

EDNILTON TAVARES DE ANDRADE

**SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM MILHO
ARMAZENADO EM SILO METÁLICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

EDNILTON TAVARES DE ANDRADE

**SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM MILHO
ARMAZENADO EM SILO METÁLICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

APROVADA: 19 de junho de 2001.

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Conselheiro)

Prof^a. Leda Rita D’Antonino Faroni

Prof. Sérgio Zolnier

Dr. Roberto Sínicio

Prof^a. Sandra Maria Couto
(Orientadora)

Aos meus pais, JOSÉ e CREUZA.

A minha esposa.

Aos meus irmãos.

Aos meus amigos.

A DEUS, que torna tudo possível.

AGRADECIMENTO

Seria difícil descrever todos os que, de alguma maneira, auxiliaram na elaboração, no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho de tese.

Assim, agradeço à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao seu Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

A professora Sandra Maria Couto, pelas valiosas orientações, pela confiança, pelos incentivos, pela amizade e pelo entusiasmo.

Aos professores conselheiros Daniel Marçal de Queiroz, Lêda Rita D'Antonino Faroni e Guido de Souza Damasceno, pelas contribuições e sugestões.

Aos professores Sérgio Zonier e Mário Puiatti pelo imprescindível auxílio na realização deste trabalho.

Ao professor Paulo César Corrêa, pela amizade e pelos incentivos à produção científica.

A minha esposa Enoêmia Alvarenga de Andrade, pela compreensão, pelo carinho e incentivos.

A Ivano Alessandro Devilla, Paulo Cesar Afonso Junior, Sérgio Donzeles, Gilmar Vieira e Solenir, pelos incentivos, pelas sugestões e pelo companheirismo nas longas horas de estudo que passamos em nome de todos aqueles com quem

convivi, num ambiente agradável, onde a amizade e a perseverança superam qualquer obstáculo.

A Adriana, Wederson, Marilson, Moisés, José Cardoso, Nori, Ricardo, Frederico, Edivan, Enilce, Arienilmar, Claudia e aos demais estudantes do curso de Engenharia Agrícola, e ao amigo Abraão.

A Creuza e José Tavares de Andrade, em nome de todos os pais do mundo.

Aos professores, secretárias e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pela ajuda na elaboração, no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho.

Ao funcionário do Laboratório de Análise de Sementes “Marcos”, pela amizade e cooperação na realização deste trabalho.

E, por último, mas não menos importante, agradecimentos especiais aos funcionários do Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, Silas, Sebastião “Catitú”, “Inhame” e Edson pela ajuda imprescindível para a conclusão desta tese, e a todos que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

EDNILTON TAVARES DE ANDRADE, filho de José Tavares de Andrade e Creuza Nazaré de Andrade, nasceu em São Paulo, Estado de São Paulo, em 29 de abril de 1971.

Em 1989, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), diplomando-se em julho de 1994.

Em agosto de 1994, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, defendendo tese em 1997.

Em Março de 1997, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, defendendo tese em 2001.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Aspectos gerais.....	5
2.2. Composição e estrutura interna do grão.....	6
2.3. Fatores físicos que influenciam a qualidade dos grãos armazenados.....	7
2.3.1. Influencia da temperatura dos grãos armazenados na sua qualidade.....	8
2.3.2. Influencia da umidade dos grãos armazenados na sua qualidade.....	11
2.4. Fatores bioquímicos que influenciam a qualidade dos grãos armazenados.....	12
2.5. Agentes biológicos que influenciam a qualidade dos grãos armazenados.....	13
2.6. Processos de transferência de calor e de massa em grãos armazenados.....	15

2.6.1. Transferência de calor em grãos armazenados.....	15
2.6.2. Transferência de massa em grãos armazenados.....	17
2.7. Modelagem matemática.....	19
2.7.1. Métodos numéricos.....	21
2.8. Modelos matemáticos de transferência de calor.....	23
2.9. Geração de calor e desenvolvimento de insetos.....	28
2.10. Propriedades térmicas.....	31
2.10.1. Condutividade térmica.....	32
2.10.1.1. Determinação experimental da condutividade térmica.....	36
2.10.1.2. Determinação experimental do calor específico.....	39
2.10.1.3. Difusividade térmica.....	39
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1. Locais dos experimentos.....	41
3.2. Modelagem da transferência de calor na massa de grãos.....	41
3.2.1. Considerações gerais.....	41
3.2.2. Solução da equação de transferência de calor.....	42
3.2.3. Parâmetros de entrada para o modelo - contornos do sistema.....	44
3.2.3.1. Fluxo de radiação solar.....	47
3.2.3.2. Coeficientes de transferência de calor.....	52
3.2.4. Parâmetros de entrada do modelo – geração de calor.....	55
3.2.5. Parâmetros de entrada do modelo – propriedades térmicas....	57
3.2.5.1. Condutividade térmica.....	58
3.2.5.2. Difusividade térmica e calor específico.....	59
3.2.5.3. Massa específica aparente.....	61
3.2.5.4. Calor específico.....	61
3.3. Validação do modelo de transferência de calor.....	61
3.4. Teste de qualidade.....	63
3.4.1. Teste-padrão de germinação (TPG)	64

3.4.2. Teste de condutividade elétrica.....	65
3.4.3. Teor de umidade.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1. Propriedades térmicas.....	67
4.1.1. Massa específica.....	67
4.1.2. Condutividade térmica.....	67
4.1.3. Difusividade térmica.....	69
4.1.4. Calor específico.....	70
4.2. Modelagem.....	71
4.2.1. Modelagem do sistema utilizando parâmetros originais.....	73
4.2.1.1. Variação do fluxo de calor incidente na superfície em função de valores de α e ϵ	76
4.2.1.2. Determinação do fluxo de calor incidente na superfície lateral do silo usando as temperaturas experimentais.....	78
4.2.2. Distribuição de temperatura no sistema.....	86
4.2.3. Modelagem do sistema com geração de calor.....	95
4.2.3.1. Acionamento das fontes de calor segundo a seqüência 1.....	95
4.2.3.2. Acionamento das fontes de calor segundo a seqüência 2.....	97
4.2.3.3. Acionamento das fontes de calor segundo a seqüência 3.....	99
4.3. Qualidade da massa de grãos armazenada.....	106
4.3.1. Qualidade física.....	106
4.3.2. Qualidade fisiológica.....	110
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
APÊNDICES.....	126

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Faixas de temperatura e umidade relativa correspondentes à sobrevivência e às condições ótimas para o desenvolvimento e multiplicação de insetos, ácaros e fungos.....	29
2 População de <i>S. oryzae</i> , conforme equação (34), para uma temperatura de 30 °C, taxa de crescimento de 0,3071 e calor gerado de 56,4 μW por inseto dia.....	56
3 Seqüência de pontos de acionamento para geração de calor no interior da massa de grãos e data de início.....	57
4 Condutividade térmica da massa de grãos de milho e seus respectivos desvios-padrão.....	68
5 Valores de propriedades dos grãos de milho e da chapa de aço galvanizado (1x10 ⁻³ m de espessura).....	72
6 Valores da absorvidade e da emissividade necessários ao ajuste do fluxo de calor incidente no silo.....	84
7 Resumo dos erros médios estimados (%) para as diversas localizações no interior da massa de grãos, considerando profundidade vertical e distância radial.....	94
8 Germinação (%) das amostras de milho durante um período de 150 dias (com germinação inicial de 94,5%).....	111
9 Condutividade elétrica (μS cm ⁻¹ g ⁻¹) das amostras de milho durante período de 150 dias (condutividade elétrica inicial de 14,4 μS cm ⁻¹ g ⁻¹)	112
1A Erros (W m ⁻¹ °C ⁻¹) envolvidos no cálculo da condutividade térmica, durante os 10 primeiros segundos de experimento.....	145

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Setor do silo cilíndrico protótipo mostrando os componentes principais que foram considerados no desenvolvimento do modelo de transferência de calor.....	45
2 Condições de contorno aplicadas no sistema.....	46
3 Quadrantes de divisão do silo para aplicação da energia solar.....	50
4 Procedimento para o cálculo da percentagem (Lp) de radiação solar direta incidente na parede do silo para cada quadrante.....	51
5 Esquema da localização dos pontos de instalação das fontes de calor no interior da massa de grãos.....	55
6 Desenho esquemático do dispositivo experimental para determinação das propriedades térmica.....	58
7 Esquema da disposição, vertical e horizontal, dos termopares, das fontes de calor e dos pontos de amostragem no interior do silo.....	63
8 Esquema da localização dos pontos de amostragem.....	64
9 Valores experimentais e estimados do calor específico e da massa específica de grãos de milho, em função do teor de umidade.....	68
10 Curvas selecionadas para determinação difusividade térmica em função da condutividade térmica e do tempo, para milho nos diversos teores de umidade.....	70
11 Discretização do sistema em elementos.....	72

12	Quadrantes do silo - Esquema de divisão e identificação.....	72
13	Temperaturas simuladas e experimentais na superfície do silo, utilizando parâmetros de entrada de literatura.....	74
14	Fluxograma mostrando prováveis fontes de erro.....	75
15	Balanco de energia na parede do silo.....	77
16	Primeira aproximação do ajuste do fluxo de calor experimental nos quadrantes do silo, por meio da temperatura coletada na parede do silo.....	78
17	Ajuste de temperatura e fluxo de calor nos quadrantes do silo, por meio da temperatura coletada na parede do silo e do fluxo de calor simulado.....	80
18	Temperatura ajustada nos quadrantes do silo por meio do fluxo de calor simulado para os 10 primeiros dias de armazenagem.....	81
19	Distribuição de temperatura na superfície do silo após 41,7 dias de armazenagem.....	82
20	Fluxo de calor experimental e simulado nas paredes externas dos quadrantes do silo, para os primeiros 30 dias de armazenamento....	83
21	Temperatura experimental e simulada na superfície da massa de grãos.....	86
22	Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a uma profundidade radial de 1,8 m (centro), e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.....	87
23	Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a uma profundidade radial de 0,6 m e a distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.....	88
24	Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a uma profundidade radial de 1,2 m e a distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.....	89
25	Geração inicial de calor para ajuste de temperaturas.....	90
26	Temperaturas experimentais e simuladas no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,6 m de profundidade radial e 0,6 e 1,1 m de distância vertical, durante o período de 50 a 80 dias.....	91

27	Temperaturas experimentais e simuladas no interior da massa de grão em pontos localizados a 1,2 m de profundidade radial e 0,6 e 1,1 m de distância vertical, durante o período de 30 a 110 dias.....	92
28	Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,1 e 1,6 m de distância vertical, próximo aos limites do sistema.....	93
29	Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,1 e 1,6 m de distância vertical, próximo aos limites do sistema, durante o período de 0 a 10 dias....	94
30	Seqüência 1 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 4.....	95
31	Seqüência 1 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados próximos à fonte 1.....	96
32	Seqüência 2 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados na vizinhança da fonte 2.....	98
33	Seqüência 2 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 6.....	99
34	Seqüência 3 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 3.....	100
35	Seqüência 3 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados na vizinhança da fonte 5.....	101
36	Representação gráfica do modelo implementado após 161,5 dias de armazenagem, sem geração de calor (8:00 hs).....	103
37	Representação gráfica do modelo implementado durante diversos períodos de armazenagem, com geração de calor.....	104
38	Variação do teor de umidade dos grãos armazenados com o período de armazenagem.....	106
39	Médias do teor de umidade de equilíbrio e umidade relativa na superfície superior e inferior da massa de grãos.....	108
40	Variação da massa específica dos grãos armazenados com o período de armazenagem.....	109
41	Valores da massa específica aparente dos grãos de milho em diferentes distâncias verticais.....	110

42	Valores da massa específica aparente dos grãos de milho em diferentes profundidades radiais.....	110
43	Umidade relativa e temperaturas do ambiente e nas profundidades radiais da massa de grãos de milho.....	113
44	Percentagem de germinação média nas diversas distâncias verticais da massa de grãos.....	113
45	Percentagem de germinação média nas diversas profundidades radiais da massa de grãos.....	113
1A	Visão externa do silo e da casa de comando.....	138
2A	Sistema de aquisição de dados utilizado na coleta dos dados de temperatura na massa de grãos e condições ambientais.....	138
3A	Placas de aquisição de dados.....	139
4A	Vista interna do silo, sistema de termometria e fontes de calor ligadas.....	139
5A	Superfície da massa de grãos de milho.....	140
6A	Abrigo meteorológico.....	140
7A	Termohigrometro.....	141
8A	Visão interna da “B.O.D.” e do equipamento utilizado para determinação das propriedades térmicas do produto.....	141
9A	Placa de aquisição utilizadas na coleta de temperatura para determinação das propriedades térmicas do produto.....	142
10A	Temperatura versus tempo experimental para grãos de milho com teor de umidade de 13,1% b.u.....	145
11A	Valores experimentais e estimados da condutividade térmica da massa de grãos de milho, em função do teor de umidade.....	146

RESUMO

ANDRADE, Ednilton Tavares de, D.S., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2001. **Simulação da variação de temperatura em milho armazenado em silo metálico.** Orientador: Sandra Maria Couto. Conselheiros: Daniel Marçal de Queiroz, Lêda Rita D'Antonino Faroni e Guido de Souza Damasceno.

Este trabalho teve como objetivo geral a modelagem da transferência de calor em uma massa de grãos de milho, armazenada em um silo metálico, na presença de fontes internas de calor e condições ambientais externas variáveis. Os objetivos específicos foram: (a) simular variações de temperatura em um sistema tridimensional com fontes internas de calor para prever a distribuição de temperatura no interior do silo, usando a técnica de elementos finitos; (b) determinar, experimentalmente, os parâmetros envolvidos no modelo; (c) obter, experimentalmente, a distribuição temporal de temperatura em uma massa de grãos de milho armazenada em um silo cilíndrico visando a validação do modelo; (d) investigar o efeito temporal das variações das condições externas na qualidade da massa de grãos armazenada. Foi utilizado um silo vertical (cilíndrico e de chapa de aço corrugado), de 3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura. A altura da massa de grãos, no interior do silo, foi igual a 1,7 m. Foi considerado no modelo uma transferência de calor tridimensional, em regime transiente, com geração interna de calor (simulando desenvolvimento de fungos e insetos) e influências dos elementos meteorológicos do ambiente externo (temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento). A solução aproximada da equação de transferência de calor por condução (tridimensional, transiente e com geração de

calor) foi obtida usando a técnica de elementos finitos. Inicialmente, o sistema foi dividido em 1728 elementos tridimensionais, do tipo SOLID70, totalizando 2169 nós. Para a obtenção de equações que descrevessem as temperaturas às quais os contornos da massa de grãos (superfície superior, inferior e lateral) ficaram submetidos, houve necessidade de determinar os seguintes parâmetros: (a) fluxo de radiação solar; (b) coeficiente de convecção para a parede externa do silo-ar ambiente; (c) coeficientes de convecção para superfícies da massa de grãos e (d) taxa de calor gerada por insetos e fungos. Visando a validação do modelo de transferência de calor desenvolvido neste trabalho, grãos de milho (*Zea mays* L.) foram armazenados em uma estrutura metálica, similar à usada nas simulações. Os grãos (variedade “Vencedor”), provenientes da safra de janeiro de 2000 e procedentes do Município de Viçosa-MG, foram colhidos e trilhados mecanicamente. Os grãos, com um teor de umidade inicial médio de 13,1% b.u. foram armazenados no silo durante 161,5 dias (20 de junho a 29 novembro de 2000). Termopares “tipo T” (cobre-constantan) foram posicionados em 64 pontos dentro do silo. Quarenta destes pontos localizavam-se no interior da massa de grãos, enquanto que os outros, localizavam-se na superfície inferior, superior e acima da massa de grãos. Os valores das variáveis pertinentes ao experimento foram registrados com auxílio de um sistema automático de aquisição de dados. Durante o período de armazenamento dos grãos de milho, amostras do produto foram coletadas, a cada trinta dias, visando o acompanhamento da qualidade do material (testes padrão de germinação, massa específica, condutividade elétrica e teor de umidade). A modelagem, usando a técnica de elementos finitos, de transferência de calor tridimensional em uma massa de grãos de milho, armazenada em silo metálico, sujeito às variações da temperatura ambiente, mostrou-se adequada, podendo ser utilizada em outras aplicações. O erro percentual médio das temperaturas simuladas, durante o armazenamento do produto, foi de aproximadamente 2,2%. Equacionou-se a condutividade térmica de amostras de milho, com um teor de umidade (U) na faixa de 8,6 a 17,1% b.u., como: $k = 0,00434 U + 0,10473 (\pm 0,00501) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. O erro aproximado na

utilização desta equação é de 3%; o calor específico de amostras de milho, com um teor de umidade na faixa de 8,6 a 17,1% b.u., equacionado como: $C = 54,453 U + 1332,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; As superfícies externas do silo situadas na região Norte e Sul foram, respectivamente, a mais quente e a mais fria, durante o período de armazenamento; gradientes de temperatura, existentes na superfície externa do silo, são uma função da radiação solar. Porém, estes gradientes não puderam ser observados em camadas mais profundas do silo. A modelagem, usando a técnica de elementos finitos, da transferência de calor tridimensional em uma massa de grãos de milho, armazenada em silo metálico, sujeito às variações da temperatura ambiente e com geração de calor não proporcionou resultados satisfatórios. As temperaturas simuladas na massa de grãos foram sempre maiores que os valores experimentais. Existe a necessidade da introdução da transferência de calor por convecção natural no modelo. A qualidade fisiológica dos grãos foi afetada pelo período de armazenagem do produto. Entretanto, a localização dos grãos no interior do silo não influenciou na manutenção de sua qualidade; exceção se faz à camada superior da massa (1,7 m), onde ocorreu uma redução significativa de qualidade do produto, devido a problemas durante o período de armazenamento. Grãos armazenados na superfície superior apresentaram maior perda de qualidade que aqueles armazenados na superfície inferior, devido aos maiores gradientes de temperatura e umidade relativa impostos aos grãos, nesta região, durante o período de armazenamento. A qualidade física dos grãos foi afetada pelo período de armazenagem; os grãos armazenados próximos às superfícies do silo, interface com o ambiente, foram os mais afetados.

ABSTRACT

ANDRADE, Ednilton Tavares de, D.S., Federal University of Viçosa, June of 2001. **Simulation of the temperature variation in corn stored in metallic bin.** Advisor: Sandra Maria Couto. Committee Members: Daniel Marçal de Queiroz, Lêda Rita D'Antonino Faroni and Guido de Souza Damasceno.

This work presents the modeling of the transient heat transfer in a mass of corn grains stored at a cylindrical metallic silo (corrugated steel plate) with 3.6 m of diameter and 2.2 m of height. The height of the mass of grains inside the silo was equal to 1.7 m. Internal heat sources (simulating the development of fungi and insects) and the influence of meteorological elements of the external atmosphere (air temperature, solar radiation and wind speed) were considered. The temperature distribution in the three-dimensional system was simulated using the finite element technique. The parameters involved in the model were determined experimentally. For the simulations, the system was divided in 1728 three-dimensional elements (SOLID70) resulting in 2169 nodes. The equations used to describe the system boundary conditions (superior surface, inferior and lateral) involved the determination of the following parameters: (a) solar radiation flow; (b) convection coefficient for the silo external wall-air; (c) convection coefficients for grain superior surface-air and (d) heat generation rate by insects and fungi. Seeking for the model validation, corn grains (variety "Vencedor") at 13.1% w.b. were stored in a metallic structure similar to that used in the simulations. The product from a Municipal district of Viçosa-MG,

mechanically harvested and thrashed in Jan/2000, was stored during 161.5 days (June, 20 to November, 29/2000). An automatic system of data acquisition was used to record the temperatures at sixty-four locations of the silo (thermocouples, "type T": copper-constantan) during the storage process. Forty of these locations were inside the mass of grains, while the other ones, were at the product surfaces (inferior and superior) and at the air above the grains. It was also investigated the external condition variation effects on the quality of the stored grains. Every thirty days during the storage time, samples of the product were collected and they were submitted to quality tests (germination, density, electric conductivity and moisture content). Experimental results on thermal conductivity (K) and specific heat (C) of corn samples as a function of moisture content (U), in the range of 8.6 to 17.1% w.b., showed that they can be expressed by the following equations: $K = 0.00434 U + 0.10473 (\pm 0.00501) \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ and $C = 54.453 U + 1332.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Temperature gradients detected on silo surfaces were a function of the solar radiation during the storage time. The external surface areas of the silo located at the North and South orientations presented, respectively, the hottest and the coldest temperatures. However, temperature gradients could not be observed in deeper layers of the grains inside the silo. The temperature distributions determined experimentally and by simulation (finite element technique) were very close (mean error of approximately 2.2%) when the system was considered without heat generation. On the other hand, the results were not satisfactory when heat sources were introduced in the model. In these cases, the simulated temperatures in the mass of grains always super estimate the experimental values. It seems that the natural convection heat transfer, probably, must be considered in the model. The physical quality of the grains was affected by the storage time only for the product stored close to the mass surfaces (interface with the atmosphere) due to the largest temperature gradients and relative humidity imposed to the grains. Grains stored near the superior surface presented larger quality loss than those stored near the inferior surface.

1 - INTRODUÇÃO

Dos 851 milhões de hectares brasileiros disponíveis para agricultura, apenas 7,5% (60 milhões) são cultivados. Em termos de área cultivada com lavouras temporárias (45,2 milhões), 96% é utilizada por oito grandes culturas: milho (30%), soja (23%), feijão (12%), arroz (10%), cana de açúcar (9%), trigo (5%), mandioca (4%) e algodão herbáceo (3%). A produção de alguns destes produtos na safra de 1999/2000 foi, em milhões de toneladas, de aproximadamente, 11,5 (arroz), 31,6 (milho), 3,1 (feijão), 31,6 (soja), 1,5 (trigo), 0,4 (aveia) e 0,3 (cevada) (CONAB, 2000). As lavouras destes produtos encontram-se concentradas nas regiões Centro-oeste, Sul e Sudeste. Neste sentido, o Brasil é considerado um país possuidor de um dos maiores potenciais para produção agrícola.

A disponibilidade mundial de uma maior quantidade de alimentos depende, além do aumento da área de cultivo, da redução das perdas de grãos depois da colheita, que são bastante significativas quando consideradas em sua totalidade. A redução das perdas teria como conseqüência um menor desperdício do enorme esforço humano e das despesas com implementos e insumos agrícolas (fertilizantes, pesticidas etc), além da economia de combustível.

Junto ao esforço para aumentar a produção de alimentos, necessariamente há que se incrementar as condições para uma armazenagem segura dos grãos. Uma das características dos grãos é a possibilidade de serem armazenados por um longo período de tempo, sem perdas significativas da qualidade.

O Brasil possui, cadastrado, um sistema de armazenagem de grãos agrícolas com capacidade estática de, aproximadamente, 90,1 milhões de toneladas, sendo

que 32,3% desta capacidade é correspondente à armazenagem em silos (CONAB, 1997; CONAB, 2000).

Para pequenos, médios e grandes produtores de grãos e sementes, os silos metálicos são, atualmente, as unidades armazenadoras mais populares (ALMEIDA et al., 1997).

Para os pequenos e médios produtores, o preço de silos metálicos é geralmente considerado elevado e sua aquisição depende do seu poder aquisitivo. Nos países desenvolvidos, esses silos são a marca de desenvolvimento agrícola do produtor rural; quanto maior a sua unidade armazenadora, maior sua capacidade de negociação e ganho com o seu produto. Uma unidade armazenadora permite ao agricultor vender sua safra gradativamente, quando o preço do produto for mais compensador, e contribui, significativamente, para a motivação de fixação do homem no campo, pois, neste caso, a lucratividade fica no campo e não na cidade nas mãos de atravessadores.

Entretanto, armazenar grãos não significa guardá-los sob quaisquer condições. A importância da armazenagem reside no fato de que, quando conduzida adequadamente, evita-se a ocorrência de perdas e preserva-se a qualidade do produto. O armazenamento prolongado de um produto só pode ser realizado quando se adotam corretamente as práticas de colheita, limpeza, secagem e combate a insetos, fungos e roedores. A partir da maturidade fisiológica, sementes e grãos entram num processo irreversível de deterioração, responsável pela perda de qualidade do produto. A velocidade desse processo depende, exclusivamente, das condições de ambiente anteriores à colheita, das injúrias mecânicas, durante a colheita e processamento, e, finalmente, das condições de armazenamento. Dependendo destas condições um produto armazenado terá sua qualidade reduzida com maior ou menor intensidade (SAUER, 1992).

As interações entre fatores abióticos (temperatura, teor de umidade, concentração de gás, umidade relativa ambiente, tipo e condições do armazém e características do sistema de aeração) e fatores bióticos (grãos, insetos, ácaros, fungos e bactérias) fazem com que os grãos armazenados se tornem um

ecossistema e dependendo dos níveis dos fatores e do grau das interações, o processo de deterioração dos grãos armazenados pode ser acelerado ou não. A manutenção da qualidade de grãos e sementes armazenados está relacionada, principalmente, ao teor de umidade e à temperatura do produto. Gradientes de temperatura na massa podem causar migração de umidade e subsequente deterioração do produto. Variações de temperatura no produto armazenado podem ser provenientes de alterações das condições ambientais externas ao silo e de presença de fontes de calor internas tais como respiração dos grãos, microorganismos e atividades de insetos. O acompanhamento da temperatura de uma massa de grãos, durante o armazenamento, é um mecanismo essencial para a identificação de anomalias e de focos de temperatura elevada proveniente de agentes que diminuem gradativamente a qualidade do produto.

As propriedades físicas (massa específica, condutividade térmica e calor específico) são variáveis de entrada em um modelo de transferência de calor, e estas devem ser conhecidas para implementação do modelo.

As propriedades térmicas de uma massa de grãos armazenada, variável de entrada do modelo, pode ser obtida por meio de experimentos e equações de transferência de calor, ou por equações empíricas já determinadas para este produto.

A previsão da distribuição de temperatura em uma massa de grãos armazenados é um assunto complexo, pois depende das variações temporais de inúmeros fatores externos e internos ao silo. A modelagem matemática de sistemas e processos físicos é de grande importância, pois permite, através de um número mínimo de experimentos, que variações em parâmetros possam ser avaliadas com rapidez. Simulações da resposta de modelos matemáticos de transferência de calor podem prever, com segurança e precisão, a ocorrência e localizações de focos de deterioração dentro da massa de grãos ao longo do tempo de armazenamento do produto. A qualidade de grãos armazenados em um silo pode ser influenciada pelas suas condições de armazenamento, sendo a temperatura e a umidade dos grãos em cada ponto no interior do silo um dos fatores que definem sua velocidade de deterioração.

Tendo em vista a importância do conhecimento da distribuição de temperatura em uma massa de grãos armazenada em silo e o comportamento do produto durante o período de armazenamento, este trabalho teve como objetivo geral a modelagem da transferência de calor em uma massa de grãos de milho, armazenada em um silo metálico, na presença de fontes internas de calor e condições externas variáveis. Os objetivos específicos foram:

- (a) Desenvolver um modelo físico-matemático tridimensional com fontes internas de calor para prever a distribuição de temperatura no interior do silo, usando a técnica de elementos finitos;
- (b) Determinar, experimentalmente, os parâmetros envolvidos no modelo:
 - propriedades físicas relacionadas com a transferência de calor no produto (massa específica, calor específico e condutividade térmica);
 - modelo para a taxa de geração de calor proveniente da infestação de *Sitophilus* nos grãos.
- (c) Obter, experimentalmente, a distribuição temporal de temperatura em uma massa de grãos de milho armazenada em um silo cilíndrico visando a validação do modelo.
- (d) Investigar o efeito temporal das variações das condições externas na qualidade da massa de grãos armazenada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos Gerais

O armazenamento de grãos é parte integrante da cadeia produtiva de alimentos e do processamento de produtos agrícolas. Um armazenamento adequado é um dos principais responsáveis pela manutenção da qualidade do produto que é considerada como o parâmetro controlador de seu valor econômico na comercialização. Grãos agrícolas, geralmente, são considerados possuidores de boa qualidade quando apresentam um teor de umidade final baixo e uniforme; alta massa específica; baixa porcentagem de material estranho; baixa porcentagem de grãos descoloridos, quebrados e danificados pelo calor; baixa suscetibilidade à quebra; alta qualidade para moagem; alto valor nutritivo; baixa infestação e danificação por insetos; dentre outros (BROOKER et al., 1992; SAUER, 1992). A deterioração de grãos e sementes não pode ser evitada, porém sua velocidade pode ser controlada, até certo ponto, pelo emprego de técnicas adequadas de produção, colheita, secagem, beneficiamento, armazenamento e manuseio (ALMEIDA et al., 1997; CARVALHO e NAKAGAWA, 1988).

A velocidade do processo de deterioração dos grãos armazenados é governada por interações entre fatores abióticos e fatores bióticos. Num sistema ideal de armazenagem, o grão, organismo mais importante, e os microrganismos estão normalmente em estado de dormência; insetos, ácaros, ratos estão ou deveriam estar ausentes. Ao contrário, o ambiente abiótico está sempre presente e é alterável; os níveis de temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, CO₂ e O₂ sempre se modificam. Uma variação anormal em alguns desses fatores pode

criar condições favoráveis ao desenvolvimento e a multiplicação daqueles seres dormentes (JAYAS et al., 1995).

Além da composição e da estrutura interna dos grãos, existem diversos fatores que contribuem para a deterioração de produtos armazenados, dentre estes, citam-se: (a) os fatores físicos, tais como temperatura e umidade; (b) os fatores químicos, entre eles a disponibilidade de oxigênio; (c) os agentes biológicos, tais como insetos, fungos, roedores e o homem, pelos seus métodos de beneficiamento, armazenamento e transporte dos produtos (SINHA e MUIR, 1973; SAUER, 1992). Estes fatores e seus efeitos são discutidos nos parágrafos que seguem.

2.2. Composição e Estrutura Interna do Grão

A estrutura e a composição dos grãos são parâmetros relevantes a serem considerados para se obter um armazenamento adequado do produto. Os grãos, em geral, apresentam características de acordo com as espécies a que pertencem. Do ponto de vista funcional, o grão é formado por (a) uma cobertura protetora: estrutura externa que envolve a semente; (b) um eixo embrionário com função reprodutiva sendo capaz de iniciar divisões celulares e de crescer - parte vital da semente; e (c) um tecido de reserva: fonte de energia e de substâncias orgânicas que são utilizadas pelo eixo embrionário no processo de germinação até que a plântula se torne autotrófica, ou que seja capaz de sintetizar matérias orgânicas pelo processo de fotossíntese (SAUER, 1992).

As principais substâncias armazenadas pelos grãos são carboidratos, lipídeos e proteínas. O principal carboidrato de reserva nos grãos é o amido. Quando o amido é a substância de reserva predominante, o grão é denominado *amiláceo*. Os grãos são denominados *oleaginosos*, quando os lipídeos são as substâncias de reserva predominantes; e *protéicos*, quando estas são proteínas. Em sementes, o conhecimento da composição química é de interesse prático, porque tanto o vigor quanto o potencial de armazenamento de sementes é influenciado pela quantidade dos compostos presentes (SAUER, 1992).

A natureza e a quantidade dos principais componentes que constituem um alimento, como carboidratos, gorduras e proteínas, determinam o valor nutritivo do mesmo e, ademais, podem determinar a tendência do alimento a experimentar decomposições químicas durante o armazenamento e depois da elaboração. As alterações químicas e bioquímicas que ocorrem nos alimentos armazenados são, por demais, complexas e sua evolução é influenciada por um grande número de fatores, dos quais, alguns dependem das condições de armazenamento e a maioria depende dos métodos de manejo, elaboração e empacotamento dos alimentos.

Os alimentos frescos estão sujeitos a uma grande diversidade de decomposição química, de tal forma que se tornam rapidamente, inadequados ao consumo. No entanto, os grãos de cereais em geral, estão sujeitos a um reduzido número de alterações químicas, motivo pelo qual podem ser armazenados durante períodos de tempo comparativamente longos.

A decomposição química dos alimentos é muito menos importante do que a deterioração provocada por infestação de insetos, ataques microbiano e por roedores. Contudo, condições climáticas desfavoráveis exigem uma maior proteção contra a decomposição química dos produtos básicos mais vulneráveis e, particularmente, quando não é possível assegurar uma rápida movimentação do produto (JAYAS et al., 1995).

2.3. Fatores Físicos que Influenciam a Qualidade dos Grãos Armazenados

Durante a armazenagem, a temperatura da massa de grãos e o seu teor de umidade influenciam, de forma significativa, na qualidade final do produto, estabelecendo a sua longevidade, população de microflora e de insetos e, também, a necessidade de aeração da massa de grãos (SAUER, 1992; CHANG et al., 1993; JAYAS et al., 1995). A remoção da umidade do grão para prevenir o desenvolvimento de microrganismos geralmente é o primeiro passo na conservação destes produtos (BROOKER et al., 1992).

O processo de deterioração de grãos armazenados inicia-se quando as variáveis abióticas (temperatura e umidade relativa do ar) alcançam níveis e combinações favoráveis para proliferação das variáveis bióticas (fungos, bactérias, insetos, roedores e pássaros). As variáveis biológicas são as responsáveis mais comuns pela deterioração dos grãos e o grau de deterioração depende da razão de incremento das variáveis bióticas em virtude, primeiro, da temperatura e da umidade relativa do ar e, segundo, pela inter-relação do grão com estas últimas e a estrutura do armazém (SINHA e MUIR, 1973).

Colher e secar um produto de maneira apropriada, obtendo-se assim condições iniciais adequadas de armazenamento, não é garantia para a manutenção de sua qualidade por um longo período de tempo. Isto seria verdade apenas no caso de não haver modificações no micro-clima da massa de grãos durante o período de armazenamento. Entretanto, modificações lentas no micro-clima da massa sempre irão acontecer devido às variações das condições ambientais e, também devido às infestações dos agentes biológicos.

2.3.1. Influencia da Temperatura dos Grãos Armazenados na sua Qualidade

Variações de temperatura em uma massa de grãos armazenada em um silo podem ser provenientes de fontes de calor internas (respiração dos grãos, microorganismos e atividade de insetos) e/ou fontes externas (radiação solar, variação de temperatura do ar que envolve o silo, etc.) (CONVERSE et al., 1973).

Uma massa de grãos apresenta baixo coeficiente de condução de calor. Pequenas quantidades de calor, resultante de um foco de infestação de insetos ou crescimentos de fungos nos grãos, não são rapidamente dissipadas e formam uma “bolsa de calor” na massa. O movimento do ar quente, do foco de calor para a superfície dos grãos, resulta em gradientes de temperatura na massa de grãos. Se as condições de temperatura do grão na superfície ou do ar exterior forem suficientemente baixas, pode ocorrer a condensação de umidade, ocasionando o aumento da umidade do grão e a deterioração do produto (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

Em regiões em que o inverno é rigoroso, a temperatura de grãos armazenados é, geralmente, mais alta que a do ambiente externo. Dessa forma, haverá a formação de um diferencial de temperatura através da massa de grãos. Quando armazenados em silos metálicos, os grãos, próximos às paredes do silo e na camada superior, estarão numa temperatura menor do que aquela no interior da massa, proporcionando, assim, condições para o estabelecimento de correntes de ar devido à convecção natural. A temperatura dos grãos, próximos à parede, estando baixa provocará, neste local, um movimento de ar frio no sentido descendente e, conseqüentemente, o ar quente se movimentará no sentido ascendente no interior da massa. Esse movimento de ar, causado por diferença de temperatura, poderá acarretar condensação de umidade. O ar frio descendente irá ocupar o lugar do ar quente que ascendeu por convecção natural. O ar quente, ao encontrar a camada superior de grãos (fria), terá a sua temperatura diminuída. Quando a temperatura do ar externo é muito maior que a da massa de grãos, poderá ocorrer correntes de convecção, porém em sentido oposto às aquelas descritas anteriormente (SAUER, 1992).

A condensação de umidade ocorre quando uma massa de ar quente encontra uma superfície com temperatura baixa capaz de fazer com que sua temperatura seja diminuída para um valor abaixo da temperatura do ponto de orvalho. Este fenômeno é importante no armazenamento de grãos. A umidade poderá, por gotejamento ou sobre a massa de grãos, ser usada, para atividade biológica, tanto pelo grão como por microrganismos.

O aquecimento durante o dia da chapa metálica da parede e do teto dos silos metálicos faz com que a temperatura do ar do espaço intergranular próximo à parede se aqueça. O mesmo acontece com o ar que fica sobre a camada superior de grãos. O ar aquecido tem maior capacidade de manter vapor d'água, e como este está em contato com o grão armazenado, a umidade do grão evapora e o ar fica, portanto, quente e úmido. Com a diminuição da temperatura no período noturno, a temperatura do ar nesses espaços também irá diminuir, e pode-se atingir temperaturas abaixo do ponto de orvalho, ocorrendo, então, a condensação de umidade. A possibilidade de ocorrer condensação da umidade do

ar em silos de concreto é menor do que nos silos metálicos (SINHA e MUIR, 1973; SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

Gradientes de temperatura na massa de grãos podem causar migração de umidade e subsequente deterioração do produto (CHANG et al., 1993; CASADA e YOUNG, 1994a; CASADA e YOUNG, 1994b; CHANG e STEELE, 1995; GONG et al., 1995). SRIVASTAVA e RAO (1994), estudando o armazenamento de trigo nas temperaturas de 27, 37 e 50 °C durante 1, 3 e 5 meses, concluíram que aumentos de temperatura e do tempo de armazenamento provocam uma queda na qualidade final do produto armazenado.

A variação de temperatura de um produto durante a armazenagem é grandemente influenciada pelo seu teor de umidade (ABBOUDA et al., 1992a; ABBOUDA et al., 1992b; KHANKARI et al., 1994). Para uma armazenagem prolongada é necessário que se tenha um produto seco (para o milho um teor de umidade de 11 a 13% b.u.) e limpo, diminuindo-se, assim, a ação da microflora na massa de grãos, retardando a velocidade das trocas gasosas e o processo de deterioração natural.

A deterioração de grãos armazenados devido a agentes biológicos é um risco constante. Muitas vezes, embora as condições médias (temperatura e umidade) de uma massa de grãos não sejam favoráveis ao desenvolvimento e multiplicação de insetos, ácaros e fungos, podem existir regiões localizadas na massa onde ocorrem condições ótimas para o desenvolvimento de tais agentes biológicos. Geralmente, à uma determinada profundidade da massa de grãos, o único controle que se tem é o da temperatura dos grãos. Quando se detecta um foco de deterioração na massa é porque a atividade metabólica naquela localização já está intensa (temperatura elevada) e a deterioração adiantada.

Segundo JAYAS et al. (1995), a maior parte, senão toda, do aquecimento acima de 20 °C é causado por microrganismo. O desenvolvimento dos fungos diminui quando a umidade relativa estiver abaixo de 70% ou quando a temperatura estiver abaixo de 0 °C.

As impurezas sempre são prejudiciais à conservação de um produto e, quando concentradas em certos locais do silo, representam focos de aquecimento

garantido. Impedem o micro-movimento do ar intergranular, favorecendo a conservação do calor e aceleram o surgimento e o desenvolvimento dos microrganismos, pois as impurezas, normalmente, possuem equilíbrio higroscópico maior que os grãos. Os insetos e fungos aumentam o calor e a umidade. A concentração da impureza em certas regiões do silo, especialmente no centro formando um tubo e nas laterais junto às paredes do silo, impedem ou dificultam a passagem de ar e aumentam, assim, a possibilidade de ataque por microrganismos.

2.3.2. Influencia da Umidade dos Grãos Armazenados na sua Qualidade

A água contida no grão é um parâmetro importante quando se refere aos processos relacionados com as práticas de pós-colheita. O teor de umidade, temperatura e atividade de água são parâmetros que devem ser observados para se estabelecer o armazenamento seguro de um produto, sem riscos de deterioração pelo ataque de microrganismos. No entanto, na prática o que se observa é uma grande quantidade de grãos armazenados com um teor de umidade acima dos limites considerados seguros para o armazenamento. Tal fato ocorre em razão dos produtos agrícolas serem comercializados com base no peso úmido sendo que os limites de umidade para o comércio são, na maioria das vezes, superiores àqueles requeridos para um armazenamento seguro (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

A umidade, tanto no grão quanto no ar, é um dos fatores mais importantes que afetam a qualidade do grão. Grãos e sementes têm natureza higroscópica e podem ganhar ou perder umidade conforme as condições de temperatura e umidade relativa do ar ambiente que os envolvem. Assim, após o produto ser exposto a um ambiente, a umidade dos grãos ficará em equilíbrio com a umidade relativa do ar. O tempo necessário para se atingir a umidade de equilíbrio ou para que ocorra o equilíbrio higroscópico entre o ar ambiente e a massa de grãos varia de acordo com a umidade relativa, a temperatura, o produto e o volume de grãos. Uma pequena camada de grãos, exposto a um ambiente, entra em equilíbrio higroscópico com a UR do ar dentro de um período relativamente curto.

Entretanto, grandes volumes de grãos, com umidade não uniforme, levarão um período muito longo para atingirem equilíbrio de umidade (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

A água presente nos grãos é considerada existir, para fins práticos, sob duas formas diferentes: água livre (mantida livremente nos espaços correspondentes aos poros existentes nos grãos) e água ligada ou de constituição (intimamente associada a substância adsorvedora do grão e não tem papel biológico). Em termos de teor de umidade, considera-se, por facilidade, que o grão é constituído apenas de água livre e matéria seca, onde estão incluídos os carboidratos, as proteínas, as gorduras, minerais e vitaminas (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

Para que reações químicas e bioquímicas (reações enzimáticas, de maturação, de proteínas, e de gelatinização de carboidratos) se iniciem, uma quantidade de “água solvente” mínima é requerida no produto. A velocidade destas reações aumenta em função da quantidade de “água solvente” disponível.

A migração de umidade pode ser minimizada ao se diminuir gradientes de temperatura na massa de grãos. O uso da aeração é a técnica mais empregada para isso (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

2.4. Fatores Bioquímicos que Influenciam a Qualidade dos Grãos Armazenados

Um fator que influencia na transferência de umidade nos grãos armazenados é a geração de umidade pelos grãos e seu ecossistema (respiração do ecossistema). A temperatura e a concentração de CO₂ influenciam a geração interna de água. A elevação da temperatura dos grãos até a morte térmica dos organismos vivos presentes nesta massa (ex., insetos, ácaros e fungos), aumentará a produção de umidade (água) devido elevação da taxa respiratória destes organismos. A taxa de respiração de organismos vivos praticamente dobra a cada 10 °C de aumento de temperatura, dentro da faixa de temperatura de

sobrevivência destes seres. Altas concentrações de CO₂ normalmente diminuem a quantidade de água produzida por grão e organismos (JAYAS et al., 1995).

O processo de respiração envolve a liberação de energia devida à oxidação de carboidratos e outros componentes orgânicos. A taxa de respiração de uma massa de grãos depende, também, de danos físicos presentes no produto. Grãos sadios apresentam uma taxa de respiração menor do que aqueles danificados (VIEIRA e CARVALHO, 1994). Sob condições práticas de armazenamento, uma massa de grãos contendo alta porcentagem de grãos quebrados, ou mostrando outras evidências de danificações, é mais fácil de se aquecer do que aquela com grãos sadios a um mesmo teor de umidade.

As reações bioquímicas de oxidação, durante o processo respiratório, consomem energias acumuladas sob forma de compostos orgânicos como os açúcares, amido e outros, diminuindo de forma efetiva a massa e, portanto, o peso dos grãos. O CO₂ liberado representa a quebra técnica do produto sendo que fungos aceleram este processo mais rapidamente em ambientes úmidos e quentes. A quebra técnica não deve ser confundida com a perda de peso devido à secagem do produto no processo de aeração durante a armazenagem.

2.5. Agentes Biológicos que Influenciam a Qualidade dos Grãos Armazenados

Os danos causados por fungos são uma das principais causas da redução da qualidade e preço de grãos armazenados e de seus subprodutos. Fungos estarão presentes em grãos cuja a manifestação de insetos e roedores foi detectada e controlada. Neste caso, a deterioração do produto devido a este agente, irá depender somente de condições (temperatura e umidade) favoráveis para iniciar a sua proliferação. Fungos encontram-se associado a insetos e podem contribuir grandiosamente para o dano em grãos e mesmo quando os insetos estão mortos, a deterioração do produto pelos fungos pode continuar.

Os hábitos e características dos fungos, sempre presentes em grãos armazenados, bem como as condições que permitem ou promovem seu

crescimento são bem conhecidas. Danos por fungos podem ser evitados através do controle de condições na armazenagem, tornando-as inadequadas para a proliferação destes agentes. As práticas e princípios envolvidos em uma boa armazenagem de grãos são conhecidos e, quando seguidas, as perdas no armazenamento são mínimas, mesmo em ambientes ou regiões com alto risco de armazenagem (SAUER, 1992).

A microflora dos grãos armazenados é constituída por uma grande variedade de microrganismos. A disponibilidade de água e a temperatura são os principais fatores que influenciam no crescimento de microrganismos presentes em uma massa de grãos armazenados. Sem dúvida, os fungos são os principais microrganismos envolvidos na deterioração dos grãos armazenados (MOLIN e VALENTINI, 1999).

Segundo BROOKER et al. (1992), os grãos são contaminados no campo por grande quantidade de fungos, classificados como fungos do campo. Se estes fungos, após a colheita, não encontrarem condições favoráveis para seu desenvolvimento, serão, gradualmente, eliminados e darão espaço para outro grupo diferente de fungos, denominados de fungos de armazenamento.

Os fungos de armazém são aqueles que se adaptam à substratos sem água livre e à ambientes com umidades relativas entre 65 e 90%. A maioria das espécies deste grupo pertence ao gênero *Aspergillus* e, em menor número, ao gênero *Penicillium*. O último, desenvolve-se, principalmente, em grãos com altos teores de umidade e em baixas temperaturas (SAUER, 1992).

De acordo com SAUER (1992), quando se conhece a quantidade e os tipos de fungos presentes nos grãos, é possível inferir acerca das condições que deverão ser mantidas durante o seu armazenamento, estimar o tempo máximo de armazenamento e a contaminação por micotoxinas. Os fungos mais comumente encontrados causando deterioração de grãos armazenados são: *Aspergillus repens*, *A. amstelodami*, *A. ruber*, *A. restrictus*, *A. glaucus*, *A. halophilicus*, *A. candidus*, *A. ochraceus*, *A. flavus*, *A. parasiticus* e algumas espécies do gênero *Penicillium*.

Como principais danos causados pela invasão dos fungos de armazenamento, citam-se, entre outros, a diminuição na germinação do produto, descoloração, produção de toxinas, aquecimento, transformações bioquímicas, modificações celulares, mofos, emboloramento e apodrecimento.

2.6. Processos de Transferência de Calor e de Massa em Grãos Armazenados

Uma massa de grãos armazenados em um silo (ecossistema) encontra-se submetida à ação de variáveis físicas, químicas e de agente biológicos. A ação destas variáveis tem como resultado a formação de gradientes de temperatura, umidade e gases no interior da massa de grãos. A existência destes gradientes faz com que se inicie um processo de transferência de calor e de massa no ecossistema. A análise deste processo é considerado complexo visto que, na maioria das vezes, as transferências de calor e de massa ocorrem simultaneamente.

As transferências de calor e de massa são afetadas por uma série de parâmetros que podem ser classificados como externos e internos. Além do aspecto estrutural do silo, dentre os parâmetros externos, a localização geográfica do ecossistema é o mais importante e envolve as seguintes variáveis climáticas: velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa do ar ambiente, radiação solar e pressão atmosférica, dentre outras. Como parâmetros internos que influenciam no processo de transferência de calor e de massa, citam-se: produção de calor, umidade e CO₂ pela respiração de grãos, insetos, ácaros, fungos, bactérias e propriedades físicas do produto armazenado (calor específico, condutividade térmica, massa específica e porosidade), dentre outras (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

2.6.1. Transferência de Calor em Grãos Armazenados

A velocidade do vento, temperatura do ar ambiente, radiação solar, e parâmetros estruturais do silo (tamanho, forma, tipo de fundação, número e

tamanho de aberturas na estrutura) afetam diretamente na transferência de calor entre o ambiente e a estrutura de armazenamento e, conseqüentemente, na transferência de calor no interior da massa de grãos armazenada. A transferência de calor do ambiente para o silo se dá por convecção, radiação ou condução do solo para o silo, se este estiver fixado no solo (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

A transferência de calor por convecção depende do coeficiente de transferência convectiva que sofre a influência da velocidade do vento, da forma e do tamanho do silo, e da diferença de temperatura entre a superfície do silo e a temperatura do ar ambiente. O fluxo de calor entre a massa de grãos e o meio ambiente torna-se maior à medida que o coeficiente convectivo aumenta. A dependência do coeficiente da temperatura da superfície do silo transforma o problema de transferência em um problema não linear, requerendo uma solução iterativa (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

A quantidade de radiação solar que incide em uma estrutura de armazenamento é dependente do posicionamento da estrutura quanto aos raios solares, do número anual de horas nuvem e da latitude do local (JAYAS et al., 1995). A conversão desta radiação em calor a ser transferido para os grãos armazenados depende da absorvidade térmica, e da emissividade do material estrutural, bem como da temperatura da superfície do silo.

YACIUK et al. (1975) investigaram os efeitos de silos com paredes de diferentes materiais nas temperaturas de uma massa de grãos. Em termos de isolamento térmico, o aço galvanizado foi considerado o pior material para se usar nas paredes do silo. Aço ou madeira, pintadas de branco, e concreto são igualmente eficientes para o armazenamento de grão. Aço galvanizado tem uma absorvidade alta para radiação solar (aproximadamente 0,89) e uma baixa emissividade (aproximadamente 0,23); quando pintado de branco estes valores tornam-se, aproximadamente, 0,18 e 0,95, respectivamente. Uma parede preta, com valores de absorvidade e emissividade iguais a 1,0 é tão boa quanto uma pintada de branco, pois ganhará e perderá uma grande quantidade de energia durante o dia e a noite. Assim, a emissividade do material da parede do silo

exposto a temperaturas atmosféricas é um fator predominante. Entretanto, a parede preta atingirá uma temperatura maior com a incidência de radiação solar e perceberá uma maior variação de temperatura no período entre noite e o dia.

A quantidade líquida de calor que é transferida dos contornos do silo para a massa de grãos armazenados é distribuída através do produto por condução, quando se considera desprezível a transferência de calor por convecção no interior da massa (MUIR e CHANDRA, 1970).

Segundo CONVERSE et al. (1973), a transferência de calor, em grãos armazenados, acontece de forma lenta e defasada, ou seja, os grãos, por serem mal condutores de calor, impedem que uma frente de calor se propague rapidamente dentro da massa. Assim, a variação de temperatura percebida nas camadas mais superficiais da massa é detectada de maneira defasada e amortecida nas camadas mais profundas da massa. Valores de temperaturas, simuladas e experimentais, de várias localizações no interior de silos mostram que as variações diurnas de temperatura afetam os grãos só até uma distância de 0,125 m da estrutura da parede (CONVERSE et al. 1973; MUIR et al., 1980; FERREIRA e MUIR, 1981).

ABBOUDA et al. (1992a) verificaram que a inércia térmica do silo investigado (1,42 m de diâmetro) foi de, aproximadamente, 7 a 10 dias, ou seja, a temperatura no centro do silo respondia à uma variação ambiental de temperatura apenas após uma defasagem de 7 a 10 dias.

2.6.2. Transferência de Massa em Grãos Armazenados

Em um silo, independente do formato, as camadas mais externas de grãos ficam mais expostas às variações bruscas de temperatura, ou seja, submetidas a gradientes maiores de temperatura e umidade. Os grãos, nestas regiões, se apresentam com um teor de umidade mais reduzido, devido aos maiores gradientes de temperatura. O efeito da umidade relativa do ar atmosférico é mais significativo em grãos com ventilação forçada (aerado) do que em uma massa de grãos não ventilada (não aerada). Porém, a umidade relativa afeta a transferência de umidade indiretamente, pelas trocas gasosas entre a massa de ar intergranular

e a massa de ar externa à estrutura (ambiente). A movimentação destas massas de ar pode ser causada por diferença de pressão e de temperatura, entre o interior e o exterior da estrutura de armazenamento, que pode conter muitas aberturas pequenas (SAUER, 1992; JAYAS et al., 1995).

O teor de umidade e a temperatura inicial dos grãos influenciam diretamente na sua conservação. ABBOUDA et al. (1992b) concluíram que o tamanho do silo e o teor de umidade inicial do produto influenciam na temperatura do grão durante a armazenagem. Em geral, baixos teores de umidade resultam em baixas temperaturas de armazenagem pois um baixo teor de umidade, além de reduzir as atividades biológicas e respiração do grão, ainda diminuem a condutividade térmica do produto. O tamanho do silo tem um efeito significativo no teor de umidade do produto durante a armazenagem; silos pequenos têm maiores perdas de umidade do que silos grandes, devido as menores camadas de grãos expostas ao ambiente. Para silos do mesmo tamanho, grãos com alto teor de umidade inicial perdem mais umidade do que grãos com menores teores de umidade inicial. Verificaram, também, a existência de gradientes de umidade (radial e axial) no interior da massa de grãos em cada um dos silos investigados. Na direção radial, grãos próximos à parede, têm teor de umidade menor do que os do centro do silo. Já na direção axial, os grãos localizados próximos à superfície da massa têm menor teor de umidade do que aqueles situados em camadas abaixo desta superfície. A variação no teor de umidade perto da parede e na superfície da massa de grãos se dá devido à transferência de calor por convecção natural. Segundo os autores, no inverno as deteriorações nos grãos foram insignificantes (baixas temperaturas), enquanto no verão ocorreram grandes focos de deterioração, localizados próximos ao fundo do silo (migração de umidade).

FREER et al. (1990), estudando a armazenagem de grãos com altos teores de umidade em graneleiros, concluíram que o teor de umidade inicial é que influencia a migração de umidade na massa de grãos.

A qualidade de grãos armazenados pode ser controlada através dos níveis de CO₂ no ar intergranular (WHITE et al., 1982; JAYAS et al., 1995). EMOND

et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático tridimensional (difusão transiente em uma mistura de gás) para prever a distribuição temporal de gás no interior de caixas empilhadas. O modelo incorpora, simultaneamente, o consumo de oxigênio, a geração de gás carbônico e a porosidade na camada de produto. O modelo matemático foi usado para prever a concentração de gás em diferentes tipos de caixas. Os resultados mostraram que a concentração de CO₂ nas caixas aumentou enquanto que a concentração de O₂ diminuiu com o aumento da distância ao ponto da perfuração para inserção de gás.

STEELE et al. (1969), estudando a produção de CO₂ durante a armazenagem de milho com diferentes teores de umidade e temperaturas, concluíram que quanto maior a temperatura e o teor de umidade, maior será a produção de CO₂.

A produção de calor, umidade e CO₂ pela respiração de grãos, insetos, ácaros, fungos e bactérias é afetada pelas propriedades físicas (calor específico, condutividade térmica, massa específica e porosidade) do produto. A respiração dos grãos e o aumento da infestação resultam num aumento na temperatura e no teor de umidade dos grãos. A temperatura, o teor de umidade e a concentração de CO₂ afetam a geração interna de calor. O teor de umidade, a concentração de CO₂ e as propriedades físicas afetam o processo de transferência (JAYAS et al., 1995).

2.7. Modelagem Matemática

De acordo com o exposto, observa-se que o processo de transferência de calor e de massa em um ecossistema (grãos armazenados em silo) é afetado por uma série de parâmetros que se encontram relacionados entre si e, também, são dependentes das variações climáticas, da posição espacial na massa de grãos e do tempo de armazenagem. A realização de experimentos para se obter as informações necessárias para se ter o domínio sobre os processos de transferência nestes ecossistemas, visando uma armazenagem segura dos grãos, é uma tarefa

dispendiosa e quase impossível de ser executada devido ao grande número de variáveis envolvidas.

A modelagem matemática de sistemas e processos físicos é de grande importância em engenharia, pois permite que variações em parâmetros possam ser avaliadas com rapidez e reduz os custos de projetos (FRANCA et al., 1995). Assim, as conseqüências de variações nas dimensões, geometria, propriedades dos materiais e condições externas, entre outras, podem ser facilmente estudadas por simulação em computador. O uso de modelagem matemática na solução de problemas apresenta inúmeras vantagens: (a) exige menos recurso e tempo do que se necessitaria em investigações experimentais; (b) permite analisar sistemas com os quais seria impossível realizar investigações experimentais; (c) proporciona a análise do comportamento de corpos em regimes anormais ou extremos de funcionamento; e (d) permite a complementação investigações experimentais com informações mais detalhadas.

Os processos de transferência de calor e de massa em um ecossistema podem ser analisados com base nos princípios de fenômenos de transporte e, geralmente, são descritos por equações diferenciais parciais. A solução destas equações diferenciais parciais, impondo-se condições iniciais e de contorno adequadas, proporciona a determinação da distribuição das variáveis físicas: temperatura, teor de umidade, e concentração de gás envolvidas no ecossistema. Devido às relações entre as variáveis, os modelos de transferência são, geralmente, não lineares e requerem, assim, soluções iterativas.

Idealmente, soluções analíticas das equações diferenciais que expressam os modelos matemáticos deveriam ser obtidas; os resultados, neste caso, seriam exatos. Entretanto, os modelos matemáticos de ecossistemas de grãos armazenados são complexos e, geralmente, não permitem este tipo de solução. Normalmente, os sistemas envolvem materiais não homogêneos, geometrias irregulares e condições de contorno variáveis.

Soluções analíticas de modelos de transferência em ecossistemas de grãos armazenados têm sido obtidas quando se consideram simplificações no modelo (formas geométricas simples, materiais com propriedades físicas constantes e

variações preestabelecidas das condições de contorno). As soluções analíticas para várias situações são apresentadas em diversas literaturas (JAYAS et al., 1995).

Entretanto, para se obter distribuições de temperatura, teor de umidade e concentração de gás em um ecossistema, usando um modelo que retrate o mais próximo possível condições reais, as soluções das equações diferenciais que descrevem o comportamento de transferência de calor e de massa deverão ser obtidas com o emprego de alguma técnica numérica.

2.7.1. Métodos Numéricos

As soluções de equações diferenciais, obtidas usando-se métodos numéricos, são aproximadas em contraste com as soluções analíticas que são exatas. Entretanto, a utilização de métodos numéricos apresenta flexibilidade para a inclusão de condições de contorno complexas, de variações (espaciais e temporais) das propriedades físicas dos grãos e dos materiais estruturais, entre outras. Soluções usando técnicas numéricas só proporcionam valores para as variáveis investigadas em determinados pontos do sistema, denominados nós ou nodos. Os métodos numéricos mais comumente usados para resolução de equações diferenciais parciais são os de diferenças finitas e de elementos finitos. O método de diferenças finitas pode ser prontamente usado para resolver problemas uni, bi e tridimensionais quando os contornos são simples. Quando o contorno do sistema é curvo ou irregular, o método torna-se mais complexo. Entretanto, SINGH e THORPE (1993) desenvolveram um procedimento, relativamente simples, para modelar transferência de calor, umidade e momentum em grãos armazenados em um recipiente de qualquer formato. No método de elementos finitos este tipo de problema não existe.

Nos dois métodos, o processo de solução inicia-se com a discretização do sistema. A região de interesse (sistema) é dividida em sub-regiões conectadas em pontos comuns, denominados nós ou nodos. Os tamanhos das sub-regiões podem variar; sub-regiões menores são usadas onde os gradientes esperados nas

variáveis a serem preditas são maiores. As variáveis a serem preditas têm valores distintos nos nodos.

No método de diferenças finitas, as equações diferenciais parciais, que descrevem o processo de transferência em grãos armazenados, são transformadas em equações contendo relações de variações finitas (espaciais e temporais). A seguir, estas equações são aplicadas a cada um dos nós, obtendo-se, assim, um sistema de equações a ser resolvido para os valores nodais (INCROPERA e DE WITT, 1996).

Dentre os vários pesquisadores que vêm usando o método das diferenças finitas para solução de problemas diversos, citam-se CHANG et al. (1993) que desenvolveram um modelo para prever a distribuição de temperatura em uma massa de grãos em um silo metálico exposto ao sol. Concluíram que o modelo é aplicável para a obtenção de temperaturas na massa de grãos, aerada e sem aeração.

O método dos elementos finitos assume que qualquer distribuição contínua em uma região, tal como a temperatura, pode ser aproximada por um modelo discreto composto de um conjunto de funções contínuas definidas em um número finito de sub-regiões ou elementos (IRUDAYARAJ et al., 1992; SEGERLIND, 1984). As equações que regem o processo, em cada nó, são obtidas pela minimização de um funcional que corresponde ao problema físico ou pelo método de resíduos ponderados. O sistema de equações resultante é, então, resolvido para os valores nodais. Descrições detalhadas do método de elementos finitos podem ser encontradas em ZIENKIEWICZ (1977), SEGERLING (1984), REDDY (1993).

Nas últimas duas décadas, o método de elementos finitos tem sido usado para resolver uma grande variedade de problemas (FERGUSON, 1995). GONG et al. (1997) usaram esta técnica para desenvolver um modelo bidimensional para a secagem de grãos de trigo baseado na teoria da difusão de líquidos. JIANG e JOFRIET (1987) desenvolveram um modelo bidimensional para estimar a distribuição de temperatura em silagem armazenada em um silo submetido a um

fluxo de radiação solar. GUSTAFSON et al. (1979) analisaram a transferência de calor transiente e as tensões térmicas em um grão de milho.

2.8. Modelos Matemáticos de Transferência de Calor

Durante o armazenamento de grãos em um silo situado em ambiente aberto, a radiação solar incide de uma maneira variável ao longo dos contornos da estrutura e processos de deterioração podem ocorrer em qualquer localidade da massa de grãos. Estes motivos, entre outros, fazem com que o processo de transferência de calor em ecossistemas (grãos armazenados em um silo) requeira uma análise tridimensional.

Dependendo da situação, a análise pode ser simplificada e modelos de transferência de calor unidimensionais ou bidimensionais podem ser empregados com sucesso. A investigação das possíveis simetrias (geométricas e das condições de contorno) que possam existir é essencial para a simplificação do modelo a ser usado para analisar a transferência de calor em um sistema. As previsões dos modelos de transferência de calor encontrados na literatura estão, na maioria dos casos, dentro da faixa de erro de 3 °C (JAYAS et al., 1995).

Os modelos de transferência de calor em estruturas armazenadoras, desenvolvidos até hoje, consideram que a geração interna de calor na massa de grãos é desprezível e que as propriedades físicas do produto são constantes. Estas considerações são razoáveis quando os grãos (com teor de umidade uniforme) estão isentos de impurezas, de insetos e de ácaros. Adotando estas suposições, pode-se obter uma solução analítica para o problema de transferência de calor em grãos armazenados. Contudo, as variações das propriedades físicas e a geração interna de calor podem ser significativas na massa de grãos armazenada. As variações nas propriedades físicas e a geração interna de calor podem ocorrer devido a gradientes de umidade na massa de grãos (horário do enchimento do silo ou migração de umidade) e distribuição desuniforme (em quantidade, localização e tipo) de materiais estranhos na massa de grãos (JAYAS et al., 1995).

A resolução das equações diferenciais parciais requer a introdução de condições iniciais e de contorno envolvidas no problema investigado. As condições de contorno definem o processo de transferência de calor entre o ambiente externo e a face externa da estrutura de armazenagem. Para silos armazenadores, devem ser definidas condições de contorno para a base, cobertura e paredes laterais da estrutura.

Quando se consideram silos cilíndricos, um modelo unidimensional pode ser usado para se obter o fluxo de calor radial, analiticamente, desde que as seguintes considerações sejam feitas: (a) o material homogêneo; (b) o silo se aproxima de um cilindro infinito (altura bem maior que diâmetro); (c) mesma condição de contorno na base e cobertura da estrutura e (d) mesma condição de contorno ao longo de toda parede lateral do silo. Neste caso, as condições de contorno, mais comuns, impostas às paredes laterais do silo são: transferência de calor por convecção, temperatura do ar externo é considerada constante e temperatura do ar externo é uma função conhecida do tempo. Se variações temporais reais de temperatura forem usadas como condição de contorno, o problema só poderá ser resolvido numericamente. Em problemas unidimensionais, normalmente, não se considera o efeito de radiação solar, embora YACIUK et al. (1975) tenha incluído este efeito em seu modelo. As condições de contorno impostas à base e à cobertura da estrutura não são importantes em problemas de fluxo de calor unidimensionais.

Normalmente, em problemas de transferência de calor bi e tridimensionais, o fluxo de calor proveniente das fundações das estruturas de armazenamento é considerado igual a zero ou calculado usando-se as propriedades do solo e do material da fundação, juntamente com a temperatura do solo abaixo da fundação. Quando se considera um fluxo de calor igual a zero, os resultados podem apresentar erros significantes, principalmente na região inferior do silo. A transferência de calor das paredes laterais e da cobertura da estrutura para o ambiente externo se dá por convecção e radiação. A consideração de temperatura constante nestes contornos não representa "problema real" desde que a estrutura (silo-protótipo ou grãos em saco) esteja localizada em um ambiente com

temperatura controlada razoavelmente. Na modelagem da transferência de calor bidimensional em silos cilíndricos ou retangulares, a troca de calor por absorção de ondas curtas, radiação solar, reflexão e radiação de ondas longas emitida pelas paredes, tem sido considerada por vários pesquisadores como sendo uniforme ao longo das paredes laterais e cobertura da estrutura. Para a maioria dos silos armazenadores, os efeitos de radiação solar variam ao longo das paredes laterais e cobertura e, neste caso, apenas um modelo tridimensional pode incorporar este efeito variável (JAYAS et al., 1995).

Em termos de condições iniciais a serem impostas ao sistema, considera-se, no tempo inicial de armazenamento, uma temperatura uniforme em toda massa de grãos ou, se um método numérico é usado na solução do problema, valores diferenciados de temperatura para cada nó. Variações de temperatura na massa de grãos sempre ocorrem durante o enchimento do silo devido à variação das condições ambientais e do produto.

O efeito da temperatura sazonal na variação da temperatura da massa de grãos é uma função da distância do grão à parede do silo. CONVERSE et al. (1973) determinaram a distribuição de temperatura em várias posições de uma massa de grãos de trigo armazenados em um silo de concreto (5,5m de diâmetro e 33,5m altura). A temperatura dos grãos, em contato direto com a parede lateral foi considerada variar com o tempo de acordo com uma função senoidal (temperatura média de 14,2 °C e amplitude de 15,3 °C). As propriedades dos grãos e a temperatura inicial da massa de grãos foram consideradas constantes. A diferença entre a temperatura do ar ambiente e a do trigo tornou-se maior à medida que distância da parede aumentava. YACIUK et al. (1975) e ABOUDA et al. (1992a) mostraram através dos resultados de suas pesquisas que as flutuações de temperatura no centro de um silo diminuem quando o diâmetro do silo é aumentado. Nas condições subtropicais do Brasil central (São Paulo), temperaturas no centro de um silo de 1,5 m de diâmetro podem aproximar-se de 45 °C, enquanto que em um silo de 5 m de diâmetro, a maior temperatura no centro será em torno de 35 °C (FERREIRA e MUIR, 1981). A temperatura dos

grãos, no início do armazenamento, afeta significativamente a distribuição de temperatura futura da massa de grãos armazenados.

De acordo com ALAGUSUNDARAM et al. (1990), os resultados da análise tridimensional de transferência de calor em grãos armazenados em silos mostram que a diferença de temperatura entre pontos, à meia distância do raio do silo, situados no Sul e no Norte pode chegar a 15 °C; diferença que diminui com o aumento do diâmetro do silo. Para um silo de diâmetro igual a 6 m uma diferença de 8 °C, a uma profundidade de 4 m, pode propiciar um ambiente melhor para o desenvolvimento de artrópodes e atividade de microorganismo no lado Sul de uma massa de grãos de sorgo que no lado Norte, isto para o Hemisfério Norte.

BUSCHERMOHLE et al. (1988) detectaram uma diferença de temperatura de 7 °C entre pontos equidistantes radialmente localizados no Norte e Sul de uma massa de grãos de milho armazenados em um silo de 6,4 m de diâmetro na Carolina do Sul. Para climas temperados do Hemisfério Norte, os resultados desses estudos sugerem que, um maior monitoramento de temperatura deve ser realizado nos grãos situados no lado Sul, visto ser este uma região propícia a uma maior atividade biológica devido a temperatura alta.

Gradientes de temperatura na massa de grãos podem causar correntes convectivas e, assim, influenciar a transferência de calor na massa de grãos. Os efeitos das correntes convectivas foram modelados por MUIR et al. (1980) na análise da transferência de calor, nas direções radiais e axiais, em um silo cilíndrico. A inclusão de correntes convectivas no modelo, além de não contribuir para a obtenção de resultados mais precisos, aumentou o tempo computacional necessário às simulações. Segundo SMITH e SOKHANSANJ (1990), para a convecção afetar os valores de temperatura de um meio poroso, o número de Rayleigh deve ser elevado. Para uma massa de cereais pequenos, como trigo, os autores afirmam que o número de Rayleigh não é grande o bastante para que a convecção influencie as temperaturas do meio, fato este confirmado por MUIR et al. (1980). Portanto a transferência de calor em uma

massa de grãos armazenados pode ser modelada como um problema apenas de condução de calor com condições de contorno apropriadas.

BELL (1978) desenvolveu um modelo computacional para prever a temperatura de grãos armazenados em um silo metálico cilíndrico, onde a temperatura da massa de grãos foi calculada pelo método implícito de diferenças finitas. O autor concluiu que o seu modelo apresentou ajuste satisfatório quando comparado com dados experimentais.

DONA e STEWART JR. (1988) desenvolveram um modelo para simular o processo de transferência de calor por convecção natural em recipientes circulares contendo milho, com alto teor de umidade, e uma geração uniforme de calor no meio. Os autores concluíram que a temperatura dos grãos se eleva com a elevação da taxa de geração de calor.

FREER et al. (1990) desenvolveram um modelo bidimensional para descrever a distribuição de temperatura e de umidade em um graneleiro. Concluíram que a temperatura e o teor de umidade inicial dos grãos influenciaram na migração de umidade e que o efeito combinado de altas temperaturas e teores de umidade resultam em migração de umidade na região próxima a superfície da massa de grãos. Esta região apresentou-se como a mais susceptível a deteriorações, atividade e crescimento de insetos.

BALA et al. (1990) simularam (análise unidimensional) a variação de temperatura em trigo armazenado durante a armazenagem. Comparação dos resultados simulados e experimentais mostraram que o modelo pode ser utilizado para selecionar localizações geográficas para instalações de estruturas não aeradas para armazenagem de grãos.

METZGER e MUIR (1983) desenvolveram um modelo bidimensional em que se considera a transferência de calor por condução e convecção forçada em grãos armazenados em silo cilíndrico. O modelo prediz, satisfatoriamente, a temperatura e a umidade na massa de grãos e pode ser utilizado para outras aplicações em aeração de grãos.

MANBECK e BRITTON (1988) desenvolveram um modelo para prever a temperatura superficial em uma chapa fina, de um silo metálico corrugado em dia

claro. Resultados de simulações mostraram que o declínio máximo da temperatura média na parede do silo foi de 4 a 8 °C por hora em dia de vento e de 1 °C por hora em dia calmo.

CHANG et al. (1993) desenvolveram um modelo para predição de temperatura em grãos armazenados, em um silo cilíndrico, com aeração. O modelo e os parâmetros utilizados no modelo se aplicam para prever a temperatura dos grãos armazenados com ou sem aeração.

2.9. Geração de Calor e Desenvolvimento de Insetos

Modelos matemáticos de transferência de calor e umidade (massa) representam uma ótima saída para projetar e avaliar métodos de reduzir gradientes de temperatura e teor de umidade em grãos armazenados, e para prever, probabilisticamente, o desenvolvimento e localizações de focos de deterioração dentro do silo e o tempo de armazenamento do produto.

Grãos, fungos e insetos, assim como todos os organismos vivos, respiram. Quanto maior a temperatura da massa de grãos, maior é a taxa de respiração do produto. Quando a respiração ocorre rapidamente e a produção de calor é maior que a sua dissipação, a temperatura do produto armazenado eleva-se, podendo aumentar as chances de crescimento dos fungos e insetos.

Existem dois tipos de aquecimento de grãos: (1) o aquecimento de grãos secos causado por insetos que podem desenvolver-se nos grãos com umidade de, aproximadamente, 15% ou menos, resultando num aumento de temperatura de até 42°C; e (2) aquecimento de grãos úmidos causado por microrganismos que se desenvolvem em grãos com umidade de, aproximadamente, 15% ou mais, resultando em temperaturas de até 62°C. Estes dois tipos de aquecimento podem acontecer simultaneamente, dentro de uma massa de grãos, e, também, o aquecimento de grãos secos pode ser substituído pelo aquecimento de grãos úmidos (SINHA e MUIR, 1973; SAUER, 1992).

Insetos que infestam grãos armazenados causam: (a) perda de massa do produto; (b) desvalorização do material; (c) poluição da massa de grãos; (d)

aquecimento da massa no local de infestação; (e) maior atividade respiratória do produto; (f) aumento do consumo de matéria seca e (g) agilização da deterioração do produto (PEDERSEN, 1992).

A sobrevivência e reprodução de agentes biológicos na massa de grãos é, em grande parte, dependente da temperatura e do teor de umidade do produto armazenado. Segundo JAYAS et al. (1995) existe uma variação considerável das condições ótimas para cada espécie de inseto, ácaro e fungo. A Tabela 1 apresenta faixas de temperatura e umidade relativa correspondentes às condições ótimas para sobrevivência e multiplicação destas espécies.

Tabela 1 - Faixas de temperatura e umidade relativa correspondentes à sobrevivência e às condições ótimas para o desenvolvimento e multiplicação de insetos, ácaros e fungos.

	Temperatura °C		Umidade Relativa %	
	Sobrevivência	Ótima (média)	Sobrevivência	Ótima
Insetos	8 – 41 ⁽¹⁾	30 ⁽²⁾	1 – 99 ⁽¹⁾	50 – 70 ⁽²⁾
Ácaros ⁽³⁾	3 – 41	25	42 – 99	70 – 90
Fungos ⁽³⁾	-2 – 55	30	70 – 90	80

⁽¹⁾ SINHA e WATTERS (1985) citado por JAYAS et al. (1995).

⁽²⁾ HOWE (1960); SINHA (1973) e SINHA e WATTER (1985), citado por JAYAS et al. (1995).

⁽³⁾ JAYAS et al. (1995).

O gênero *Sitophilus*, pertencente à família Curculionidae da ordem Coleoptera, é classificada como inseto primário, pois os adultos são capazes de romper o grão. Os adultos medem de 2,5 a 4 mm de comprimento, são bons voadores e podem infestar os grãos no campo e em todas etapas do seu processamento. Podem viver de 4 a 5 meses, dependendo da temperatura e umidade relativa do meio. A fêmea do *Sitophilus* pode ovopositar até 150 ovos durante sua vida. A condição ótima para seu desenvolvimento é na temperatura de 27 °C e 70% de umidade relativa do ar (REES, 1996).

O aquecimento localizado de grãos armazenados em um silo pode ser devido ao ataque de insetos ou ao crescimento de fungos. Existe uma relação direta entre a temperatura de grãos armazenados e o número de insetos que os infestam e, também, com a intensidade de infecção fúngica de grãos úmidos. Em uma infestação por insetos, segundo FERREIRA (1983), uma temperatura de 10

°C é suficiente para manter o metabolismo e a reprodução dormentes e, grãos mantidos abaixo de 20 °C, estão protegidos da maioria dos insetos. Entretanto, uma temperatura superior a 37,5 °C é letal para a maioria deles.

COFIE-AGBLOR et al. (1995a) mediram a produção de CO₂ pela respiração do inseto *Cryptolestes ferrugineus* em grãos armazenados em condição adiabática variando: (a) temperatura (15, 20, 25, 30 e 35 °C); (b) teor de umidade (12, 15 e 18% b.u.); (c) danos (trigo com 0, 10 e 20% de grãos quebrados); (d) idade dos insetos (1, 4 e 8 semanas); (e) população de adultos (1250, 2500 e 5000 insetos por 200 gramas de trigo) e (f) estágios imaturos (larvas de segundo, terceiro e quarto instar com densidade de 1250 larvas por 200 gramas de trigo). Concluíram que a taxa de produção de CO₂ aumenta com a elevação da temperatura (de 15 para 35 °C), com a elevação do teor de umidade (de 12 para 18% b.u.), e, também, com o aumento de grãos quebrados. A idade dos insetos e das larvas afetou a taxa de produção de CO₂; quanto mais velho o inseto ou a larva, maior será a taxa de produção de CO₂. O autor conseguiu adequar o modelo para a obtenção da relação entre a taxa de produção de CO₂, temperatura e teor de umidade.

COFIE-AGBLOR et al. (1995b) mediram a produção de calor de cinco besouros (*S. granarius*, *S. oryzae*, *Tribolium confusum*, *T. castaneum* e *Rhizopertha dominica*) em trigo armazenado, com teor de umidade de 14,5% b.u., a duas temperaturas iniciais (20 e 30 °C) durante 10 horas. Concluíram que a taxa de produção de calor foi uma função da temperatura inicial dos grãos e da espécie em questão. O inseto *S. oryzae* foi o que teve maior taxa de produção de calor, em função de sua biomassa, e as equações para a taxa de geração de calor para estas condições foram apresentadas.

COFIE-AGBLOR et al. (1996) estudaram a produção de calor devido à respiração do inseto *C. ferrugineus*, com três idades (uma, quatro e oito semanas) e diferentes densidades (insetos por grama de trigo). A produção de calor pelo inseto foi afetada pela temperatura inicial do grão, teor de umidade, idade do inseto adulto e densidade da população de insetos. O aumento de temperatura inicial dos grãos causou um aumento na taxa de produção de calor dos insetos.

Os dados obtidos podem ser utilizados para simular a formação de bolsas de calor pelo inseto *C. ferrugineus*.

Portanto, um modelo ambiental tem que prever a temperatura e o teor de umidade, em intervalos de tempo constantes, que coincidam com o passo de tempo usado no modelo de dinâmica populacional de insetos. Se as previsões do modelo ambiental forem para diferentes regiões de uma massa de grãos (superfície, parede do silo, etc.), então, o modelo terá que simular o desenvolvimento da população, separadamente, para cada região da massa de grãos, que estará se baseando, preferencialmente, no comportamento da temperatura e do teor de umidade.

Algumas tentativas foram feitas para integrar modelos ambientais com os de dinâmica populacional de insetos (JAYAS et al., 1995). Dentre estes, citam-se: BAKER, (1988); BARNEY et al. (1991); HAGSTRUM e MILLIKEN, (1991); LOCATELLI e DAOLI, (1993); PHELPS et al., (1993); PLARRE, (1996); TREMATERRA et al. (1996); ANNIS e MORTON, (1997) e NAKAKITA e IKENAGA, (1997).

2.10. Propriedades Térmicas

O modelamento da transferência de calor em produtos agrícolas requer o conhecimento das propriedades térmicas do produto principalmente, a condutividade térmica e o calor específico. São poucas, entretanto, as informações disponíveis sobre as propriedades físicas dos produtos agrícolas produzidos no Brasil. Essa deficiência explica a utilização muito restrita de técnicas de modelagem físico-matemática, tanto para o processamento de produto agrícolas e alimentícios quanto para a elaboração de projetos (SOARES, 1988).

O mecanismo de transferência de calor, normalmente, é interpretado como uma propagação da energia cinética pelas oscilações moleculares. Quando a energia cinética aumenta, com a elevação da temperatura, esta energia é transferida às moléculas circunvizinhas.

A transferência de calor numa massa de grãos é um fenômeno físico complexo. Este fenômeno ocorre principalmente por condução e convecção. O calor é transferido de grão para grão por condução, nos pontos de contato entre um e outro. O calor, também, é transferido de uma sessão para outra da massa por meio de convecção, em decorrência do fluxo de ar intergranular motivado por diferença de temperatura entre pontos da massa de grãos, ou em relação ao meio exterior.

Pelo fato da transferência de calor ocorrer numa massa de produto que envolve grão e ar é de interesse, para a análise do processo, a determinação das propriedades térmicas aparente do leito poroso (ROSSI et al., 1982).

Em um material homogêneo, o calor se difunde com certa velocidade em todas as direções e as propriedades térmicas não dependem do volume ou da forma do material examinado. Entretanto quando se trata de um material não heterogêneo como uma massa de grãos (material granular e higroscópico), a massa e a forma das partículas influenciam na quantidade de calor transferido por unidade de área.

Segundo ROSSI e ROA (1980), para determinar ou predizer as mudanças de temperatura internas do produto, sujeito aos processos de secagem e armazenamento, necessita-se de conhecimento de sua condutividade térmica, k , além da difusividade térmica e do calor específico do produto.

As propriedades térmicas de um material são influenciadas pelo teor de umidade do produto, temperatura, composição, densidade e porosidade (STOLFF, 1972).

2.10.1. Condutividade Térmica

A condutividade térmica de um material é uma medida da intensidade de calor que é transferido de uma região quente para uma região mais fria, do material. A transferência de calor do ambiente para a massa de grãos, por condução, ou “vice-versa”, é um processo lento, visto que o coeficiente de condução de calor do grãos é relativamente baixo. Esse aspecto é importante para uma armazenagem segura, visto que, grãos armazenados em grande quantidade

podem manter maior estabilidade de temperatura do que pequenas quantidades, devido à diferença de espessura de camadas.

Denomina-se condutividade térmica real (ou coeficiente de condutibilidade térmica), a taxa de calor que flui por condução, por unidade de tempo, normal a uma superfície de área unitária, quando se estabelece um gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dx}$, entre duas superfícies paralelas e de espessura unitária. A condutividade é denominada aparente (ou efetiva) quando são incluídos outros mecanismos de transmissão de calor.

No caso unidimensional, a condutividade térmica pode ser definida por meio da lei de Fourier, expressa como:

$$q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

em que,

k – condutividade térmica, $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$;

T – Temperatura, $^\circ C$;

A – área, m^2 ;

x – distância, m.

A condutividade térmica de grãos depende da natureza dos grãos e da massa de grãos (estrutura física, composição química e arranjo físico de uma amostra), de sua temperatura e de seu teor de umidade. Basicamente, os métodos de medida da condutividade térmica são divididos em duas categorias: os baseados em fluxo de calor em regime permanente, e os baseados em regimes transientes. Os métodos de regime permanente ou estacionários consistem, basicamente, em resolver as equações de condução de calor para regime permanente em placas paralelas, cilindros e esferas concêntricas. Os métodos de regime transiente consistem em resolver a equação de condução de calor para regimes transientes com o uso de diferentes arranjos geométricos. Dentre os valores de condutividade térmica de grãos disponíveis na literatura, a maioria foi determinada seguindo a metodologia do regime permanente. De modo geral, este não é um método apropriado para produtos biológicos, devido aos longos

intervalos de tempo necessários para as determinações, nos quais podem ocorrer modificações significativas no teor de umidade do produto.

A condutividade térmica de grãos e oleaginosas são linearmente dependentes do teor de umidade.

$$k(M) = k_d + a_1 M \quad (2)$$

em que,

k_d - condutividade térmica de uma camada de grãos ($W m^{-1} °C^{-1}$);

a_1 - coeficiente que depende do material;

M - teor de umidade do material.

A condutividade térmica da maioria dos materiais biológicos, inclusive grãos, variam ligeiramente com a temperatura. A influência da temperatura na condutividade térmica de trigo foi estudada por CHANDRA e MUIR (1971). Eles determinaram que a condutividade térmica entre -6 e 20 °C é uma função linear só do teor de umidade.

Existem muitas referências na literatura, nas quais se discutem vários tipos de aparelhos empregados na medição da condutividade térmica de alimentos e grãos.

Problemas de migração de umidade podem ocorrer durante os testes para determinação da condutividade térmica de um material. A transferência de massa é mais pronunciante quando existe uma diferença de temperatura em um meio úmido e permeável. Na maioria dos casos, a umidade é transferida, como vapor, por difusão de regiões mais quentes para aquelas mais frias e, assim, ocorrendo uma condensação na região mais fria. Nesta condição, calor, em grande parte na forma de calor latente, é transmitido por este mecanismo, que é adicionado à transferência de calor por condução. Este fenômeno de migração de umidade altera a condutividade térmica do material. Existe, assim, a necessidade de determinar valores instantâneos de condutividade térmica que incluam o efeito de migração de umidade, para um teor de umidade inicial particular das amostras utilizadas.

Ao contrário de materiais estruturais, que apresentam uma dependência marcante entre a condutividade térmica e a temperatura, a condutividade térmica de materiais biológicos é influenciada mais significativamente pela umidade que pela temperatura. Os limites de temperatura aos quais materiais de engenharia são expostos são muito maiores do que aqueles aos quais materiais biológicos ficam submetidos. Entretanto, como no caso de materiais de engenharia, quando k varia linearmente com a temperatura, o efeito da temperatura pode ser convertido em uma média aritmética entre a condutividade e a os valores extremos esperados para cada temperatura. Se k é uma função não linear da temperatura, a condutividade pode ser determinada através da equação:

$$k = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} k_t dT \quad (3)$$

em que,

k - condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), é uma função não linear de condutividade versus a temperatura (MOHSENIN, 1980);

T - temperatura, $^\circ\text{C}$.

De maneira geral a condutividade térmica de um material se eleva com a elevação da temperatura ou do teor de umidade.

A massa específica ou densidade de produtos granulares (grau de compactação dos grãos), também, influencia a condutividade térmica da amostra. O método pelo qual um silo é enchido e o tempo de residência do produto na estrutura influenciam na condutividade térmica da massa de produto. Quanto maior a compactação deste material maior será sua condutividade térmica. A condutividade térmica do ar no espaço intergranular é muito menor que condutividade térmica da maioria dos produtos agrícolas. Portanto, a condutividade térmica aumenta com diminuições na porosidade. Considerando um teor de umidade constante, a condutividade térmica pode ser uma função linear da massa específica (JAYAS et al., 1995).

$$k = a + b\rho_b \quad (4)$$

em que,

a e b – coeficientes, CHANG (1986) apresentou o valor de a e b para trigo, milho, e sorgo a 22 °C e a vários teores de umidade;
 ρ_b – massa específica.

2.10.1.1. Determinação Experimental da Condutividade Térmica

Um dos métodos mais usados, atualmente, para determinação da condutividade térmica de produtos agrícolas é baseado na transmissão de calor num cilindro infinito com uma fonte de calor linear central. Esta transferência pode ser analisada em regimes permanentes ou transientes.

Este método consiste da utilização de um cilindro (receptor da amostra de grãos), construído de material resistente e de alta condutividade térmica, com diâmetro e comprimento pré-determinado. Longitudinalmente, no centro do cilindro, coloca-se um fio de resistência elétrica conhecida (fonte linear de calor) que será percorrido por uma corrente (baixa amperagem) quando submetido a uma diferença de voltagem. A variação de temperatura do meio é registrada por meio de termopares situados preferencialmente à meia altura do cilindro.

O cilindro infinito é uma idealização que possibilita adotar a hipótese da condução unidimensional na direção radial. É uma aproximação razoável se o cilindro tiver $L/r_o \geq 10$ (INCROPERA e DE WITT 1996).

O equilíbrio térmico do sistema (cilindro infinito e grãos) é essencial para os testes de condutividade serem iniciados. Além disso, fatores de correção para a inércia térmica do sistema devem ser considerados.

Uma importante fonte de erro a ser observada em tal metodologia é a migração de umidade de locais próximos a fonte de calor para as bordas do sistema, devido às regiões de temperaturas diferentes. A maneira de se minimizar este erro é a utilização de correntes baixas na resistência elétrica, propiciando assim menores gradientes de temperatura no produto. Uma outra fonte de erro nesta metodologia é a incerteza envolvida na posição de fixação dos termopares.

A condutividade térmica do produto (grãos), após o sistema entrar em regime permanente, é obtida pela equação:

$$k = -q \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{[2 \pi (T_2 - T_1)]} \quad (5)$$

em que,

q - quantidade de calor fornecida ao fio em (W m^{-1});

r_2 e r_1 - raios externos e internos do cilindro (m);

T_2 e T_1 - temperaturas nos raios externos e internos ($^{\circ}\text{C}$).

O mesmo equipamento (cilindro infinito), usado para a determinação da condutividade em regime permanente, tem sido utilizado por vários pesquisadores para determinação da condutividade térmica em grãos agrícolas utilizando o método do regime transiente (HOOPER e LEPPER, 1950; DICKERSON, 1965; MUIR e CHANDRA, 1970; CHANDRA e MUIR, 1971; REIDY e RIPPEN, 1971; JASANSKY e BILANSKI, 1973; SHARMA e THOMPSON, 1973; SUTER et al., 1975; ALMEIDA, 1979; PASSOS, 1982; SINGH, 1982; DROUZAS e SARAVACOS, 1988; SOARES, 1988; MAROULIS et al., 1991; VOUDOURIS e HAYAKAWA, 1994; FANG et al., 1997).

A equação que governa a transferência transiente de calor em um cilindro infinito quando se considera: (a) geração de calor proveniente de uma fonte infinita central com diâmetro zero e potência constante; (b) meio infinito e homogêneo; (c) condições iniciais do meio isotérmicas e em equilíbrio com o ambiente, pode ser expressa como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} \quad (6)$$

em que,

T - temperatura, $^{\circ}\text{C}$;

t - tempo de aquecimento da amostra, s;

α - difusividade térmica, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;

r - raio de localização do termopar, m;

• q - potência dissipada na fonte, $W m^{-1}$ por unidade de capacidade calorífica volumar ($\rho C - J m^{-3} ^\circ C^{-1}$).

A equação (6) pode ser resolvida para determinar a distribuição de temperatura no meio, que é uma função da potência dissipada pela fonte, do tempo, da posição espacial e das propriedades térmicas. Seguindo o procedimento de HOOPER e LEPPER (1950), pode-se avaliar a condutividade a partir dos valores de temperatura em um ponto especificado a partir da fonte linear de calor, entre os tempos t_1 e t_2 , quando se conhece o fluxo de calor, através da equação:

$$\Delta T = \frac{-Q}{4\pi k} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (7)$$

em que,

Q – potência dissipada na fonte linear de calor, $W m^{-1}$;

k – condutividade térmica, $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$;

t_1 e t_2 – tempos inicial e final.

Materiais biológicos tipicamente exibem algumas características que complicam o uso da técnica da fonte linear de calor. Dentre estas, citam-se: (a) distribuição heterogênea e anisotrópica dos grãos no cilindro (massa de grãos é um meio poroso e é constituída, muitas vezes, de grãos de diferentes tamanhos); (b) significativa resistência de contato entre a interface partícula-ar; (c) migração de calor latente devido à evaporação da água nos poros.

Correções, que consideram a oscilação inicial da fonte de calor e o aquecimento inicial do sistema, têm sido feitas por muitos pesquisadores, utilizando-se um fator de correção, τ_0 , que deve ser subtraído de cada tempo experimental constante na equação (8).

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi k} \ln\left(\frac{t_2 - \tau_0}{t_1 - \tau_0}\right) \quad (8)$$

Erros devido à migração de umidade no produto também existem, entretanto, como o período de tempo gasto nas determinações é pequeno, esse erro é atenuado.

2.10.1.2. Determinação Experimental do Calor Específico

Calor específico de um material pode ser definido como a quantidade de energia (J) necessária para elevar de um grau celsius uma determinada unidade de massa de grãos.

$$C = \frac{Q}{(\rho V)\Delta T} \quad (9)$$

em que,

C - calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

ρ - massa específica (kg m^{-3});

V - volume da amostra (m^3).

MOHSENIN (1980) descreve alguns métodos utilizados para se medir o calor específico de produtos agrícolas. Dentre estes, cita-se o método das misturas por ser o método mais comumente utilizado em pesquisas para determinação de calor específico de grãos e sementes.

2.10.1.3. Difusividade Térmica

A difusividade térmica de uma massa de grãos é uma relação de três diferentes propriedades: a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica. A difusividade térmica pode ser definida como a velocidade de propagação ou difusão de calor em um material. A difusividade térmica de uma massa de grãos é afetada pelo seu teor de umidade e temperatura, como também por sua composição e porosidade. Na maioria dos processos agrícolas o teor de umidade, temperatura, massa específica e porosidade mudam consideravelmente a cada etapa e de ponto a ponto no interior de uma massa de grãos, tendo como resultado uma difusividade térmica variável dentro de um determinado processamento. Os métodos normalmente utilizados para determinação da

difusividade térmica são: estacionários, transitórios ou resolvendo a equação através da condutividade térmica, calor específico e massa específica. REIDY e RIPPEN (1971) descreveram detalhadamente sobre estes métodos.

Na determinação das propriedades térmicas de produtos agrícolas, para se obter resultados confiáveis, é necessário que sejam feitas medidas precisas e seguras dos parâmetros envolvidos. Desta maneira, os modelos de transferência de calor vão prever de forma mais adequada a distribuição de temperatura no sistema. Erros médios menores que ± 2 a 5% nas previsões de modelos são impossíveis de se obter, devido às variações inerentes envolvidas nas amostras experimentais (composição, tamanho, forma, etc). Para se obter modelos adequados as propriedades térmicas devem ser introduzidas como uma função da temperatura, densidade e teor de umidade.

A maioria dos valores de propriedades térmicas encontrados na literatura não incluem a faixa de validade. Uma informação precisa inclui a descrição detalhada do produto, temperatura e os erros obtidos nas medidas. Esta descrição deveria incluir o cultivar, o tamanho individuais dos cereais, maturidade, e pré-tratamentos nas amostras. No detalhamento experimental deveria ser incluído o tamanho de amostra, condições de superfície, porosidade, temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e procedimento de amostragem. Na descrição do equipamento usado para as determinações deveria conter detalhes suficientes de forma que a experiência pudesse ser repetida igualmente. Comparações de fórmulas matemáticas publicadas por diferentes autores, mostram que os valores extremos calculados para o calor específico do trigo podem variar em 15% nos teores de umidade de 1-15% b.u. (MOHSENIN, 1980).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Locais dos Experimentos

O presente trabalho foi realizado na área de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas (Departamento de Engenharia Agrícola) e no Laboratório de Análise de Sementes (Departamento de Fitotecnia), pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

3.2. Modelagem da Transferência de Calor na Massa de Grãos

3.2.1. Considerações Gerais

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo para a predição da distribuição de temperatura em uma massa de grãos de milho armazenada (considerada como sistema) em um silo vertical (cilíndrico e de aço corrugado), de 3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura. A altura da massa de grãos, no interior do silo, era igual a 1,7 m.

Considerou-se no modelo uma transferência de calor tridimensional, em regime transiente, com geração interna de calor (simulando desenvolvimento de fungos e insetos) e influências de condições ambientais e externas ao silo (temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento).

A equação de transferência de calor por condução (tridimensional, transiente e com geração de calor) na massa de grãos armazenados, em coordenadas cilíndricas (r , ϕ , z), pode ser escrita como (INCROPERA e DE WITT, 1996):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

em que,

k - condutividade térmica aparente da massa de grãos (função de r , φ , z e t), $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

ρ - massa específica, $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$;

c_p - calor específico, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

t - tempo, s ;

T - temperatura (função de r , φ , z e t), $^\circ\text{C}$;

\dot{q} - taxa de geração de calor (função de r , φ , z e t), W .

3.2.2. Solução da equação de transferência de calor

A solução aproximada da equação (10) foi obtida usando a técnica de elementos finitos. Inicialmente, o sistema foi dividido em 1728 elementos tridimensionais, do tipo SOLID70, totalizando 2169 nós.

Na técnica dos elementos finitos, um dos procedimentos para analisar a equação (10) é por meio do método dos resíduos ponderados (SEGERLIND, 1984). Neste método, a integral volumétrica para um elemento “e” é dada por:

$$\{R^{(e)}\} = - \int_V [W^T] \left[\frac{k_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k_\varphi}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + k_z \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \right] dV + \int_V [W^T] \left[\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV \quad (11)$$

em que,

$\{R^{(e)}\}$ - integral residual;

$[W]^T$ - função peso;

k_r - condutividade térmica na direção radial r (constante no elemento);

k_φ - condutividade térmica na direção φ (constante no elemento);

k_z - condutividade térmica na direção z (constante no elemento);

V - volume do elemento;

dV - volume elementar.

A equação (11) é avaliada com respeito às coordenadas espaciais para um instante de tempo fixo. Depois de integrada, a equação (11) pode ser expressa na forma matricial, como:

$$[C_e^t] \left\{ \dot{T}_e \right\} + ([K_e^{tb}] + [K_e^{tc}]) \left\{ T_e \right\} = \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} = \{F_e\} \quad (12)$$

em que,

$[C_e^t]$ - matriz de capacitância térmica;

$[K_e^{tb}]$ - matriz de condutividade;

$[K_e^{tc}]$ - matriz de convecção na superfície do elemento;

$\{Q_e^c\}$ - vetor fluxo de calor na superfície do elemento;

$\{Q_e^g\}$ - geração de calor.

$\{F_e\}$ - vetor força no elemento.

Para o sistema, conjunto dos elementos, tem-se:

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\} + [K] \left\{ T \right\} = \{F\} \quad (13)$$

em que,

$[C]$ - matriz de capacitância global;

$[K]$ - matriz de rigidez global;

$\{F\}$ - vetor força global.

Assim, a solução da equação (11) produz um sistema de equações diferenciais lineares de primeira ordem no tempo.

A discretização da equação (12) no tempo pode ser realizada com o auxílio de aproximações por diferenças finitas no domínio do tempo (SEGERLIND, 1984). O resultado da discretização é da forma:

$$([C] + \theta \Delta t [K]) \left\{ T \right\}_{n+1} = ([C] - (1 - \theta) \Delta t [K]) \left\{ T \right\}_n + \Delta t ((1 - \theta) \{F\}_n + \theta \{F\}_{n+1}) \quad (14)$$

em que,

θ - parâmetro de integração transiente;

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$ - intervalo de tempo = 2 hs;

$\{T\}_n$ - temperatura no tempo t_n ;
 $\{T\}_{n+1}$ - temperatura no tempo t_{n+1} ;
 $\{F\}_n$ - vetor força global no tempo t_n ;
 $\{F\}_{n+1}$ - vetor força global no tempo t_{n+1} .

A equação (14) proporciona os valores nodais das temperaturas no instante t_{n+1} , em função dos valores conhecidos das temperaturas no instante t_n , e de forças nos instantes t_n e t_{n+1} e o parâmetro de integração transiente θ .

Os valores das temperaturas nodais, nos diferentes tempos, foram obtidas pela resolução do sistema de equações representado pela equação (14) (SEGERLIND, 1984; REDDY, 1993). Para tal, foi utilizado o programa computacional de análise por elementos finitos “ANSYS” versão 5.6.

Ao observar a equação (14), vê-se que para a implementação do método de elementos finitos são necessárias a introdução de vários parâmetros, alguns relacionados com as propriedades do produto, que foram determinadas experimentalmente e são discutidas posteriormente, e outros relevantes às condições iniciais e de contorno impostas ao sistema e à geração de calor no interior do sistema, que são discutidas a seguir.

3.2.3. Parâmetros de Entrada para o Modelo – contornos do sistema

A Figura 1 apresenta um esquema de um setor do silo cilíndrico mostrando os elementos que foram considerados, neste trabalho, como sendo relevantes ao modelo de transferência de calor.

As condições de contorno impostas aos limites do sistema são mostradas na Figura 2. Os modos de transferência de calor envolvidos nos contornos do sistemas são expostos a seguir.

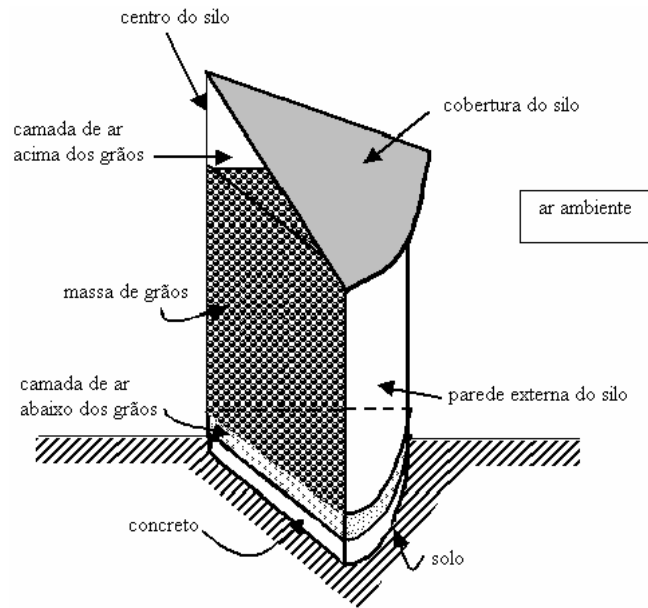


Figura 1 - Setor do silo cilíndrico protótipo mostrando os componentes principais que foram considerados no desenvolvimento do modelo de transferência de calor.

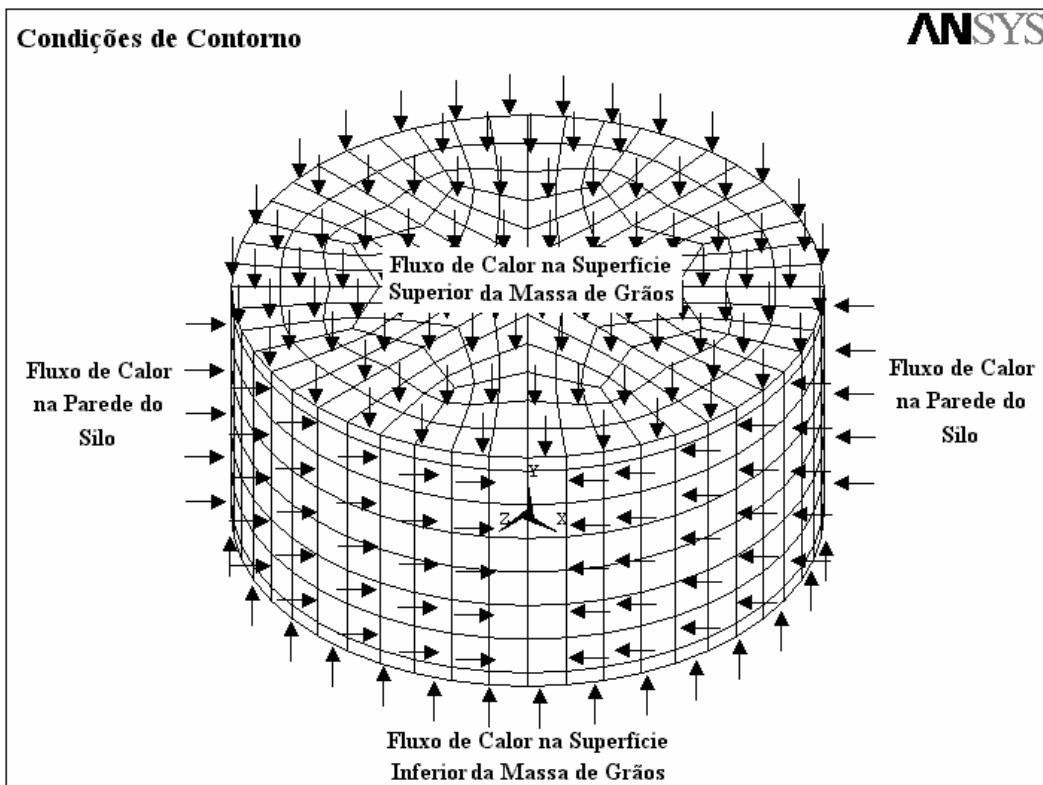


Figura 2 - Condições de contorno aplicadas no sistema.

Superfície superior da massa de grãos

Foi considerado transferência de calor por convecção natural entre a camada de grãos, na superfície superior e o ar acima desta. Observa-se da Figura 2, a temperatura da camada de ar é influenciada pelas condições da cobertura do silo, que está submetida à radiação solar e à convecção com a atmosfera vizinha.

Superfície inferior da massa de grãos

A transferência de calor entre a superfície inferior da massa de grãos e o ar abaixo desta foi considerada, devido ao piso todo perfurado, como convecção natural. A temperatura do ar abaixo dos grãos depende de parâmetros térmicos relacionados com o solo e com a camada de concreto (Figura 2).

Superfície lateral da massa de grãos

A temperatura na superfície da massa de grãos, em contato com a parede do silo, depende da temperatura da parede externa do silo que foi exposta à radiação solar e à convecção.

Assim, para a obtenção de equações que descrevam as temperaturas às quais os contornos da massa de grãos (superfície superior, inferior e lateral) ficaram submetidos, houve necessidade de determinar, os seguintes parâmetros:

- (a) fluxo de radiação solar;
- (b) coeficiente de convecção para parede externa do silo-ar ambiente;
- (c) coeficientes de convecção para superfícies da massa de grãos, inferior e superior, e ar; e
- (d) taxa de calor gerada por insetos e fungos.

As metodologias para a obtenção desses parâmetros são descritas a seguir.

3.2.3.1. Fluxo de Radiação Solar

O fluxo de calor radiante q_r ($W m^{-2}$) incidente no silo foi calculado conforme a relação (KREITH, 1977; SAYIGH, 1977; DUFFIE e BECKMAN, 1974; ALAGUSUNDARAM et al., 1990):

$$q_r = q_e + q_s + q_f + q_d - q_o \quad (15)$$

em que, a lei de Stefan Boltzman é utilizada para o cálculo dos seguintes fluxos:

$$q_e = \sigma \alpha F_{be} T_\infty^4$$

$$q_s = \sigma \alpha F_{bs} T_{c\acute{e}u}^4$$

$$q_o = \sigma \varepsilon T_s^4$$

em que,

q_e – fluxo de radiação do solo para o silo, $W m^{-2}$;

q_s – fluxo de radiação do céu para o silo, $W m^{-2}$;

q_f – fluxo de radiação solar difusa, $W m^{-2}$;

q_d – fluxo de radiação solar direta, $W m^{-2}$;

q_o – fluxo de radiação do silo para a vizinhança, $W m^{-2}$;

σ – constante de Stefan Boltzman, $5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$;

α – absortividade de ondas longas pelo material da parede do silo;

ε – emissividade de ondas longas do material da parede do silo;

F_{be} – fator de forma de radiação para silo-solo;

F_{bs} – fator de forma de radiação para silo-céu;

T_∞ – temperatura do ar externo, K;

$T_{c\acute{e}u}$ – temperatura do céu, K;

T_s – temperatura da superfície, K.

A temperatura do céu ($T_{c\acute{e}u}$) foi determinada por meio da seguinte equação (ALBRIGHT, 1990):

$$T_{c\acute{e}u} = 0,0552 T_{ar}^{1,5} \quad (16)$$

A emissividade e absortividade do material da parede do silo metálico corrugado, em relação à radiação solar, foi estimada em 0,28; 0,50, respectivamente (INCROPERA e DE WITT, 1996; BAETA e SOUZA, 1997).

Os valores para os dois fatores de forma, F_{be} e F_{bs} , foram considerados iguais a 0,5 (ALAGUSUNDARAM et al., 1990).

Sendo $q_b = q_e + q_s$ igual à troca radiativa entre o silo e o meio, tem-se que:

$$q_b = q_e + q_s = \sigma \alpha (T_\infty^4 - T_{c\acute{e}u}^4) F_{bs} \quad (17)$$

Para determinar as componentes de radiação solar, q_f e q_d , em cada superfície exposta à radiação, foi necessário obter valores para a radiação sobre uma superfície vertical.

A quantidade de energia solar recebida pela parede do silo é uma função do ângulo de elevação do sol, do ângulo de incidência dos raios solares no silo, da emissividade e da absorvidade da parede do silo. Os dados de radiação solar, coletados experimentalmente, durante o período de armazenamento, foram usados com a metodologia descrita por VIANELLO e ALVES (1991) e CHANG et al. (1993) para determinação desta quantidade de energia.

Para tal, os parâmetros envolvidos foram estimados usando-se as equações que seguem.

- azimute do sol, a (grau):

$$\cos a = \frac{\text{sen } \phi \cos z - \text{sen } \delta}{\text{sen } z \cos \phi} \quad (18)$$

- elevação do sol, e (graus):

$$e = 90 - z \quad (19)$$

em que, z é o ângulo zenital.

- ângulo zenital, z (grau):

$$\cos z = \text{sen } \phi \text{sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (20)$$

em que,

ϕ - latitude local.

h - ângulo horário do sol no local, grau;

δ - declinação do sol, grau;

- O ângulo horário do sol no local, h (grau), quando o sol passa pelo meridiano local:

$$h = (\text{hora} - 12) 15 \quad (21)$$

- declinação do sol, δ :

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (22)$$

em que,

n - número do dia do ano, variando de 1 a 365 dias, para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro.

Considerou-se, também, que a localização do silo é equivalente à da cidade de Viçosa com Latitude 20° 45' S e Longitude Oeste 42° 51'.

De posse dos dados experimentais, pode-se calcular a quantidade de energia interceptada pela parede do silo devido a radiação solar em qualquer momento diurno do período de armazenagem. É importante salientar que este cálculo se refere ao período diurno de exposição do silo aos raios solares. À noite, considerou-se que a parede externa do silo só recebia radiação difusa em todos os lados, em igual quantidade.

O ângulo de incidência dos raios solares no silo foi calculado em função do quadrante do silo, como mostrado na Figura 3, usando-se a equação:

$$q_r = (q_{\text{difusa}} + q_{\text{direta}}) \alpha \quad (23)$$

em que,

q_r – fluxo de calor radiante incidente no silo, $W m^{-2}$;

q_{difusa} – fluxo de radiação solar difusa, $W m^{-2}$;

q_{direta} – fluxo de radiação solar direta, $W m^{-2}$;

α - absortividade de ondas curtas pelo material da parede do silo.

ALVES (1981), pesquisando a irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa, recomendou a seguinte equação para o cálculo da irradiância solar difusa ($W m^{-2}$):

$$q_{\text{difusa}} = (0,43 + 8,25 (1 - 0,0111 \exp(0,05 z))) 11,63 \quad (24)$$

Cada quadrante da circunferência que contorna o silo foi dividida em 10 segmentos lineares (Figura 3). O azimute horário de cada um dos segmentos, foi calculado da maneira exposta a seguir:

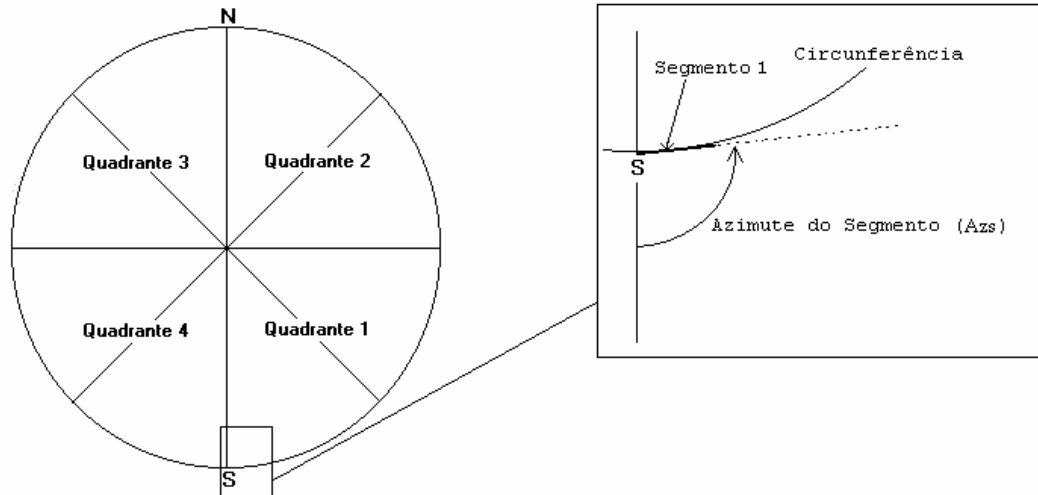


Figura 3 - Quadrantes de divisão do silo para aplicação da energia solar.

O fluxo de energia solar incidente em cada segmento foi calculado pela seguinte expressão:

$$q_s = [(Lp \cdot q_{\text{direta}}) + q_{\text{difusa}}] \alpha \quad (25)$$

O fluxo de energia solar recebida por cada segmento foi considerado como o fluxo médio neste segmento. Para entrada no modelo, cada quadrante foi dividido em duas partes com cinco segmentos cada.

Os quadrantes que não receberam energia solar na forma direta durante a hora investigada, ficaram submetidos somente à incidência de radiação solar difusa.

A Figura 4 apresenta um fluxograma com o procedimento usado no cálculo da percentagem (Lp) de radiação solar direta incidente na parede do silo.

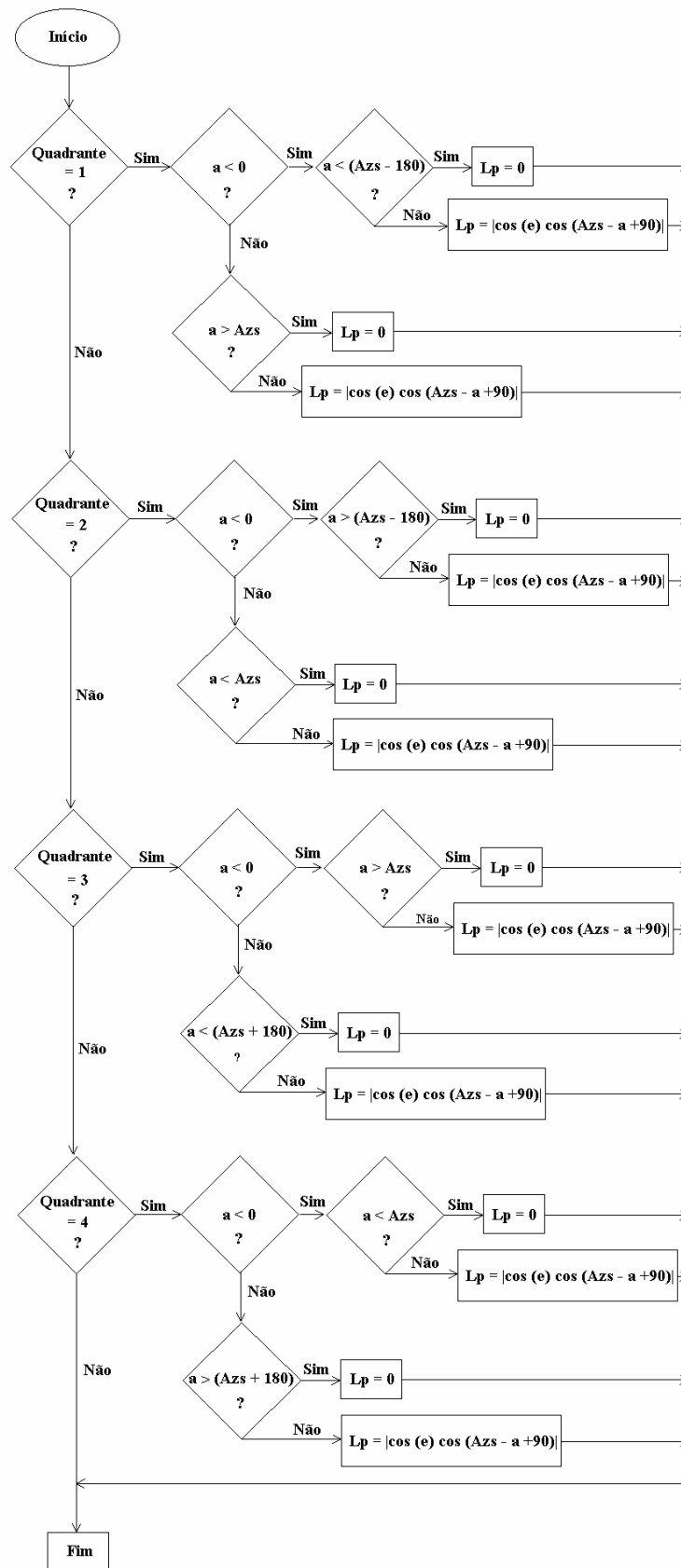


Figura 4 - Procedimento para o cálculo da percentagem (L_p) de radiação solar direta incidente na parede do silo para cada quadrante.

3.2.3.2. Coeficientes de Transferência de Calor

O coeficiente de transferência convectiva de calor entre o ar ambiente externo e a parede do silo é uma função da velocidade do vento e das propriedades térmicas do ar. Dependendo das condições existentes, esta transferência de calor pode ocorrer por convecção forçada e/ou natural.

Segundo KREITH (1977) e INCROPERA e DE WITT (1996), a relação entre os números adimensionais de Grashof (Gr) e o quadrado do de Reynolds (Re) define a importância dos efeitos combinados de convecção. Se $Gr/Re^2 \sim 1$, os efeitos da convecção forçada e da convecção livre devem ser considerados. Entretanto se $Gr/Re^2 \ll 1$, os efeitos da convecção livre podem ser desprezados.

A análise dos dados de velocidade do vento, v , coletados em um abrigo meteorológico localizado a 10 m do silo, mostraram que os valores da relação Gr/Re^2 variaram durante cada dia e durante o período de armazenamento. Em determinados períodos, a convecção livre podia ser desprezada enquanto que em outros não. Assim, um coeficiente de convecção para fluxo misto foi estimado através da equação (INCROPERA e DE WITT, 1996):

$$Nu^n = Nu_F^n + Nu_N^n \quad (26)$$
$$Nu = \frac{\bar{h} D}{k_a}$$

em que,

Nu - número de Nusselt (adimensional);

\bar{h} - coeficiente de transferência de calor médio, $W m^{-2} K^{-1}$;

n - coeficiente (4 para escoamento externo em cilindros).

k_a - condutividade térmica do ar, $W m^{-1} K^{-1}$;

D - diâmetro do silo, m;

F - índice para convecção forçada pura;

N - índice para convecção livre (natural) pura;

O coeficiente de transferência de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) por convecção forçada entre a parede do silo cilíndrico e o ar externo foi estimado pela equação (INCROPERA e DE WITT, 1996):

$$\bar{h}_F = \frac{k_a}{D} \left[0,3 + \frac{0,62 \text{Re}_D^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{\left[1 + (0,4/\text{Pr})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_D}{282.000}\right)^{5/8} \right]^{4/5} \right] \quad (27)$$

em que,

Re - Número de Reynolds para o diâmetro do silo;

Pr - número de Prandtl, adimensional;

A equação (27) é recomendada para todos $(\text{Re Pr}) > 0,2$ e, todas propriedades são estimadas na temperatura da película, $T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2}$, em que,

T_f - temperatura da película, °C;

T_s - temperatura da superfície do silo, °C;

T_∞ - temperatura do ar ambiente circundante ao silo, °C;

O coeficiente de transferência de calor por convecção natural, \bar{h}_N , ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) entre a parede do silo cilíndrico e o ar externo, em regime laminar, foi estimado por BEJAN (1984):

$$\bar{h}_N = \frac{k_a}{D} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{7R_{aH} \text{Pr}}{5(20 + 21\text{Pr})} \right)^{1/4} + \frac{4(272 + 312\text{Pr})H}{35(64 + 63\text{Pr})D} \right] \quad (28)$$

em que,

H - altura característica do silo;

R_{aH} - número de Rayleigh baseado na altura característica do silo, adimensional.

$$R_{aH} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu \alpha} \quad (29)$$

g - aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

β - coeficiente de expansão, $\frac{1}{T}$, K^{-1} ;

T_s - temperatura da superfície da massa de grãos, °C;

T_∞ - temperatura do ar acima da massa de grãos, °C;

ν - viscosidade cinemática, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;

α - viscosidade dinâmica, N s m^{-2} .

Para $\text{Pr} \geq 1$, o critério é que, $\frac{D}{H} > \text{Ra}_H^{-\frac{1}{4}}$.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor para a interface grão-ar, na superfície superior da massa grãos foram estimados usando-se correlações para placas planas, encontradas em INCROPERA e DE WITT (1996):

- Superfície dos grãos quente e ar acima dos grãos frio (para $10^7 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{11}$):

$$\text{Noite} \quad \bar{h} = 0,15 \frac{k_a}{L} \text{Ra}_L^{1/3} \quad (30)$$

- Superfície dos grãos fria e ar acima dos grãos quente (para $10^5 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{10}$):

$$\text{Dia} \quad \bar{h} = 0,27 \frac{k_a}{L} \text{Ra}_L^{1/4} \quad (31)$$

em que,

$$L \equiv \frac{A_s}{P} \quad (32)$$

onde L é o comprimento característico da placa, e A_s e P são, respectivamente, a área superficial e o perímetro da placa.

$$\text{Ra}_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (33)$$

em que,

Ra_L - número de Rayleigh baseado no comprimento característico, adimensional;

3.2.4. Parâmetros de Entrada do Modelo – geração de calor

- **Geração de calor**

Para introdução da geração interna de calor no modelo foi necessário o desenvolvimento de uma função representativa de uma provável infestação de insetos e fungos na massa de grãos.

Fontes de calor foram inseridas no interior do sistema (massa de grãos), em nós pré-definidos (Figura 5), para simular a geração de calor proveniente da infestação por insetos.

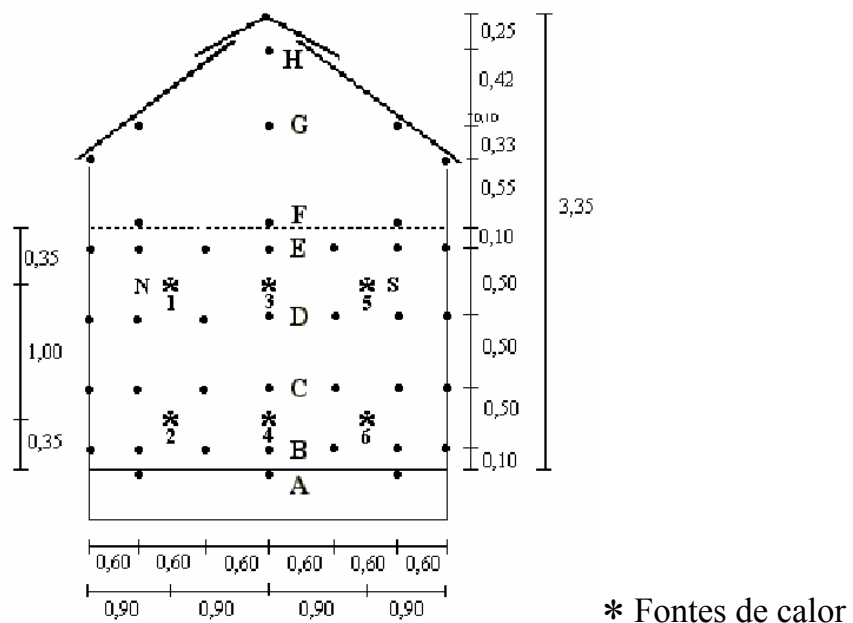


Figura 5 - Esquema da localização dos pontos de instalação das fontes de calor no interior da massa de grãos.

Para quantificação do incremento de energia, a ser aplicado a cada dia na fonte de calor, foram usadas:

(a) a equação desenvolvida por HAGSTRUM (1987), para estimar a taxa média de desenvolvimento do gênero *Sitophilus*, um dos principais inseto-praga que infestam grãos de milho:

$$r(t) = 0,075 T - 0,10 \quad R^2 = 0,9499 \quad (34)$$

em que,

$r(t)$ – taxa de desenvolvimento por semana a uma temperatura T (°C);

T – temperatura, °C;

(b) valores de produção de calor por inseto iguais a 44,6 μ W (20 °C) e 56,4 μ W (30 °C), estimadas por COFIE-AGBLOR et al. (1995b) para infestações de *S. oryzae* (L.) em grãos de trigo.

A geração de calor foi interrompida quando a temperatura da massa de grãos atingiu 40 °C, pois a partir deste valor, considerou-se que aconteceria a morte dos insetos.

Estabeleceu-se, neste trabalho, que cada ponto de geração de calor, inicialmente, estava infestado com 50 mil insetos (metade fêmea), e que o calor gerado pelos insetos, naquele ponto, aumentava diariamente com o aumento da população, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - População de *S. oryzae*, conforme equação (34), para uma temperatura de 30 °C, taxa de crescimento de 0,3071 e calor gerado de 56,4 μ W por inseto dia.

Dia	População	Voltagem (V)	Corrente elétrica (A)	Taxa Calor Gerado (W)
1	50000	21,7	0,13	2,82
2	57679	23,2	0,14	3,25
3	66536	25,0	0,15	3,75
4	76754	28,9	0,15	4,33

Foram simulados a introdução simultânea de duas fontes de calor no sistema, sempre em pontos diferentes. Após simular a resposta do sistema com geração de calor em uma seqüência de pontos, a geração era interrompida, por um mínimo de 24 h, antes que as outras fontes fossem acionadas. A escolha dos pontos foi feita por sorteio e a seqüência de acionamento das fontes é apresentada na Tabela 3.

As fontes de calor inseridas no interior do sistema, simulando uma taxa de geração de calor, foram localizadas na direção Norte-Sul, em regiões superior, inferior e central da massa de grãos, simulando, assim aquecimento em todos os perfis da massa de grãos, como pode ser observado na Figura 5.

Tabela 3 - Seqüência de pontos de acionamento para geração de calor no interior da massa de grãos e data de início.

Seqüência	Pontos	Início (dias)
1	1 e 4	124,8
2	2 e 6	129,8
3	3 e 5	141,5

3.2.5. Parâmetros de Entrada do Modelo - propriedades térmicas

Na determinação da condutividade térmica e da difusividade do produto foi utilizado o método do cilindro infinito com uma fonte de calor, linear, central.

O equipamento usado nas determinações experimentais foi projetado e construído no Laboratório de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, UFV.

O equipamento (Figura 6) consiste de um tubo de alumínio (0,1 m de diâmetro e 0,5 m de altura) isolado nas extremidades superior e inferior (isopor e cortiça). O cilindro foi construído de maneira a se obter uma transferência de calor, unidimensional, na direção radial, ou seja, mantendo uma relação entre o comprimento e o raio maior ou igual a dez (INCROPERA e DE WITT, 1996). Para funcionar como fonte linear de calor, instalou-se no centro do cilindro (na direção longitudinal) um fio resistor de níquel-cromo envernizado (resistência, aproximada, $4,16 \Omega \text{ m}^{-1}$), com diâmetro de 0,0006438 m. A fonte de calor foi mantida tracionada, ao longo do eixo central do cilindro, por meio de presilhas conectadas às extremidades do cilindro. Três termopares “tipo T” (cobre-constantan) foram instalados na altura média do cilindro, na direção radial. O primeiro termopar encontrava-se na superfície do fio resistor; o segundo, distanciado de 1 cm do primeiro e o terceiro, na superfície interna da parede do cilindro receptor da amostra. Os termopares foram conectados a uma placa de aquisição de dados e as temperaturas acusadas nas três posições, durante a realização de cada experimento, foram registradas em intervalos de 1 segundo.

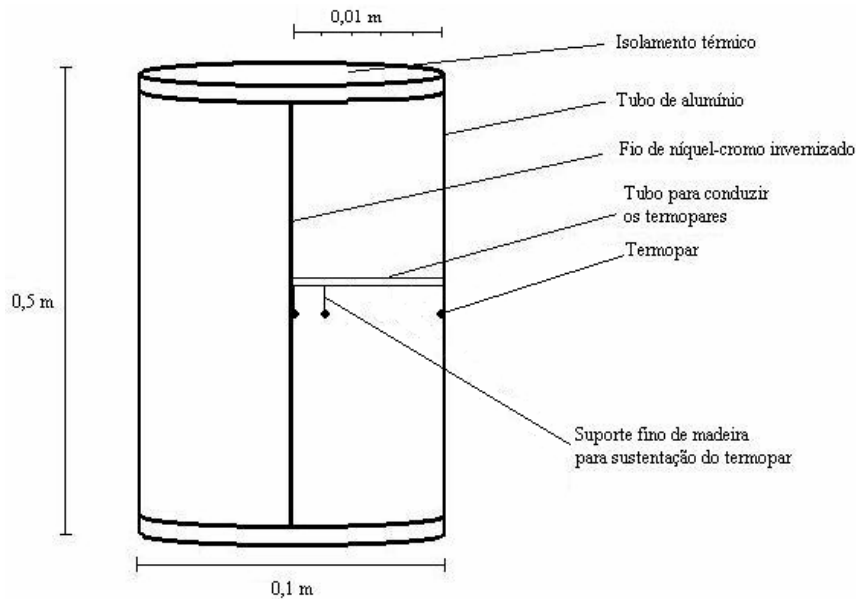


Figura 6 - Desenho esquemático do dispositivo experimental para determinação das propriedades térmica.

Durante cada determinação, o fio resistor foi submetido a uma diferença de potencial de 2,08V (fonte alimentadora de tensão e voltagem), que proporcionou uma corrente elétrica de 1A.

Antes de iniciar a determinação das propriedades térmicas, inicialmente, o produto, em sacos plásticos, permanecia em uma câmara “B.O.D.” (20 °C) por um período de, aproximadamente, 6 hs até atingir o equilíbrio térmico com o ambiente. A seguir, o produto era transferido para o interior do cilindro do equipamento, por meio de um equipamento homogeneizador, e o sistema era transferido para dentro da câmara onde permanecia até atingir, novamente, o equilíbrio térmico. Energia ao fio resistor era, então, fornecida e simultaneamente iniciava-se a aquisição dos dados de temperatura.

3.2.5.1. Condutividade Térmica

Para a determinação da condutividade térmica das amostras de milho, foram usados na equação (7) os dados das temperaturas e dos tempos correspondentes, provenientes do primeiro termopar, o mais próximo à fonte e cuja distância radial (0,0003219 m) foi considerada igual ao raio do fio resistor.

Antes do início do experimento, amostras do produto eram retiradas para determinação do teor de umidade e massa específica. Os teores de umidade utilizados para as determinações foram de 8,6; 11,1; 13,1; 15,8 e 17,1% b.u., obtidos com secagem em ar ambiente.

3.2.5.2. Difusividade Térmica e Calor Específico

Para determinação da difusividade térmica do produto, desenvolveu-se uma metodologia partindo-se da equação descrita em CARSLAW e JAEGER (1959):

$$\Delta T = \frac{1}{4\pi\alpha} \int_0^t q(t') e^{-\frac{r^2}{4\alpha(t-t')}} \frac{dt'}{t-t'} \quad (35)$$

em que,

k - condutividade térmica, $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$;

α - difusividade térmica, $m s^{-2}$;

(t - t') – variação do tempo, s;

r - raio do ponto de medida ao ponto de geração.

$q(t) = Q \rho c$ – suprimento de energia por unidade de comprimento por unidade de tempo.

A equação (35) envolve as seguintes considerações:

(a) transferência de calor por condução em um meio onde calor é gerado a uma taxa ($\rho c q(t)$) por unidade de tempo por unidade de comprimento em uma linha, paralela ao eixo z, que passa no ponto (x' , y');

b) a fonte de calor é linear e pode estar localizada em qualquer ponto do meio;

c) $r^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2$, em que,

x - distância total no eixo x;

y - distância total no eixo y;

x' - distância do ponto de medida ao ponto de geração, no eixo x;

y' - distância do ponto de medida ao ponto de geração, no eixo y.

Após mudança de variável ($u = \frac{r^2}{4\alpha t}$ e $(t - t') = t$), a solução da equação (35)

é:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\alpha} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\frac{q}{4\pi\alpha} Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (36)$$

em que,

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{é uma integral exponencial.}$$

Para pequenos valores de x , tem-se que:

$$Ei(x) = -\gamma - \ln x + \left(\frac{x}{1.1!} - \frac{x^2}{2.2!} + \frac{x^3}{3.3!} - \dots \right) \quad (37)$$

em que, $\gamma = 0,5772\dots$ a constante de Euler. Para grandes valores de tempo (discutido nos resultados), a equação (36) pode ser aproximada por:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\alpha} \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \frac{\gamma q}{4\pi\alpha} \quad (38)$$

efetuando as transformações, chega-se a:

$$\Delta T = \frac{\frac{q}{\rho c}}{\frac{4\pi k}{\rho c}} \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \frac{\gamma \frac{q}{\rho c}}{4\pi \frac{k}{\rho c}} = \frac{Q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \quad (39)$$

$$\frac{4 \Delta T \pi k}{Q} + \gamma = \ln \frac{4\alpha t}{r^2} \quad (40)$$

$$\frac{4\alpha t}{r^2} = e^{\frac{4 \Delta T \pi k}{Q} + \gamma} \quad (41)$$

Finalmente, obtém-se:

$$\alpha = \frac{e^{\left(\frac{4 \Delta T \pi k}{Q} + \gamma\right)}}{4t} r^2 \quad (42)$$

A equação (42) foi utilizada para determinar a difusividade térmica em uma massa de grãos, disposta no interior de um cilindro, com uma fonte de

geração de calor central (mesmo instrumento usado para determinação da condutividade térmica). A utilização desta equação necessita do conhecimento da massa específica, condutividade térmica, gradiente de temperatura entre os pontos de leitura e o intervalo de tempo em que foram feitas as leituras.

3.2.5.3. Massa Específica Aparente

A massa específica aparente das amostras foi determinada por meio de uma balança de peso hectolítrico, com capacidade para um quarto de litro, da marca Dallemole, em três determinações.

3.2.5.4. Calor Específico

Depois de determinada a difusividade térmica, a condutividade térmica e a massa específica, o calor específico foi determinado através da seguinte equação:

$$c = \frac{k}{\rho \alpha} \quad (43)$$

em que,

ρ - massa específica da amostra experimentada, kg m^{-3} .

3.3. Validação do Modelo de Transferência de Calor

Visando a validação do modelo de transferência de calor desenvolvido neste trabalho, grãos de milho (*Zea mays* L.) foram armazenados em uma estrutura metálica, similar à usada nas simulações. Grãos da variedade “Vencedor”, provenientes da safra de janeiro de 2000 e procedentes do Município de Viçosa-MG, foram colhidos e trilhados mecanicamente. Os grãos, com um teor de umidade inicial médio de 19,4% b.u., foram transferidos para um silo e submetidos a um processo de secagem com ar natural (aproximadamente por 5 dias) até atingirem o teor de umidade de 13,1 % b.u.

A seguir, o produto foi armazenado em um silo protótipo metálico cilíndrico (3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura), provido de sistema de aeração, que foi vedado, e não utilizado durante o período de armazenamento. O período de

armazenagem foi de 20 de junho a 29 novembro de 2000, ou seja, durante 161,5 dias.

Termopares “tipo T” (AWG 2-24, PVC-PVC) (cobre-constantan), calibrados, com precisão de $\pm 0,5$ °C foram posicionados dentro do silo, em 64 pontos. Quarenta destes pontos localizavam-se no interior da massa de grãos, enquanto que os outros, localizavam-se na superfície inferior, superior e acima da massa de grãos, conforme ilustra a Figura 7. Os termopares foram dispostos na direção Norte-Sul e Leste-Oeste (verdadeiro). Os termopares, no interior do silo, foram posicionados nas interseções das alturas de 0,1; 0,60; 1,1; 1,60; 1,7; 2,25; 2,58; e 3,10 m com as distâncias radiais de 0; 0,60; 1,20; 1,80; 2,40; 3,00 e 3,60 m (Figura 7).

Os valores das variáveis pertinentes ao experimento (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento) foram registrados com auxílio de um sistema automático de aquisição de dados. Uma placa do tipo “plug-in-board” (resolução de 16 bits) e duas placas de expansão dos canais análogos (32 canais cada) foram usadas para obtenção das temperaturas nos 64 pontos selecionados. Para coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um termo-higrômetro, com precisão de 3%. Dados de radiação solar global foram obtidos com auxílio de um piranômetro (modelo LI 200AS, Li-cor Inc., Lincoln, NE), com precisão de 5%. Um anemômetro de canecas (com precisão de leitura de duas casas decimais) ligado ao sistema de aquisição, foi usado para a obtenção da velocidade do vento.

A aquisição de dados foi realizada a cada minuto e os dados foram armazenados em um microcomputador.

Fontes de calor (lâmpadas incandescentes de 40 W com 4,5 cm de diâmetro) foram inseridas no interior da massa de grãos em pontos, similares ao usado no modelo (Figura 7), para simular a geração de calor proveniente da infestação de insetos. A mesma metodologia de acionamento das fontes e quantidade de calor gerado, empregada no modelamento, foi aplicada no experimento.

As variações temporais das temperaturas no interior do sistema foram comparadas com aquelas obtidas pela simulação matemática por elementos finitos visando validação do modelo.

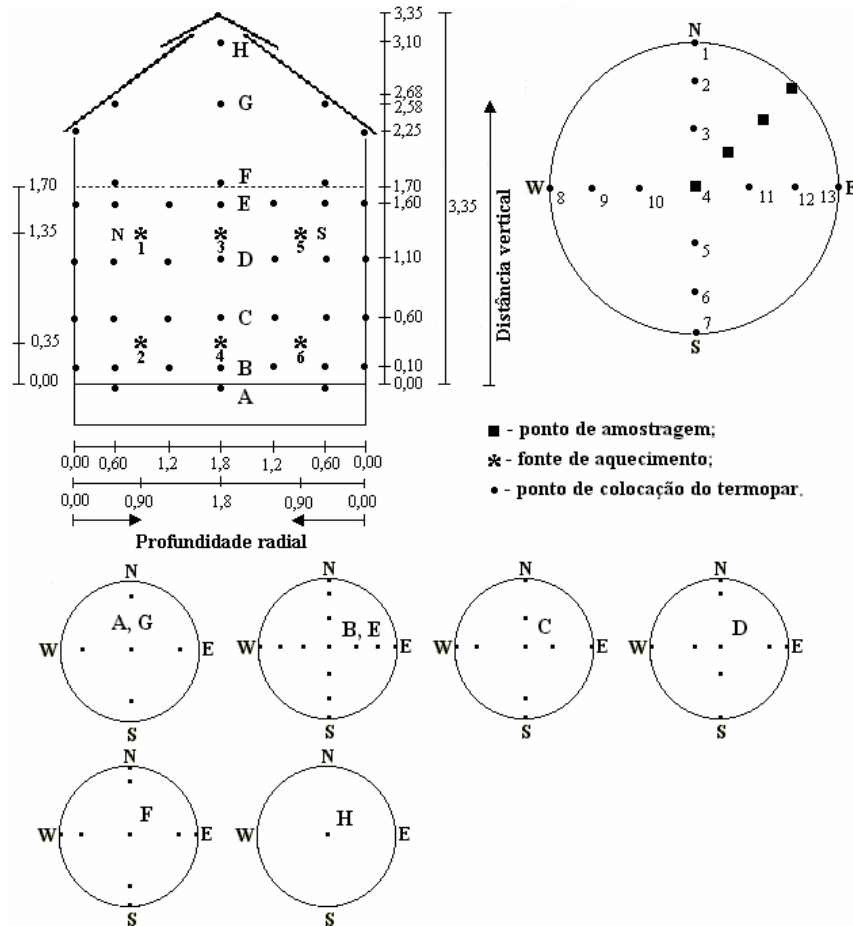


Figura 7 - Esquema da disposição, vertical e horizontal, dos termopares, das fontes de calor e dos pontos de amostragem no interior do silo.

3.4. Teste de Qualidade

Durante o período de armazenamento dos grãos de milho, amostras do produto foram coletadas, a cada trinta dias visando o acompanhamento da qualidade do material.

As amostras foram coletadas (calador) no quadrante nordeste do silo (Figura 8), nas profundidades verticais de, aproximadamente, 0,1; 0,6; 1,1 e 1,7 m, e nas profundidades radiais de, aproximadamente, 0; 0,6; 1,2 e 1,8 m. Durante a

amostragem tomou-se o cuidado para se retirar as amostras sempre na mesma profundidade radial e distância vertical.

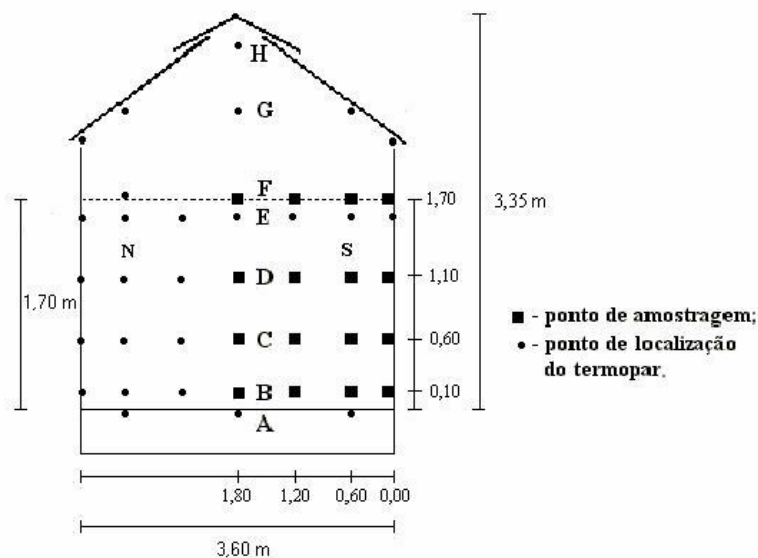


Figura 8 - Esquema da localização dos pontos de amostragem.

Antes do armazenamento, uma amostra representativa do produto foi retirada para realização de testes de qualidade e para determinações das propriedades termofísicas.

As amostras de milho, coletadas ao longo do período de armazenamento foram submetidas a testes para avaliação da massa específica, germinação, condutividade elétrica e teor de umidade, segundo metodologias descritas a seguir.

3.4.1. Teste-Padrão de Germinação (TPG)

Antes de cada teste de germinação, as sementes foram tratadas com fungicida (Captan) na dosagem de 1 grama para 1 kg de sementes.

O teste padrão de germinação foi realizado conforme os critérios estabelecidos pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992). Foram realizadas quatro repetições de 50 sementes para cada amostra coletada no silo.

As sementes, tendo como substrato rolo de papel tipo "germitest" umedecido com água deionizada, foram colocadas para germinar à temperatura aproximada de 25°C, em um germinador. As avaliações foram realizadas aos

cinco e nove dias depois da instalação do teste e os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

Na primeira avaliação, foram determinados os números de sementes com plântulas normais e o número de sementes mortas ou infeccionadas, capazes de contaminar as demais. Após o registro, estas sementes foram eliminadas.

No nono dia foi realizada a contagem final de plântulas normais, plântulas anormais e sementes mortas ou deterioradas. O resultado da germinação foi expresso em termos de porcentagem média de plântulas normais detectadas nas duas avaliações.

A energia germinativa das sementes foi avaliada utilizando-se os resultados da primeira contagem do teste-padrão de germinação. Para tal, no quinto dia, depois da montagem do teste, as plântulas normais foram contadas e os resultados expressos em porcentagem.

3.4.2. Teste de Condutividade Elétrica

Nos testes de condutividade elétrica foi utilizado o sistema de copo ou massa (bulk system), conforme metodologia recomendada por KRZYZANOWSKI et al. (1991) e VIEIRA e CARVALHO (1994).

Uma amostra do produto (50 sementes), após ter a sua massa determinada (com precisão de 0,01 g), foi colocada em copo plástico (200 ml) e, a este, foram adicionados 75 ml de água deionizada. Em seguida, o copo foi colocado em um germinador, a uma temperatura de 25 °C, durante 24 horas. Decorrido esse período, o recipiente foi retirado do germinador, o conteúdo foi suavemente agitado e, imediatamente, procederam-se às medições. As determinações da condutividade elétrica foram realizadas em quatro repetições, usando-se um condutivímetro.

Em cada teste, a condutividade elétrica da amostra (condutivímetro marca Digimed, Modelo DM-31) foi obtida dividindo-se o valor da condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$) pela massa (g) das 50 sementes. O resultado final, expresso em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$, foi obtido pela média dos valores determinados em cada repetição.

3.4.3. Teor de Umidade

O teor de umidade dos grãos, em todas as etapas envolvidas no trabalho, foi determinado pelo método-padrão da estufa, 105 ± 3 °C, durante 24 h, com três repetições, de acordo com as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades Térmicas

4.1.1. Massa Específica

Os valores obtidos experimentalmente para a massa específica aparente de grãos de milho a diferentes teores de umidade são apresentados na Figura 9. Observa-se que os valores da massa específica dos grãos de milho aumentam a medida que o teor de umidade diminui. O que pode ser explicado por uma maior contração da amostra de grãos, em relação à redução de massa, durante a secagem do produto.

A equação ajustada aos dados experimentais (regressão) para expressar a variação da massa específica aparente do produto em função do seu teor de umidade é apresentada, também, na Figura 9.

4.1.2. Condutividade Térmica

Os valores da condutividade térmica e da difusividade térmica do milho, necessários para entrada no modelo de transferência de calor, foram obtidos utilizando-se de apenas um experimento. Os dados de temperatura foram coletados na massa de grãos no interior do cilindro, em uma distância radial específica para cada propriedade investigada.

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para a condutividade térmica dos grãos de milho, em cada repetição experimental, juntamente com os tempos utilizados para o cálculo dos respectivos valores da grandeza. Observa-se que o desvio experimental médio foi igual a $0,005 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ou seja, um desvio de,

aproximadamente, 3%. Isto se deve, possivelmente, a erros experimentais e à falta de homogeneidade na amostra, inerente a qualquer material biológico.

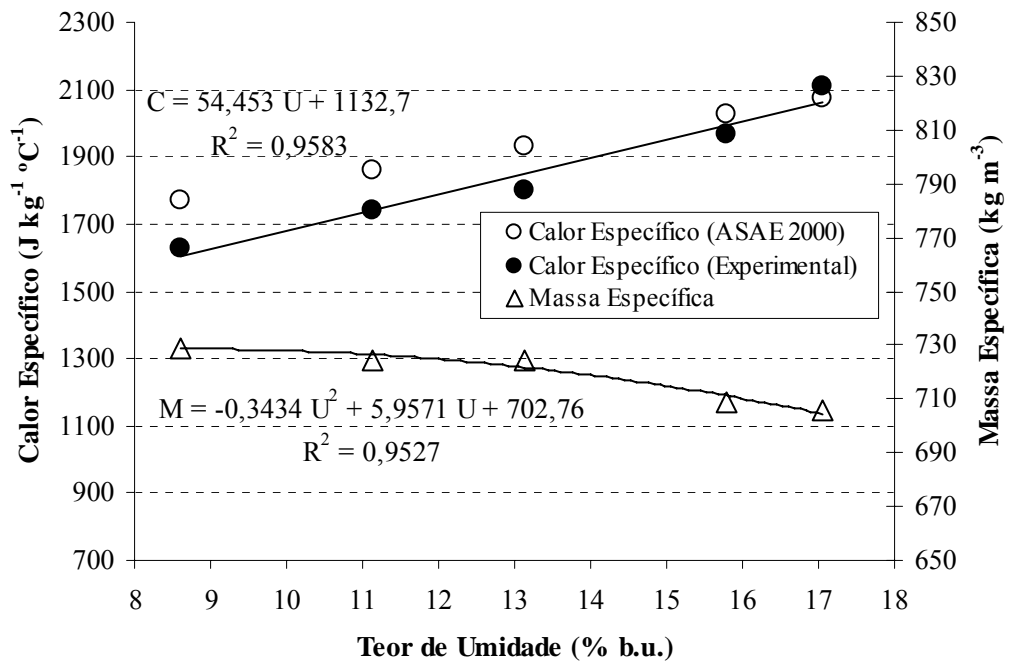


Figura 9 - Valores experimentais e estimados do calor específico e da massa específica de grãos de milho, em função do teor de umidade.

Tabela 4 - Condutividade térmica da massa de grãos de milho e seus respectivos desvios-padrão

Teor de Umidade (% b.u.)	Inclinação da reta	k ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	Tempo (s)	Media ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	Desvio Padrão ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
8,61	2,486	0,1332	300	0,139	0,0054
	2,307	0,1435	200		
	2,345	0,1412	200		
11,14	2,113	0,1567	200	0,157	0,0011
	2,092	0,1583	200		
13,14	1,977	0,1674	300	0,162	0,0066
	2,007	0,1649	300		
	2,136	0,1550	300		
15,79	2,064	0,1604	250	0,169	0,0079
	1,893	0,1750	250		
	1,912	0,1732	250		
17,06	1,790	0,1850	270	0,180	0,0040
	1,860	0,1780	300		
	1,860	0,1780	290		

4.1.3. Difusividade Térmica

A Figura 10 apresenta a variação temporal dos valores da difusividade térmica, obtidos pela equação (42), para amostras de grãos de milho a diferentes teores de umidade. Observa-se que a difusividade térmica é uma função do teor de umidade da amostra de grãos de milho; quanto mais seca a massa de grãos, maior é a sua difusividade. Verifica-se, também, a validade da recomendação de CARSLAW e JAEGER (1959) sobre utilização da equação (42) somente para grandes tempos experimentais. Os resultados experimentais mostraram que intervalos de tempo superiores a 1000 segundos eram adequados para a obtenção de valores para a difusividade térmica das amostras de milho. Após este período de tempo, as curvas, inicialmente exponenciais tenderam a uma reta e proporcionaram valores de difusividade coerentes com a realidade, considerando-se que o produto utilizado é de uma variedade brasileira e foi plantada e cultivada no Brasil. Neste trabalho, um intervalo de tempo de 1000 a 1500 segundos foi utilizado para a determinação da difusividade térmica das amostras. Os valores de difusividade térmica determinados para amostras de grãos de milho a teores de umidade de 8,6; 11,1; 13,1; 15,8 e 17,1% b.u., em três repetições, foram iguais a, aproximadamente, $1,22 \times 10^{-7}$ ($\pm 0,046 \times 10^{-7}$); $1,18 \times 10^{-7}$ ($\pm 0,009 \times 10^{-7}$); $1,18 \times 10^{-7}$ ($\pm 0,049 \times 10^{-7}$); $1,15 \times 10^{-7}$ ($\pm 0,056 \times 10^{-7}$) e $1,15 \times 10^{-7}$ ($\pm 0,028 \times 10^{-7}$) $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente. Estes valores encontram-se próximos daqueles apresentados em ASAE (2000) que varia de $1,02 \times 10^{-7}$ a $8,67 \times 10^{-8} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, para os teores de umidade de 0,9 a 20,1% b.u., respectivamente.

Nas determinações da difusividade térmica da massa de grãos de milho, foram usadas as temperaturas de pontos localizados a 1 cm da fonte linear.

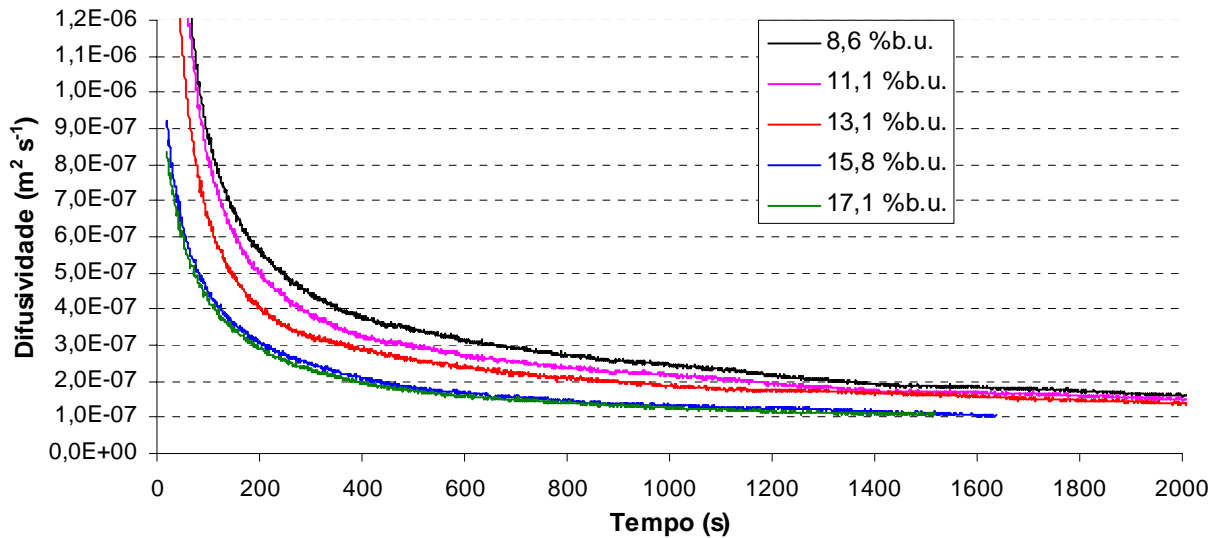


Figura 10 - Curvas selecionadas para determinação da difusividade térmica em função da condutividade térmica e do tempo, para milho nos diversos teores de umidade.

4.1.4. Calor Específico

Conhecendo-se os valores da condutividade térmica, difusividade térmica e massa específica aparente da massa de grãos de milho, o calor específico da amostra foi determinado por meio da equação (43), para o produto em cada teor de umidade investigado.

A Figura 9 apresenta os valores estimados de calor específico para amostras de grãos de milho a diferentes teores de umidade. Observa-se que os valores de calor específico aumentam à medida que se eleva o teor de umidade das amostras. A equação ajustada, regressão, para expressar a variação do calor específico em função do teor de umidade do produto é apresentada, também, na Figura 9.

Os valores determinados, neste trabalho, para o calor específico das amostras de milho são resultados semelhantes aos valores recomendados em ASAE (2000), confirmando-se, assim, a validade dos resultados encontrados.

4.2. Modelagem

O modelo apresentado neste trabalho permite a predição da distribuição de temperatura em um sistema (massa de grãos armazenados em um silo) submetido a gerações internas de calor e a variações temporais das condições externas ao silo. O modelo de transferência de calor foi desenvolvido usando a técnica de elementos finitos com o auxílio do ANSYS , versão 5.6.

Os parâmetros de entrada do modelo foram: (a) forma geométrica do sistema; (b) discretização do sistema; (c) propriedades térmicas da massa de grãos; (d) condições iniciais de temperatura para todos os nós; (e) condição de contorno para a superfície lateral do sistema (fluxo de calor); (f) condição de contorno para a superfície superior do sistema (fluxo de calor); e (g) condição de contorno para a superfície inferior do sistema (temperatura média experimental).

A discretização do sistema investigado em 1728 elementos tridimensionais, do tipo SOLID70, resultando em 2169 nós pode ser visualizada na Figura 11. Os valores das propriedades dos grãos de milho e da superfície do silo, usadas como entrada do modelo são apresentados na Tabela 5. A condutividade térmica da superfície do silo (chapa de aço) foi considerada infinita nas análises.

Um dos problemas encontrados na simulação da transferência de calor no sistema foi à dificuldade de visualização da malha tridimensional. Quando elementos de ordem mais alta são utilizados, a visualização torna-se quase impossível. O trabalho e o tempo, para a entrada de dados e verificação de erros, em uma malha tridimensional são enormes.

A Figura 12 apresenta um esquema do silo armazenador, em corte, juntamente com os quadrantes e direções utilizadas no desenvolvimento do modelo. A apresentação dos resultados será feita conforme disposição dos quadrantes esquematizados nesta figura.

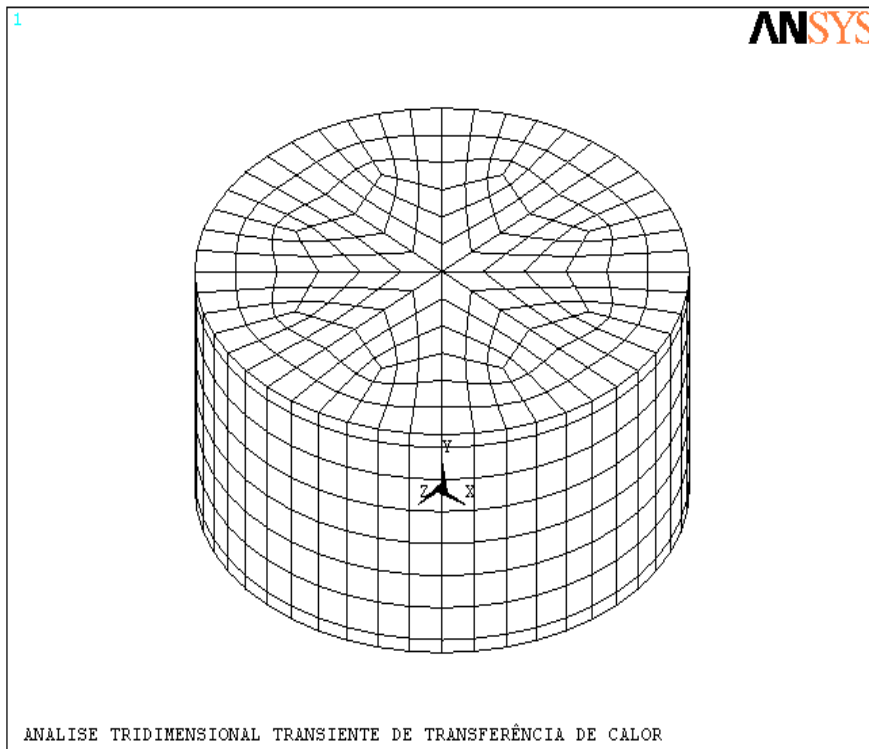


Figura 11 - Discretização do sistema em elementos.

Tabela 5 - Valores de propriedades dos grãos de milho e da chapa de aço galvanizado (1×10^{-3} m de espessura).

	Milho	Chapa de Aço Galvanizado*
Teor de Umidade (% b.u.)	13,1	-
Massa Específica (kg m^{-3})	724,7	7832
Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	1851,5	434
Condut. Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	0,1618	63,9
Difusividade Térmica ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	$1,21 \times 10^{-7}$	$1,88 \times 10^{-5}$
Absortividade	0,9	0,5
Emissividade		0,28

- INCROPERA e DE WITT (1996), BAETA e SOUZA (1997)

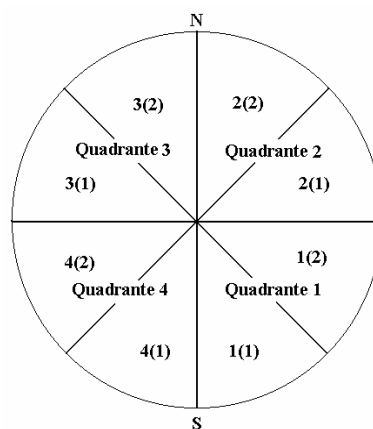


Figura 12 - Quadrantes do silo - Esquema de divisão e identificação.

4.2.1. Modelagem do Sistema Utilizando Parâmetros Originais

A distribuição de temperatura no sistema, simulada ao longo do período de armazenamento, quando os valores dos parâmetros de entrada, constantes na Tabela 5, foram usados é apresentada na Figura 13. Nesta figura encontram-se, também, os valores das temperaturas medidas experimentalmente ao longo do mesmo período de tempo.

Pode-se observar da Figura 13 que a resposta do modelo é satisfatória no início da armazenagem (aproximadamente, nos dois primeiros dias). Entretanto, os valores das temperaturas simuladas e experimentais vão se defasando progressivamente à medida que o tempo de armazenagem aumenta. Isto é um indicativo de possíveis erros de modelamento.

A Figura 14 apresenta um fluxograma com um esquema das prováveis fontes de erro que podem estar afetando a resposta do sistema. Acredita-se que a fonte principal de erros esteja relacionada com os valores de parâmetros de entrada usados no modelo. Dentre estes, evidenciam-se os itens D e E. No item D, propriedades da parede do silo, os valores usados para a absortividade e emissividade da superfície da parede foram estimados como sendo aqueles correspondentes a uma superfície de aço. Entretanto, a superfície externa da parede do silo é pintada e não se teve condições experimentais para a determinação destes dois parâmetros.

O item E, forças externas, envolve variáveis que são funções do tempo de armazenagem: fluxo de calor devido à radiação solar (item F) e transferência de calor por convecção (item G). Os erros embutidos nas equações usadas para estimar os diferentes parâmetros são grandes (como por exemplo, de até 25% no cálculo do coeficiente de convecção segundo INCROPERA e DE WITT, 1996). Acredita-se que exista, também, um erro razoável relacionado com a determinação das radiações direta e difusa. A radiação difusa foi estimada usando-se uma equação para dia claro (sem nuvens), e isto nem sempre aconteceu.

Além desses erros, existem aqueles envolvidos com os parâmetros experimentais que foram usados nas equações, por exemplo, a velocidade do ar e a radiação solar global. Estas variáveis foram medidas em um abrigo situado a, aproximadamente, 12 m do silo experimental. A existência de edificações, na vizinhança do silo, provavelmente interferiu nos valores reais destas grandezas na superfície do silo.

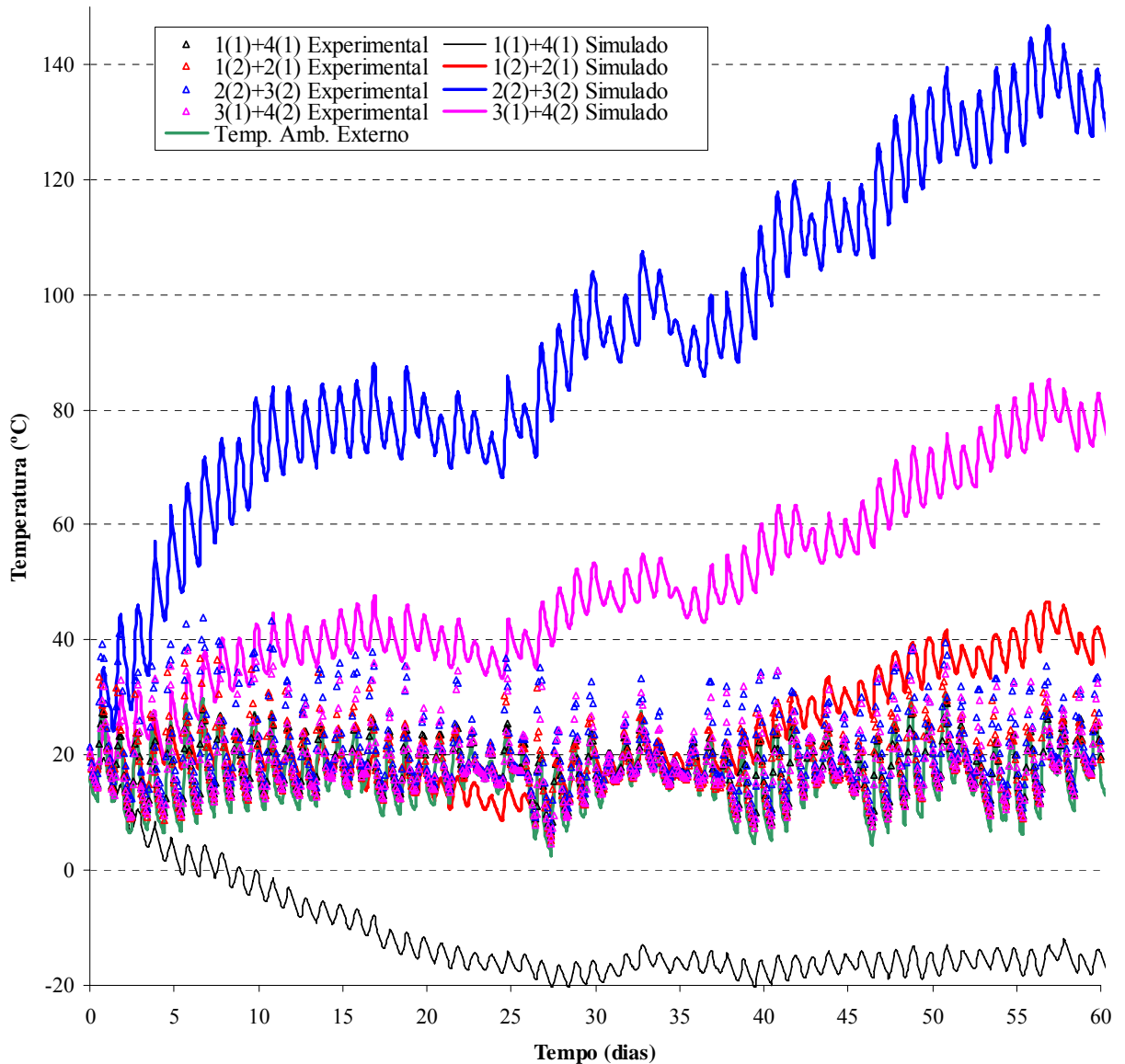


Figura 13 – Temperaturas simuladas e experimentais na superfície do silo, utilizando parâmetros de entrada de literatura.

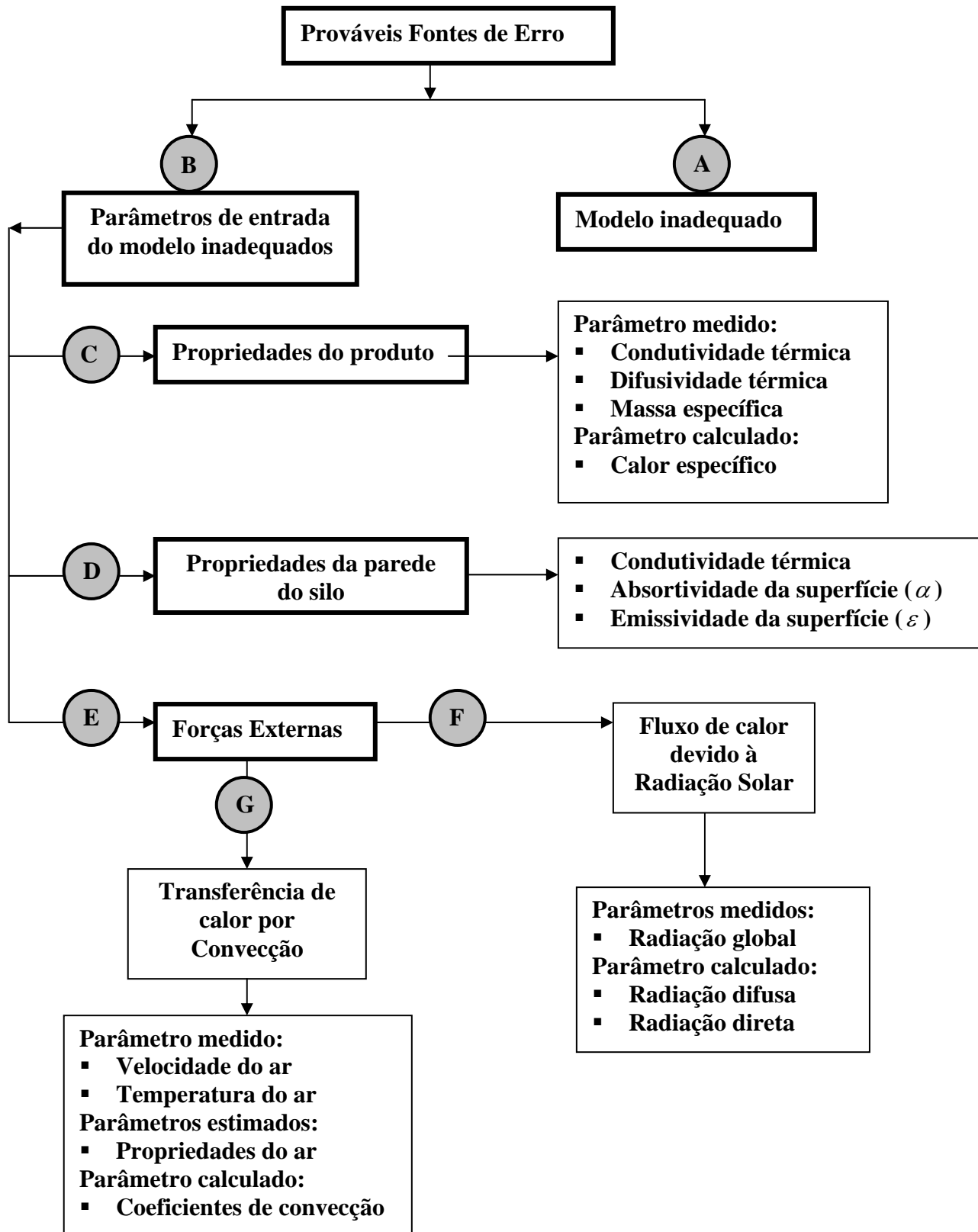


Figura 14 - Fluxograma mostrando prováveis fontes de erro.

Os erros relacionados à convecção não foram considerados objeto de investigação; a quantidade de calor envolvida neste processo não é significativa em relação aos outros modos de transferência. Assim, para investigar as fontes de erro mais significativas no fluxo de calor incidente na parede lateral do silo, os seguintes procedimentos foram adotados:

- (a) variação do fluxo de calor incidente na superfície externa do silo, variando-se os valores da absortividade e emissividade da superfície e
- (b) determinação do fluxo de calor incidente na superfície externa do silo usando-se valores experimentais de temperatura.

Os resultados destas investigações, para cada quadrante do silo, são apresentadas e discutidas nas próximas seções.

4.2.1.1. Variação do Fluxo de Calor Incidente na Superfície em Função de Valores de α e ϵ

Diversas simulações foram realizadas para investigar a resposta do modelo de transferência de calor (temperatura na parede interna do silo) às variações dos fluxos de calor incidente na superfície externa da parede do silo, devido a alterações nos valores da absortividade e emissividade. Em cada caso, as temperaturas obtidas experimentalmente para a superfície interna da chapa do silo foram comparadas com aquelas provenientes das simulações. O fluxo de radiação solar incidente na parede do silo foi obtido efetuando-se um balanço energético na parede do silo, como mostrado na Figura 15. Neste balanço, foram consideradas a energia absorvida pela parede do silo devido à radiação solar incidente, as perdas por convecção e por radiação para o meio e para a vizinhança.

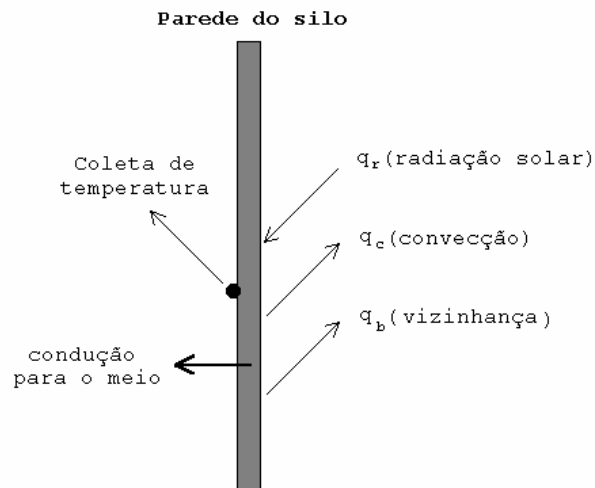


Figura 15 – balanço de energia na parede do silo.

O melhor resultado obtido, dentre as simulações realizadas, foi usando-se valores de absorvidade e emissividade iguais a 0,78 e 0,51, respectivamente. A Figura 16 apresenta os valores das temperaturas obtidos para a superfície interna da chapa, resultantes desta simulação, e, também, os valores das temperaturas experimentais medidos na mesma superfície. Observa-se desta figura que, com estes valores, a resposta do modelo foi boa até o vigésimo oitavo dia de armazenamento. A partir deste ponto, os valores das temperaturas experimentais e simuladas apresentaram grande defasagem. Portanto, verifica-se que a variação dos valores de absorvidade e emissividade não é suficiente para se obter uma resposta adequada do modelo. Observa-se da Figura 16 que, provavelmente, os erros existentes se propagam com o tempo e que estejam relacionados com parâmetros de entrada que variem com o tempo.

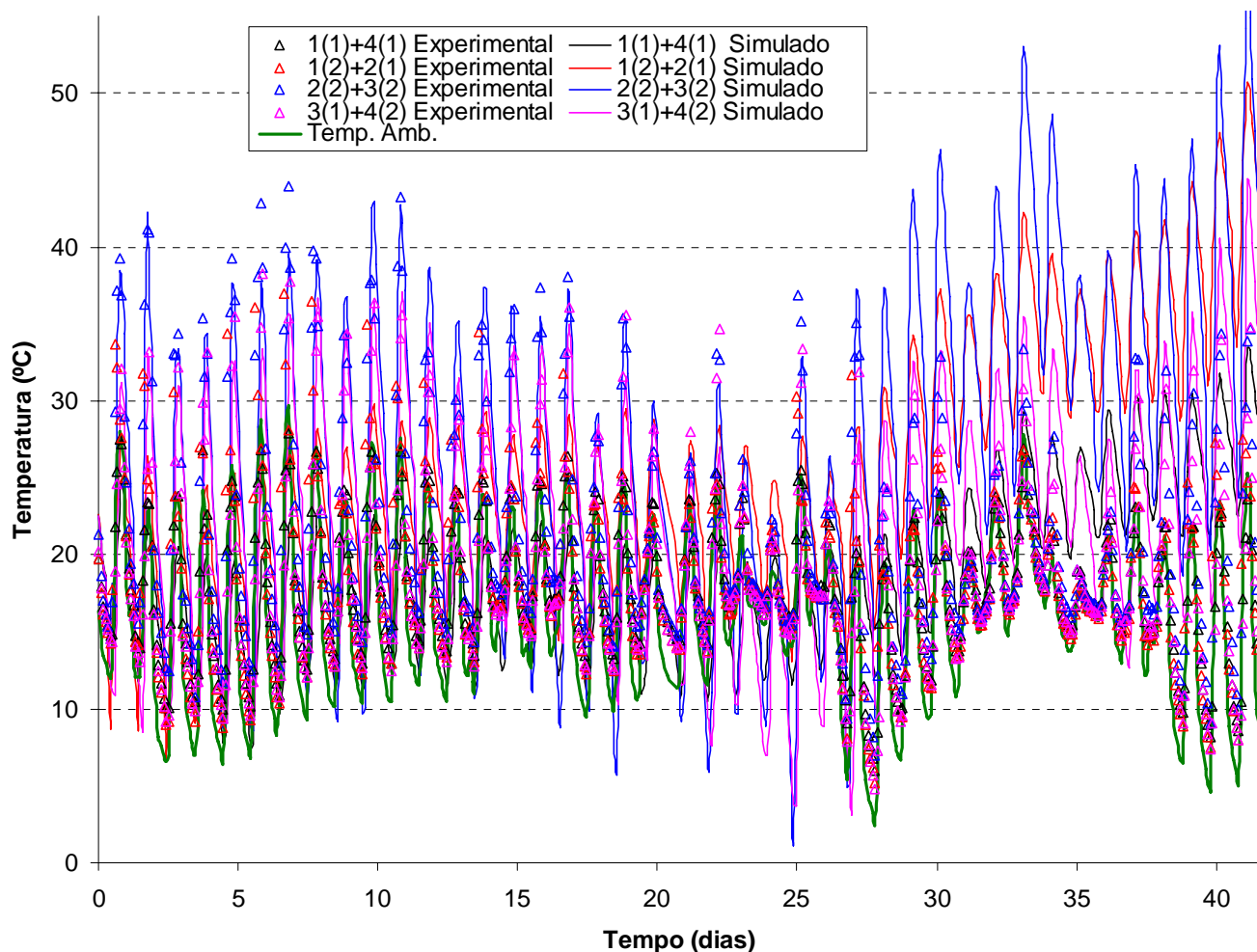


Figura 16 - Primeira aproximação do ajuste do fluxo de calor experimental nos quadrantes do silo, por meio da temperatura coletada na parede do silo.

4.2.1.2. Determinação do Fluxo de Calor Incidente na Superfície Lateral do Silo Usando as Temperaturas Experimentais

Simulações foram realizadas para determinar o fluxo de energia que realmente incidiu na superfície externa da parede do silo ao longo do período de armazenamento. Aqui, o modelo de transferência de calor foi usado para a obtenção da energia real através dos nós da parede do silo. Para tal, as temperaturas, coletadas experimentalmente, na parede interna do silo durante o

período de armazenagem, foram consideradas como parâmetros de entrada do modelo.

O fluxo de calor incidente na superfície (F_S) foi determinado usando-se a relação:

$$F_S = \frac{E_t}{A} = E_N F_C \quad (44)$$

em que,

E_t – energia total transferida na superfície;

A – área da superfície;

E_N – energia transferida em um nó;

F_C – fator que leva em consideração o n^o de nós e a área envolvida em cada um.

O valor de E_N foi considerado igual àquele para a energia através do nó central (escolhido de antemão) da área da superfície investigada.

Novas simulações foram realizadas para a obtenção do fluxo de calor incidente real. Usando-se um valor inicial para F_C , calculou-se o fluxo e este foi introduzido no modelo visando a obtenção das temperaturas na parede interna do silo. Estas temperaturas eram, então, comparadas com os valores experimentais. O valor de F_C foi modificado até que a defasagem entre as temperaturas (experimental e simulada) fosse mínima.

A Figura 17 apresenta, para cada quadrante do silo (Figura 12), valores experimentais de temperatura da parede interna do silo e, também os simulados, obtidos usando-se os fluxos ajustados. Comparações dos valores de temperaturas, simuladas e experimentais, mostram um erro médio estimado de 4%, quando se considera toda a parede do silo. Para as seções-quadrante 1(1)+4(1); 1(2)+2(1); 2(2)+3(2); 3(1)+4(2), os erros envolvidos nos valores de temperatura foram, respectivamente, 1,3; 7,4; 5,9; 1,5%. Para melhor visualização das temperaturas simuladas e experimentais, a Figura 18 apresenta os valores destas grandezas para os dez primeiros dias de armazenagem dos grãos.

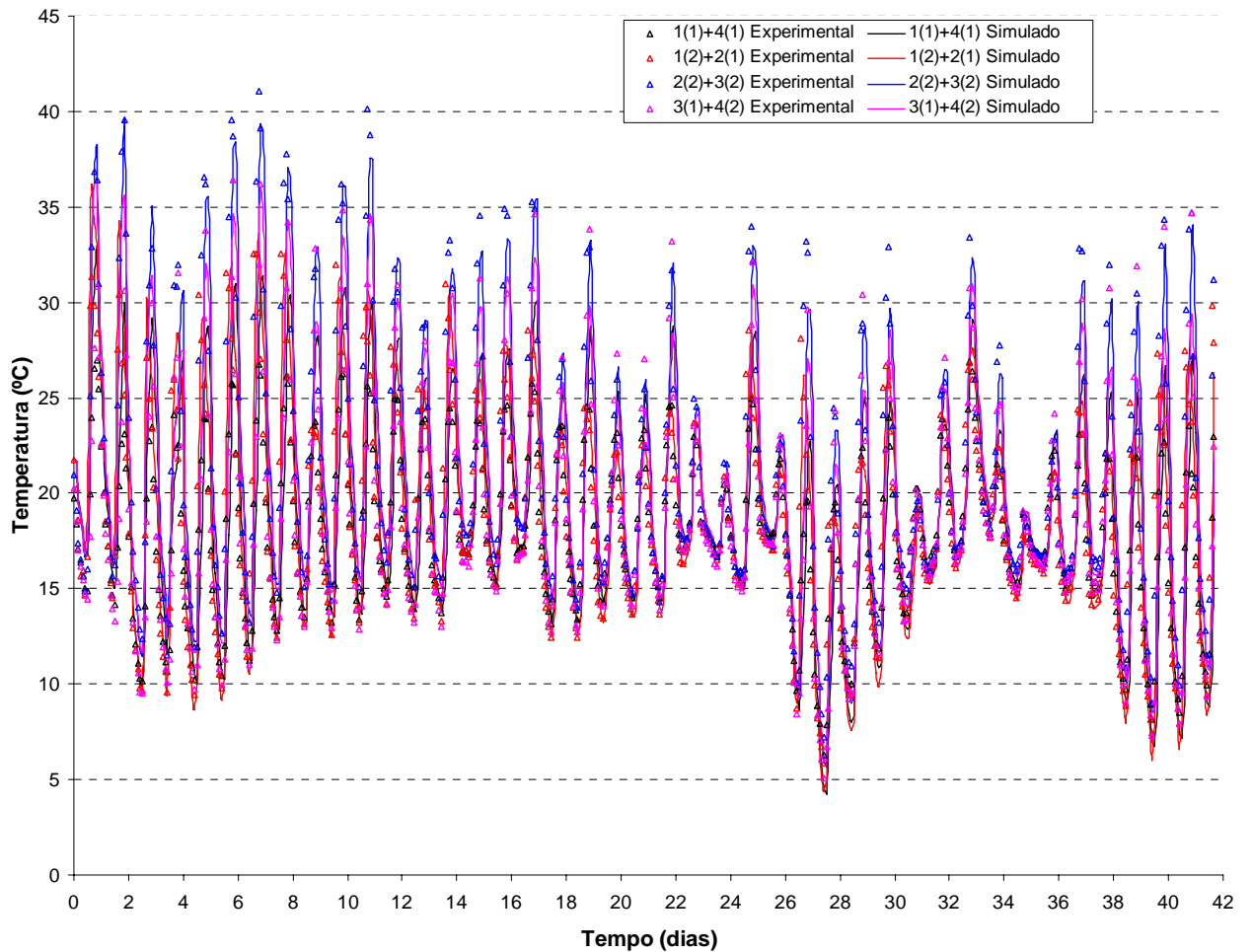


Figura 17 - Ajuste de temperatura e fluxo de calor nos quadrantes do silo, por meio da temperatura coletada na parede do silo e do fluxo de calor simulado.

Da Figura 18, observa-se que os valores das temperaturas nos quadrantes do silo foram, relativamente, diferentes. O quadrante 2(2)+3(2) foi o que apresentou maiores temperaturas e maiores amplitudes diárias, seguido dos quadrantes 3(1)+4(2), 1(2)+2(1) e 1(1)+4(1). Em termos de fluxo de energia solar na parede do silo, o quadrante 2(2)+3(2) é o que fica submetido a um maior período de exposição aos raios solares; no período de armazenamento (julho a novembro) a trajetória do sol permite que este quadrante fique exposto aos raios solares por mais de 6 horas diárias. Já o quadrante 1(1)+4(1), o mais frio, fica exposto aos raios solares por um menor período de tempo, menos de 2 horas, em relação aos outros quadrantes. Na maior parte deste quadrante não existe a

incidência de raios solares em nenhuma hora do dia; o seu aquecimento é devido à radiação difusa, convecção com o ar externo e transferência de calor, por condução, dos outros quadrantes mais quentes.

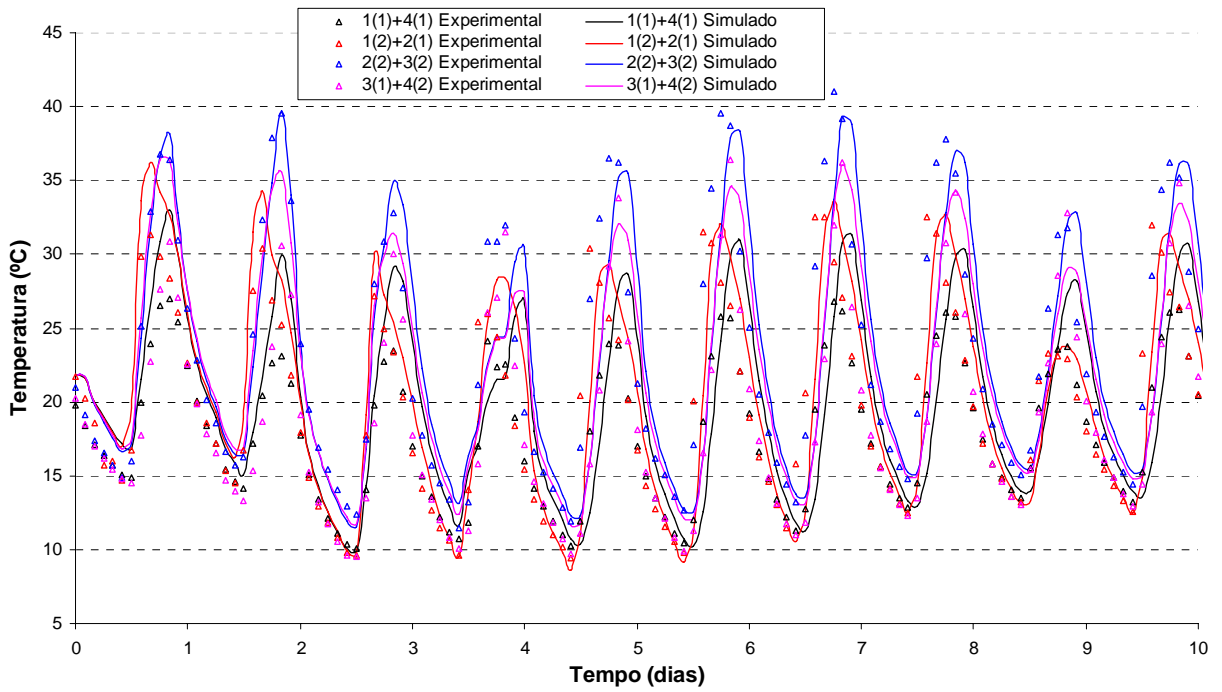


Figura 18 - Temperatura ajustada nos quadrantes do silo por meio do fluxo de calor simulado para os 10 primeiros dias de armazenagem.

É possível observar da Figura 18, também, que as temperaturas máximas dos quadrantes, além de terem valores diferentes, acontecem em horários distintos. Durante o período diurno, o sol incidirá sobre cada quadrante em horários diferentes e específicos e, mesmo incidindo em mais de um quadrante, um deles poderá estar recebendo uma quantidade maior de radiação devido ao ângulo de incidência do sol (azimute solar).

A variação da temperatura dos quadrantes do silo pode ser observada na Figura 19, que apresenta a distribuição de temperatura simulada na superfície do sistema após 41,7 dias de armazenagem (aproximadamente às 13:00 horas do dia 1º de agosto). Observa-se nesta figura, em azul mais forte, que a região Sul do silo, foi a que apresentou as menores temperaturas na superfície. Já, em tom mais avermelhado, pode-se observar as regiões mais quentes da superfície do silo.

Estas regiões se distribuíram nas direções Norte, Leste e Oeste, sendo a região norte a mais quente.

Os fluxos de energia simulados, considerados como reais, foram usados para ajustar os fluxos experimentais. Neste caso, a absortividade e a emissividade foram as variáveis modificadas para se obter o ajuste.

A Figura 20 apresenta, para os diversos quadrantes do silo, os valores dos fluxos de calor, simulado e experimental, ajustado ao longo dos trinta primeiros dias do período de armazenamento, para uma melhor visualização do ajuste. O ajuste foi razoável para todo intervalo investigado. Os valores da absortividade e da emissividade resultantes dos ajustes dos fluxos, mostrados na Figura 20 são apresentados nas duas primeiras linhas da Tabela 6, juntamente com os valores médios e desvios-padrão.

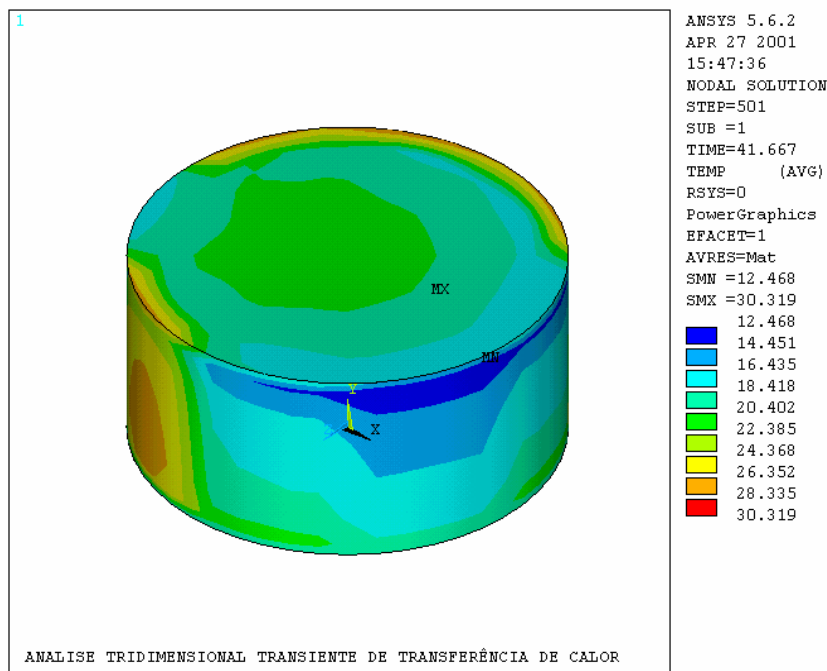


Figura 19 - Distribuição de temperatura na superfície do silo após 41,7 dias de armazenagem.

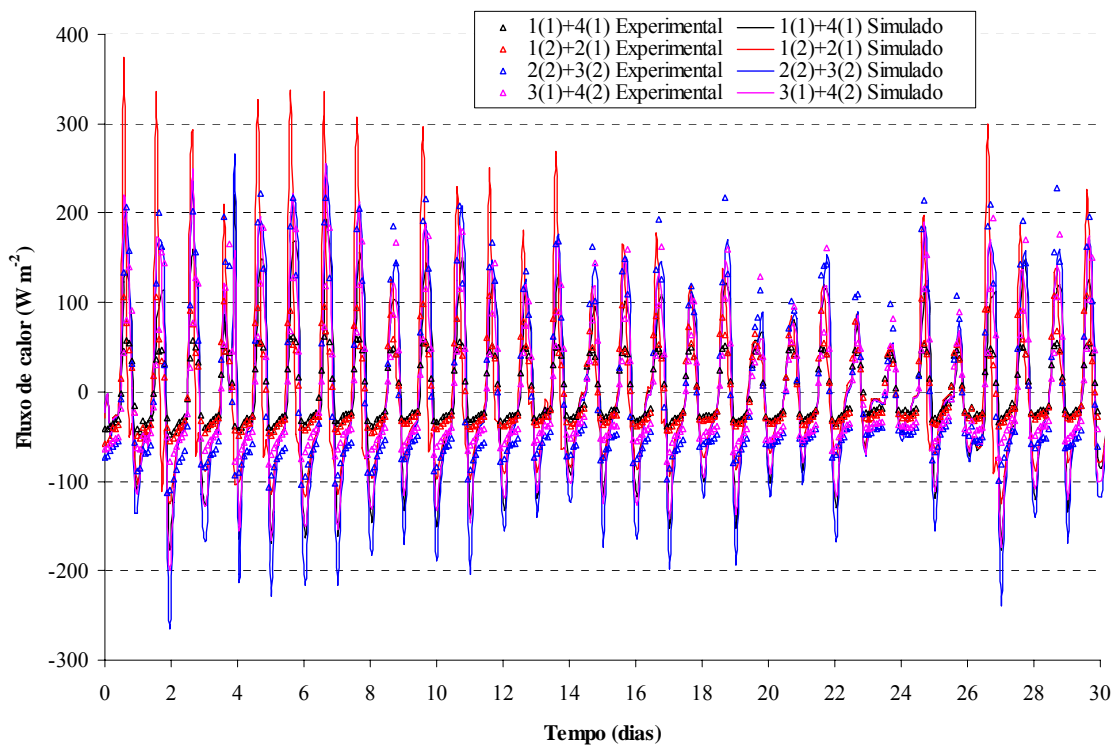


Figura 20 - Fluxo de calor experimental e simulado nas paredes externas dos quadrantes do silo, para os primeiros 30 dias de armazenamento.

Nas últimas duas linhas da Tabela 6 encontram-se os valores da emissividade e da absorvidade que proporcionaram os melhores ajustes dos fluxos de calor incidentes na parede do silo, usando o primeiro procedimento (seção 4.2.1). Observa-se que estes valores são bem próximos daqueles obtidos usando-se o segundo procedimento (duas primeiras linhas da Tabela 6). Durante os ajustes pelo segundo procedimento, notou-se que uma variação mínima no valor da emissividade era capaz de causar transtornos razoáveis nos valores das temperaturas internas da parede do silo.

Sendo a emissividade e a absorvidade dependentes apenas do material da superfície e da temperatura, esperava-se obter valores próximos destas grandezas para todos os quadrantes do silo (a variação da temperatura não é significativa para influenciar os valores destes parâmetros). Entretanto, os valores da absorvidade e da emissividade variam de acordo com os quadrantes do silo. Assim, observa-se, novamente, que os valores destas grandezas não poderiam ser responsáveis pela diferença existente entre os valores dos fluxos reais e aqueles

determinados através de parâmetros experimentais. É real o fato da temperatura no interior da parede ter se elevado além do que se esperava em termos dos fluxos experimentais. Desta maneira, uma quantidade de energia maior do que a que foi contabilizada, parece estar envolvida. Provavelmente, as edificações existentes na vizinhança do silo tenham contribuído com fluxos de calor adicionais para o silo. Entretanto, não se teve condição de determiná-los.

Tabela 6 – Valores da absortividade e da emissividade necessários ao ajuste do fluxo de calor incidente no silo.

	Quadrantes								Média	Desvio
	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	4(1)	4(2)		
Absortividade	0,85	0,88	0,64	0,75	0,64	0,71	0,85	0,94	0,78	0,1
Emisividade	0,37	0,47	0,47	0,62	0,57	0,62	0,37	0,57	0,51	0,1
Absortividade*	0,85	0,88	0,64	0,75	0,64	0,71	0,85	0,94	0,78	0,1
Emisividade*	0,34	0,41	0,41	0,58	0,53	0,58	0,34	0,53	0,50	0,1

* ajustado por meio do primeiro procedimento

Assim, os valores dos fluxos determinados pelo segundo procedimento, considerados como mais próximos dos reais, foram usados como entradas no modelo para determinação da distribuição de temperatura no sistema.

- **Distribuição de temperatura nas superfícies inferior e superior da massa de grãos**

Pode-se observar, da Figura 19, variações nas temperaturas da superfície externa do sistema; quanto mais distante da base do silo, maior a diferença. Isto se deve, provavelmente, ao fato de a superfície inferior do silo apresentar uma temperatura mais constante que a superfície superior, ou seja, as amplitudes de variações diárias de temperatura da superfície superior superam as variações da superfície inferior.

A hipótese de temperatura constante ao longo de todo período de armazenagem, ou mesmo isolamento térmico, na superfície inferior do sistema é inviável visto que o silo utilizado é provido de sistema de aeração. Desta forma, como condição de contorno na superfície inferior do sistema, usou-se em todos

os nós uma temperatura uniforme, a cada instante, de valor igual à média das temperaturas experimentais medidas em diferentes pontos desta seção.

Para se obter a distribuição de temperatura na superfície da massa de grãos o seguinte balanço de energia deveria ser realizado:

$$\Delta Q = q_{\text{conv}} + q_{\text{teto}} + q_{\text{inf}} + q_{\text{p}} + q_{\text{cn}} + q_{\text{rad}} \quad (45)$$

em que,

q_{conv} - fluxo de calor por convecção entre a massa de ar acima dos grãos e a superfície dos grãos, W m^{-2} ;

q_{teto} - fluxo de calor por convecção para o teto do silo, W m^{-2} ;

q_{inf} - fluxo de calor por infiltração de ar externo (vento), W m^{-2} ;

q_{p} - fluxo de calor por convecção na parede interna acima dos grãos, W m^{-2} ;

q_{cn} - fluxo de calor devido correntes de convecção natural que entram e saem do espaço acima da massa de grãos, W m^{-2} ;

q_{rad} - fluxo de calor por radiação entre as paredes, o teto e a superfície da massa de grãos, W m^{-2} .

Entretanto, por motivos similares àqueles expostos para os fluxos de calor envolvidos na superfície lateral do silo, os valores das temperaturas experimentais da superfície superior da massa de grãos foram utilizadas no modelo para a determinação do fluxo real de calor nesta superfície. Os fluxos reais foram, então, usados como entrada do modelo e as temperaturas resultantes foram comparadas com as experimentais.

As temperaturas simuladas e experimentais na superfície superior da massa de grãos são apresentadas na Figura 21. Observa-se que os valores das temperaturas experimentais e simuladas ficaram muito próximos, apresentando um erro estimado médio de 2,6%.

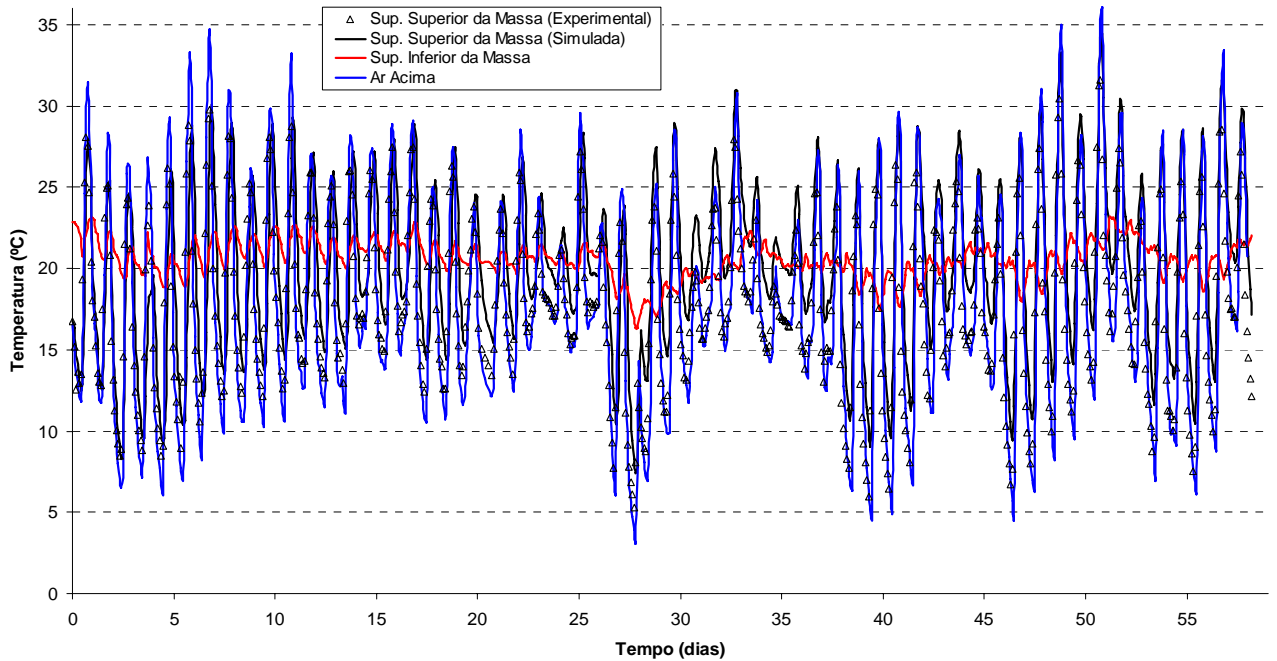


Figura 21 - Temperatura experimental e simulada na superfície da massa de grãos.

4.2.2. Distribuição de Temperatura no Sistema

Após a obtenção dos valores adequados de fluxo de calor, entrada para o modelo de transferência de calor na massa de grãos no interior do silo, a distribuição de temperatura no sistema, durante o período de armazenamento, foi determinada.

A discussão dos resultados, baseia-se no esquema de pontos apresentados na Figura 7 e usa a seguinte nomenclatura para localização de pontos na massa de grãos:

$$\text{Direção(A; B)}$$

em que,

Direção – Norte, Sul, Leste ou Oeste

A – distância vertical no silo;

B – profundidade radial no silo.

Considerando as distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m, as Figuras 22, 23 e 24 apresentam as distribuições de temperatura no interior da massa de grão de milho, provenientes das simulações, para profundidades radiais de 1,8; 1,2 e 0,6

m, respectivamente. As temperaturas experimentais medidas nos respectivos pontos, são, também, apresentadas nestas figuras. As Figuras 23 e 24 apresentam, também, a variação da temperatura ambiental (externa ao silo) durante o período investigado.

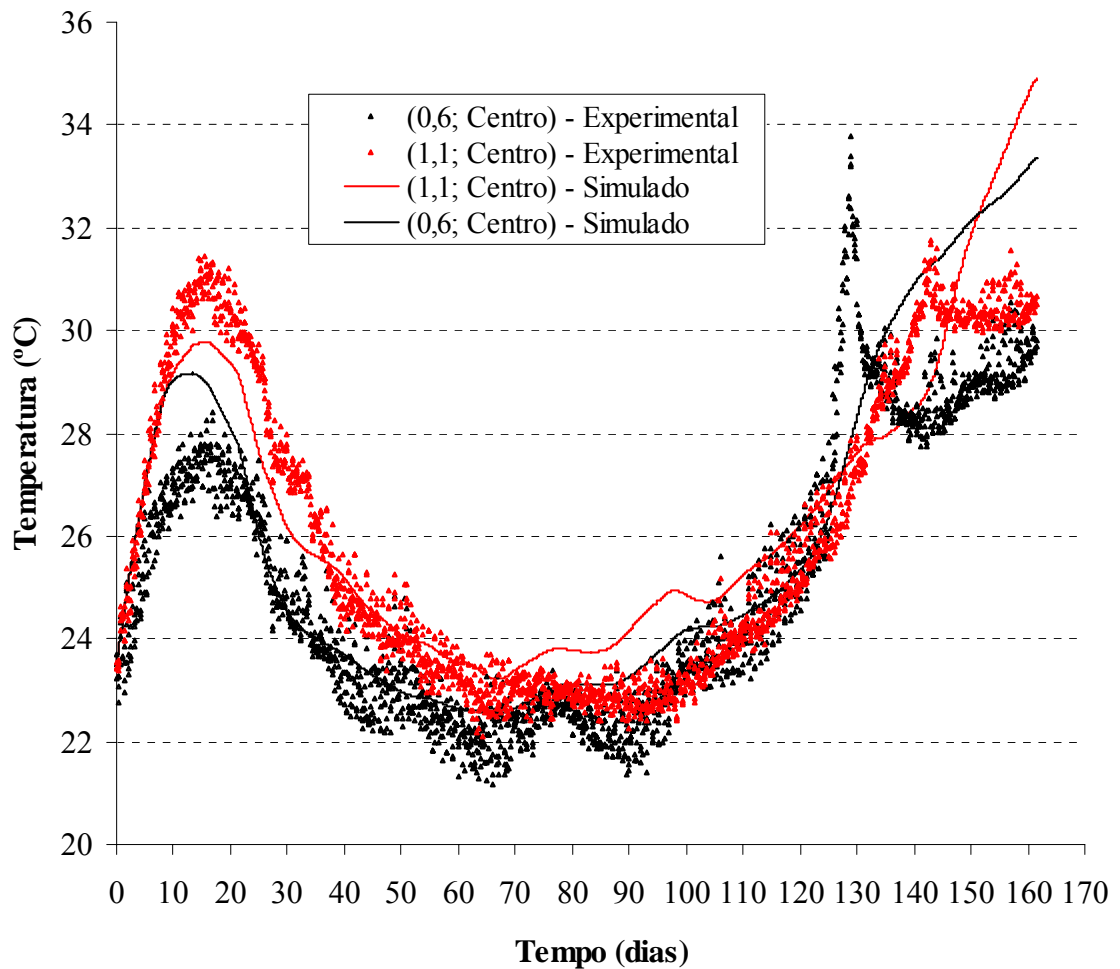


Figura 22 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a uma profundidade radial de 1,8 m (centro), e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.

Pode-se observar, da Figura 22, que as temperaturas iniciais experimentais dos pontos situados nas duas distâncias verticais são próximas. Entretanto, durante os primeiros dias do processo de armazenagem, estas temperaturas se elevaram de, aproximadamente, 5 °C. Não existe uma justificativa imediata para o fato. Acredita-se que durante o enchimento do silo, que durou um dia todo,

houve a formação de regiões na massa de grãos, afastadas dos termopares, com temperaturas mais altas. Nesta situação, a elevação de temperatura poderia ter sido causada pela transferência de calor destas regiões para aquelas de temperaturas inferiores. Análises (teor de umidade e qualidade) realizadas em amostras coletadas, no início do armazenamento, no eixo central da massa de grãos não detectaram problemas.

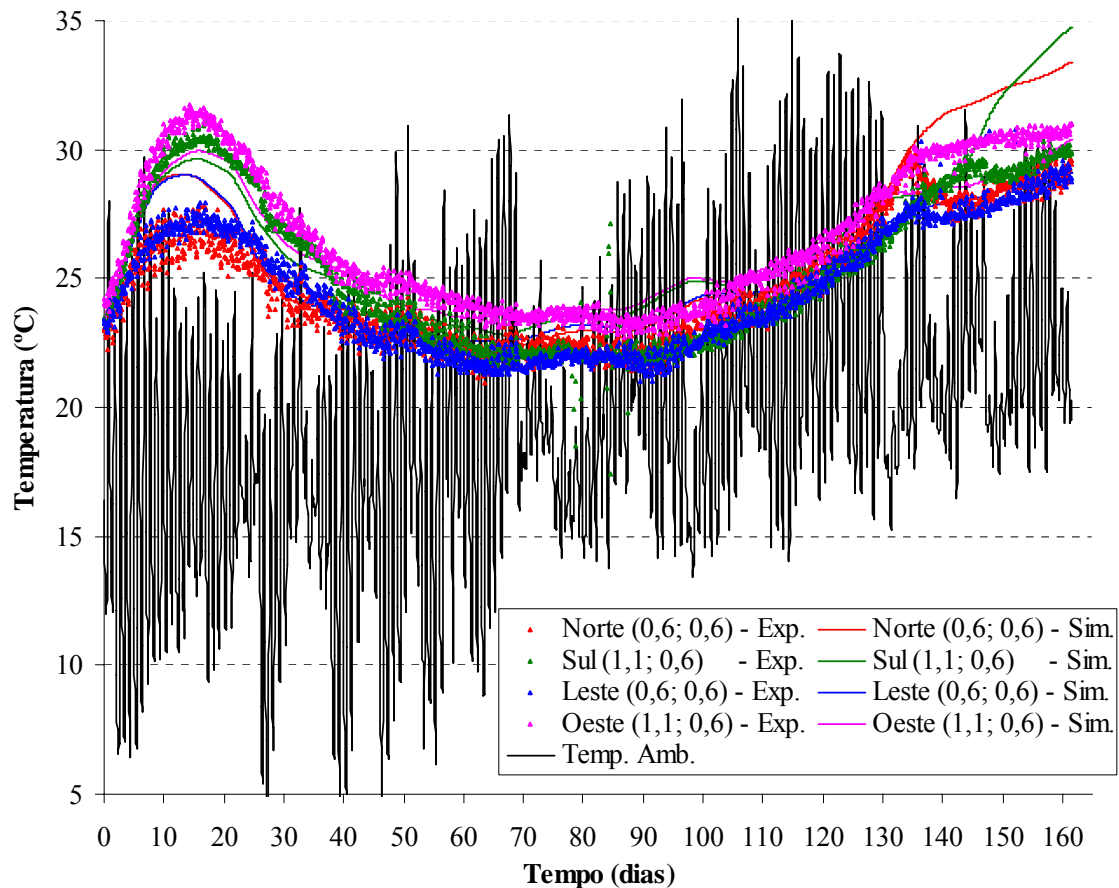


Figura 23 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a uma profundidade radial de 0,6 m e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.

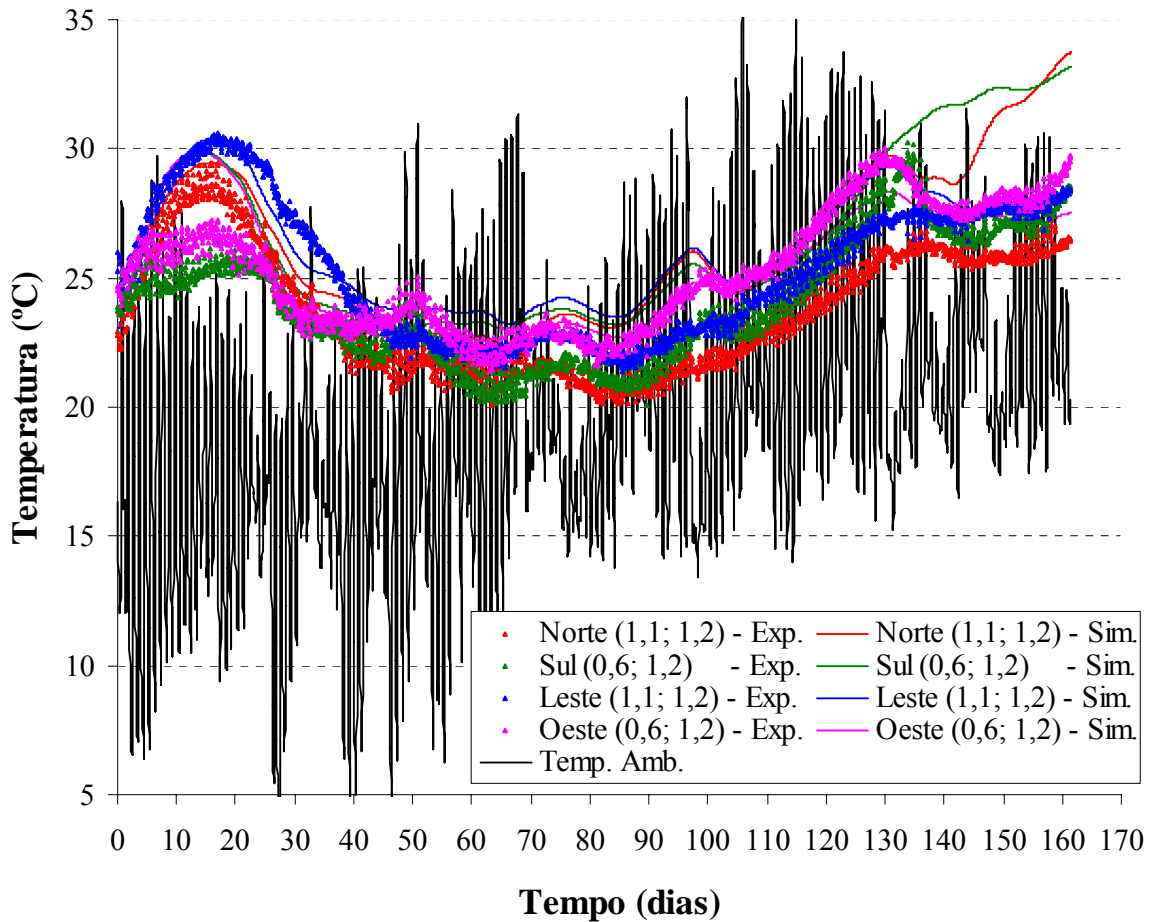


Figura 24 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a uma profundidade radial de 1,2 m e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m.

Diante do ocorrido, houve a necessidade de se impor uma nova condição inicial para o sistema e, assim, obter uma entrada coerente para o modelo de transferência de calor. A malha gerada, para análise por elementos finitos, não possibilita a inclusão da condição de camadas com diferentes temperaturas iniciais. Optou-se, então, pela introdução, no sistema, de uma geração inicial de calor, uniforme em toda a massa de grãos. Esta geração foi imposta somente nos nós internos do sistema, ou seja, sem considerar os limites do sistema. A Figura 25 mostra a energia introduzida no sistema, bem como a curva e a equação ajustada para simular este aquecimento.

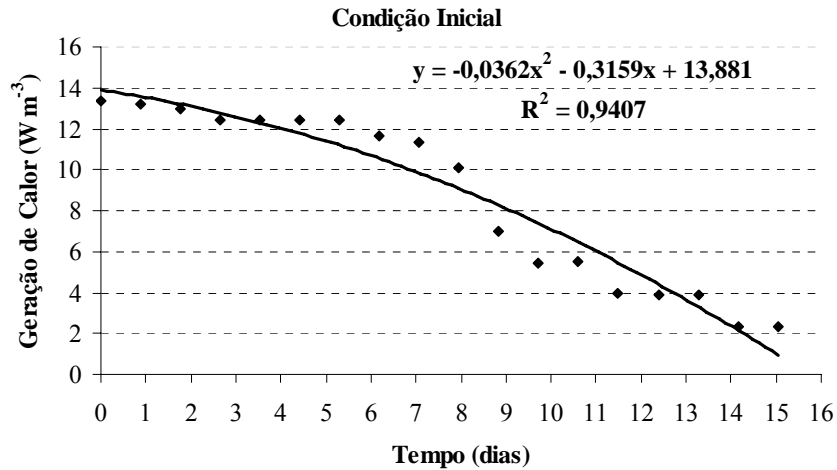


Figura 25 – Geração inicial de calor para ajuste de temperaturas.

Pode-se observar (Figura 22) que o modelo desenvolvido descreve de maneira satisfatória a transferência de calor transiente em pontos situados no eixo central do sistema. Nota-se que o desvio máximo detectado entre os valores simulados e os experimentais foi, aproximadamente, de 2 °C. Os erros relativos médios inerentes à modelagem da distribuição de temperatura nos pontos localizados no centro (1,8 m de profundidade radial) e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m, foram iguais a 1,6 e 1,5%, respectivamente.

A temperatura inicial de armazenamento dos grãos é um fator importante, pois vê-se (Figura 24) que a inércia térmica do sistema é grande. As variações externas não afetam, significativamente, as temperaturas dos pontos localizados a 0,6 m de profundidade radial e distâncias verticais iguais a 0,6 e 1,1 m. Os erros relativos médios associados aos pontos Norte (0,6; 0,6), Sul (1,1; 0,6), Leste (0,6; 0,6) e Oeste (1,1; 0,6) foram de 2,2; 2,7; 2,9 e 1,2%, respectivamente. Para uma melhor visualização do comportamento do sistema, a Figura 26 apresenta, para um período menor de armazenamento, a variação na temperatura ambiente e as variações de temperatura, simuladas e experimentais, nos mesmos pontos.

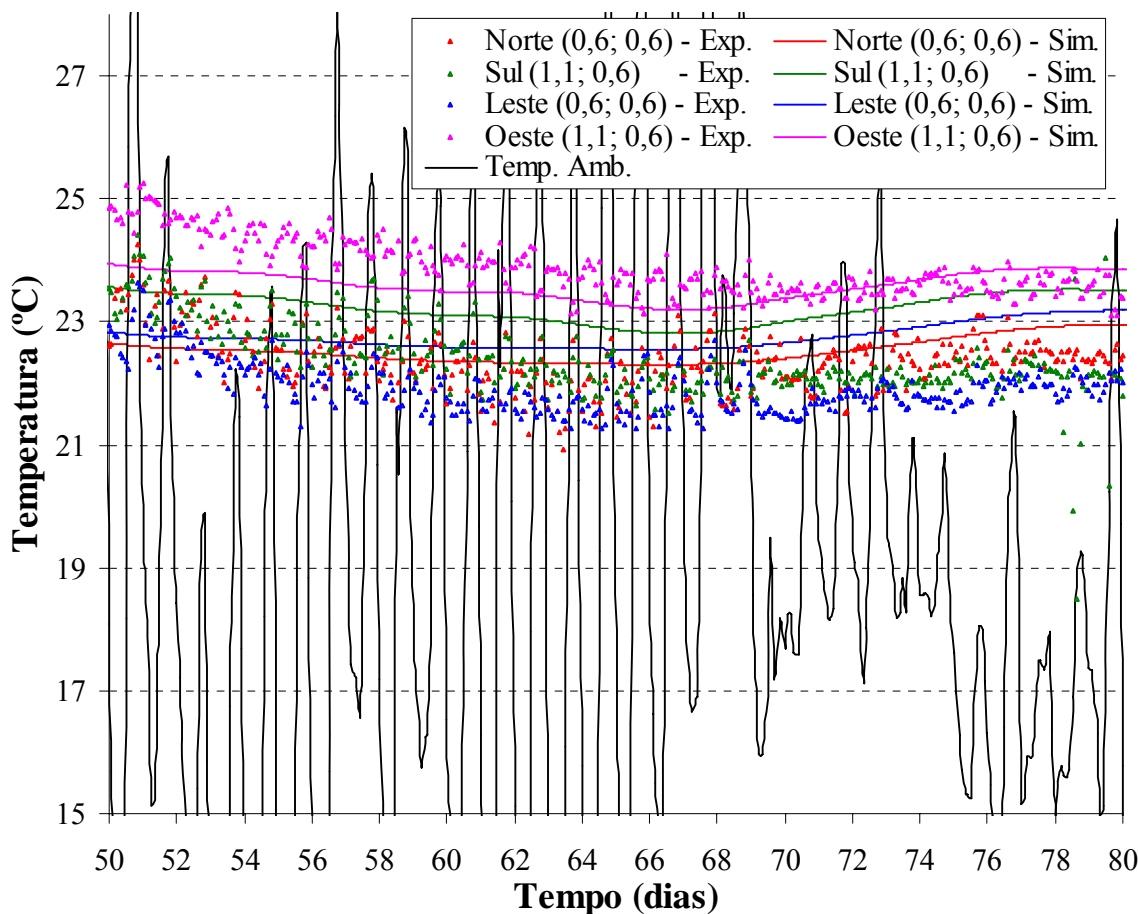


Figura 26 – Temperaturas experimentais e simuladas no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,6 m de profundidade radial e 0,6 e 1,1 m de distância vertical, durante o período de 50 a 80 dias.

Observa-se (Figura 24) que as temperaturas nos pontos situados a uma profundidade radial de 1,2 m e distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m não mostraram tendências de regiões mais quentes no interior da massa de grãos. Existem inversões de regiões mais quentes, principalmente nos pontos das direções Leste (1,1; 1,2) e Oeste (0,6; 1,2). Os erros associados aos pontos Norte (1,1; 1,2), Sul (0,6; 1,2), Leste (1,1; 1,2) e Oeste (0,6; 1,2) são de 4,2; 4,0; 2,9 e 0,2%, respectivamente. A Figura 27 apresenta, para uma melhor visualização, os mesmos dados para uma faixa menor de tempo de armazenagem.

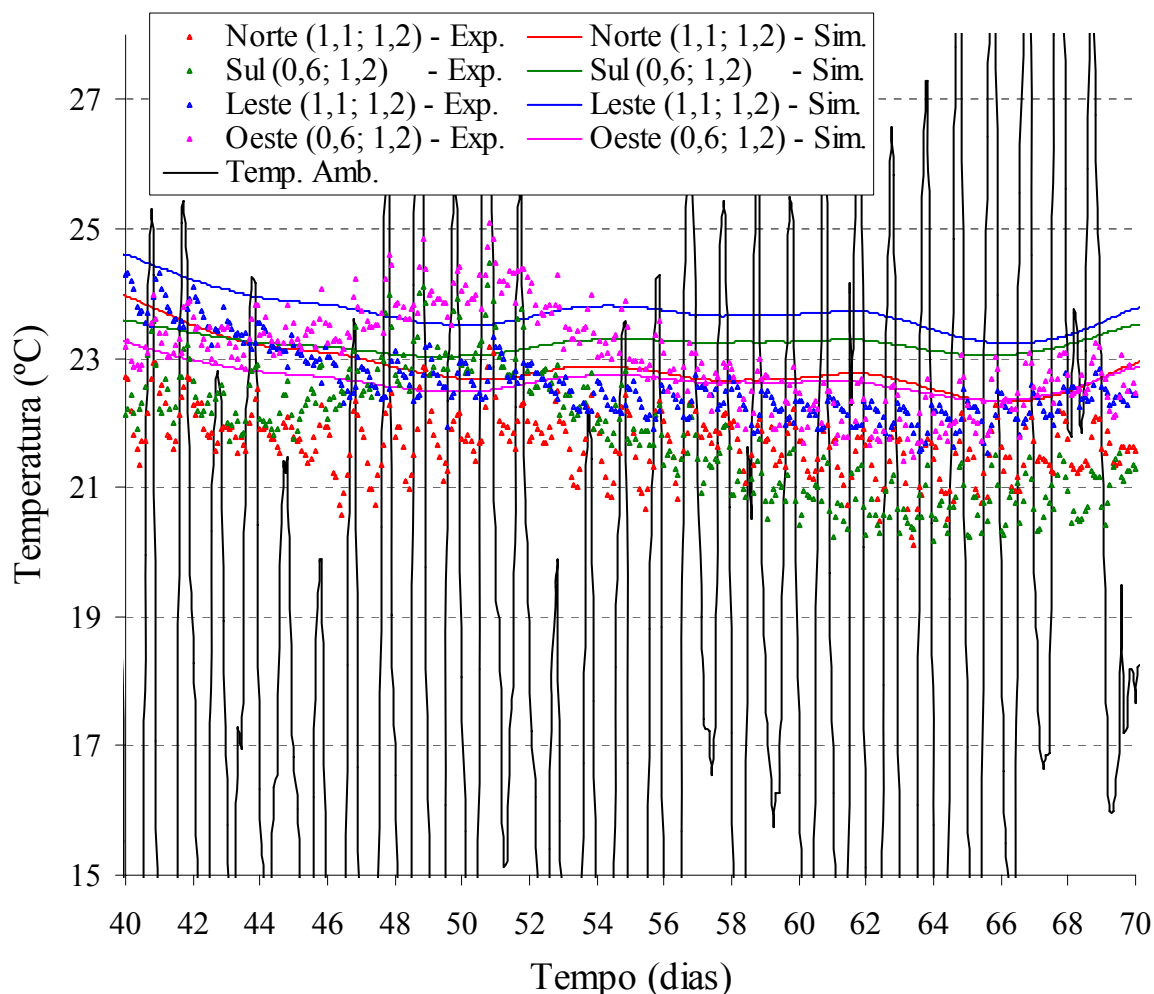


Figura 27 – Temperaturas experimentais e simuladas no interior da massa de grão em pontos localizados a 1,2 m de profundidade radial e 0,6 e 1,1 m de distância vertical, durante o período de 30 a 110 dias.

Durante o período de armazenamento não foi notada a presença de fungos no interior da massa de grãos e nem de bolsas de calor. Porém, no 120º dia observou-se a presença de insetos na superfície da massa de grãos. Isto foi contornado com uma fumigação. Após este procedimento, não se constatou mais a presença de insetos nas amostras.

A Figura 28 apresenta a distribuição de temperatura em pontos localizados próximos aos limites do sistema (a 0,1 m das superfícies superior e inferior), ao longo de todo período de armazenagem. A Figura 29 apresenta, para melhor visualização, a distribuição de temperatura nos mesmos pontos para os primeiros dez dias de armazenagem. Observa-se destas figuras que a resposta do modelo

às variações externas foi razoável. Os maiores desvios entre os valores de temperatura, simuladas e experimentais, para pontos próximos da superfície superior e da inferior foram de 1,6, e 1,3%, respectivamente.

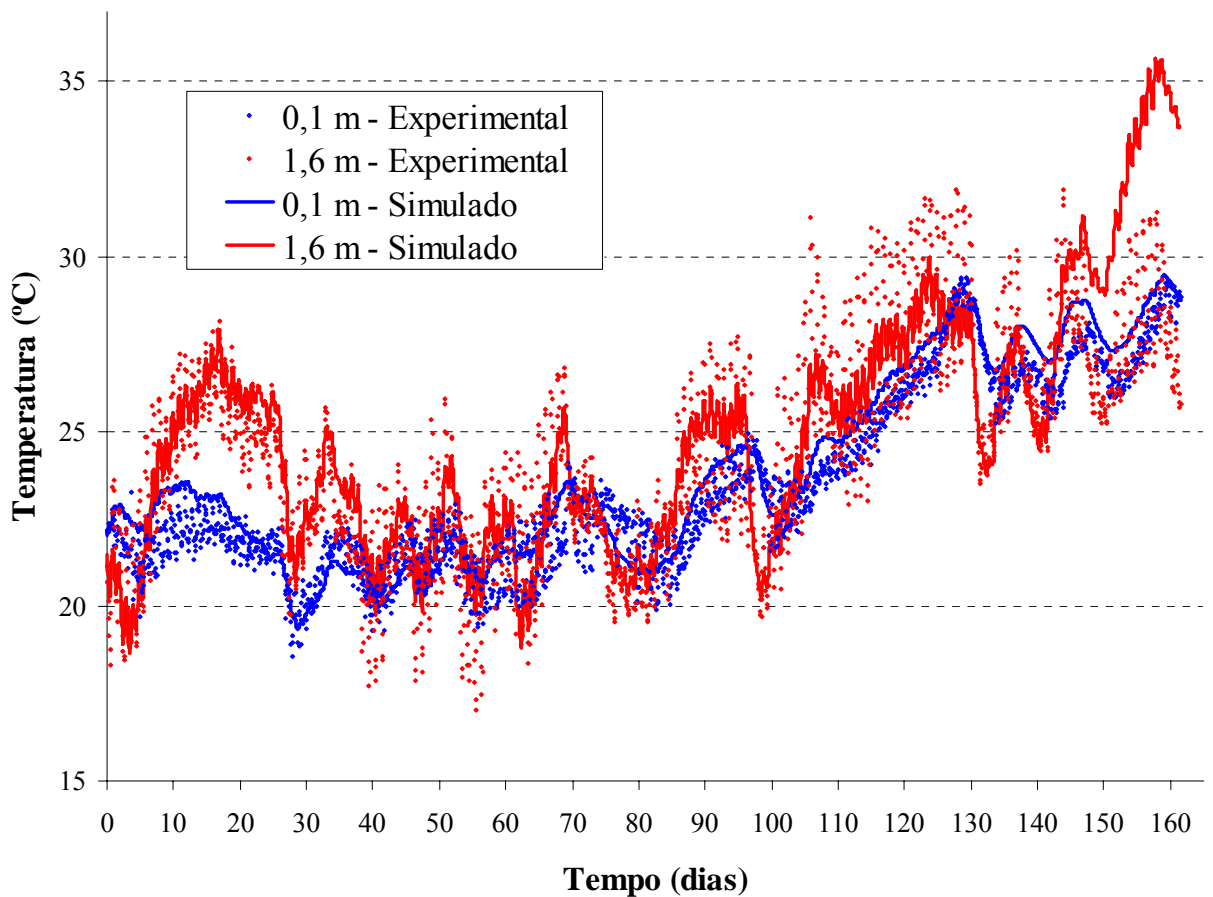


Figura 28 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,1 e 1,6 m de distância vertical, próximo aos limites do sistema.

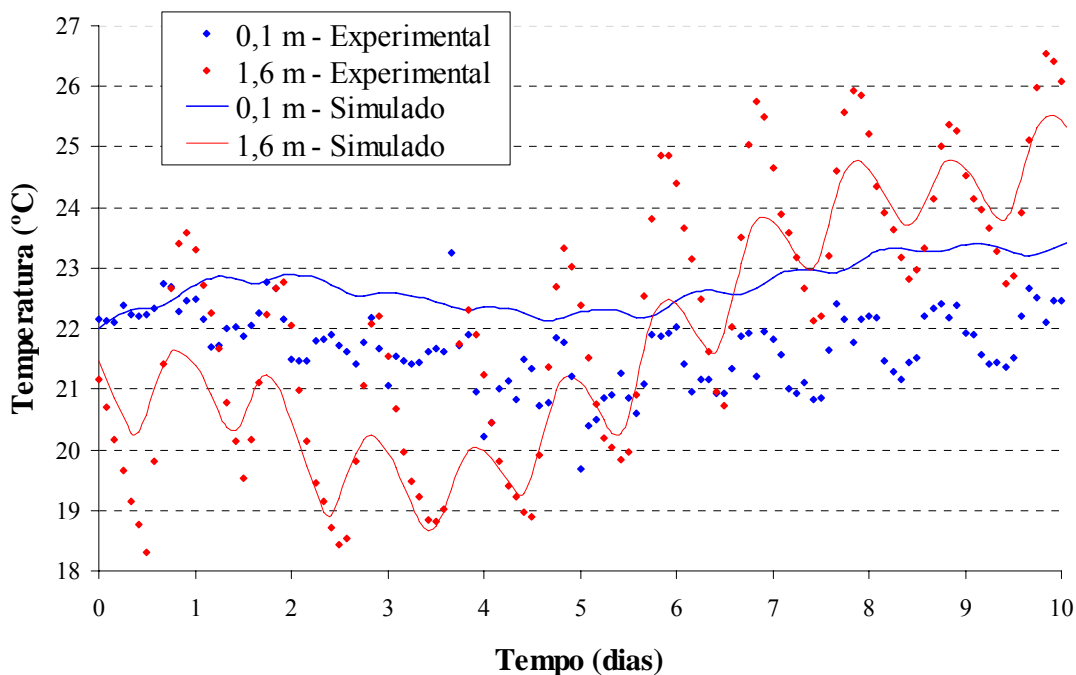


Figura 29 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grão em pontos localizados a 0,1 e 1,6 m de distância vertical, próximo aos limites do sistema, durante o período de 0 a 10 dias.

A Tabela 7 apresenta o resumo dos erros médios estimados (%) entre as temperaturas, simuladas e experimentais, nas diversas localizações no interior da massa de grãos.

Tabela 7 - Resumo dos erros médios estimados (%) para as diversas localizações no interior da massa de grãos, considerando profundidade vertical e distância radial.

	Profundidade radial (m)							
	0,6		1,2		1,8			
	0,6*	1,1*	0,6*	1,1*	0,1*	0,6*	1,1*	1,6*
Norte	2,2	-	-	4,2	-	-	-	-
Sul	-	2,7	4,0	-	-	-	-	-
Leste	2,2	-	-	2,9	-	-	-	-
Oeste	-	1,2	0,2	-	-	-	-	-
Centro	-	-	-	-	1,3	1,6	1,5	1,6

* Distância vertical (m)

4.2.3. Modelagem do Sistema com Geração de Calor

A resposta do sistema à introdução de fontes de calor, acionadas em uma determinada ordem seqüencial (Tabela 3), é apresentada nas seções que seguem. Nas apresentações e discussões dos resultados foram observadas as nomenclaturas usadas para os pontos conforme as esquematizadas na Figura 5.

4.2.3.1. Acionamento das Fontes de Calor Segundo a Seqüência 1

As Figuras 30 e 31 apresentam as distribuições de temperatura, em diferentes posições do sistema, quando as fontes de calor 1 e 4 (Figura 5) foram acionadas, simultaneamente, a partir de um tempo igual a 124,8 dias.

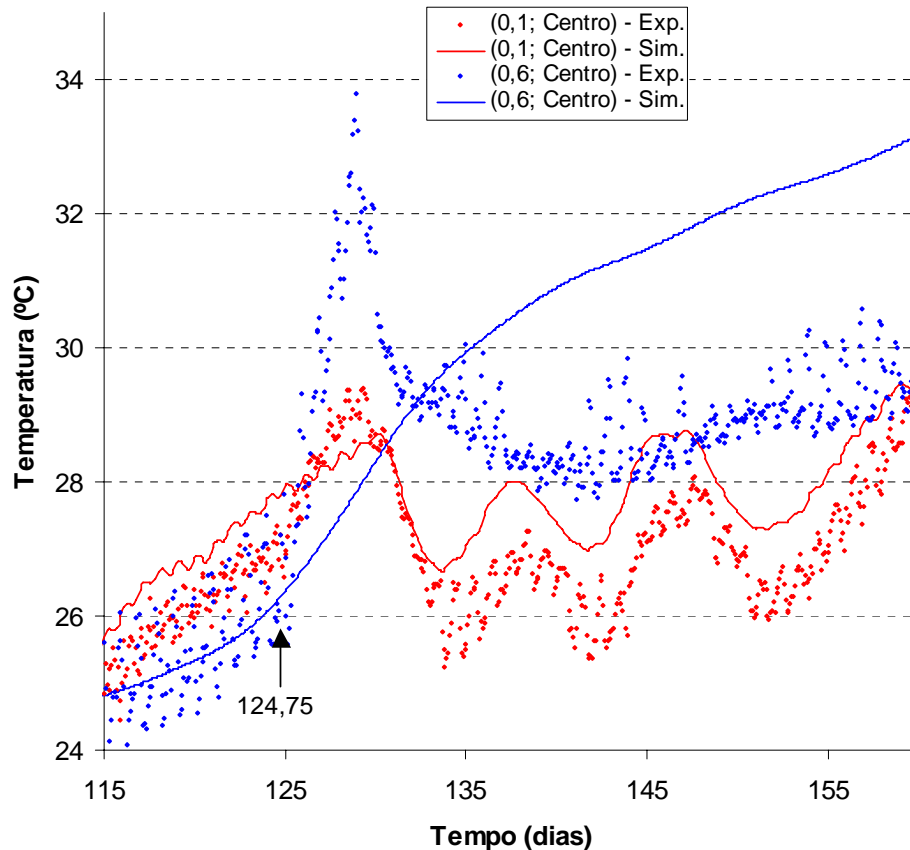


Figura 30 – Seqüência 1 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 4.

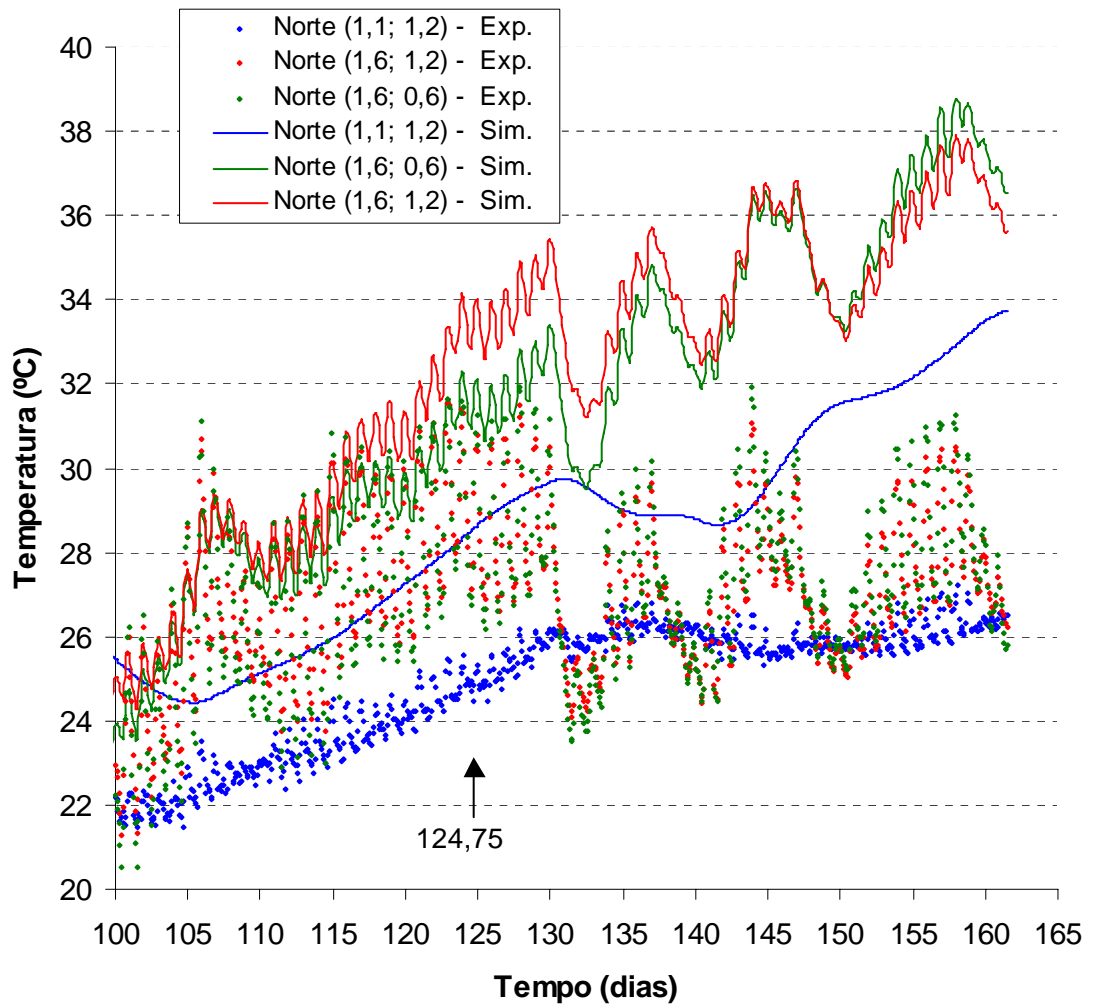


Figura 31 – Seqüência 1 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados próximos à fonte 1.

A Figura 30 apresenta a distribuição de temperatura em pontos situados no eixo longitudinal central do silo, a distâncias verticais de 0,1 e 0,6 m, abaixo e acima da fonte 4, respectivamente. Pode-se observar que, antes de acionar as fontes, o modelo simulou, de uma maneira adequada, as temperaturas nestes pontos, entretanto, após o acionamento das fontes, o mesmo não ocorreu, principalmente para as temperaturas relativas ao ponto acima da fonte 4. Nota-se, para o ponto abaixo da fonte 4, que as temperaturas simuladas e experimentais apresentaram um comportamento similar, entretanto, os valores simulados superestimam os experimentais.

Observa-se da Figura 30 que existe uma resposta imediata do sistema ao serem acionadas as fontes e que a geração de calor alterou, mais visivelmente, as temperaturas experimentais do ponto situado acima da fonte 4.

A Figura 31 apresenta a distribuição de temperatura em pontos situados na vizinhança da fonte 1. Os pontos Norte (1,6; 1,2) e Norte (1,6; 0,6) encontram-se a 0,1 m da superfície da massa de grãos e o ponto Norte (1,1; 1,2) está localizado mais no interior da massa, a 0,6 m da superfície. Pode-se observar que o acionamento das fontes de calor foi quase imperceptível nestes pontos.

Pela Figura 31 observa-se que, antes do acionamento das fontes, já existia uma defasagem de, aproximadamente, 3 °C entre os valores das temperaturas simulada e experimental no ponto Norte (1,1; 1,2).

4.2.3.2. Acionamento das Fontes de Calor Segundo a Sequência 2

As Figuras 32 e 33 apresentam as distribuições de temperatura, em diferentes posições do sistema, quando as fontes de calor 2 e 6 (Figura 5) foram acionadas, a partir de um tempo igual a 129,8 dias.

Pelas Figuras 32 e 33 pode-se observar que, após o acionamento das fontes, houve uma elevação perceptível de temperatura somente nos pontos Norte (0,6; 0,6) e Sul (0,6; 1,2), localizados acima das fontes e mais no interior da massa de grãos. Da Figura 32 nota-se, também, que a grande dispersão nos valores das temperaturas dos pontos Norte (0,1; 0,6) e Norte (0,1; 1,2) foi reduzida após o acionamento das fontes.

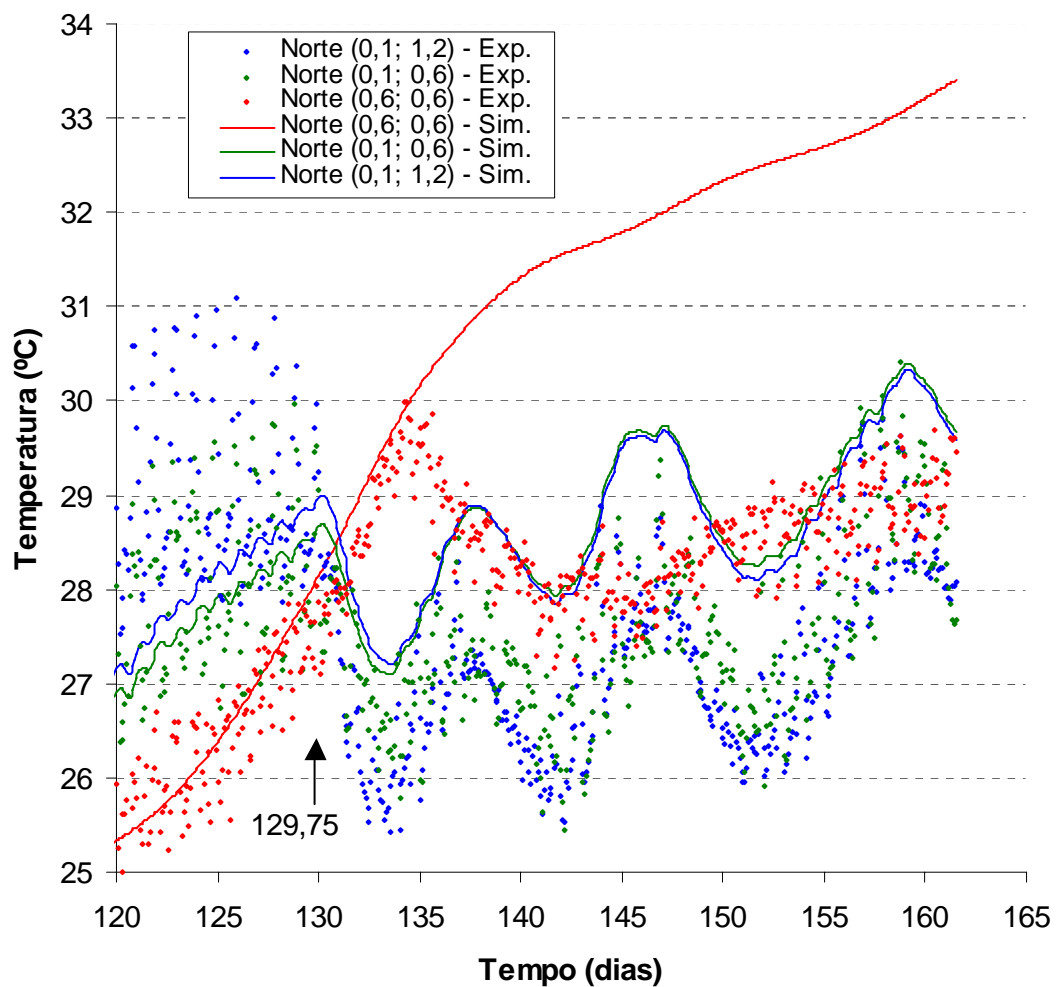


Figura 32 – Seqüência 2 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados na vizinhança da fonte 2.

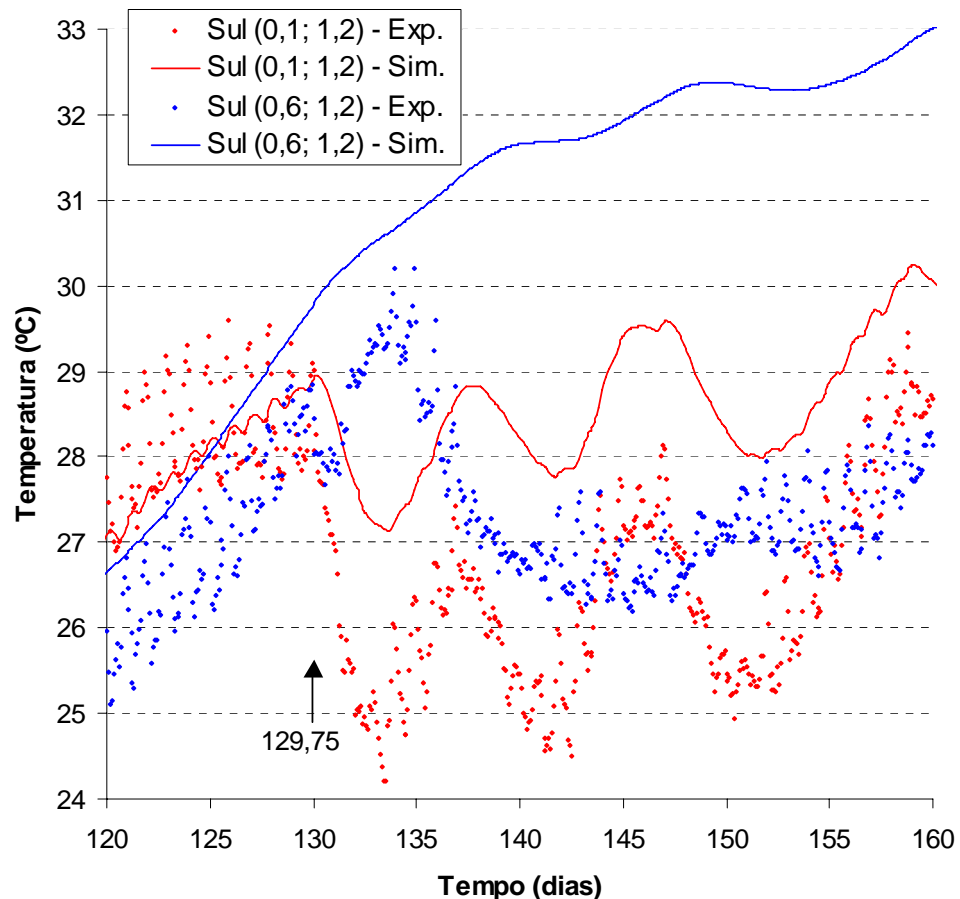


Figura 33 – Seqüência 2 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 6.

4.2.3.3. Acionamento das Fontes de Calor Segundo a Seqüência 3

As Figuras 34 e 35 apresentam as distribuições de temperatura, em diferentes posições do sistema, quando as fontes de calor 3 e 5 (Figura 5) foram acionadas, a partir de um tempo igual a 141,5 dias. Pode-se observar da Figura 5 que de todas as seqüências de acionamento das fontes, a seqüência 3 é a que apresenta as fontes mais próximas, propiciando, assim uma maior geração de calor na região envolvida.

Após o acionamento das fontes 3 e 5, observa-se da Figura 34 que as temperaturas experimentais dos pontos situados acima (1,6 m) e abaixo (1,1 m) da fonte 3 apresentam uma ligeira elevação e a seguir, enquanto a do ponto acima da fonte decresce, a do ponto abaixo permanece, praticamente, constante.

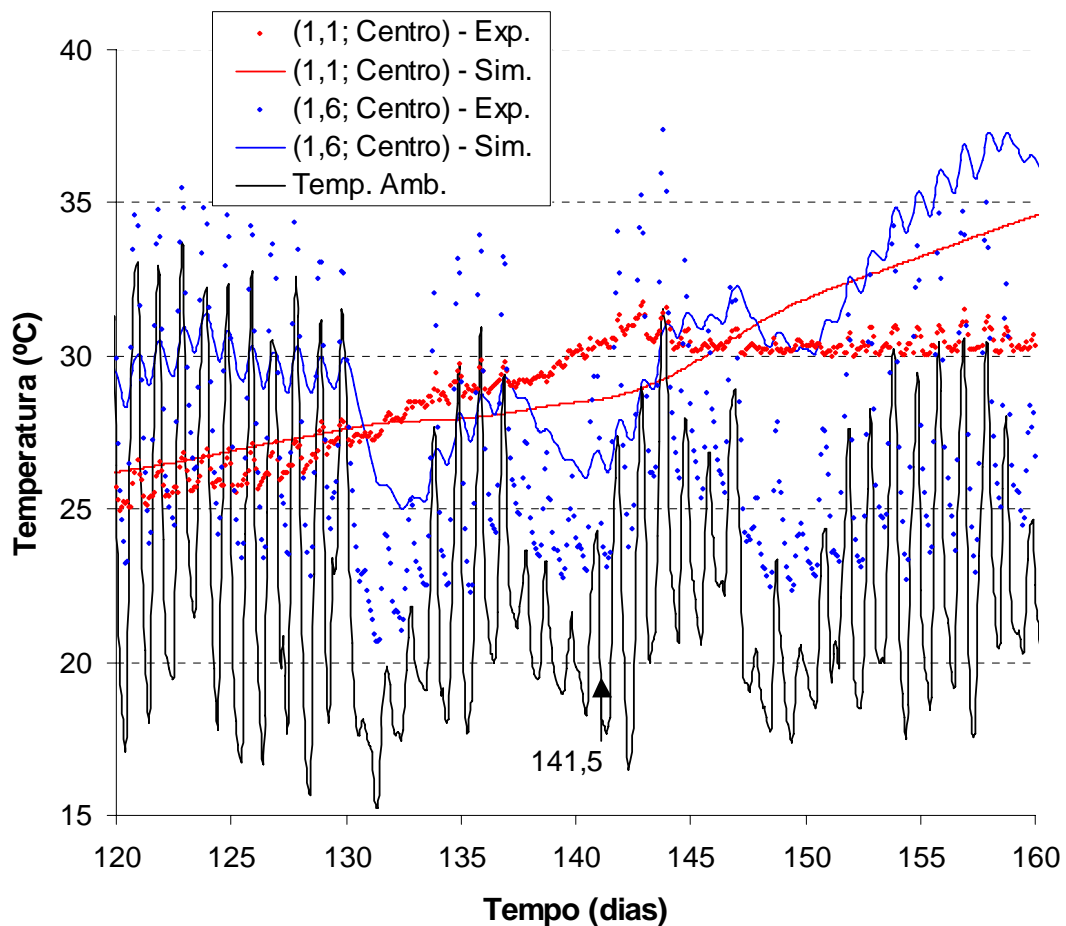


Figura 34 – Seqüência 3 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados acima e abaixo da fonte 3.

A Figura 34 apresenta a distribuição de temperatura em pontos situados no eixo longitudinal central do silo, a distâncias verticais de 1,1 e 1,6 m, abaixo e acima da fonte 3, respectivamente. Inicialmente, é interessante notar a pequena dispersão, ao longo do período de armazenamento, dos valores experimentais da temperatura no ponto situado a uma distância de 1,1 m (mais interno na massa de grãos). Entretanto, pode-se observar uma grande dispersão dos valores das temperaturas experimentais no ponto situado em 1,6 m (mais próximo da superfície superior da massa de grãos), indicando um efeito mais dominante das variações das condições externas ao sistema. Antes do acionamento das fontes 3 e 5, a temperatura do ponto situado acima da fonte 3 aumenta e diminui ao longo do tempo, enquanto aquela do ponto situado abaixo da fonte 3 é sempre

crescente. Na Figura 34 encontram-se, também, as variações das temperaturas ambientais, externas ao sistema.

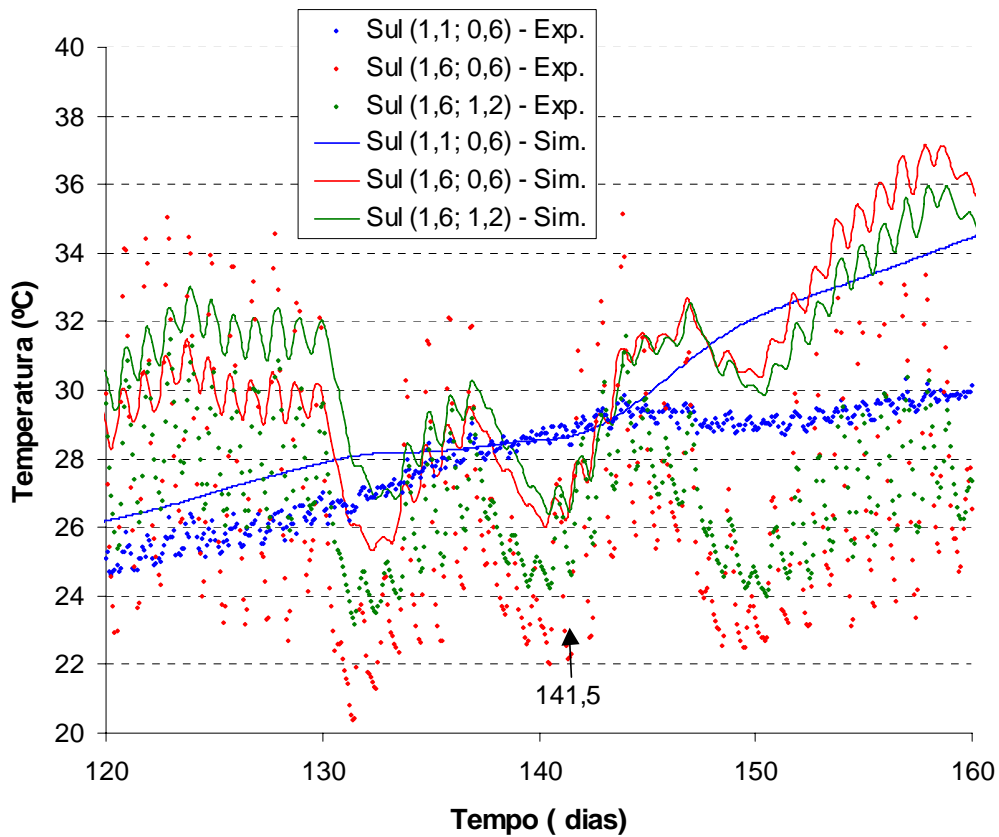


Figura 35 – Seqüência 3 de geração de calor. Distribuição de temperatura em pontos situados na vizinhança da fonte 5.

Uma observação mais minuciosa das Figuras de 30 a 35 mostra que:

- os valores das temperaturas experimentais, de pontos situados mais no interior da massa de grãos, apresentaram pequena dispersão ao longo do período de armazenamento, antes e após o acionamento das fontes de calor;
- os valores das temperaturas experimentais, de pontos situados mais próximos à superfície superior da massa de grãos, apresentaram grande dispersão, enquanto, aqueles para pontos situados mais próximos à superfície inferior apresentaram pequena dispersão;
- após o acionamento das fontes, as distribuições de temperaturas simulada e experimental, para pontos próximos às superfícies superior e inferior do

silos, possuem a mesma forma. Entretanto, os valores das temperaturas simuladas encontram-se defasados daqueles experimentais e, sempre, superestimando-os; e

- (d) quando os pontos se situam mais no interior da massa de grãos, os valores das temperaturas simuladas, após o acionamento das fontes, se afastam progressivamente daqueles para as temperaturas experimentais.

Diante do exposto, vê-se que as temperaturas simuladas tenderam, sempre, a sobreestimar as experimentais, indicando, assim, problemas na modelagem do sistema com geração de calor. No modelo implementado, a transferência de calor no interior do sistema (massa cilíndrica, isotrópica e compacta) é por condução. Na realidade, a massa de grãos é um meio poroso e um comportamento mais adequado do modelo, provavelmente, seria obtido com a inclusão da transferência de calor por convecção natural no interior da massa de grãos.

Em situações reais de infestações, existe o aquecimento localizado da massa de grãos e a formação de uma “bolsa de calor”, na qual a massa do produto se torna compacta. A porosidade da massa, nesta região, se reduz drasticamente, impossibilitando a movimentação de calor por convecção. Porém, no sistema investigado, as fontes de calor usadas (lâmpadas) não propiciaram alterações na porosidade da massa de grãos, possibilitando a transferência de calor por convecção natural no interior da massa e, assim, dificultando a modelagem do sistema.

Na Figura 36 observa-se a representação gráfica do modelo implementado, após 161,5 dias de armazenagem, sem geração de calor. Nota-se que as temperaturas se distribuem de maneira tendenciosa, sendo o lado Norte do silo o mais aquecido. Esta distribuição de temperatura foi simulada às 8:00 hs da manhã; os gradientes de temperatura na superfície do silo durante o dia já não são tão pronunciados devido ao resfriamento noturno.

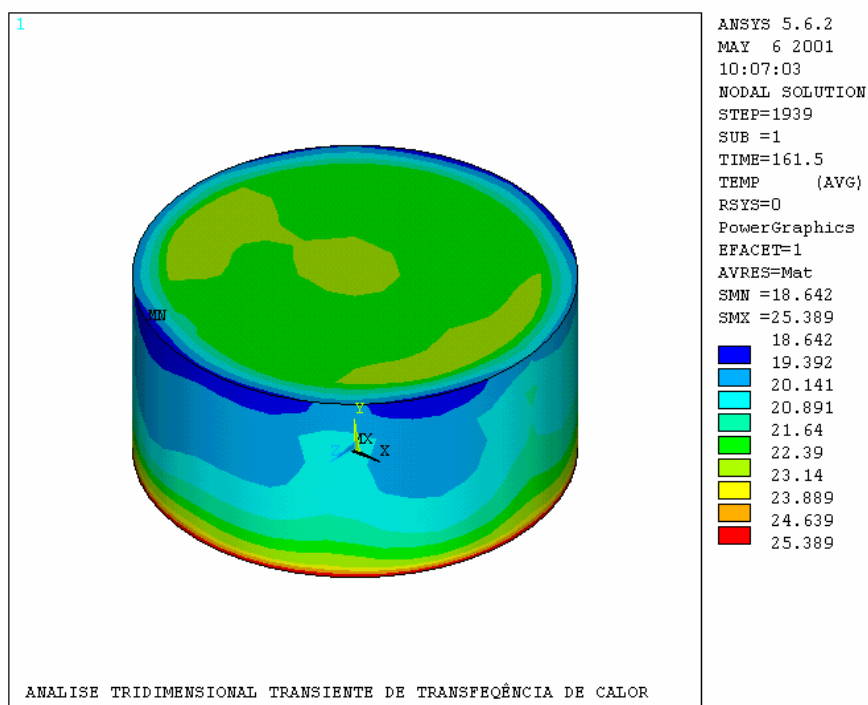


Figura 36 – Representação gráfica do modelo implementado após 161,5 dias de armazenagem, sem geração de calor (8:00 hs).

A Figura 37 apresenta a representação gráfica do modelo implementado, durante diversos períodos de armazenagem, com geração de calor.

Por estas figuras pode-se dizer que o lado Norte do silo, representado pela direção do eixo x (negativo), foi a que recebeu maior energia proveniente de radiação solar, e que o lado Sul, representado pela direção do eixo x (positivo), recebeu menos energia.

Pode-se observar que as fontes de calor só passaram a ser perceptíveis na superfície da massa de grãos próximo a 140 dias de armazenagem, sendo observada a elevação de temperatura, primeiramente, no lado Norte, provavelmente, por ser o lado que recebe maior quantidade de energia proveniente da radiação solar, e também por que as primeiras fontes (1 e 4) foram ligadas no Centro e no Norte. Após este período de geração, o gradiente de temperatura passa a ser perceptível em toda direção Norte-Sul, porém a região Norte continua apresentando maiores temperaturas, até o final da geração de calor.

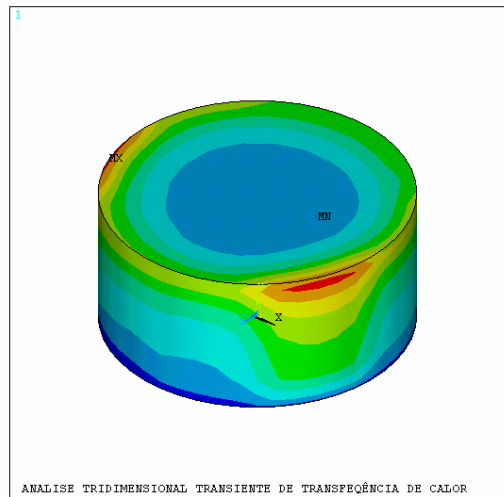
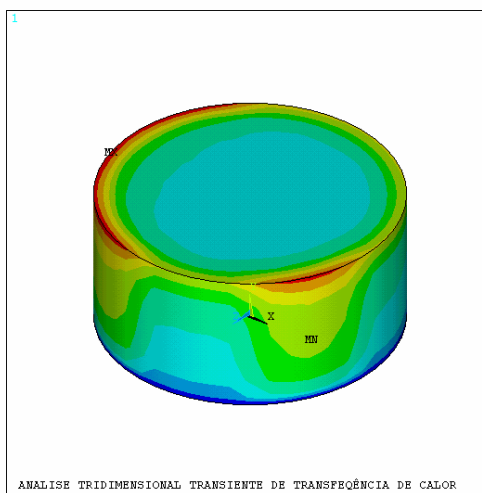
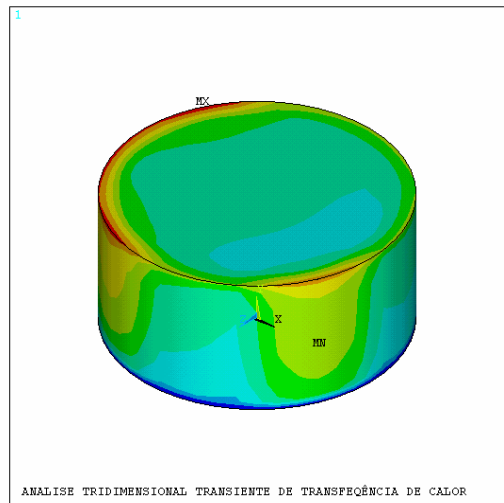
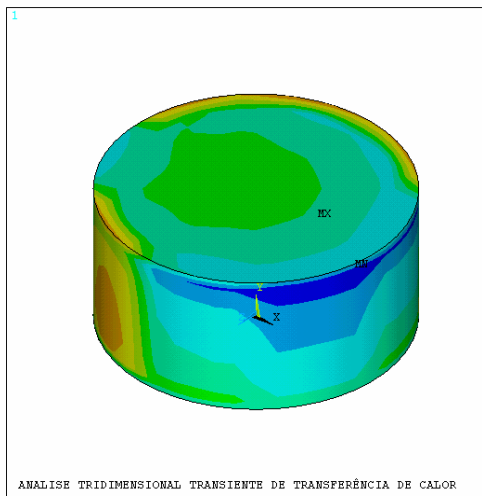
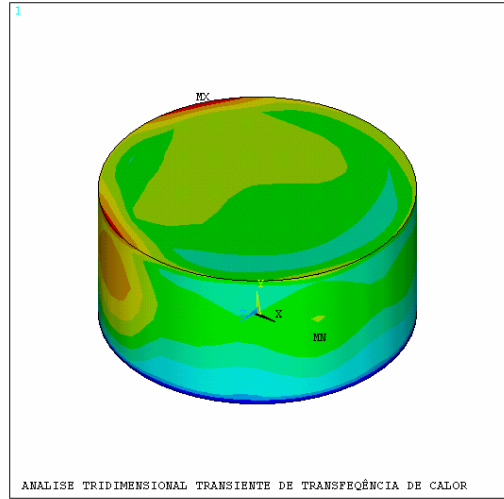
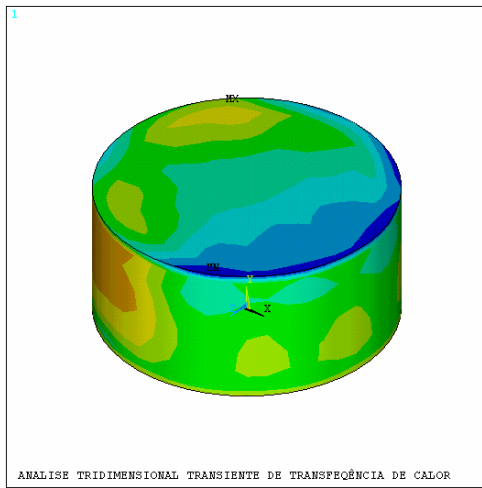


Figura 37 – Representação gráfica do modelo implementado durante diversos períodos de armazenamento, com geração de calor.

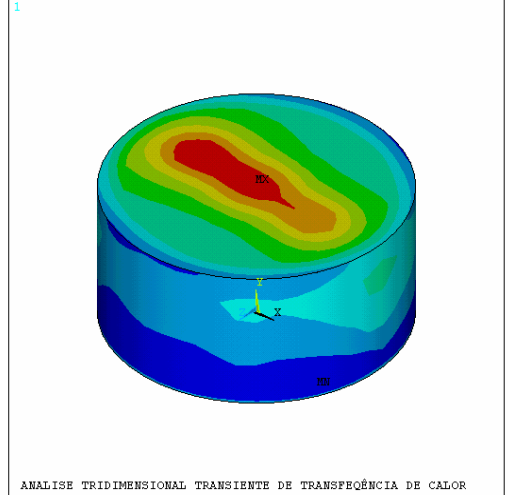
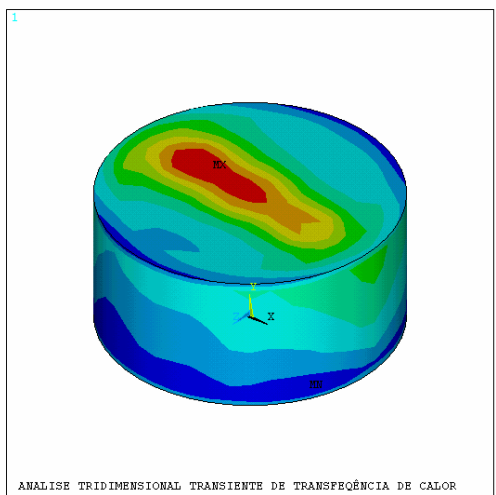
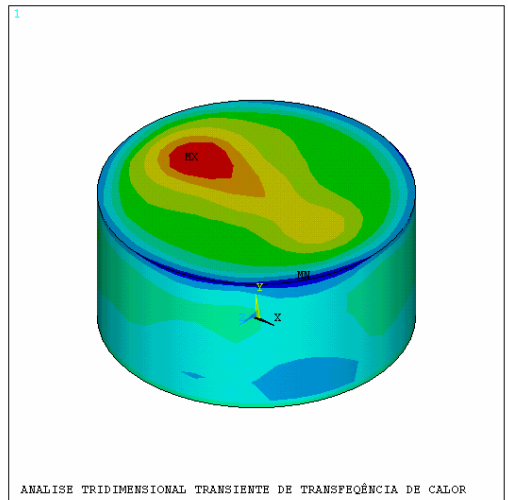
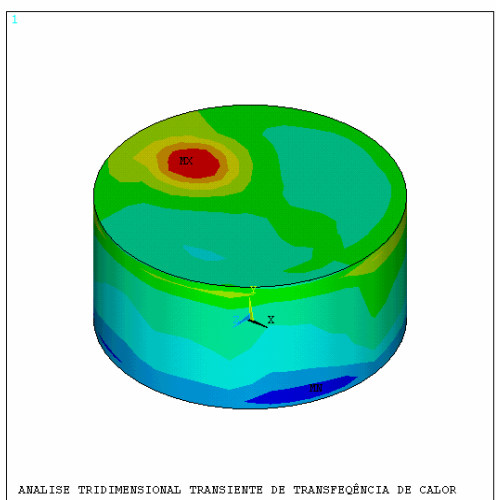
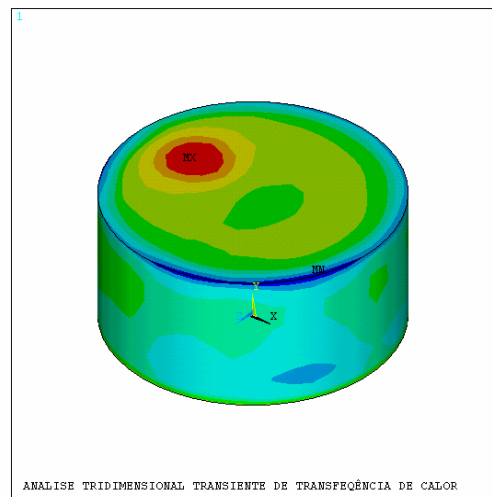
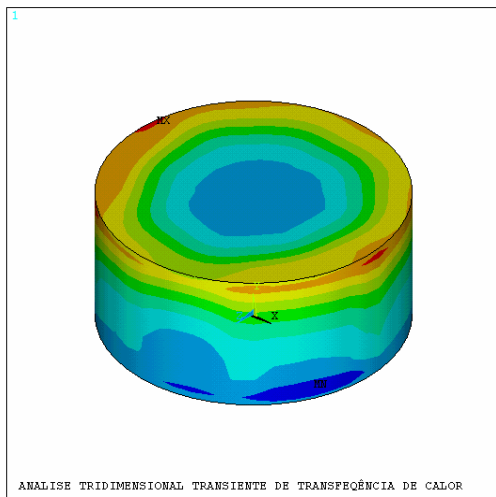


Figura 37 – Representação gráfica do modelo implementado durante diversos períodos de armazenagem, com geração de calor (cont.).

4.3. Qualidade da Massa de Grãos Armazenada

4.3.1. Qualidade Física

A Figura 38 apresenta as variações do teor de umidade de amostras de grãos de milho em função do tempo de armazenamento e da posição no interior do silo (profundidade radial e distância vertical, Figura 7). No início do armazenamento, o produto, nas diferentes profundidades, encontrava-se a um teor de umidade de 13,1% b.u. e ao final do período de armazenamento, com 11,4 % b.u., indicando, em condições médias, uma secagem do produto durante o período de armazenamento.

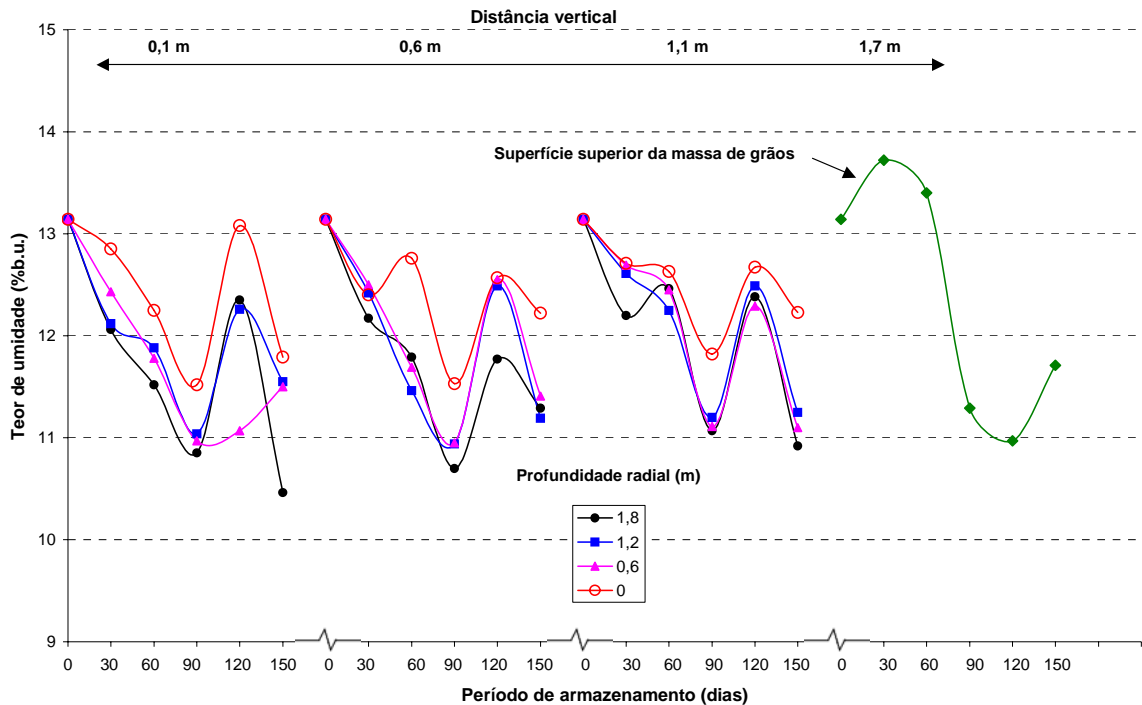


Figura 38 - Variação do teor de umidade dos grãos armazenados com o período de armazenagem.

Da Figura 38 observa-se que as camadas mais externas sofreram maiores variações do teor de umidade. Em relação ao teor de umidade inicial, as umidades do produto, nas diferentes localidades, sempre diminuíram. Exceção se faz à umidade da amostra de grãos na camada superior (1,7 m), que sofreu um

acréscimo no primeiro período de armazenagem (30 dias) e no segundo (60 dias).

Pode-se observar na Figura 38 que o teor de umidade na camada superior da massa de grãos (1,7 m) sofreu grande variação durante o período de armazenamento, provavelmente devido à influência mais acentuada das condições ambientais externas. Pode-se observar durante o período de armazenamento que a superfície superior da massa de grãos e o teto do silo sofreram condensação de umidade, provocando uma elevação anormal de umidade.

Para investigar o efeito das variações das condições externas ambientais no teor de umidade das camadas superficiais (superior e inferior) da massa de grãos, estimou-se, inicialmente, valores de teores de umidade de equilíbrio para o milho, usando-se as equações (PINTO et al., 1991):

$$U_e = \frac{7,4776 UR^{0,4584}}{\ln\left(\frac{9T_f}{5} + 32\right)} \quad \text{para} \quad 0 < UR \leq 52\% \quad (46)$$

$$U_e = \frac{21,2198 \exp(0,0146 UR)}{\ln\left(\frac{9T_f}{5} + 32\right)} \quad \text{para} \quad 52 < UR < 100\% \quad (47)$$

em que,

U_e = Umidade de equilíbrio do milho, % b.s.;

UR = Umidade relativa do ar, %;

T_f = Temperatura do grão, °C.

A Figura 39 apresenta as variações médias dos teores de umidade de equilíbrio nas camadas superficiais, superior e inferior, juntamente com as umidades relativas destas camadas e a ambiente. Para construção desta figura, foram utilizados dados médios de cada cinco dias de coleta e as equações (46) e (47). Observa-se que a umidade relativa média do ambiente externo se manteve sempre acima da umidade relativa nas camadas superior e inferior; a massa de grãos nestas superfícies apresentavam-se sempre com temperaturas médias acima da média ambiental. Nota-se, também, que a superfície superior

apresentou teor de umidade maior que a superfície inferior, praticamente, durante todo o período de armazenagem.

Observa-se das Figuras 38 e 39 que existe uma grande diferença nos valores de teor de umidade das camadas superficiais, superior e inferior, e isto pode influenciar na qualidade dos grãos nestas camadas.

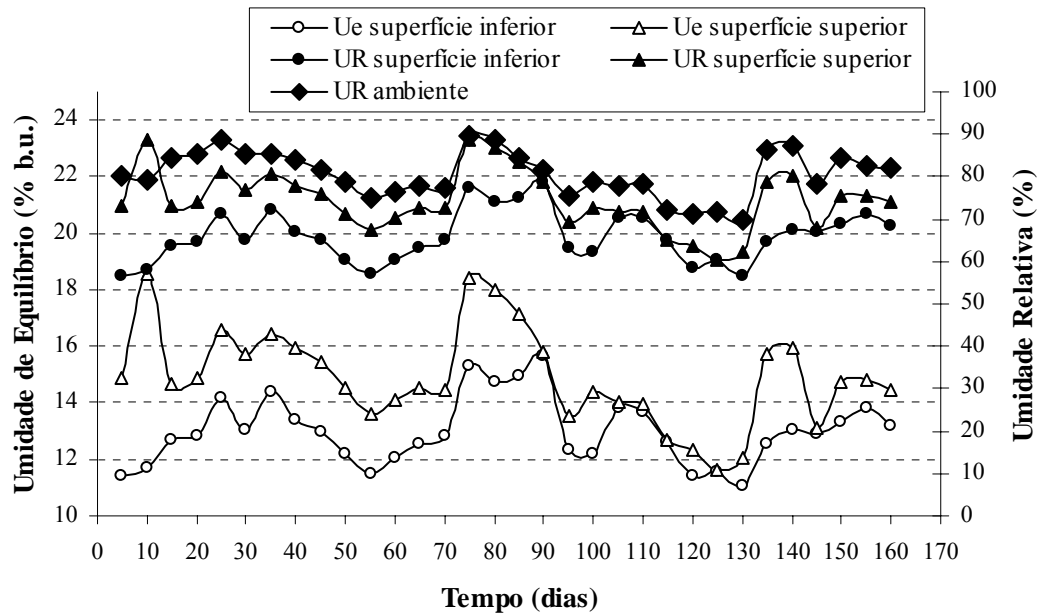


Figura 39 – Médias do teor de umidade de equilíbrio e umidade relativa na superfície superior e inferior da massa de grãos.

A Figura 40 apresenta as variações da massa específica de amostras de grãos de milho em função do tempo de armazenagem e da posição no interior do silo (distância vertical e profundidade radial, Figura 7). O produto, nas diferentes profundidades, apresentava, inicialmente, uma massa específica igual a $724,4 \text{ kg m}^{-3}$.

Observa-se da Figura 40 que a massa específica aparente dos grãos, nas diversas profundidades e períodos de armazenagem, se manteve praticamente constante, exceto para a camada superficial (1,7 m). Nestes casos, os valores da massa específica dos grãos sempre diminuiram em relação àqueles para o tempo inicial de armazenagem.

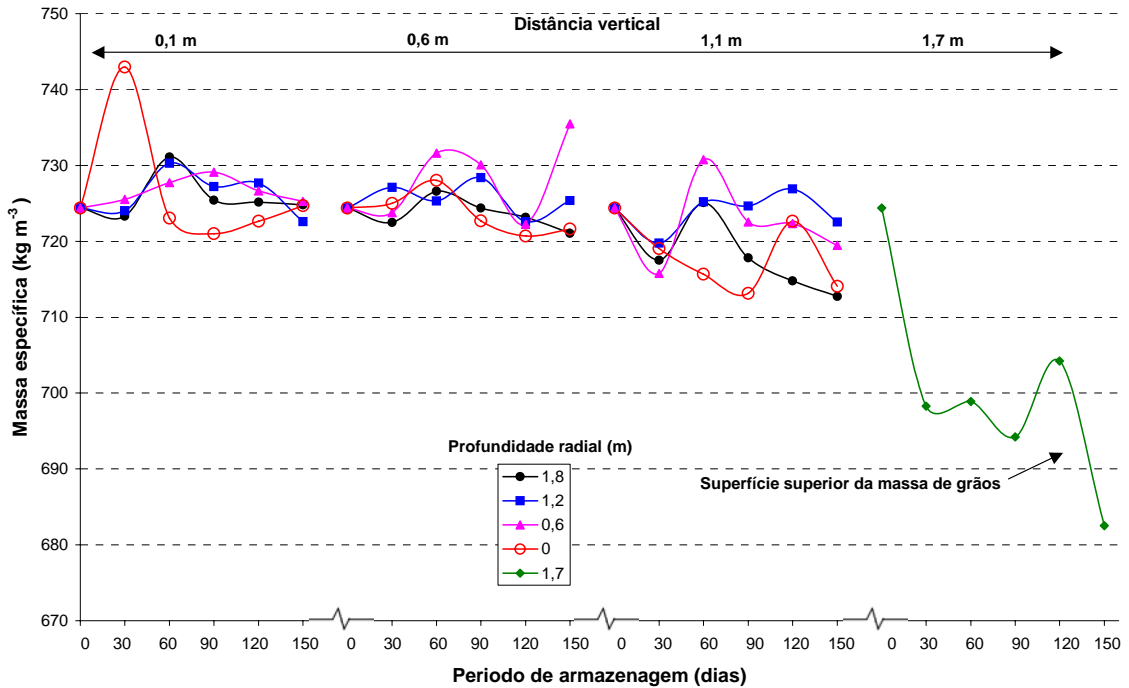


Figura 40 - Variação da massa específica dos grãos armazenados com o período de armazenagem.

As Figuras 41 e 42 apresentam variações da massa específica aparente média dos grãos, em função do tempo de armazenagem, para diferentes distâncias verticais e profundidades radiais, respectivamente. Quando se relaciona a massa específica aparente com a profundidade da camada de armazenamento, não se observa um efeito da posição, a não ser quando se compara com a camada superficial que sofreu uma leve queda na massa específica.

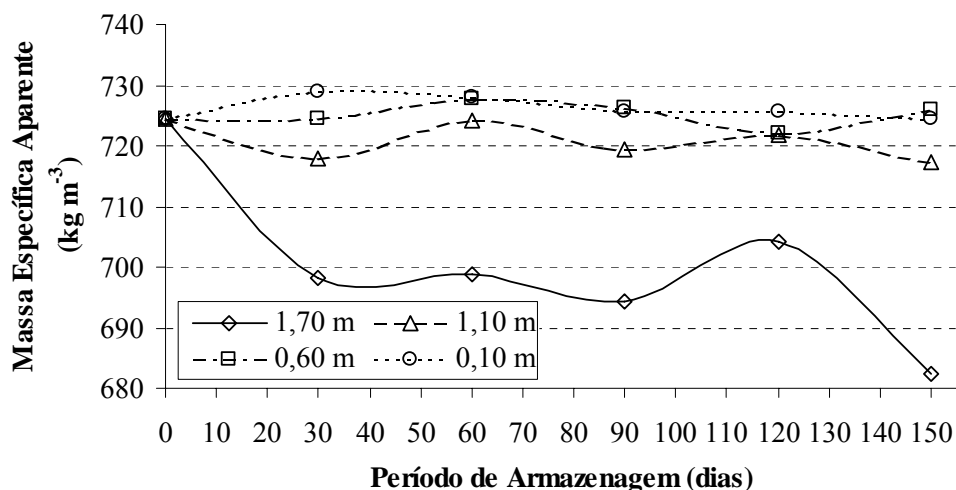


Figura 41 - Valores da massa específica aparente dos grãos de milho em diferentes distâncias verticais.

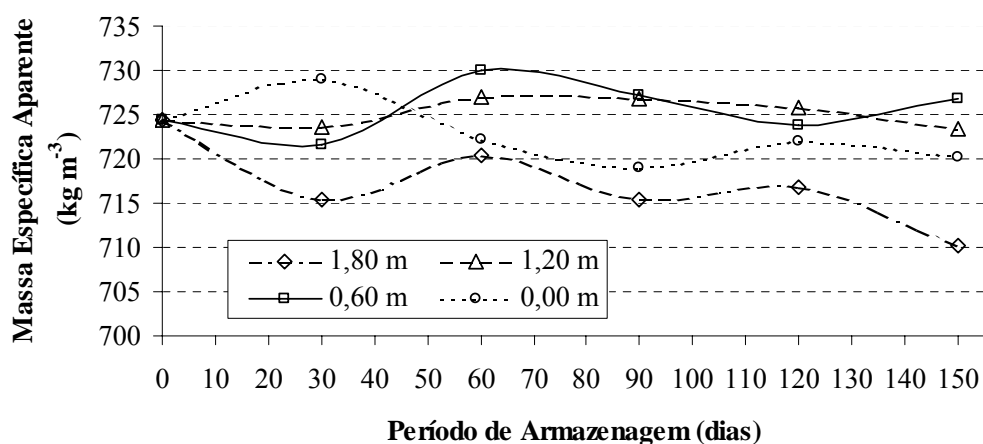


Figura 42 - Valores da massa específica aparente dos grãos de milho em diferentes profundidades radiais.

4.3.2. Qualidade Fisiológica

A Tabela 8 apresenta os resultados do teste-padrão de germinação das amostras de milho durante período de 150 dias de armazenamento. Os resultados mostram a tendência de a qualidade dos grãos armazenados decrescer significativamente com o aumento do período de armazenamento, para o produto em todas as camadas investigadas.

Observa-se da Tabela 8 que, durante os meses de armazenamento, os grãos da camada superior (1,7 m) apresentaram uma maior redução de qualidade. A

queda de qualidade dos grãos da camada superior pode ser devido à condensação de umidade ocorrida nesta superfície durante alguns períodos do armazenamento, provocando sua elevação de umidade e conseqüente o desenvolvimento de fungos, e também às trocas gasosas intensificadas e a transferência de calor mais acentuadas durante o período de armazenamento, que são prejudiciais à qualidade fisiológica dos grãos.

Tabela 8 – Germinação (%) das amostras de milho durante um período de 150 dias (com germinação inicial de 94,5%).

Distância vertical / Profund. Radial (m)	Período de Armazenagem (dias)				CV(%) 7,17
	30	60	90	120	150
1,7	94,3 A	84,0 C	68,0 E	67,0 E	47,3 G
1,1 / 1,8	89,3 B	88,0 B	75,3 D	73,0 D	73,0 D
1,1 / 1,2	86,0 B	88,3 B	80,3 C	78,3 C	68,3 E
1,1 / 0,6	89,0 B	87,7 B	85,3 B	79,0 C	72,7 D
1,1 / 0,0	91,7 A	85,7 B	81,0 C	75,3 D	73,0 D
0,6 / 1,8	89,7 B	91,3 A	80,0 C	81,3 C	68,3 E
0,6 / 1,2	92,0 A	88,7 B	79,0 C	82,0 C	70,0 E
0,6 / 0,6	87,7 B	88,7 B	80,0 C	81,7 C	68,7 E
0,6 / 0,0	89,0 B	87,7 B	83,7 C	74,7 D	75,0 D
0,1 / 1,8	85,3 B	88,7 B	78,7 C	76,3 D	69,0 E
0,1 / 1,2	83,7 C	88,0 B	79,7 C	77,7 D	70,7 E
0,1 / 0,6	90,0 B	89,3 B	79,7 C	80,0 C	75,0 D
0,1 / 0,0	89,3 B	89,3 B	77,0 D	79,0 C	71,3 E

* Médias precedidas da mesma letra na horizontal ou na vertical não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de SCOTT KNOTT.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos testes de condutividade elétrica. Pode-se observar que não houve influência significativa entre as condutividades das amostras de grãos provenientes das diferentes camadas ao longo do período de armazenamento. Observa-se, entretanto, que o período de armazenamento proporcionou uma queda significativa na qualidade do produto, principalmente, nos grãos da camada superior.

A Figura 43 apresenta as variações das temperaturas médias, com relação às profundidades radiais, nas diferentes camadas de grãos, e, também, as variações médias da umidade relativa e temperatura do ambiente externo. As

regiões mais próximas do ambiente externo, Figura 44, apresentaram maior variação de temperatura que parecem ter acelerado a deterioração dos grãos nas camadas mais superficiais, superior e inferior. Entretanto, as variações externas de temperatura parecem ter pouca influencia nas das camadas mais profundas de grãos. A germinação dos grãos decresceu com o período de armazenamento, Figuras 44 e 45, mas não se observa um efeito médio nítido quando se comparam as diversas distâncias verticais e profundidades radiais. A queda de germinação dos grãos parece ser uma tendência natural em todo o silo.

Tabela 9 - Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$) das amostras de milho durante período de 150 dias (condutividade elétrica inicial de $14,4 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$).

Distância vertical / Profund. Radial (m)	Período de Armazenagem (dias)					CV (%) 18,41
	30	60	90	120	150	
1,7	15,3 C	19,1 C	23,3 B	23,7 B	34,5 A	
1,1 / 1,8	19,6 C	21,6 C	22,0 B	19,9 C	23,0 B	
1,1 / 1,2	18,7 C	19,1 C	19,1 C	20,0 C	16,9 C	
1,1 / 0,6	20,4 C	17,4 C	16,4 C	18,8 C	20,7 C	
1,1 / 0,0	20,1 C	22,2 B	21,1 C	18,5 C	24,2 B	
0,6 / 1,8	20,7 C	19,4 C	18,0 C	21,2 C	24,9 B	
0,6 / 1,2	18,1 C	19,9 C	18,4 C	17,6 C	23,4 B	
0,6 / 0,6	19,3 C	18,4 C	21,0 C	19,4 C	24,2 B	
0,6 / 0,0	17,7 C	22,1 B	20,3 C	25,9 B	23,0 B	
0,1 / 1,8	19,5 C	19,7 C	19,3 C	18,9 C	22,6 B	
0,1 / 1,2	22,3 B	19,5 C	21,2 C	19,4 C	21,2 C	
0,1 / 0,6	18,2 C	19,3 C	19,8 C	19,8 C	24,7 B	
0,1 / 0,0	19,1 C	18,3 C	17,3 C	20,2 C	23,8 B	

* Médias precedidas da mesma letra na horizontal ou na vertical não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de SCOTT KNOTT.

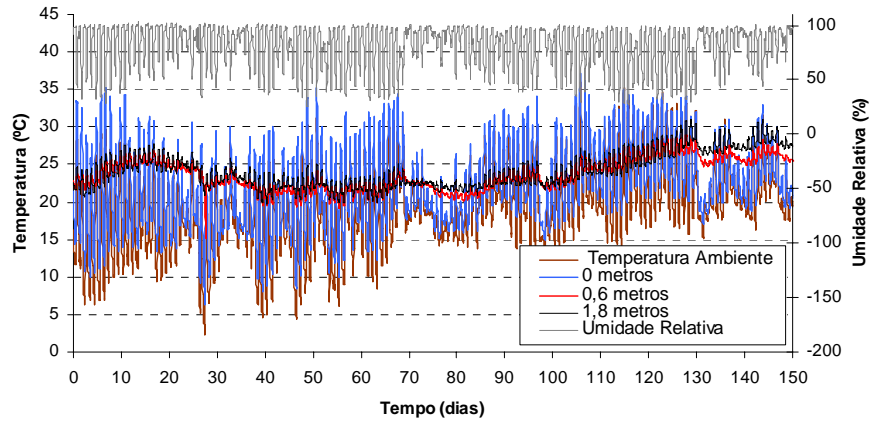


Figura 43 - Umidade relativa e temperaturas do ambiente e nas profundidades radiais da massa de grãos de milho.

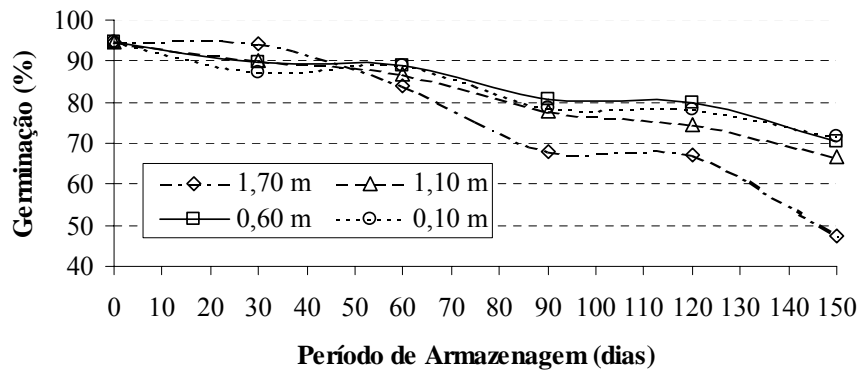


Figura 44 - Percentagem de germinação média nas diversas distâncias verticais da massa de grãos.

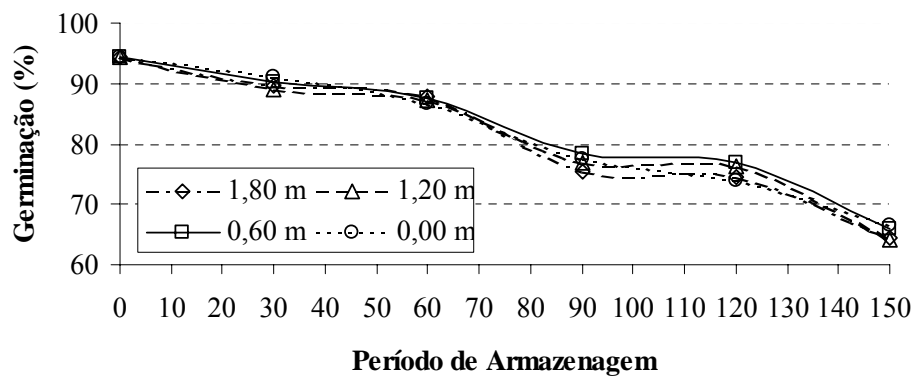


Figura 45 - Percentagem de germinação média nas diversas profundidades radiais da massa de grãos.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Para a execução deste trabalho, foram utilizados o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola e o Laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Fitotecnia, pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo, usando a técnica de elementos finitos, para a predição da distribuição de temperatura em uma massa de grãos armazenada em um silo metálico cilíndrico corrugado, com dimensões de 3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura, provido de sistema de aeração e termometria. Durante o período de armazenamento não foi utilizado o sistema de aeração. Considerou-se no modelo uma transferência de calor tridimensional, com geração interna de calor (representando o desenvolvimento de fungos e insetos) e influências dos elementos meteorológicos do ambiente externo (temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento).

Para a implementação do modelo, a condutividade térmica, a difusividade e a massa específica de amostras de grãos de milho foram determinadas experimentalmente. Parâmetros relativos ao ambiente externo ao silo (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) foram medidos continuamente durante o período experimental e serviram de entrada para o modelo.

Para validação do modelo, grãos de milho a um teor de umidade de 13,1% b.u. foram armazenados no silo descrito anteriormente. O período de armazenagem foi de 20 de junho a 29 novembro de 2000, (161,5 dias) e foram

utilizados grãos de milho (*Zea mays* L.), variedade “Vencedor”, safra de janeiro de 2000, procedentes do Município de Viçosa - MG. O produto foi colhido e trilhado mecanicamente.

Durante o período de armazenamento, a cada 30 dias, foram retiradas amostras do produto para análise de qualidade (teor de umidade, massa específica, germinação e condutividade elétrica).

Os resultados obtidos, neste trabalho, permitem as seguintes conclusões:

- a modelagem, usando a técnica de elementos finitos, de transferência de calor tridimensional em uma massa de grãos de milho, armazenada em silo metálico, sujeito às variações da temperatura ambiente, mostrou-se adequada, podendo ser utilizada em outras aplicações. O erro percentual médio envolvido nos valores simulados de temperatura, durante o armazenamento do produto, foi de, aproximadamente, 2,2%;

- a condutividade térmica de amostras de milho, com um teor de umidade (U) na faixa de 8,6 a 17,1% b.u., pode ser expressa por: $k = 0,00434 U + 0,10473 (\pm 0,00501) \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. O erro aproximado na utilização desta equação é de 3%;

- o calor específico de amostras de milho, com um teor de umidade na faixa de 8,6 a 17,1% b.u., pode ser representado por: $C = 54,453 U + 1332,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;

- gradientes de temperatura, existentes na superfície externa do silo, são uma função da radiação solar. As superfícies externas do silo situadas na região Norte e Sul foram, respectivamente, a mais quente e a mais fria, durante o período de armazenamento. Porém, estes gradientes não podem ser observados em camadas mais profundas do silo.

- a modelagem, usando a técnica de elementos finitos, da transferência de calor tridimensional em uma massa de grãos de milho, armazenada em silo metálico, sujeito às variações da temperatura ambiente e com geração de calor não proporcionou resultados satisfatórios. As temperaturas simuladas na massa de grãos foram sempre maiores que os valores experimentais. Existe a necessidade da introdução da transferência de calor por convecção natural no modelo;

- A qualidade fisiológica dos grãos foi afetada pelo período de armazenagem do produto. Entretanto, a localização dos grãos no interior do silo não influenciou na manutenção de sua qualidade; exceção se faz à camada superior da massa (1,7 m).

- Grãos armazenados na superfície superior apresentam maior queda de qualidade que aqueles armazenados na superfície inferior.

- A qualidade física dos grãos foi afetada pelo período de armazenagem; os grãos armazenados próximos às superfícies do silo, interface com o ambiente, foram os mais afetados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOUDA, S.K.; CHUNG, D.S.; SEIB, P.A.; SONG, A. Heat and mass transfer in stored milo. Part I. Heat transfer model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.35, n.5, p.1569-1573, 1992a.
- ABBOUDA, S.K.; SEIB, P.A.; CHUNG, D.S.; SONG, A. Heat and mass transfer in stored milo. Part II. Mass transfer model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.35, n.5, p.1575-1580, 1992b.
- ALAGUSUNDARAM, K; JAYAS, D.S.; WHITE, N.D.G.; MUIR, W.E. Three-dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph. v.33, n.2, p.577-584, 1990.
- ALBRIGHT, L.D. **Environment control for animals and plants**. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, 1990, 453p.
- ALMEIDA, B.V. **Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*, L.)**. Viçosa, MG: UFV, 1979. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- ALMEIDA, F.A.C.; HARA, T.; MATA, M.E.R.M.C. **Armazenamento de grãos e sementes nas propriedades rurais**. In: Simpósio “Armazenamento de grãos e sementes nas propriedades rurais”. Congresso Brasileiro de Eng. Agrícola. Campina Grande: UFPB, 1997. 291p.
- ALVES, A.R. **Irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa, MG**. Viçosa, MG: UFV, 1981. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.
- ANDRADE, E.T.; CORREA, P.C.; AFONSO JUNIOR, P.C. Propriedades térmicas da massa granular de milho (*Penisetum americanum* (L.) Leake). In: **Avances en Ingenieria Agrícola**. Facultad de Agronomía, Buenos Aires, 2000, p.545-550.

- ANNIS, P.C.; MORTON, R. The acute mortality effects of carbon dioxide on various life stages of *Sitophilus oryzae*. **Journal of Stored Products Research**, London, v.33, n.2, p.115-124, 1997.
- ANSYS. **Ansys/Multiphysics Product (Program and Program Documentation)**, Release 5.6, ANSYS Inc, Houston. 2000.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Agricultural Engineers Yearbook**. St. Joseph: Michigan, 2000. 796p.
- BAETA, F.C.; SOUZA; C.F. **Ambiência em edificações rurais – conforto animal**. Viçosa, UFV, 1997. 246p.
- BAKER, J.E. Development of four strains of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) on barley, corn (Maize), rice, and wheat. **Journal of Stored Products Research**, London, v.24, n.4, p.193-198, 1988.
- BALA, B.K.; SARKER, N.N.; BASUNIA, M.A.; ALAM, M.M. Simulation of temperature changes during storage of wheat and rough rice. **Journal of Stored Products Research**, London, v.26, n.1, p.1-6, 1990.
- BARNEY, R.J.; SEDLACEK, J.D.; SIDDIQUI, M.; PRICE, B. Quality of stored corn (MAIZE) as influenced by *Sitophilus zeamais* MOSTSCH. And several management practices. **Journal of Stored Products Research**, London, v.27, n.4, p.225-237, 1991.
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. Durham: Willey – Interscience, 1984. 477p.
- BELL, R.A. A simulation model of temperature in grain bins. Simulation conference. **Austrália**. Canberra. p.99-102, 1978.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, DF, 1992. 365p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.
- BUSCHERMOHLE, M.J.; BUNN, J.M.; SPRAY, R.A. Moisture migration in stored grain. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, paper n.88-6508. 11p., 1988.

- CARSLAW, H.S.; JAEGER, N.C. **The conduction of heat in solids**. 2^o edition. London: Oxford University Press, 1959, 510p.
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 3. ed. Campinas, SP: Fundação Cargil, 1988. 424p.
- CASADA, M.E.; YOUNG, J.H. Model for heat and moisture transfer in arbitrarily shaped two-dimensional porous media. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.6, p.1927-1938, 1994a.
- CASADA, M.E.; YOUNG, J.H. Heat and moisture transfer during transportation of shelled peanuts. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.6, p.1939-1946, 1994b.
- CHANDRA, S.; MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.14, p.644-646, 1971.
- CHANG, C.S. Thermal conductivity of wheat, corn and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.644-646, 1986.
- CHANG, C.S.; CONVERSE, H.H.; STEELE, J.L. Modeling of temperature of grain during storage with aeration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.36, n.2, p.509-519, 1993.
- CHANG, C.S.; STEELE, J.L. Development and evaluation of aeration control strategies for maintaining stored grain quality. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.11, n.4, p.577-582. 1995.
- COFIE-AGBLOR, R.; MUIR, W.E.; ZHANG, Q; SINHA, R.N. CO₂ production by *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) in stored wheat under adiabatic conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.5, p.95-104, 1995a.
- COFIE-AGBLOR, R.; MUIR, W.E.; SINHA, R.N. Comparative heat of respiration of five grain beetles in stored wheat. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.5, p.167-175, 1995b.
- COFIE-AGBLOR, R.; MUIR, W.E.; SINHA, R.N.; FIELDS, P.G. Heat production by adult *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) of different ages and densities. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.7, p.371-380, 1996.
- CONAB, Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, **Brasília**, 1997.

- CONAB. Indicadores da agropecuária. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, **Brasília**, Ano IX, nº 10, 2000, 50p.
- CONVERSE, H.H.; GRAVES, A.H.; CHUNG, D.S. Transient heat transfer within wheat stored in a cylindrical bin. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 129-133, 1973.
- DICKERSON, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, Chicago, May, p.198-204. 1965
- DONA, C.L.G.; STEWART JR., W.E. Numerical analysis of natural convection heat transfer in stored high moisture corn. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.40, p.275-284, 1988.
- DROUZAS, A.E.; SARAVACOS, G.D. Effective thermal conductivity of granular starch materials. **Journal of Food Science**, Athens, v.53, n.6, p.1795-1799, 1988.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar energy thermal processes**. John Wiley and Sons, New York, 1974, 386p.
- EMOND, J.P.; CHAU, K.V.; BRECHT, J.K.; NGADI, M.O. Mathematical modeling of gas concentration profiles in modified atmosphere bulk packages. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.41, n.4, p.1075-1082, 1998.
- FANG, Q.; LAN, Y.; KOCHER, M.F.; HANNA, M.A. Thermal conductivity of granular starch materials. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Paper n.976014. 18p. 1997.
- FERGUSON, W.J. A control volume finite element numerical simulation of the high temperature drying of spruce. **Drying Technology**, New York, v.13, n.3, p.607-634, 1995.
- FERREIRA, W.A. Armazenamento de grãos de cereais. In: CEREDA, M. P.; SANCHES L. **Manual de armazenamento e embalagem**. FEPAF – Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. p.97-113. 1983.
- FERREIRA, W.A.; MUIR, W.E. Efeito do diâmetro e dos materiais da parede do silo metálico na temperatura de grãos armazenados. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.6, n.2, p.11-18, 1981.
- FRANCA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; HAGHIGHI, K.; KRUTZ, G.W. The application of adaptive finite element analysis to heat and mass transfer problems. **Journal Agricultural Engineering Resource**, Silsoe, v.62, p.49-60, 1995.

- FREER, M.W.; SIEBENMORGEN, T.J.; COUVILLION, R.J.; LOEWER, O.J. Modeling temperature and moisture content changes in bunker-stored rice. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p.211-220, 1990.
- GONG, Z.X.; DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A.S. A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory concrete. **Drying Technology**, New York, v.13, n.3, p.585-605, 1995.
- GONG, Z.X.; DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A.S. A two-dimensional finite element model for wheat drying in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, New York, v.15, n.2, p.575-592, 1997.
- GUSTAFSON, R.J.; THOMPSON, D.R.; SOKHANSANJ, S. Temperature and stress analysis of corn kernel – Finite Element Analysis. **Transactions of the ASAE**. p.955-960, 1979.
- HAGSTRUM, D.W. Seasonal variation of stored wheat environment and insect populations. **Environment Entomology**, Lanham, v.16, p.77-83, 1987.
- HAGSTRUM, D.W.; MILLIKEN, G.A. Modeling differences in insect developmental times between constant and fluctuating temperatures. **Annals Entomology Society of America**, Lanham, v.84, n.4, p.369-379, 1991.
- HOOPER, F.C.; LEPPER, F.R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. **Transactions ASHVE**. v.56, p.309-322, 1950.
- INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons, New York, 1996, 886p.
- IRUDAYARAJ, J; HAGHIGHI, K; STROSHINE, R.L. Finite element analysis of drying with application to cereal grain. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.53, p.209-229, 1992.
- JASANSKY, A.; BILANSKI, W.K. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p.100-103. 1973
- JAYAS, D.S.; WHITE, N. D.G.; MUIR, W.E. **Stored-Grain Ecosystems**. Marcel Dekker, Inc. New York. 1995, 756p.
- JIANG, S.; JOFRIET, J.C. Finite element prediction of silage temperatures in tower silos. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.6, p.744-750, 1987.

- KHANKARI, K.K.; MOREY, R.V.; PATANKAR, S.V. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1591-1604, 1994.
- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. Ed. Edgard Blucher Ltda. SP. 1977, 550p.
- KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA NETO, J.B.; HENNING, A.A. Relatos dos testes de vigor disponíveis para grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, v.1, n.2, p.15-50, 1991.
- LOCATELLI, D.P.; DAOLI, E. Effectiveness of carbon dioxide under reduced pressure against some insects infesting packaged rice. **Journal of Stored Products Research**, London, v.29, n.1, p.81-87, 1993.
- MANBECK, H.B.; BRITTON, M.G. Prediction of bin-wall temperature declines. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.6, p.1767-1773, 1988.
- MAROULIS, Z.B.; SHAH, K.K.; SARAVACOS, G.D. Thermal conductivity of gelatinized starches. **Journal of Food Science**, Chicago, v.56, n.3, p.773-776, 1991.
- METZGER, J.F.; MUIR, W.E. Computer model of two-dimensional conduction and forced convection in stored grain. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v.25, n.1, p.119-125, 1983.
- MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon, 1980, 407p.
- MOLIN, R.; VALENTINI, M.L. **Simpósio sobre micotoxinas em grãos**. São Paulo, SP: Fundação Cargil, Fundação ABC, 1999. 206p.
- MUIR, W.E.; CHANDRA, S. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, paper 49085, 15p. 1970.
- MUIR, W.E.; FRASER, B.M.; SINHA, R.N. Simulation model of two-dimensional heat transfer in controlled-atmosphere. Controlled atmosphere storage of grains. **Elsevier scientific publishing company**. Amsterdam, p.385-397. 1980.
- MUIR, W.E.; VIRAVANICHAJ, S. Specific heat of wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.17, p.338-342, 1972.
- NAKAKITA, H.; IKENAKA, H. Action of low temperature on physiology of *Sitophilus zeamais* Motschulsky and *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera:

- Curculionidae) in rice storage. **Journal of Stored Products Research**, London, v.33, p.31-38, 1997.
- PASSOS, E.F. Condutividade térmica da pasta de mandioca. **Revista Ceres**, Viçosa, v.29, n.162, p.222-231, 1982.
- PEDERSEN, J.R. Insects: Identification, damage, and detection. In: SAUER, D. B.; **Storage of cereal grains and their products**. American Association of cereal chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, USA. 1992. p.435-489.
- PHELPS, K.; COLLIER, R.H.; READER, R.J.; FINCH, S. Monte Carlo simulation method for forecasting the timing of pest insect attacks. **Crop Protection**, kidlington, v.12, n.5, p.335-342, 1993.
- PINTO, F.A.C.; SILVA, J.S.; SOUSA, F.F. Simulação de secagem de grãos – Modelo de Hukill. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.1, n.1, 1991. 16p.
- PLARRE, R. Three-dimensional distribution of *Sitophilus granarius* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) in wheat influenced by the synthetic aggregation pheromone. **Journal of Stored Products Research**, London, v.32, n.3, p.275-283, 1996.
- REDDY, J.N. **An introduction to the finite element method**. McGraw-Hill International Edition. Engineering Mechanics Series. Singapore. Second Edition. 1993, 684p.
- REES, D.P. **Integrated management of insects in stored products**. Edition SUBRAMANYAM, B. & HAGSTRUM, D. B. Marcel Dekker, Inc. New York, NY, p.1-39. 1996.
- REIDY, G.A.; RIPPEN, A.L. Methods for determining thermal conductivity in foods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.14, n.2, p.248-254, 1971.
- ROSSI, S.J.; FIOREZE, R.; OLIVEIRA, A.M.C.; MALZAC, H.F. Propriedades Térmicas de castanha de cajú e raspa de mandioca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.7, n.1, p.51-56, 1982.
- ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com o uso de energia solar e ar natural**. Academia de Ciência de Estado de São Paulo, n.22, São Paulo. 1980. 295p.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA. 1992. 615p.
- SAYIGH, A.A.M. **Solar energy engineering**. Academic Press, Inc., New York. 1977. 506p.

- SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. Editor John Wiley & Sons, Inc. New York. 1984. 427p.
- SHARMA, D.K.; THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.16, n.1. p.114-117. 1973.
- SINGH, R.P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, Chicago, v.36, n.2, p.87-91. 1982
- SINGH, A. K.; THORPE, G. R. A solution procedure for remodeling three-dimensional free convection flow in peaked bulks of grain. **Journal Stored Products Research**. v.29, p. 221-235, 1993.
- SINHA, R.N.; MUIR, W.E. **Grain storage: Part of system**. The Avi Publishing Company, INC. Westport, Connecticut, 1973. 481p.
- SMITH, E.A.; SOKHANSANJ, S. Natural convection and temperature of stored produce – a theoretical analysis. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v.32, p.91-97, 1990.
- SOARES, N.F.F. **Análise experimental do método de sonda para medição de condutividade térmica de grãos: Aplicação para milho (*Zea mays L.*)**. Viçosa, MG: UFV, 1988. 46p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- SRIVASTAVA, A.K.; RAO, P.H. Changes in the functional characteristics of wheat during high temperature storage. **Journal of Food Science and Technology**, Mysore, v.31, n.1, p.36-39, 1994.
- STEELE, J.L.; SAUL, R.A.; HUKILL. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p.685-689, 1969.
- STOLF, S.R. Medição da condutividade térmica dos alimentos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de alimentos – ITAL**. Campinas, n.29, p.67-79, 1972.
- SUTER, D.A.; AGRAWAL, K.K.; CLARY, B.L. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernel. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.18, n.2, p.370-375, 1975.
- TREMATERRA, P.; FONTANA, F.; MANCINI, M. Analysis of development rates of *Sitophilus oryzae* (L.) in five cereals of the genus *Triticum*. **Journal of Stored Products Research**, London, v.32, n.4, p.315-322, 1996.

- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Imprensa Universitária, Viçosa, UFV, 1991. 449p.
- VIEIRA, R.D., CARVALHO, N.M. **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP/UNESP, 1994. p.103-132.
- VOUDOURIS, N. e HAYAKAWA, K. Simultaneous determination of the thermal conductivity and diffusivity of foods using a point heat source probe: A theoretical analysis. **Journal of Food Science and Technology**, v.27, n.6, p.522-532. 1994
- WHITE, N.D.G.; SINHA, R.N.; MUIR, W.E. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 24, p.35-42, 1982.
- WRIGHT, M.E.; POTERFIELD, J.G. Specific heat of spanish peanuts. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.13, n.4, p.508-510, 1970.
- YACIUK, G.; MUIR, W.E.; SINHA, R.N. A simulation model of temperature in stored grain. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.20, p.245-258. 1975.
- ZIENKIEWICZ, O.C. **The finite element method**. New York, McGraw Hill, 1977. 787p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Modelo de transferência de calor implementado

```
/TITLE, ANALISE TRIDIMENSIONAL TRANSIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR
!*
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
KEYW, LSDYNA,0
/PMETH,OFF
/CONFIG, NRES, 1000000
!
/PREP7
!
ET,1,SOLID70
!
DOF,TEMP
!
MP,DENS,1,724.69,
MP,KXX,1,104329468772352,
MP,KYY,1,104329468772352,
MP,KZZ,1,104329468772352,
MP,C,1,13821224140800,
!
K,1,0,0,,
K,2,1.8,0,,
K,3,1.8,1.7,,
K,4,0,1.7,,
K,5,0,0.1,,
K,6,1.8,0.1,,
K,7,0,1.6,,
K,8,1.8,1.6,,
!
LSTR, 4, 7
LSTR, 7, 5
LSTR, 5, 1
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 6
LSTR, 6, 8
LSTR, 8, 3
```

```

LSTR, 3, 4
LSTR, 7, 8
LSTR, 5, 6
!
AL, 1, 8, 9, 7
AL, 2, 9, 6, 10
AL, 3, 10, 5, 4
!
LESIZE,1,,1,1,
LESIZE,2,,6,1,
LESIZE,3,,1,1,
LESIZE,4,,6,1,
LESIZE,5,,1,1,
LESIZE,6,,6,1,
LESIZE,7,,1,1,
LESIZE,8,,6,1,
LESIZE,9,,6,1,
LESIZE,10,,6,1,
!
TYPE,1
ESIZE,,1
ESHape,3          ! QUADRILATERALS
!
ET,2,SOLID70
!
MP,DENS,2,724.69,
MP,KXX,2,104329468772352,
MP,KYY,2,104329468772352,
MP,KZZ,2,104329468772352,
MP,C,2,13821224140800,
!
VROTAT, ALL, , , , ,1,4,360,8
!
LESIZE,14,,6,1,
LESIZE,15,,6,1,
LESIZE,18,,6,1,
LESIZE,21,,6,1,
!
LESIZE,25,,6,1,
LESIZE,26,,6,1,
LESIZE,29,,6,1,
LESIZE,32,,6,1,
!
LESIZE,36,,6,1,
LESIZE,37,,6,1,
LESIZE,40,,6,1,
LESIZE,43,,6,1,
!
LESIZE,47,,6,1,
LESIZE,48,,6,1,
LESIZE,51,,6,1,
LESIZE,54,,6,1,
!
LESIZE,58,,6,1,
LESIZE,59,,6,1,
LESIZE,62,,6,1,
LESIZE,65,,6,1,
!
LESIZE,69,,6,1,
LESIZE,70,,6,1,

```

```

LESIZE,73,,6,1,
LESIZE,76,,6,1,
!
LESIZE,80,,6,1,
LESIZE,81,,6,1,
LESIZE,84,,6,1,
LESIZE,87,,6,1,
!
LESIZE,88,,6,1,
LESIZE,89,,6,1,
LESIZE,90,,6,1,
LESIZE,91,,6,1,
!
VGLUE,ALL
!
VMESH,ALL
!
IC,ALL,TEMP,21.77,
ALLSEL,ALL
!
VSEL,A,,1
VSEL,A,,4
VSEL,A,,7
VSEL,A,,10
VSEL,A,,13
VSEL,A,,16
VSEL,A,,19
VSEL,S,,22
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,22.16,
ALLSEL, ALL
!
VSEL,A,,2
VSEL,S,,5
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,23.5,
ALLSEL, ALL
!
VSEL,A,,8
VSEL,S,,11
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,23.5,
ALLSEL, ALL
!
VSEL,A,,14
VSEL,S,,17
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,23,
ALLSEL, ALL
!
VSEL,A,,20
VSEL,S,,23
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,23.5,
ALLSEL, ALL
!
VSEL,A,,3
VSEL,A,,6
VSEL,A,,9
VSEL,A,,12

```

```

VSEL,A,,15
VSEL,A,,18
VSEL,A,,21
VSEL,S,,24
NSLV,S,1
IC,ALL,TEMP,22,
!
!IC,ALL,TEMP,21.77,
ALLSEL, ALL
!
ASEL,A,,6
ASEL,A,,16
ASEL,A,,26
ASEL,A,,36
ASEL,A,,46
ASEL,A,,56
ASEL,A,,66
ASEL,S,,76
NSLA,S,1
IC,ALL,TEMP,16.77,
!
ALLSEL, ALL
!
!data de inicio 20/06 às 20:00hs
!
*DIM,RDC1,TABLE,1939,1,1
RDC1 ( 0 , 1 , 1 ) = -17828960000000000
RDC1 ( 1 , 1 , 1 ) = -17545600000000000
RDC1 ( 2 , 1 , 1 ) = -27339750000000000
      •
      •
      •
RDC1 ( 1937 , 1 , 1 ) = 12803475000000000
RDC1 ( 1938 , 1 , 1 ) = 19199625000000000
RDC1 ( 1939 , 1 , 1 ) = 53758950000000000
!
!
RDC1( 0 , 0 , 1 ) = 0.000000
RDC1( 1 , 0 , 1 ) = 0.083333
RDC1( 2 , 0 , 1 ) = 0.166667
      •
      •
      •
RDC1( 1937 , 0 , 1 ) = 161.375000
RDC1( 1938 , 0 , 1 ) = 161.458333
RDC1( 1939 , 0 , 1 ) = 161.500000
!
*DIM,RDC2,TABLE,1939,1,1
RDC2 ( 0 , 1 , 1 ) = -18391200000000000
RDC2 ( 1 , 1 , 1 ) = -19276400000000000
RDC2 ( 2 , 1 , 1 ) = -29831750000000000
      •
      •
      •
RDC2 ( 1937 , 1 , 1 ) = 37968000000000000
RDC2 ( 1938 , 1 , 1 ) = 18827525000000000
RDC2 ( 1939 , 1 , 1 ) = 52717070000000000
!
RDC2( 0 , 0 , 1 ) = 0.000000
RDC2( 1 , 0 , 1 ) = 0.083333

```

```

RDC2( 2 , 0 , 1 )= 0.166667
      •
      •
      •
RDC2( 1937 , 0 , 1 )= 161.375000
RDC2( 1938 , 0 , 1 )= 161.458333
RDC2( 1939 , 0 , 1 )= 161.500000
!
*DIM,RDC3,TABLE,1939,1,1
RDC3 ( 0 , 1 , 1 )= -19094960000000000
RDC3 ( 1 , 1 , 1 )= -18791525000000000
RDC3 ( 2 , 1 , 1 )= -30879500000000000
      •
      •
      •
RDC3 ( 1937 , 1 , 1 )= 40988000000000000
RDC3 ( 1938 , 1 , 1 )= 19700925000000000
RDC3 ( 1939 , 1 , 1 )= 55162590000000000
!
RDC3( 0 , 0 , 1 )= 0.000000
RDC3( 1 , 0 , 1 )= 0.083333
RDC3( 2 , 0 , 1 )= 0.166667
      •
      •
      •
RDC3( 1937 , 0 , 1 )= 161.375000
RDC3( 1938 , 0 , 1 )= 161.458333
RDC3( 1939 , 0 , 1 )= 161.500000
!
*DIM,RDC4,TABLE,1939,1,1
RDC4 ( 0 , 1 , 1 )= -12269200000000000
RDC4 ( 1 , 1 , 1 )= -12860375000000000
RDC4 ( 2 , 1 , 1 )= -34741000000000000
      •
      •
      •
RDC4 ( 1937 , 1 , 1 )= 68973250000000000
RDC4 ( 1938 , 1 , 1 )= 15379250000000000
RDC4 ( 1939 , 1 , 1 )= 43061900000000000
!
RDC4( 0 , 0 , 1 )= 0.000000
RDC4( 1 , 0 , 1 )= 0.083333
RDC4( 2 , 0 , 1 )= 0.166667
      •
      •
      •
RDC4( 1937 , 0 , 1 )= 161.375000
RDC4( 1938 , 0 , 1 )= 161.458333
RDC4( 1939 , 0 , 1 )= 161.500000
!
*DIM,RDC5,TABLE,1939,1,1
RDC5 ( 0 , 1 , 1 )= -72498300000000010
RDC5 ( 1 , 1 , 1 )= -17368825000000000
RDC5 ( 2 , 1 , 1 )= -30532000000000000
      •
      •
      •
RDC5 ( 1937 , 1 , 1 )= 18507600000000000
RDC5 ( 1938 , 1 , 1 )= 18677675000000000

```

RDC5 (1939 , 1 , 1) = 5229749000000000
!
RDC5 (0 , 0 , 1) = 0.000000
RDC5 (1 , 0 , 1) = 0.083333
RDC5 (2 , 0 , 1) = 0.166667

•
•
•

RDC5 (1937 , 0 , 1) = 161.375000
RDC5 (1938 , 0 , 1) = 161.458333
RDC5 (1939 , 0 , 1) = 161.500000

!
*DIM,RDC6,TABLE,1939,1,1
RDC6 (0 , 1 , 1) = -17828960000000000
RDC6 (1 , 1 , 1) = -1754710000000000
RDC6 (2 , 1 , 1) = -27339750000000000

•
•
•

RDC6 (1937 , 1 , 1) = 12257075000000000
RDC6 (1938 , 1 , 1) = 19145725000000000
RDC6 (1939 , 1 , 1) = 53608030000000000

!
RDC6 (0 , 0 , 1) = 0.000000
RDC6 (1 , 0 , 1) = 0.083333
RDC6 (2 , 0 , 1) = 0.166667

•
•
•

RDC6 (1937 , 0 , 1) = 161.375000
RDC6 (1938 , 0 , 1) = 161.458333
RDC6 (1939 , 0 , 1) = 161.500000

!
*DIM,RDC7,TABLE,1939,1,1
RDC7 (0 , 1 , 1) = -12269200000000000
RDC7 (1 , 1 , 1) = -12860375000000000
RDC7 (2 , 1 , 1) = -34741000000000000

•
•
•

RDC7 (1937 , 1 , 1) = 66717000000000000
RDC7 (1938 , 1 , 1) = 15356650000000000
RDC7 (1939 , 1 , 1) = 42998620000000000

!
RDC7 (0 , 0 , 1) = 0.000000
RDC7 (1 , 0 , 1) = 0.083333
RDC7 (2 , 0 , 1) = 0.166667

•
•
•

RDC7 (1937 , 0 , 1) = 161.375000
RDC7 (1938 , 0 , 1) = 161.458333
RDC7 (1939 , 0 , 1) = 161.500000

!
*DIM,RDC8,TABLE,1939,1,1
RDC8 (0 , 1 , 1) = -16571040000000000
RDC8 (1 , 1 , 1) = -17368975000000000
RDC8 (2 , 1 , 1) = -30532000000000000

•

•
 •
 RDC8 (1937 , 1 , 1) = 217360000000000
 RDC8 (1938 , 1 , 1) = 18709900000000000
 RDC8 (1939 , 1 , 1) = 52387720000000000
 !
 RDC8(0 , 0 , 1) = 0.000000
 RDC8(1 , 0 , 1) = 0.083333
 RDC8(2 , 0 , 1) = 0.166667

•
 •
 •
 RDC8(1936 , 0 , 1) = 161.291667
 RDC8(1937 , 0 , 1) = 161.375000
 RDC8(1938 , 0 , 1) = 161.458333
 RDC8(1939 , 0 , 1) = 161.500000
 !
 ! convecção na superfície da massa de grãos
 *DIM,QCONVS, TABLE, 1939, 1, 1
 QCONVS (0 , 1 , 1) = 19953230000000000
 QCONVS (1 , 1 , 1) = -66380965000000000
 QCONVS (2 , 1 , 1) = -13879405000000000

•
 •
 •
 QCONVS (1937 , 1 , 1) = -1346539500000000
 QCONVS (1938 , 1 , 1) = 93168210000000000
 QCONVS (1939 , 1 , 1) = 93168210000000000
 !
 QCONVS(0 , 0 , 1) = 0.000000
 QCONVS(1 , 0 , 1) = 0.083333
 QCONVS(2 , 0 , 1) = 0.166667

•
 •
 •
 QCONVS(1937 , 0 , 1) = 161.375000
 QCONVS(1938 , 0 , 1) = 161.458333
 QCONVS(1939 , 0 , 1) = 161.500000
 !
 ! Temperatura em baixo
 *DIM,TEMPE, TABLE, 1939, 1, 1
 TEMPE(0 , 1 , 1) = 22.87
 TEMPE(1 , 1 , 1) = 22.82166667
 TEMPE(2 , 1 , 1) = 22.70333333

•
 •
 •
 TEMPE(1937 , 1 , 1) = 25.58625
 TEMPE(1938 , 1 , 1) = 25.39333333
 TEMPE(1939 , 1 , 1) = 25.38854167
 !
 TEMPE(0 , 0 , 1) = 0.000000
 TEMPE(1 , 0 , 1) = 0.083333
 TEMPE(2 , 0 , 1) = 0.166667

•
 •
 •
 TEMPE(1936 , 0 , 1) = 161.291667
 TEMPE(1937 , 0 , 1) = 161.375000

```

TEMPE( 1938 , 0 , 1 )= 161.458333
TEMPE( 1939 , 0 , 1 )= 161.500000
!
! Geração de calor
!
*DIM,HGER1,TABLE,56,1,1
HGER1 ( 0 , 1 , 1 )= 0
HGER1 ( 1 , 1 , 1 )= 0
HGER1 ( 2 , 1 , 1 )= 0
      •
      •
      •
HGER1 ( 52 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER1 ( 53 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER1 ( 54 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER1 ( 55 , 1 , 1 )= 2792731115520000
!
HGER1 ( 0 , 0 , 1 )= 0
HGER1 ( 1 , 0 , 1 )= 20
HGER1 ( 2 , 0 , 1 )= 40
      •
      •
      •
HGER1 ( 52 , 0 , 1 )= 128.47915
HGER1 ( 53 , 0 , 1 )= 128.5625
HGER1 ( 54 , 0 , 1 )= 128.64585
HGER1 ( 55 , 0 , 1 )= 128.72915
!
*DIM,HGER2,TABLE,56,1,1
HGER2 ( 0 , 1 , 1 )= 0
HGER2 ( 1 , 1 , 1 )= 0
HGER2 ( 2 , 1 , 1 )= 0
      •
      •
      •
HGER2 ( 53 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER2 ( 54 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER2 ( 55 , 1 , 1 )= 2792731115520000
!
HGER2 ( 0 , 0 , 1 )= 0
HGER2 ( 1 , 0 , 1 )= 20
HGER2 ( 2 , 0 , 1 )= 40
      •
      •
      •
HGER2 ( 53 , 0 , 1 )= 131.625
HGER2 ( 54 , 0 , 1 )= 131.6667
HGER2 ( 55 , 0 , 1 )= 131.7083
!
*DIM,HGER3,TABLE,57,1,1
HGER3 ( 0 , 1 , 1 )= 0
HGER3 ( 1 , 1 , 1 )= 0
HGER3 ( 2 , 1 , 1 )= 0
HGER3 ( 3 , 1 , 1 )= 0
      •
      •
      •
HGER3 ( 54 , 1 , 1 )= 2792731115520000
HGER3 ( 55 , 1 , 1 )= 2792731115520000

```

```

HGER3 ( 56 , 1 , 1) = 2792731115520000
!
HGER3 ( 0 , 0 , 1) = 0
HGER3 ( 1 , 0 , 1) = 25
HGER3 ( 2 , 0 , 1) = 50
      •
      •
      •
HGER3 ( 54 , 0 , 1) = 145.35415
HGER3 ( 55 , 0 , 1) = 145.4375
HGER3 ( 56 , 0 , 1) = 145.5
!
*DIM,HGER4,TABLE,45,1,1
HGER4 ( 0 , 1 , 1) = 8609505792000000
HGER4 ( 1 , 1 , 1) = 8493410734080000
HGER4 ( 2 , 1 , 1) = 8378476626739200
      •
      •
      •
HGER4(15,1, 1)=2508485244966600
HGER4(16,1, 1)=1500500392516930
HGER4(17,1, 1)=1500615388591760
      •
      •
      •
HGER4 ( 43 , 1 , 1) = 0
HGER4 ( 44 , 1 , 1) = 0
HGER4 ( 45 , 1 , 1) = 0
!
HGER4( 0 , 0 , 1) = 0
HGER4( 1 , 0 , 1) = 0.8843
HGER4( 2 , 0 , 1) = 1.7686
      •
      •
      •
HGER4(15,0,1)=13.2642
HGER4(16,0,1)=14.1484
HGER4(17,0,1)=15.0327
      •
      •
      •
HGER4( 43 , 0 , 1) = 105
HGER4( 44 , 0 , 1) = 110
HGER4( 45 , 0 , 1) = 120
!
! Inicia o processo de solucao
/SOLU
FINISH
/SOLU
!
! Define o problema como transiente
!
ANTYPE,4
!
! define tempo de inicio da simulacao
!
TM_START=1E-8
!
! Define tempo final de simulacao, em dias

```

```

TM_END=161.5
!
! Define incremento de tempo, em dias
!
TM_INCR=0.08333333
!
! Inicia loop de solucao
!
*DO, TM, TM_START, TM_END, TM_INCR
TIME, TM
!
F, 151, HEAT, HGER1(TM)
F, 996, HEAT, HGER1(TM)
!
F, 174, HEAT, HGER2(TM)
F, 1016, HEAT, HGER2(TM)
!
F, 147, HEAT, HGER3(TM)
F, 154, HEAT, HGER3(TM)
!
BFV, 17, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 20, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 23, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 2, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 5, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 8, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 11, HGEN, HGER4(TM)
BFV, 14, HGEN, HGER4(TM)
!
ASEL, S, , , 5
ASEL, A, , , 9
ASEL, A, , , 12
NSLA, S, 1
SFA, ALL, , HFLUX, RDC1(TM)
!
ASEL, S, , , 22
ASEL, A, , , 19
ASEL, A, , , 15
NSLA, S, 1
SFA, ALL, , HFLUX, RDC2(TM)
!
ASEL, S, , , 25
ASEL, A, , , 29
ASEL, A, , , 32
NSLA, S, 1
SFA, ALL, , HFLUX, RDC3(TM)
!
ASEL, S, , , 35
ASEL, A, , , 39
ASEL, A, , , 42
NSLA, S, 1
SFA, ALL, , HFLUX, RDC4(TM)
!
ASEL, S, , , 75
ASEL, A, , , 78
ASEL, A, , , 80
NSLA, S, 1
SFA, ALL, , HFLUX, RDC5(TM)
!
ASEL, S, , , 65

```

```

ASEL,A,,69
ASEL,A,,72
NSLA,S,1
SFA,ALL,,HFLUX,RDC6(TM)
!
ASEL,S,,55
ASEL,A,,59
ASEL,A,,62
NSLA,S,1
SFA,ALL,,HFLUX,RDC7(TM)
!
ASEL,S,,45
ASEL,A,,49
ASEL,A,,52
NSLA,S,1
SFA,ALL,,HFLUX,RDC8(TM)
!
ASEL,S,,6
ASEL,A,,16
ASEL,A,,26
ASEL,A,,36
ASEL,A,,46
ASEL,A,,56
ASEL,A,,66
ASEL,A,,76
NSLA,S,1
SFA,ALL,,HFLUX,QCONVS(TM)
!
ASEL,S,,11
ASEL,A,,21
ASEL,A,,31
ASEL,A,,41
ASEL,A,,51
ASEL,A,,61
ASEL,A,,71
ASEL,A,,79
NSLA,S,1
D,ALL,TEMP,TEMPE(TM)
!
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
FINISH
!
/POST1
SET,LAST
!
/POST26
!
NSOL, 2, 996,TEMP,,
NSOL, 3, 1016,TEMP,,
NSOL, 4, 147,TEMP,,
NSOL, 5, 151,TEMP,,
NSOL, 6, 154,TEMP,,
NSOL, 7, 174,TEMP,,
!
PRVAR,2,3,4,5,6,7
!
FINISH

```

Vistas da área e equipamentos experimentais



Figura 1A – Visão externa do silo e da casa de comando.



Figura 2A – Sistema de aquisição de dados utilizado na coleta dos dados de temperatura na massa de grãos e condições ambientais.

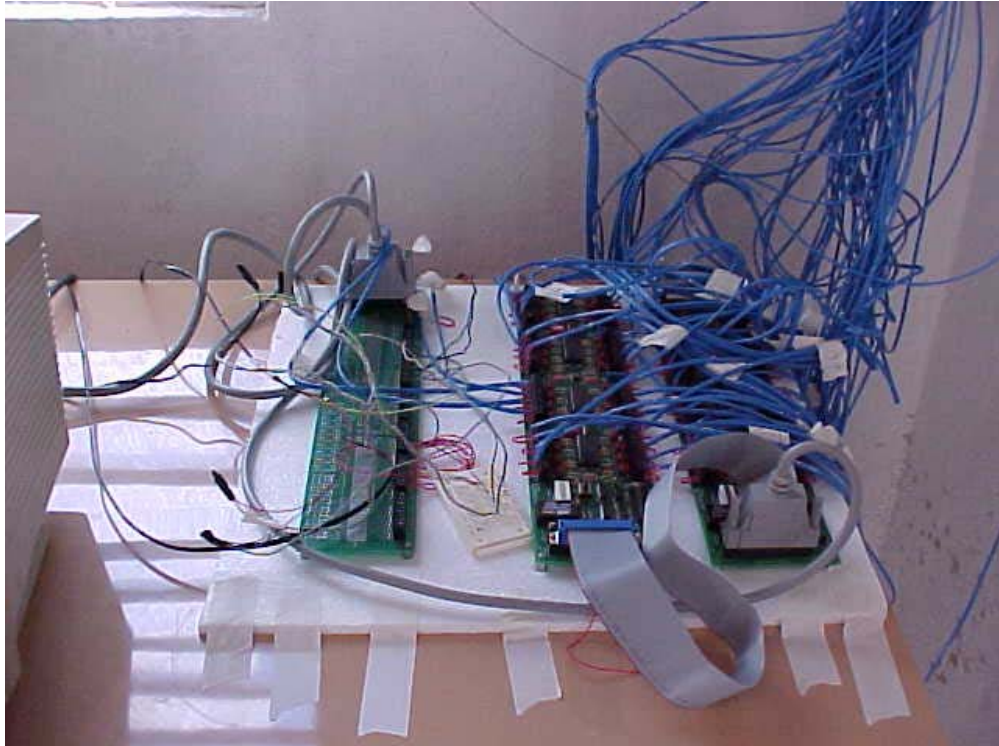


Figura 3A – Placas de aquisição de dados.



Figura 4A – Vista interna do silo, sistema de termometria e fontes de calor ligadas.



Figura 5A – Superfície da massa de grãos de milho.



Figura 6A – Abrigo meteorológico.

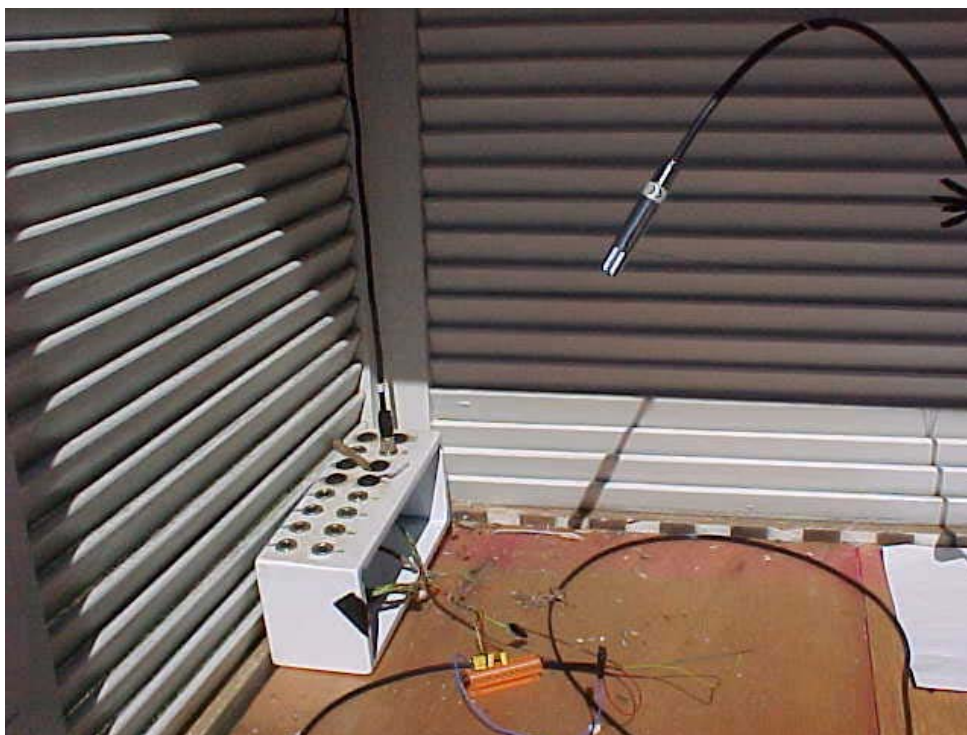


Figura 7A – Termohigrometro.



Figura 8A – Visão interna da “B.O.D.” e do equipamento utilizado para determinação das propriedades térmicas do produto.

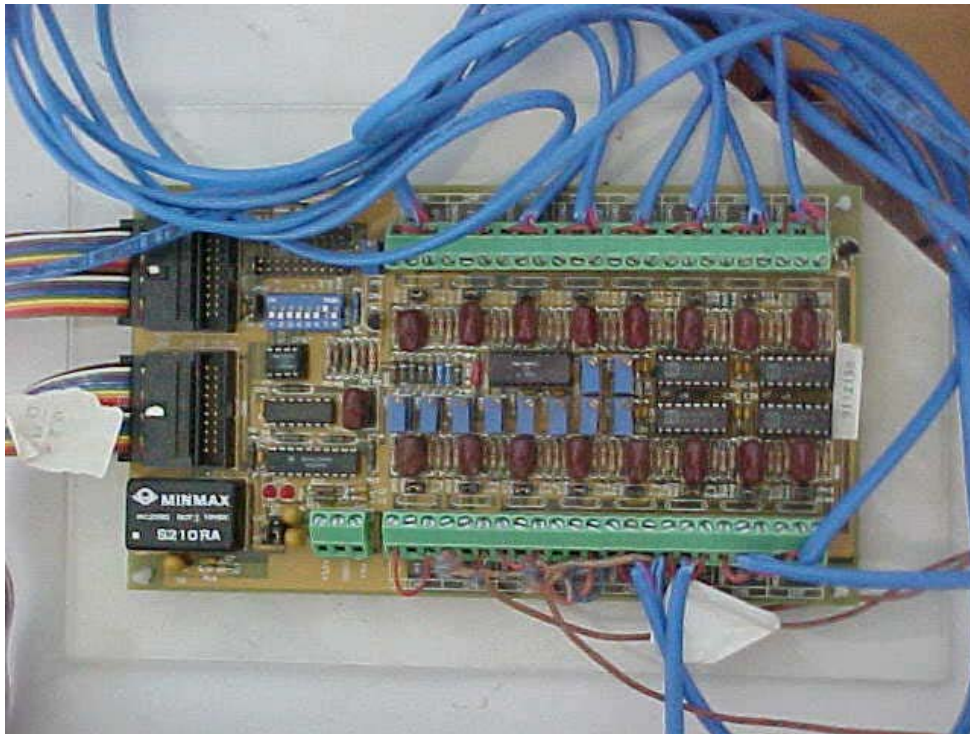


Figura 9A – Placa de aquisição utilizadas na coleta de temperatura para determinação das propriedades térmicas do produto.

Análise de incerteza

O método mais preciso de se calcular a incerteza em resultados experimentais é baseado em uma especificação cuidadosa das incertezas nas variáveis experimentais medidas. Por exemplo, uma certa condutividade térmica poderia ser expressa como:

$$k = 0,14 \pm 0,01 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \quad (1a)$$

A notação mais ou menos é usada para designar a incerteza. O pesquisador que faz esta designação está declarando em condições satisfatoriamente precisas o grau de precisão com que ele acredita que a medida está relacionada. Nós podemos notar que esta especificação está em si incerta porque o experimento é naturalmente incerto sobre a precisão destas medidas.

Se uma calibração muito cuidadosa de um instrumento foi executada recentemente, com padrões de precisão muito altos, o pesquisador poderá

justificar uma baixíssima incerteza para as medidas, ao contrario do que se elas fossem executados com um instrumento de calibração desconhecida.

Suponha que uma seqüência de medidas seja feita e possa se expressar a incerteza em cada medida com a mesma variação. Estas medidas podem ser usadas para se calcular então alguns resultados experimentais desejados. Se nós desejamos calcular a incerteza nos resultados calculados com base nas incertezas medidas anteriormente. O resultado R é uma determinada função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Assim,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2a)$$

Sendo w_R a incerteza nos resultados, e w_1, w_2, \dots, w_n as incertezas nas variáveis independentes. Se as incertezas nas variáveis independentes são todas determinadas com a mesma variação, então a incerteza nos resultados que têm estas variações é determinada como:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (3a)$$

Deve ser observado que a propagação de incerteza em w_R nos resultados preditos pela equação (3A) depende do quadrado das incertezas das variáveis independente w_n . Isto significa que se a incerteza em uma variável é significativamente maior que as incertezas nas outras variáveis, então por um fator de 5 a 10, esta é a incerteza maior que predomina e as outras provavelmente podem ser negligenciadas. Como ilustração, suponha três variáveis com incerteza de magnitude 1 e uma variável com uma incerteza de magnitude 5. A incerteza nos resultados seria,

$$(5^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} = \sqrt{28} = 5,29$$

A importância desta observação anterior é referente à magnitude relativa da incerteza, e deve ser evidenciada quando no planejamento experimental, como obtenção de dados através de instrumentação, etc. Muito pouco é ganho tentando reduzir as "pequenas incertezas". Por que a propagação quadrática é "grande" e predominante, e qualquer melhoria nos resultados experimentais "globais"

devem ser alcançada melhorando o instrumento ou a técnica experimental relacionadas com esta incerteza relativamente grande.

Fazendo a análise pela equação (3a), e adequando para este caso, temos:

$$|dk| = \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta T} dq\right)^2 + \left(\frac{q}{\Delta T} dL\right)^2 + \left(\frac{qL}{-\Delta T^2} dq\right)^2} \quad (4a)$$

A Equação (4a) pode ser utilizada para o estudo dos erros envolvidos no cálculo das propriedades térmicas, com a utilização de só um experimento. Após análise chegou se ao resultado da Tabela 1A.

Pela Tabela 1A pode-se observar que o período compreendido até os 4 segundos iniciais foi o que proporcionou o mais alto nível de erros. Este período inicial até os 4 segundos foi excluído para o cálculo da condutividade térmica, afim de minimizar os erros envolvidos, podendo ser este período considerado como o tempo de correção.

Pode-se observar que o erro inerente a repetibilidade (3%) é maior que os erros considerados no cálculo das propriedades térmicas, podendo-se inferir que os dois erros estão relacionados, devido estar se tratando do mesmo experimento, e mesmas condições experimentais. Daí podemos descartar, pela sua magnitude (menores que 0,2 % a partir de 4 segundos), os erros relacionados a incertezas nas medições, tendo como principal erro, o erro de repetibilidade, estando se tratando de um mesmo tratamento. Observa-se também da Tabela 1A que a elevação do tempo experimental reduz-se os erros devido a incertezas, isto é devido à equação (42) se tratar de uma função exponencial, e quanto maior o intervalo de tempo utilizado no teste, menores os erros.

Tabela 1A – Erros ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) envolvidos no cálculo da condutividade térmica, durante os 10 primeiros segundos de experimento.

Tempo (s)	Teor de Umidade (% b.u.)					Média	Erro (%)
	8,6	11,1	13,1	15,8	17,1		
1	0,001001	0,000139	0,007650	0,033813	0,009100	0,010341	6,13
2	0,000751	0,000120	0,001926	0,140399	0,002892	0,029217	17,26
3	0,000601	0,000109	0,000738	0,005095	0,001350	0,001579	0,94
4	0,000401	9×10^{-5}	0,000342	0,001373	0,000588	0,000559	0,34
5	0,000244	$6,88 \times 10^{-5}$	0,000190	0,000644	0,000369	0,000303	0,18
6	0,000162	$5,57 \times 10^{-5}$	0,000123	0,000365	0,000225	0,000186	0,11
7	0,000117	$4,81 \times 10^{-5}$	$9,49 \times 10^{-5}$	0,000234	0,000162	0,000131	0,08
8	$8,62 \times 10^{-5}$	$3,89 \times 10^{-5}$	$6,65 \times 10^{-5}$	0,000165	0,000118	$9,5 \times 10^{-5}$	0,06
9	$7,00 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$	$5,40 \times 10^{-5}$	0,000129	$9,56 \times 10^{-5}$	$7,64 \times 10^{-5}$	0,05
10	$5,47 \times 10^{-5}$	$2,92 \times 10^{-5}$	$4,31 \times 10^{-5}$	$9,81 \times 10^{-5}$	$7,82 \times 10^{-5}$	$6,07 \times 10^{-5}$	0,04

Outro agravante na utilização deste teste é a variação de temperatura no intervalo de tempo do teste, pois uma grande variação de temperatura levaria a uma migração de umidade no produto, o que resultaria em uma condutividade térmica com um erro devido à secagem. Porém a variação máxima de temperatura durante o experimento para os dados de condutividade e difusividade foi de, aproximadamente, 11 $^\circ\text{C}$ ou menor, para todos os tratamentos, um exemplo disto é apresentado na Figura 10A, onde podemos observar também a equação ajustada para obtenção da inclinação da reta.

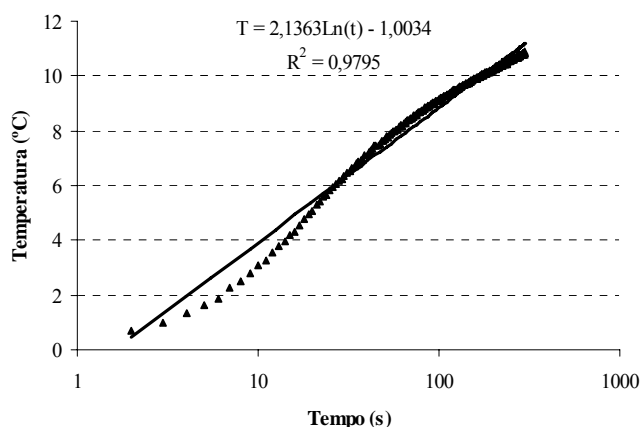


Figura 10A - Temperatura versus tempo experimental para grãos de milho com teor de umidade de 13,1% b.u.

A Figura 11A apresenta os valores experimentais e estimados da condutividade térmica da massa de grãos de milho, em função do teor de

umidade dos grãos. Observa-se desta figura que a condutividade térmica da massa de grãos de milho é uma função do teor de umidade dos grãos, sendo que para teores de umidade mais elevados obtém-se uma maior condutividade térmica.

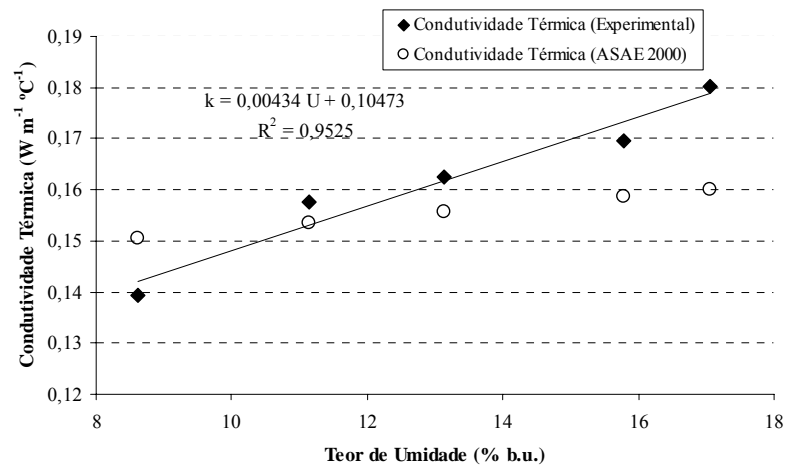


Figura 11A - Valores experimentais e estimados da condutividade térmica da massa de grãos de milho, em função do teor de umidade.

Seguindo o raciocínio anterior e os dados da Tabela 1A, para o erro na equação da Figura 11A, a nova equação fica na forma:

$$k = 0,00434 U + 0,10473 \pm 0,005014 \quad (5a)$$

sendo o valor (0,005014) a incerteza média relacionada com a determinação da condutividade térmica para massa de grãos de milho.

Resultados de propriedades térmicas semelhantes com os discutidos neste trabalho, foram encontrados em diversas bibliografias para diversos produtos agrícolas: milho (SOARES, 1988), milho (ANDRADE et al. 2000), trigo (MUIR e VIRAVANICHAJ, 1972), amendoim em casca (WRIGHT e POTERFIELD, 1970), sorgo (SHARMA e THOMPSON, 1973).

Fontes de erro

NIX et al. (1967) citado por ALMEIDA (1979) analisaram os erros causados pelos desvios, em instrumentos semelhantes e concluíram que dois fatores constituem a principal fonte de erro: (a) o comprimento finito da fonte de calor e (b) as propriedades térmicas da fonte. Estes dois fatores levando a um erro que é o intervalo de tempo durante o qual a própria fonte utilizou energia para o aumento de sua vibração molecular, que pode ser expresso pelas equações (3a) e (4a).

A utilização das equações (7) e (42) para determinação das propriedades térmicas do milho são válidas para uma fonte de calor linear ideal (comprimento infinito), imersa em um meio infinito. Porém, as determinações experimentais são realizadas com amostras de tamanho finito e a fonte de calor, também, possui dimensões finitas. Assim existem erros envolvidos nos resultados de condutividade e difusividade provenientes do emprego destas equações. Os principais erros envolvidos na metodologia empregada podem ser listados como:

- a) erro introduzido ao abandonar termos na equação;
- b) erro introduzido devido ao comprimento finito da fonte;
- c) erro causado pela natureza finita do diâmetro da fonte;
- d) erro resultante do tamanho da amostra;
- e) erro oriundo da resistência de contato entre a fonte de calor e o material de teste;
- f) erro introduzido na determinação da difusividade térmica;
- g) erro resultante de trocas de calor entre a câmara “B.O.D.” o ambiente e a amostra. Procurou-se minimizar este tipo de erro aguardando a estabilização da temperatura da câmara.
- h) erro proveniente de possíveis variações nos testes de massa específica;
- g) pode ocorrer que grãos do material amostrado não fiquem em contato direto com o termopar, ficando uma pequena camada de ar entre o grão e o termopar, podendo ser isto uma fonte de erro;
- i) migração de umidade e aquecimento da amostra no período de realização do teste.