minuto)					
	0	40	40	100	100	160
	Massa Específica x 10 ⁻³ (kg/m ³)					
1,5	1,03	1,06	1,05	1,07	1,06	1,02
3,0	1,03	1,03	1,02	1,06	1,03	1,04
4,5	1,03	1,03	1,02	1,04	1,03	1,04
6,0	1,03	1,02	1,02	1,03	1,02	1,00
7,5	1,03	1,02	1,01	1,03	0,98	1,02

Tabela E5 – Temperatura na saída do leito em função da posição radial, para h=1,5 cm, parametrizada na posição angular.

r/R	Posição angular(°)							
	Experimento				Réplica			
	0	90	180	270	0	90	180	270
0,00	34,2	34,2	34,2	34,2	34,4	34,4	34,4	34,4
0,15	34,1	29,7	31,7	35,3	34,3	24,1	22,4	28,9
0,30	34,2	29,4	29,7	35,3	35,4	24,8	27,0	32,4
0,45	33,9	30,3	29,5	35,6	33,2	27,8	28,5	24,8

Tabela E6 – Temperatura em função da posição angular, para $h=1,5$ cm e $t=40$ min, parametrizada em r.

Posição Angular (°)	Raio (cm)			
	0	0,39	0,77	1,16
	Temperatura (°C)			
0	34,2	34,2	34,2	34,2
90	34,2	29,7	29,4	30,3
180	34,2	31,7	29,7	29,5
270	34,2	35,3	35,3	35,6

Tabela E7 – Temperatura em função da posição angular, para $h=2,0$ cm e $t=40$ min, parametrizada em r.

Posição Angular (°)	Posição Radial (cm)			
	0	0,39	0,77	1,16
	Temperatura(°C)			
0	34,4	32,0	32,0	32,7
90	34,4	32,6	33,3	35,5
180	34,4	35,1	36,4	37,3
270	34,4	35,1	33,9	35,6

Tabela E8 – Umidade das partículas em função da posição angular, parametrizadas em h e t.

Posição Angular (°)	Umidade(%bu)			
	Tempo (minuto)			
	h=1,5 cm		h=2,0 cm	
	40	120	60	100
0	68,0	19,8	66,5	22,0
90	66,0	20,0	69,0,	58,0
180	66,0	20,0	63,0	23,0
270	64,0	20,0	73,0	48,0

Tabela E9 – Temperatura do sólido em função da posição angular, parametrizada em h e t.

Posição Angular (°)	T_s (°C)					
	Tempo (minuto)					
	40	80	120	60	100	200
0	17,4	20,5	20,8	20,5	20,5	20,5
90	17,4	20,5	21	20,5	20,5	20,5
180	17,4	20,1	20,8	20,1	20,1	20,1
270	17,4	20,5	20,1	20,5	20,5	20,1